



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DOTTORATO IN INGEGNERIA DEI MATERIALI XIX CICLO

COORDINATORE: PROF. GIORGIO TIMELLINI

SETTORE SCIENTIFICO DISCIPLINARE: SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI

ING-IND/22

LA MATEMATICA FUZZY  
NELL'INGEGNERIA DEI MATERIALI.  
APPLICAZIONI ALLA DUREVOLEZZA  
E ALLA CONSERVAZIONE DEI MATERIALI  
IN OPERA NEI SITI ARCHEOLOGICI

Relatore  
**Prof. Ulrico SANNA**

Correlatore  
**Dott. Cirillo ATZENI**

Tesi di Dottorato di:  
**Nannina SPANU**

Anno Accademico 2005/2006

A Gesuino



Noi viviamo la nostra vita quotidiana  
senza comprendere quasi nulla del mondo.

Stephen Hawking



**LA MATEMATICA FUZZY  
NELL'INGEGNERIA DEI MATERIALI.**

**APPLICAZIONI ALLA DUREVOLEZZA  
E ALLA CONSERVAZIONE DEI MATERIALI  
IN OPERA NEI SITI ARCHEOLOGICI**



## INDICE

RIASSUNTO	1
ABSTRACT	2
PRESENTAZIONE	3

## PARTE I

1 – STORIA E NOZIONI DI BASE SUGLI INSIEMI FUZZY	7
2 – OPERATORI E QUANTIFICATORI	15
3 – INTERPRETAZIONE E VALUTAZIONE DELLE FUNZIONI DI APPARTENENZA	21
4 – MODELLAZIONE E APPROXIMATE REASONING	25
4.1 – CONSIDERAZIONI SUI MODELLI	25
4.2 – LE REGOLE IF/THEN	29
4.3 – GRAFICA DELLE FUZZY RELATIONS	35
5 – NUMERI FUZZY	37
5.1 – DEFINIZIONI	37
5.2 – OPERAZIONI	39
5.3 – DISTANZA E ORDERING	41

## PARTE II

1 – MODELLAZIONE FUZZY NELL'INGEGNERIA DEI MATERIALI	47
2 – LA REOLOGIA NEL PROCESSING DEI MATERIALI	49
2.1 – APPLICAZIONI AI MATERIALI CON LEGANTE CALCE O CEMENTO UTILIZZATI NELL'AMBITO DEL RESTAURO	51
2.1.1 – Preparazione delle calci e sperimentazione reologica	53
2.1.2 – Viscosimetria delle paste	61



2.1.3 – Consistenza delle malte: l’approccio empirico	69
2.1.4 – Sviluppi reologici dei materiali per impieghi strutturali a base cementizia	73
2.2 – MODELLO REOLOGICO FUZZY PER PASTE, MALTE E CALCESTRUZZI	79
2.2.1 – Fuzzificazione della variabile dipendente RQI	81
2.2.2 – Riconoscimento e fuzzificazione delle variabili indipendenti	81
2.2.3 – Il modello reo-fuzzy	83
3 – LA RESISTENZA A COMPRESSIONE DEI MATERIALI	89
3.1 – Classi di resistenza, crisp e fuzzy, nelle rocce e nei materiali artificiali	91
3.2 – Applicazione al basalto utilizzato nei siti archeologici della Sardegna	95
4 – LA DURABILITÀ DEI MATERIALI	103
4.1 – SVILUPPO DELLA MODELLAZIONE FUZZY DI UN SINGOLO FENOMENO DI DEGRADO	105
4.1.1 – Il gelo/disgelo nei materiali porosi	105
4.1.2 – Degrado dei materiali moderni utilizzati nel restauro strutturale	113
4.2 – SVILUPPO DELLA MODELLAZIONE FUZZY DELLA DURABILITY ALLA SCALA DEL SITO ARCHEOLOGICO	131
4.3 – ACQUISIZIONE DI DATI SULLA CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI E DELL’AMBIENTE DI ALCUNI SITI ARCHEOLOGICI	135
4.3.1 – Su Monte-Sorradile	137
4.3.2 – GennaMaria-Villanovaforru	149
4.3.3 – Is Paras-Isili	155
4.4 – APPLICAZIONI DEL MODELLO FUZZY AI SITI	177
4.4.1 – Su Monte-Sorradile	177
4.4.2 – GennaMaria-Villanovaforru	185
4.4.3 – Is Paras-Isili	195
5 – IL RUOLO DELL’INGEGNERIA DEI MATERIALI NELLE PROCEDURE DECISIONALI RIGUARDANTI LA SELEZIONE DEI PROGETTI CONSERVATIVI	201

5.1 – GENERALITÀ: L'INGEGNERIA DEI MATERIALI ED IL CONTESTO CULTURALE-PAESAGGISTICO-ECONOMICO	201
5.2 – SVILUPPO DELLA PROCEDURA DI RATING DEI PROGETTI CONSERVATIVI	205
5.3 – APPLICAZIONE DELLA PROCEDURA ALLE TERME A MARE DI NORA-PULA	211
5.4 – APPLICAZIONE DELLA PROCEDURA ALL'ANFITEATRO ROMANO DI NORA-PULA	215
CONCLUSIONI	221
RINGRAZIAMENTI	223
BIBLIOGRAFIA	225
APPENDICE: Modello fisico-matematico della gelività di Zuber-Marchand [2000]	237

## RIASSUNTO

- La ricerca presentata è un'ampia esplorazione delle possibili applicazioni di concetti, metodi e procedure della Fuzzy Logic all'Ingegneria dei Materiali.  
Tale nuovo approccio è giustificato dalla inadeguatezza dei risultati conseguiti con i soli metodi tradizionali riguardo alla reologia ed alla durabilità, all'utilizzo di dati di laboratorio nella progettazione e alla necessità di usare un linguaggio (informatizzabile) che consenta una valutazione congiunta degli aspetti tecnici, culturali, economici, paesaggistici della progettazione.
- In particolare, la Fuzzy Logic permette di affrontare in modo razionale l'aleatorietà delle variabili e dei dati che, nel settore specifico dei materiali in opera nel costruito dei Beni Culturali, non possono essere trattati con i metodi statistici ordinari.
- La scelta di concentrare l'attenzione su materiali e strutture in opera in siti archeologici discende non solo dall'interesse culturale ed economico connesso ai sempre più numerosi interventi in questo nuovo settore di pertinenza dell'Ingegneria dei Materiali, ma anche dal fatto che, in tali contesti, i termini della rappresentatività dei campionamenti, della complessità delle interazioni tra le variabili (fisiche e non), del tempo e quindi della durabilità sono evidenti ed esasperati.
- Nell'ambito di questa ricerca si è anche condotto un ampio lavoro sperimentale di laboratorio per l'acquisizione dei dati utilizzati nelle procedure di modellazione fuzzy (fuzzy modeling). In tali situazioni si è operato secondo protocolli sperimentali standard: acquisizione della composizione mineralogica tramite diffrazione di raggi X (XRD), definizione della tessitura microstrutturale con osservazioni microscopiche (OM, SEM) e porosimetria tramite intrusione forzata di mercurio (MIP), determinazioni fisiche quali la velocità di propagazione degli ultrasuoni e rotoviscosimetria, misure tecnologiche di resistenza meccanica a compressione uniassiale, lavorabilità, ecc.
- Nell'elaborazione dei dati e nella modellazione in termini fuzzy, la ricerca è articolata su tre livelli:
  - a. quello dei singoli fenomeni chimico-fisici, di natura complessa, che non hanno trovato, a tutt'oggi, una trattazione soddisfacente e di generale consenso; le applicazioni riguardano la reologia delle dispersioni ad alto tenore di solido in acqua (calci, cementi, malte, calcestruzzi SCC), la correlazione della resistenza a compressione, la gelività dei materiali porosi ed alcuni aspetti della durabilità del calcestruzzo armato;
  - b. quello della modellazione della durabilità dei materiali alla scala del sito archeologico; le applicazioni presentate riguardano i centri di cultura nuragica di Su Monte-Sorradile, GennaMaria-Villanovaforru e Is Paras-Isili;
  - c. quello della scelta strategica costituita dalla selezione del miglior progetto di conservazione considerando gli aspetti connessi all'Ingegneria dei Materiali congiuntamente a quelli culturali, paesaggistici ed economici; le applicazioni hanno riguardato due importanti monumenti (Anfiteatro e Terme a Mare) del sito Romano di Nora-Pula.

## ABSTRACT

- This study is a wide ranging exploration of the possible applications of concepts, methods and procedures of Fuzzy Logic in Materials Engineering.  
This new approach is justified by the inadequacy of results obtained through the traditional methods regarding rheology and durability, the use of laboratory data in design and of the necessity to use a language which permits joint evaluation of the technical, cultural, landscape and economic aspects of the plans.
- In particular, Fuzzy Logic allows us to assess in a rational way the aleatoricity of variables and data which, in the specific field of materials employed in constructions of Cultural Heritage, cannot be examined with normal statistical methods.
- The choice of focusing our attention on materials and structures as found in archaeological sites is derived from cultural and economic interests connected with the ever increasing number of interventions in this new field of Materials Engineering. It also stems from the fact that it is in this context that the terms of the representation of the samples, the complexity of the interaction between the variables (physical and non-physical), the time and therefore the durability are all clearly evident and heightened.
- In this research much experimental work is also carried out in the laboratory for the acquisition of data utilised in the procedures of fuzzy modelling. In these situations the work is carried out according to standard experimental protocol: acquisition of the mineral composition using X-ray diffraction (XRD), definition of the microstructural texture through microscopic observation (OM, SEM), porosimetry using mercury intrusion method (MIP), physical determinations such as the ultrasounds propagation velocity and rotoviscosimetry, measures of uniaxial compression strength, workability, ecc.
- Regarding the elaboration of the data and modelling with the fuzzy approach, this research is articulated on three levels:
  - a. that of a single chemical-physical phenomenon, of a complex nature, which until now hasn't found a satisfactory treatment and/or a general consensus. This refers to the rheology of dispersion high in solids in water (limes, cements, mortars, concretes SCC), the correlation of the resistance to compression, the freezing process of the porous materials and some aspects of the durability of reinforced concrete;
  - b. that of the modelling of the durability of materials on the scale of an archaeological site; the applications presented refer to the nuragic sites of Su Monte-Sorradile, Genna Maria-Villanovaforru and Is Paras-Isili;
  - c. that of the strategic choice in the selection of the best conservation project considering, collectively, the aspects associated with Materials Engineering and those associated with culture, economy and landscape terms; the applications regarded two important monuments (Anfiteatro and Terme a Mare) of the ancient Roman city of Nora-Pula.

## PRESENTAZIONE

Numerosi settori dell'Ingegneria si interrogano attualmente sui propri fondamenti e ridefiniscono le loro priorità, i propri obiettivi, i propri metodi. Naturalmente questo non è da intendersi come un rifiuto del loro precedente paradigma, basato su un sapiente mix di metodi fisico-matematici ed empirismo, i cui straordinari risultati sono ben evidenti sotto gli occhi di tutti.

*“Pure science continues to extend towards two extreme scales, these being the micro-scale (even below elementary particles) and the mega-scale (even beyond the universe). Engineering science has gradually come to recognize that the theories available and methods existing are not sufficient to solve the problems encountered between these two extremes. ... macro-phenomena could not be fully explained even if the micro-mechanisms were revealed to the finest detail, and hence the reductionistic approach alone is not sufficient but needs to be accompanied by holistic considerations. Therefore, bridging the gap between the micro-mechanisms and the macro-phenomena has become a challenge not only for science but also for engineering.”*  
[LI & KWAWUK 2004]

*“The increasingly competitive demand on structural design, construction, and materials development has for some time caused concern about the inherited simplistic modeling philosophy in concrete research. Metha has in recent years in several articles suggested general introduction of the concept of holism, i.e. acceptance of the interdependence of laboratory model studies and field behaviour, energy and resource saving, etc., and wrote in 2000: ‘...that the results from DEF laboratory tests involving small scale samples are of limited value. This is because the concrete processing variables and the conditions to which structural elements would be exposed in the field cannot readily be simulated in the laboratory’.”*  
[IDORN 2005]

Gli aspetti più sentiti sui quali ci si interroga possono quindi essere sintetizzati nelle tre parole chiave ‘COMPLESSITA’, ‘OLISMO’ e ‘COMUNICAZIONE’ tra Ingegneria e Scienze Umane (Archeologia, Architettura, Ecologia, Economia, ecc.) [LI, ZHANG, GE, LIU 2004; LI & KWAWUK 2004].

*“From a holistic design perspective, both human-engineered and naturally evolved networks are organized to perform certain overall function(s) well, that is, designed to meet certain performance criteria or survival objectives as a whole. Thus, one is not overly concerned with the local satisfaction or performance of any particular member but with the overall satisfaction or performance level in the entire network. ... In addition, there is another design criterion. One would like the network to be designed in such a manner that it can survive and meet its performance target under a wide variety of operating conditions or environments.”*  
[VENKATASUBRAMANIAN, POLITIS, PATKAR 2006]

*“The Fuzzy Logic system is such an innovation. Its basis is the recognition that visual observations and measurement data in experimental research and testing inevitably are*

*subjective and approximate, and that reactivity in nature and technology is, in principle, irregular.”*  
[IDORN 2005]

Questo nuovo approccio è criticamente sperimentato nell'ambito di questa Tesi.

Tra i compiti che l'Ingegneria dei Materiali è chiamata ad assolvere, quelli del settore della Conservazione e del Restauro di edifici antichi classificati Beni Culturali, eventualmente allo stato di rudere o di interi complessi talvolta estendentisi per decine di ettari ed aventi ancora il carattere di veri e propri centri urbani, sono tra quelli che richiedono certamente una maggiore innovazione.

In questo settore è esasperata l'insufficienza degli approcci tradizionali riguardo a:

- riduzionismo vs olistico;
- comportamento nel tempo (dove la variabile tempo si estende per secoli o addirittura millenni);
- limitate possibilità di campionamento ed estrema eterogeneità dei materiali in opera;
- inadeguatezza della simulazione di laboratorio;
- complessità delle leggi fisiche persino nella trattazione di aspetti fortemente parziali o complessità delle procedure di soluzione analitica;
- necessità di dialogo tra le diverse culture (fattori paesaggistici, archeologici ed economici) e sua formalizzazione ed informatizzazione.

# PARTE I





## 1 – STORIA E NOZIONI DI BASE SUGLI INSIEMI FUZZY

Platone nella ‘Repubblica’ sostiene che:

*“La matematica è conoscenza di ciò che esiste eternamente.”*

Gli oggetti e gli enunciati della matematica sarebbero quindi delle entità astratte ma che hanno una loro esistenza oggettiva, perciò gli enti del mondo reale, che si adattano solo limitatamente a questi modelli, vengono considerati perturbati da imperfezioni, così per esempio non esiste nessun oggetto che possa essere definito ‘sfera’ o ‘punto’. Nel secolo scorso venne coniata l’espressione ‘platonismo matematico’ per indicare gli oggetti matematici ‘distaccati da ogni legame con il soggetto riflettente’. Tale punto di vista venne adottato, almeno in parte o temporaneamente, da alcuni dei principali logici e matematici del secolo (Frege, Cantor, Russell, Gödel).

Le ‘nozioni perfette’ o ‘concetti esatti’ corrispondono quindi a enti presenti nella matematica, mentre nel mondo reale prevalgono le ‘strutture imperfette o inesatte’.

*“Nella misura in cui le leggi della matematica si riferiscono alla realtà non sono certe. E nella misura in cui sono certe, non si riferiscono alla realtà.”*

[EINSTEIN 1921]

Nel 1926 il teorico dei sistemi Jan Christiaan Smuts scrisse un libro di ispirazione fuzzy intitolato “Holism and Evolution”, in cui osservava:

*“We have to return to the fluidity and plasticity of nature and experience to find the concepts of reality. When we do this we find that round every luminous point in experience there is a gradual shading off into haziness and obscurity. A ‘concept’ is not merely its clear luminous center, but embraces a surrounding sphere of meaning of influence of smaller or larger dimensions, in which the luminosity tails off and grows fainter until it disappears. Similarly a ‘thing’ is not merely that which presents itself as such in clearest definite outline, but this central area is surrounded by a zone of intuitions and influences which shades off into the region of the indefinite. The hard and abrupt contours of our ordinary conceptual system do not apply to reality. [...] And all this is due to the initial mistake of enclosing things or ideas or persons in hard contours which are purely artificial and are not in accordance with the natural shading-off continuities which are or should be well known to science and philosophy alike.”*

[SMUTS 1926]

Alcune branche della matematica e della geometria contemporanee ritengono che questi ‘sistemi imperfetti’ siano comunque assai ricchi di proprietà e possibili operazioni da costituire un soggetto di studio di forte interesse.

*“As the complexity of a system increases, our ability to make precise and significant statements about its behaviour diminishes until a threshold is reached beyond which precision and significance (or relevance) become almost mutually exclusive*

*characteristics ... A corollary principle may be stated succinctly as, 'The closer one looks at a real-world problem, the fuzzier becomes its solution'.*  
[ZADEH 1973]

La stessa Ingegneria, dopo essersi sviluppata nel corso degli ultimi secoli proprio in seguito all'adozione di modelli matematici e geometrici della realtà fortemente idealizzati, ritiene negli ultimi decenni ed in particolare agli inizi del nostro secolo di dover superare il 'riduzionistico' approccio tradizionale e di potersi sviluppare verso una considerazione della realtà nella sua complessità. Da queste esigenze nascono quindi alcune linee di pensiero quali l'adozione della geometria frattale nella descrizione dei sistemi geometrici e caotici e la logica e la matematica fuzzy per la trattazione sia di aspetti strettamente tecnici ma complessi, sia per instaurare un linguaggio comune tra la stessa Ingegneria e altre discipline che con essa necessariamente si integrano e si confrontano negli interventi di trasformazione del mondo reale, secondo un approccio olistico.

La logica ordinaria, intendendo per logica la teoria dell'inferenza e quindi delle condizioni generali per le quali un ragionamento è corretto, ha le sue basi a partire dai filosofi greci, in particolare Aristotele. Il risultato più evidente di questa logica è la dottrina del sillogismo (due premessa, una maggiore e una minore, e una conclusione), che egli riteneva lo schema di ogni inferenza valida. Aristotele definisce e classifica tutte le forme valide del sillogismo distinguendo inoltre i sillogismi veri da quelli puramente corretti. Un sillogismo corretto, infatti, giunge alla verità solo se è stata provata la verità delle premesse. Per dimostrare la verità delle premesse si può ricorrere ad altri sillogismi, ma questo processo non può andare all'infinito; occorre perciò che vi siano alcuni principi supremi per sé evidenti, che non abbisognino di dimostrazione; questi sono il principio di identità:

*"Ogni cosa è identica a sé stessa."* ,

il principio di non contraddizione:

*"Non è lecito affermare che qualcosa sia e non sia nello stesso modo ed allo stesso tempo."* ,

ed il principio del terzo escluso:

*"Tertium non datur."* .

Alla metà dell'800 questi principi furono alla base dello sviluppo della logica booleana, dovuta a George Boole, che prevedeva il calcolo logico a due valori di verità con alcune leggi particolari, che consentivano di operare su proposizioni allo stesso modo che su entità matematiche. Nonostante l'apparente astrattezza, è ben noto che a partire dagli anni '30 del secolo scorso queste teorie ebbero una clamorosa applicazione nello sviluppo dei sistemi elettrici ed elettronici.

Nella logica ordinaria, una proposizione può essere 'vera' o 'falsa' e a questi termini che vengono chiamati 'valori di verità' si associano i numeri 1 e 0 rispettivamente; pertanto la logica ordinaria si basa sulla logica bivalente. Indicando con  $p$  e  $q$  due proposizioni, su di esse si possono condurre le operazioni  $\sim p$  (negazione),  $p \vee q$  (coniunzione o unione),  $p \wedge q$  (disgiunzione o intersezione),  $p \rightarrow q$  (implicazione),  $p \leftrightarrow q$  (equivalenza).

Strettamente legata alla logica bivalente, in termini di ‘appartiene’ o 1 vs ‘non appartiene’ o 0, è quindi l’intera teoria degli insiemi.

Con il termine ‘insieme’ (ordinario) ci si riferisce ad una collezione di oggetti ben definiti che vengono chiamati elementi dell’insieme; in tal modo l’insieme è rigidamente definito. Le espressioni:  $a \in A$  e  $a \notin A$  indicano rispettivamente che l’elemento  $a$  appartiene (valore di verità = 1) e non appartiene (valore di verità = 0) all’insieme  $A$ . Un insieme che non ha elementi è chiamato insieme vuoto e si indica con il simbolo  $\phi$ .

L’insieme  $A$  è un sottoinsieme o subset di  $B$  ( $A \subseteq B$ ), se gli elementi che appartengono all’insieme  $A$  appartengono anche a  $B$ . Due insiemi  $A$  e  $B$  sono uguali ( $A = B$ ) se hanno gli stessi elementi, ossia se vale  $A \subseteq B$  e  $B \subseteq A$ .

Generalmente quando si ragiona in termini di insiemi si assume che essi possano essere considerati dei subsets dell’insieme universale, che indicheremo con  $U$ .

Il filosofo americano Charles Sanders Peirce, circa 100 anni fa, fu uno dei primi studiosi ad osservare che la logica aristotelica aveva trascurato lo studio della *vagueness* ignorando il ruolo significativo che questa aveva assunto nel pensiero matematico, ed arrivò in sostanza alla definizione del concetto di ‘insiemi dai confini sfumati’.

*“Logicians have too much neglected the study of vagueness, not suspecting the important part it plays in mathematical thought.”*

*“Think of arm chairs and reading chairs and dining-room chairs, and kitchen chairs, chairs that pass into benches, chairs that cross the boundary and become settees, dentist’s chairs, thrones, opera stalls, seats of all sorts, those miraculous fungoid growths that cumber the floor of the arts and crafts exhibitions, and you will see what **a lax bundle** in fact is this simple straightforward term. I would undertaken to defeat any definition of chair or chairishness that you gave me.”*

[PEIRCE 1931]

Questa esigenza fu posta successivamente anche da Bertrand Russell, uno dei principali filosofi della scienza del XX secolo, che riscoprendo i paradossi della Grecia antica insinuò dei dubbi sulla certezza della logica bivalente, ponendo le basi per la matematica moderna.

*“All traditional logic habitually assumes that precise symbols are being employed. It is therefore not applicable to this terrestrial life, but only to an imagined celestial one. The laws of excluded middle is true when precise symbols are employed but this is not true when symbols are vague, as, in fact, all symbols are.”*

[RUSSELL 1923]

Il dibattito sul legame concernente l’ingresso del concetto di *vagueness* nella logica era relativamente comune nei primi decenni del XX secolo; negli anni ’30 Jan Lukasiewicz e la sua scuola svilupparono un completo sistema logico basato su tre valori:

*“... it can assume one and only one of two truth-values: truth and falsity. I call this principle **the principle of bivalence**. In ancient times this principle was emphatically defended by Stoics and opposed by the Epicurean, both parties being fully*

aware of the issue involved. Because it lies at the very foundation of logic, the principle under discussion cannot be proved. One can only believe it, and he alone who consider it self-evident believe it. To me, personally, the principle of bivalence does not appear to be self-evident. Therefore I am entitled not to recognize it, and to accept the view that besides truth and falsehood exist other truth-values, including at least more, the third truth-value.

What is this third-value? I have no suitable name for it. But after the preceding explanations it should not be difficult to understand what I have in mind. I maintain that there are propositions which are neither true nor false but indeterminate. All sentences about future facts which are not yet decided belong to this category. Such sentences are neither true at present moment, for they have no real correlate. If we make use of philosophical terminology which is not particularly clear we could say that ontologically there corresponds to these sentences neither being nor non-being but possibility. Indeterminate sentences, which ontologically have possibility as their correlate, take the third value.

If third value is introduced into logic we change its very foundations. A trivalent system of logic, whose first outline I was able to give in 1920, differs from ordinary bivalent logic, the only one known so far, as much as non-Euclidean systems of geometry differ from Euclidean geometry. In spite of this, trivalent logic is as consistent and free from contradictions as is bivalent logic. Whatever form, when worked out in detail, this new logic assumes, the thesis of determinism will be no part of it.”

[LUKASIEWICZ 1970]

Il concetto di ‘consistency profiles’, l’antenato della fuzzy membership function, da intendersi come misura di appartenenza ad un insieme dai confini non rigidamente definiti e che utilizzeremo largamente nel corso di questo lavoro essendo il cuore della teoria degli insiemi fuzzy, è dovuto al filosofo Max Black che nel 1937 pubblicò un articolo intitolato “Vagueness: An Exercise in Logical Analysis”. Egli introdusse tale concetto allo scopo di ‘characterize vague symbol’.

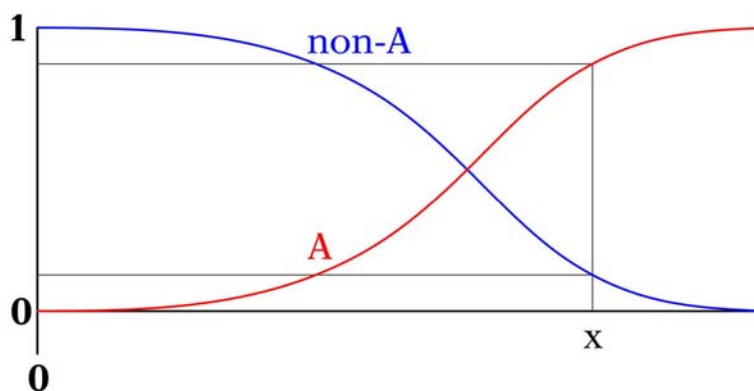


Figura 1.1 - Consistency profiles. X può essere completamente A, oppure non-A, ma esiste anche un’ampia gamma di situazioni nelle quali è parzialmente A e parzialmente non-A.

“The vagueness of the word chair is typical of all terms whose application involves the use of common senses. In all such cases ‘borderline case’ or ‘doubtful objects’ are easily found to which we are unable to say either that the class name does or does not apply.”

*“Thus the very precise symbol would have a consistency curve made up of a straight line almost parallel to the horizontal axis, and at a great distance from it, followed by a steep drop to another line almost parallel to the horizontal axis and very close to it.”*  
[BLACK 1937]

Altri parziali sviluppi che porteranno negli anni '60 ad una piena definizione di questi concetti furono condotti da H. WEYL [1940], A. KAPLAN e H.F. SCHOTT [1951] e K. MENGER [1951] al quale si deve l'espressione 'ensemble flou' che richiama esplicitamente il termine inglese 'fuzzy set' che si affermerà definitivamente con le concrete applicazioni dovute a Zadeh.

Il termine 'fuzzy' fu utilizzato per la prima volta nel 1965 da Lofti Zadeh che pubblicò un articolo intitolato "Fuzzy Sets" in cui veniva applicata la logica multivalente di Lukasiewicz ad insiemi (sets) o gruppi di oggetti:

*“A fuzzy set is a class of objects with a continuum of grades of membership. Such a set is characterized by a membership (characteristic) function which assigns to each object a grade of membership ranging between zero and one.”*  
[ZADEH 1965]

L'intento, assai ambizioso, di Zadeh nel concepire questi concetti era quello di poter ricongiungere la modellazione matematica e la conoscenza umana nelle scienze ingegneristiche.

*“There is a fairly wide gap between what might be regarded as 'animate' system theorists and 'inanimate' system theorists at the present time, and it is not at all certain that this gap will be narrowed, much less closed, in the near future. There are some who feel that this gap reflects the fundamental inadequacy of conventional mathematics – the mathematics of precisely-defined points, functions, sets, probability measures, etc. – for coping with the analysis of biological systems, and that to deal effectively with such systems, which are generally orders of magnitude more complex than man-made systems, we need a radically different kind of mathematics, the mathematics of fuzzy or cloudy quantities which are not describable in terms of probability distributions. Indeed, the need for such mathematics is becoming increasingly apparent even in the realm of inanimate systems, for in most practical cases the a priori data as well as the criteria by which the performance of a man-made system are judged are far from being precisely specified or having accurately-known probability distributions.”*  
[ZADEH 1962]

'Fuzzy' è un termine della lingua inglese che nel linguaggio corrente si può tradurre in 'confuso, sfocato, vago' e, quando Zadeh pubblicò il suo primo articolo non ebbe molti consensi, e venne osteggiato proprio perché sembrava un tentativo di rendere 'vaghi' i concetti in quei settori della scienza in cui invece ci si auspicava un maggiore rigore scientifico.

*“'Fuzzification' is a kind of scientific permissiveness. It tends to result in socially appealing slogans unaccompanied by the discipline of hard scientific work and patient observation.”*  
[RUDOLF KALMAN, citato in KOSKO 1994]

*“Fuzzy theory is wrong, wrong, and pernicious. What we need is more logical thinking, not less. The danger of fuzzy logic is that it will encourage the sort of imprecise thinking that has brought us so much trouble.*

*Fuzzy logic is the cocaine of science.”*

*[WILLIAM KAHAN, citato in KOSKO 1994]*

Ma come acutamente osservato da Abraham Kandel:

*“Fuzziness is a type of imprecision that stems from a grouping of elements into classes that do not have sharply boundaries. Such classes – called fuzzy sets – arise, for example, whenever we describe ambiguity, vagueness, and ambivalence in mathematical models of empirical phenomena. Since certain aspects of reality always escape such models, the strictly binary (and even ternary) approach to the treatment of physical phenomena is not always adequate to describe systems in the real world; and the attributes of the system variables often emerge from an elusive fuzziness, a readjustment to context, or an effect of human imprecision. In many cases, however, even if the model is precise, fuzziness may be a concomitant of complexity. Systems of high cardinality are rampant in real life and their computer simulations require some kind of mathematical formulation to deal with the imprecise descriptions. The theory of fuzzy sets has one of its aims the development of a methodology for the formulation and solution of problems that are too complex or too ill-defined to be susceptible to analysis by conventional techniques”.*

*[KANDEL 1986]*

Difficilmente i concetti e successivamente le applicazioni ingegneristiche della fuzzy logic si sarebbero potute sviluppare assai rapidamente se Zadeh non fosse stato una personalità affermata e nota a livello internazionale nel campo dell’Ingegneria elettrica ed elettronica. Al tempo della pubblicazione citata egli era, infatti, direttore dell’Electrical and Computer Science Department all’University of California a Berkeley.

Nato a Baku (Azerbaijan) nel 1921, di lingua russa ma di cittadinanza persiana, nel 1942 si laureò all’Università di Teheran e si trasferì nel 1944 negli Stati Uniti dove si laureò al MIT di Boston nel 1946. Nel 1951 prese un Ph.D. alla Columbia University entrando subito dopo nel corpo docente, dove insegnò fino al 1959; nel 1956 fu invitato all’Institute of Advanced Studies di Princeton che ha incluso personaggi come Einstein e Gödel. Dal 1959 si trasferì a Berkeley diventando nel 1963 direttore di dipartimento.

Le prime applicazioni della logica fuzzy riguardarono soprattutto l’ambito della nascente Scienza dell’Informazione e dei Controlli Automatici [ZADEH 1975 A, B, C], anche se da allora tali concetti sono stati estesi a numerosi altri settori, da quello matematico e logico a quello ingegneristico (ingegneria civile, industria elettronica e dei controlli degli impianti industriali e di trasporto), trovando applicazioni nei contesti più vari, dalla medicina alla finanza fino anche all’archeologia.

La fuzzy logic è il cuore del sistema di controllo utilizzato anche in numerosi dispositivi di uso quotidiano quali condizionatori d’aria (Hitachi, Mitsubishi, Sharp), lavatrici (Daewoo, Hitachi, Samsung, Sharp), forni a microonde (Hitachi, Sharp, Toshiba), televisori (Hitachi, Samsung, Sony), fotocopiatori (Canon), sistemi di frenatura ABS (Nissan), ecc.

Numerose sono le associazioni scientifiche e le riviste internazionali che si occupano specificamente della logica fuzzy e delle sue applicazioni.

I concetti fondamentali per le applicazioni che verranno affrontate in questo lavoro sono quelli di appartenenza parziale di un elemento ad un insieme (membership function), variabile linguistica (in aggiunta alle tradizionali variabili numeriche), Knowledge Base (costruita non solo con dati sperimentali e teorie fisiche e chimiche su aspetti parziali dei fenomeni ma anche considerando fattori imprecisamente noti, intrinsecamente non-statistici e l'esperienza), approssimazione delle funzioni incognite o non esprimibili analiticamente, inferenza, numeri fuzzy e loro ordinamento.

La fuzzy logic consente di costruire modelli (olistici) di fenomeni complessi utilizzando la globalità dei dati disponibili compresi quelli definibili 'di esperienza' [COX 2005, RUAN 2000]. Il suo output è intrinsecamente approssimato o per meglio dire è una nuova forma dell'approssimazione insita in qualsiasi misura (qualunque misura è un'approssimazione del valore 'vero', che è inconoscibile). Questa approssimazione perde la sua connotazione negativa e diventa sinonimo di elasticità e completezza dell'approccio quando un modello tradizionale è impossibile da formulare matematicamente o è talmente complesso da risultare operativamente non gestibile dal punto di vista tecnico e/o economico.

In innumerevoli applicazioni dell'Ingegneria, l'alternativa non è tra 'preciso' e 'approssimato', ma tra 'impossibile' e 'possibile'.

*"Fuzzy-ism is a body of concepts and techniques aimed at providing a systematic framework for dealing with the vagueness and imprecision inherent in human thought processes."*  
[GUPTA 1977]





## 2 – OPERATORI E QUANTIFICATORI

Come accennato nel precedente capitolo, il concetto base della fuzzy logic è quello della multivalenza, ossia, in termini ‘insiemistici’, della possibilità che un oggetto possa appartenere ad un insieme anche parzialmente e quindi anche a più insiemi con differenti gradi.

Richiamiamo da principio gli elementi alla base della teoria degli insiemi ordinari. Come si vedrà, in essi compaiono le espressioni formali dei principi della logica aristotelica, richiamati nel precedente capitolo.

Dato l’insieme universale  $U$ , indichiamo con  $x$  un suo generico elemento tale che  $U = \{x\}$ ; consideriamo due sottoinsiemi  $A$  e  $B$  di  $U$ .

Si indica con  $A^c$  il complemento di  $A$ , ossia l’insieme degli elementi che non appartengono ad  $A$ :  $A^c = \{x \in U / x \notin A\}$ .

L’unione dei due insiemi  $A$  e  $B$  ( $A \cup B$ ) è definita da tutti gli elementi che appartengono ad  $A$ , a  $B$  o ad entrambi:  $A \cup B = \{x \in U / x \in A \text{ o } x \in B\}$ .

L’intersezione tra gli insiemi  $A$  e  $B$  ( $A \cap B$ ) è formata dagli elementi che appartengono ad entrambi gli insiemi:  $A \cap B = \{x \in U / x \in A \text{ e } x \in B\}$ .

Sugli operatori  $^c$ ,  $\cup$ ,  $\cap$  (che sono i corrispettivi di  $\sim$ ,  $\vee$ ,  $\wedge$  per le proposizioni logiche viste nel precedente capitolo) si definiscono:

Principio di Identità:	$A \cup \phi = A$ $A \cup U = U$ $A \cap U = A$ $A \cap \phi = \phi$
Principio di non Contraddizione:	$A \cap A^c = \phi$
Principio del Terzo Escluso:	$A \cup A^c = U$
Principio di Idempotenza:	$A \cup A = A$ $A \cap A = A$
Principio di Assorbimento:	$A \cup (A \cap B) = A$ $A \cap (A \cup B) = A$
Proprietà Commutativa:	$A \cup B = B \cup A$ $A \cap B = B \cap A$
Proprietà Associativa:	$A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$ $A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C$
Proprietà Distributiva:	$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$ $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$
Leggi di De Morgan:	$(A \cup B)^c = A^c \cap B^c$ $(A \cap B)^c = A^c \cup B^c$

Un insieme fuzzy  $\tilde{A}$  di  $U$  è caratterizzato da una membership function (funzione di appartenenza o funzione caratteristica o MF)  $\mu_{\tilde{A}}(x)$ , che associa a ciascun punto in  $U$  un numero reale nell’intervallo  $[0,1]$ ; in ciascun punto  $x$  l’associata  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  rappresenta il ‘grado di appartenenza’ di  $x$  in  $\tilde{A}$ , ossia un’espressione della misura dell’adesione di  $x$  al predicato che definisce  $\tilde{A}$ . In altre parole, un fuzzy set è un insieme di coppie ordinate:  $\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) / x \in U\}$ . Correntemente della membership function viene data una rappresentazione grafica o analitica, come mostrato in figura 2.1.

Secondo alcuni matematici la forma della curva che esprime il grado di appartenenza (e che equivale alla definizione stessa dell’insieme fuzzy) può essere varia; quelle a tratti lineari

(triangolari, trapezoidali) possono essere operativamente comode ma le forme a 'z' e a 's' possono esprimere con efficacia concetti e funzioni di tipo non lineare.

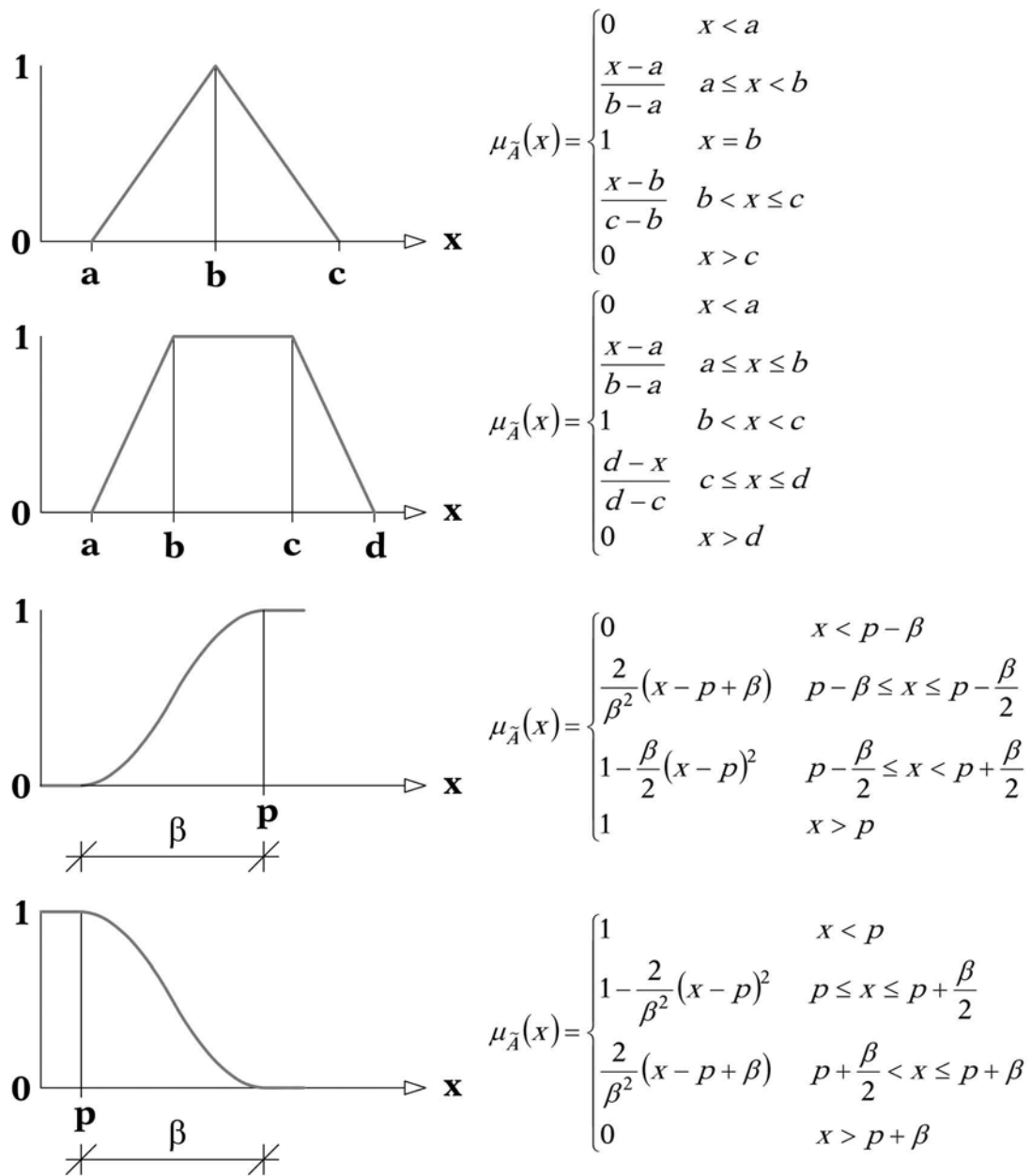


Figura 2.1 - Rappresentazione di funzioni di appartenenza triangolari, trapezoidali, 's' e 'z'.

Non necessariamente la funzione di appartenenza è simmetrica, l'eventuale asimmetria rende conto dell'esistenza di limiti fisici su un estremo, o comunque esprime l'apprezzamento di una differente confidenza o possibilità sui due estremi.

Nella pratica e in modo particolare nelle operazioni di rating o nel Decision Support System vengono utilizzati soprattutto le forme trapezoidali, di cui quelle triangolari sono un caso particolare.

Si definisce 'supporto' (support set) di un fuzzy set la zona in cui il grado di appartenenza risulta  $> 0$ ; si definisce invece 'nucleo' (core) la zona in cui il grado di appartenenza assume valore  $= 1$ . Il supporto rappresenta i valori del predicato ritenuti 'possibili', mentre il nucleo quelli ritenuti più 'plausibili'.

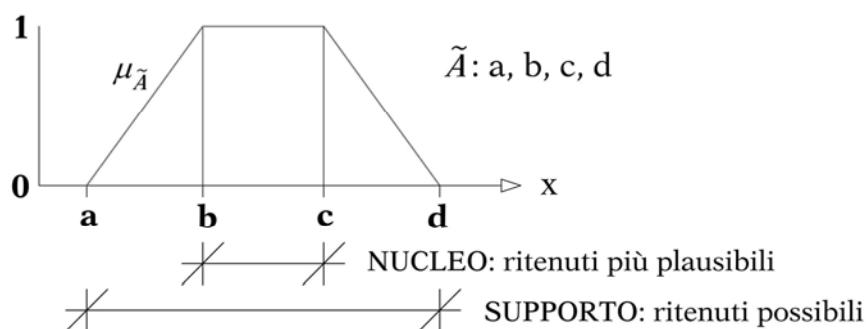


Figura 2.2 - Definizione ed elementi della MF di un insieme fuzzy trapezoidale:  $\tilde{A}$  denota il set fuzzy, mentre  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  denota il grado di appartenenza di  $x$  a  $\tilde{A}$  in termini di stima di compatibilità col predicato, o definizione.

Se  $A$  rappresentasse un insieme nel senso ordinario del termine, la sua funzione di appartenenza potrebbe assumere solo i valori 1 o 0,  $\mu_A(x) = 1$  o 0, a seconda che l'elemento  $x$  appartenga o meno all'insieme considerato.

In figura 2.3 è data una rappresentazione grafica del concetto di appartenenza crisp (rigidamente definito) o fuzzy, che richiama chiaramente le considerazioni di Smuts riportate nel capitolo precedente.

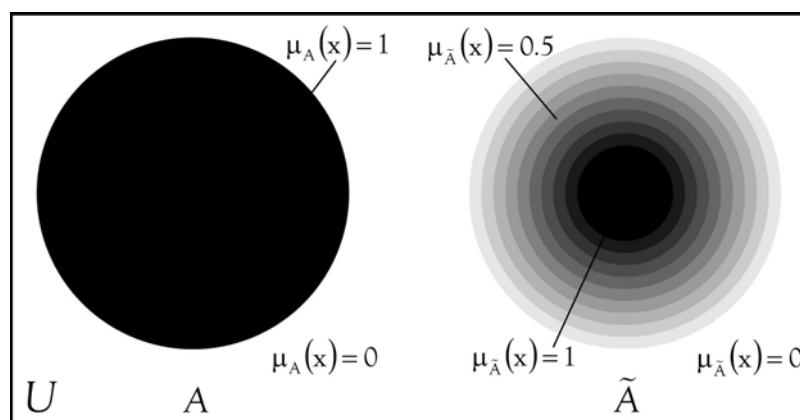
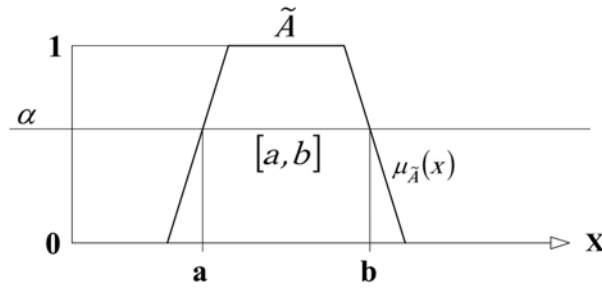


Figura 2.3 - Rappresentazione di un insieme crisp  $A$  e di un insieme fuzzy  $\tilde{A}$ .

Può essere anche utile definire un insieme ordinario (non-fuzzy)  $A_\alpha$ , come  $\alpha$ -cut di  $A$ :  $A_\alpha = \{x \in U / \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha, 0 \leq \alpha \leq 1\}$ .



$\alpha$ -cut è l'intervallo (insieme crisp):  
 $A_\alpha = [a, b] = \{x \in X / \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha, 0 \leq \alpha \leq 1\}$

Figura 2.4 - Rappresentazione dell'insieme  $A_\alpha$ .

Un insieme fuzzy si definisce vuoto,  $\phi$ , se e solo se (IFF,  $\Leftrightarrow$ ) la sua funzione di appartenenza è identicamente nulla su  $U$ .

Due insiemi fuzzy  $\tilde{A}$  e  $\tilde{B}$  sono uguali ( $\tilde{A} = \tilde{B}$ ) se e solo se  $\mu_{\tilde{A}}(x) = \mu_{\tilde{B}}(x)$  per tutti  $x \in U$  (in tal caso è opportuno scrivere  $\mu_{\tilde{A}} = \mu_{\tilde{B}}$ ).

Il complemento di un fuzzy set  $\tilde{A}$  è indicato con  $\tilde{A}^c$  ed è definito dalla relazione:  
 $\mu_{\tilde{A}^c} = 1 - \mu_{\tilde{A}}$ .

$\tilde{A}$  si definisce sottoinsieme fuzzy di  $\tilde{B}$  ( $\tilde{A} \subseteq \tilde{B}$ ) se e solo se  $\mu_{\tilde{A}}(x) \leq \mu_{\tilde{B}}(x)$  ossia:  
 $\tilde{A} \subseteq \tilde{B} \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}} \leq \mu_{\tilde{B}}$ .

L'unione di due insiemi fuzzy  $\tilde{A}$  e  $\tilde{B}$ , caratterizzati dalle rispettive membership functions  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  e  $\mu_{\tilde{B}}(x)$ , è un insieme fuzzy  $\tilde{C}$  ( $\tilde{C} = \tilde{A} \cup \tilde{B}$ ) la cui funzione di appartenenza è legata a quelle di  $\tilde{A}$  e  $\tilde{B}$  attraverso la relazione:  $\mu_{\tilde{C}}(x) = u[\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)]$ ,  $x \in U$

o, in altri termini:  $\mu_{\tilde{C}} = \mu_{\tilde{A}} \vee \mu_{\tilde{B}}$ . L'unione di  $\tilde{A}$  e  $\tilde{B}$  è costituito dal più piccolo insieme fuzzy che contenga sia  $\tilde{A}$  che  $\tilde{B}$ .

Analogamente, l'intersezione tra due insiemi fuzzy  $\tilde{A}$  e  $\tilde{B}$ , caratterizzati dalle rispettive membership functions  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  e  $\mu_{\tilde{B}}(x)$ , è un insieme fuzzy  $\tilde{C}$  ( $\tilde{C} = \tilde{A} \cap \tilde{B}$ ) la cui funzione di appartenenza è legata a quelle di  $\tilde{A}$  e  $\tilde{B}$  attraverso la relazione:  $\mu_{\tilde{C}}(x) = i[\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)]$ ,  $x \in U$

o, in forma breve:  $\mu_{\tilde{C}} = \mu_{\tilde{A}} \wedge \mu_{\tilde{B}}$ . L'intersezione fuzzy è quindi il più grande tra gli insiemi fuzzy che contenga sia  $\tilde{A}$  che  $\tilde{B}$ .

Le funzioni che definiscono le operazioni di intersezione  $i$  e unione  $u$  vengono chiamate rispettivamente  $t$ -norm (T) e  $t$ -conorm (C).

Posto  $0 \leq \mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}} \leq 1$ , alle funzioni  $i$  e  $u$  si richiedono le seguenti caratteristiche generali:

$$i(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}) \in [0, 1]$$

$$i(1, 1) = 1 \quad i(0, 1) = i(1, 0) = i(0, 0) = 0$$

$$u(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}) \in [0, 1]$$

$$u(0, 0) = 0 \quad u(0, 1) = u(1, 0) = u(1, 1) = 1$$

Queste discendono dall'assunzione delle seguenti 4 leggi:

Legge di Identità:	$T(x,1) = x$ $C(x,0) = x$
Legge di Commutatività	$T(x,y) = T(y,x)$ $C(x,y) = C(y,x)$
Legge di Associatività	$T(x, T(y,z)) = T(T(x,y), z)$ $C(x, C(y,z)) = C(C(x,y), z)$
Legge di Monotonicità	$\forall x, y, u, v \in [0,1] / x \leq u \text{ e } y \leq v \Rightarrow T(x,y) \leq T(u,v)$ $\forall x, y, u, v \in [0,1] / x \leq u \text{ e } y \leq v \Rightarrow C(x,y) \leq C(u,v)$

Sono possibili differenti scelte (t-norm) per la funzione i:

$$\begin{aligned}
 i(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}) &= \mu_{\tilde{A}} \cdot \mu_{\tilde{B}} \\
 i(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}) &= \min(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}) \\
 i(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}) &= \max(\mu_{\tilde{A}} + \mu_{\tilde{B}} - 1, 0) \\
 i(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}) &= \sqrt{\max(0, \mu_{\tilde{A}}^2 + \mu_{\tilde{B}}^2 - 1)} \\
 i(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}) &= \begin{cases} \min(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}) & \text{se } \max(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}) = 1 \\ 0 & \text{negli altri casi} \end{cases} \\
 i(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}) &= \begin{cases} \min(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}) & \text{se } \mu_{\tilde{A}} + \mu_{\tilde{B}} > 1 \\ 0 & \text{negli altri casi} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Analogamente per la funzione u sono possibili differenti scelte (t-conorm):

$$\begin{aligned}
 u(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}) &= \mu_{\tilde{A}} + \mu_{\tilde{B}} - \mu_{\tilde{A}} \cdot \mu_{\tilde{B}} \\
 u(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}) &= \max(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}) \\
 u(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}) &= \min(\mu_{\tilde{A}} + \mu_{\tilde{B}}, 1) \\
 u(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}) &= \min\left(1, \sqrt{\mu_{\tilde{A}}^2 + \mu_{\tilde{B}}^2}\right) \\
 u(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}) &= \begin{cases} \max(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}) & \text{se } \min(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}) = 0 \\ 1 & \text{negli altri casi} \end{cases} \\
 u(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}) &= \begin{cases} \max(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}) & \text{se } \mu_{\tilde{A}} + \mu_{\tilde{B}} < 1 \\ 1 & \text{negli altri casi} \end{cases}
 \end{aligned}$$

La figura 2.5 riporta un esempio grafico delle due operazioni di intersezione e unione, condotte su due insiemi fuzzy triangolari  $\tilde{A}$  e  $\tilde{B}$ .

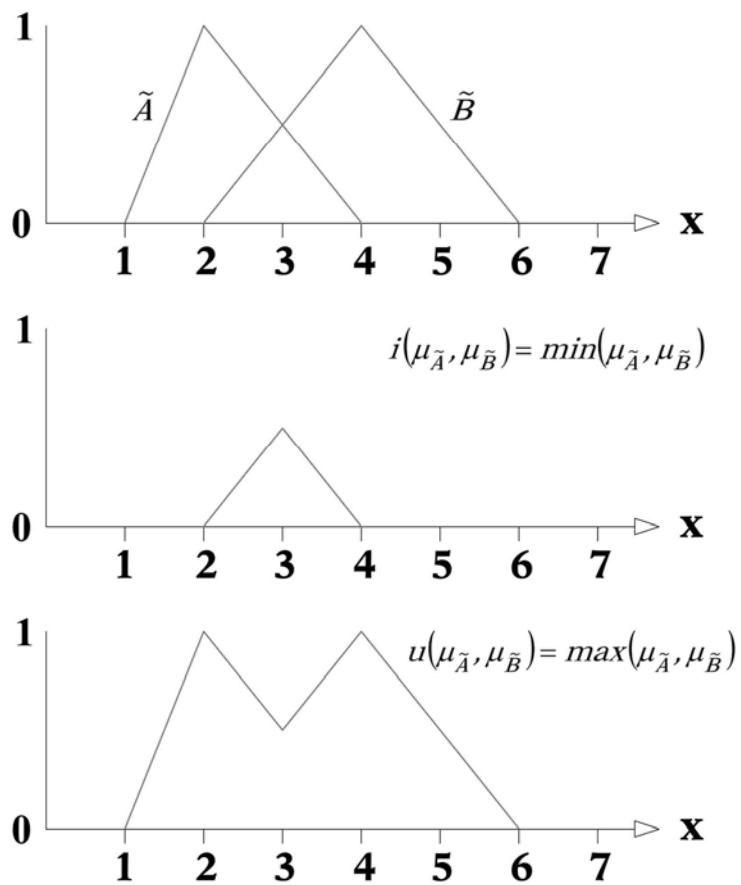


Figura 2.5 - Rappresentazione delle operazioni di intersezione e di unione tra  $\tilde{A}$  e  $\tilde{B}$  secondo la t-norm e la t-conorm indicate.

### 3 – INTERPRETAZIONE E VALUTAZIONE DELLE FUNZIONI DI APPARTENENZA

Le funzioni di appartenenza sono i ‘building blocks’ della teoria degli insiemi fuzzy.

Zadeh già nell’articolo del 1965 diede la definizione secondo la quale quello fuzzy fosse un insieme con un continuum di gradi di appartenenza (membership grades). Così l’insieme fuzzy è caratterizzato o definito da una funzione di appartenenza che associa ad ogni elemento un numero reale nell’intervallo  $[0,1]$ .

Il ‘grado di appartenenza’ ha principalmente un significato ‘ordinale’: è l’ordinamento indotto dai gradi di appartenenza tra elementi che è significativo in sé, più che l’esatto valore del grado. Questo concorda anche con la natura qualitativa delle più comuni operazioni utilizzate quali max, min, ecc.

L’interpretazione del concetto di ‘membership function’ ha dato adito a numerosi equivoci e controversie che hanno comunque contribuito a chiarire questo concetto apparentemente semplice.

Ad esempio, il predicato “la resistenza a compressione (x) è ‘alta’ ( $\tilde{A}$ )” è rappresentato da due numeri  $(x, \mu_{\tilde{A}}(x))$ , essendo  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  un numero nell’intervallo  $[0,1]$  che ‘misura’ l’adesione di x al predicato. Ci sono diverse sfaccettature nel rispondere alla domanda “cosa significa  $\mu_{\tilde{A}}(x) = 0.8$ ?”:

<b>Likelihood view:</b>	l’80% degli interpellati ha dichiarato che “la resistenza a compressione x è ‘alta’”
<b>Random set view:</b>	l’80% degli interpellati ha descritto ‘alto’ come un intervallo a cui appartiene la resistenza a compressione x
<b>Similarity view:</b>	la resistenza a compressione x si distanzia da un campione caratterizzato da una resistenza veramente ‘alta’ di un grado 0.2
<b>Utility view:</b>	0.8 rappresenta l’utilità (in termini di implicazioni) di affermare che “la resistenza a compressione è ‘alta’”
<b>Measurement view:</b>	quando viene comparato ad altri campioni, la resistenza a compressione x è più alta di qualcuno, e questo può essere codificato come 0.8 in una scala.

Ovviamente una fuzzy membership function (MF) dipenderà in vari modi dal contesto. Anzitutto dipenderà dal contesto del discorso, ossia dal dominio dell’insieme che deve essere stabilito: il predicato ‘alta resistenza’ ha un dominio differente a seconda che ci si riferisca per esempio a costruzioni in terra cruda oppure in calcestruzzo armato. La MF dipenderà anche dalle altre classi che vengono utilizzate per coprire l’intero dominio: supponendo dato il dominio, una classe di resistenza ‘bassa’ avrà differente significato se il dominio è stato suddiviso nelle due classi ‘bassa’ e ‘alta’ piuttosto che in tre classi ‘bassa’, ‘media’ e ‘alta’. Ovviamente, il grado di appartenenza dipenderà in parte anche dal soggetto che esprime la valutazione.

Il ‘grado di appartenenza’ viene quindi valutato soggettivamente (ma non casualmente o arbitrariamente) in base alle personali conoscenze, alle esperienze, ai dati di laboratorio e di letteratura a disposizione, alle conoscenze teoriche dei fenomeni chimico-fisici, ecc. Esso

esprime quindi un giudizio, fondato su un complesso di dati, ma esprime anche in modo esplicito il grado di incertezza e ambiguità che ad esso si attribuisce.

Una conseguenza dell'appartenenza parziale di un elemento ad un insieme è che esso può appartenere anche ad insiemi diversi, rispondenti a predicati diversi, al limite anche mutuamente escludentisi secondo la logica ordinaria.

Il grado di appartenenza è fissato in termini convenzionali e la scelta di adottare un intervallo unitario è comoda ma arbitraria.

Si definisce altezza di un insieme fuzzy  $\tilde{A}$  assegnato:

$$ht(\tilde{A}) = \sup\{\mu_{\tilde{A}}(x) / x \in X\}$$

L'insieme fuzzy è detto 'normale' se  $ht(\tilde{A}) = 1$ .

In questo lavoro si adotterà che tutti gli insiemi fuzzy siano insiemi normali.

Si riportano di seguito alcuni esempi su come tali concetti possono essere applicati nel campo della Scienza e Tecnologia dei Materiali.

Una viscosità pari a  $970 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , in un dato contesto quale quello della reologia delle paste di calce, può appartenere in parte ad un insieme detto della 'viscosità bassa' e in parte anche ad un insieme detto della 'viscosità media', definiti ad esempio dalle funzioni di appartenenza riportate nella figura 3.1.

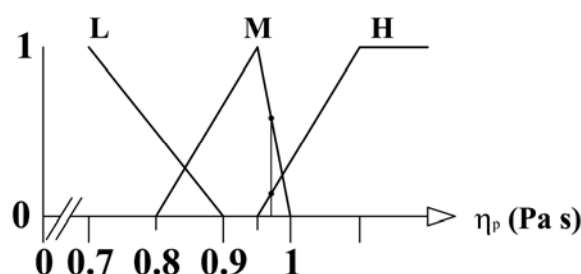


Figura 3.1 - Rappresentazione fuzzy dell'appartenenza a diversi insiemi della viscosità delle paste di calce.

M e H sono fuzzy sets contigui, ma non necessariamente sono anche complementari, ossia  $\mu_M(x) + \mu_H(x)$  può essere  $\neq 1$ .

Il termine 'classe' non è affatto sconosciuto nell'ambito della Tecnologia dei Materiali; ad esempio la UNI EN 206-1 [2001] definisce classi di consistenza, di resistenza, di esposizione o di massa volumica. Queste sono però definite in termini crisp, ma una definizione 'elastica' (fuzzy) risulterebbe non solo facilmente comprensibile ma anche del tutto ragionevole. In figura 3.2 si riporta la classificazione dell'aggressività ambientale (in termini di pH dell'acqua del terreno a contatto con l'opera) per i calcestruzzi, come definita in [UNI EN 206-1 2001] in classi denominate *debolmente* (XA1), *moderatamente* (XA2) e *fortemente* (XA3) *aggressiva*, ed una



possibile fuzzificazione della stessa. Questi aggettivi possono considerarsi come quantificatori fuzzy [COX 2005].

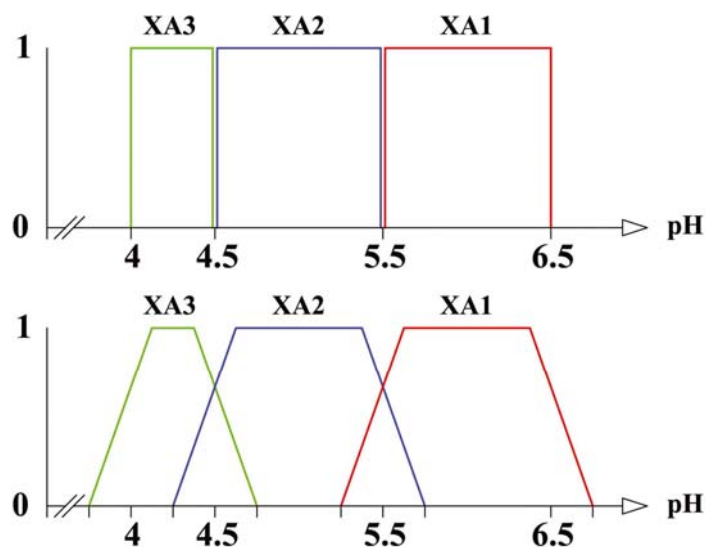


Figura 3.2 - Aggressività, come pH del terreno a contatto col calcestruzzo secondo la UNI EN 206-1 [2001], in termini crisp e fuzzy.

Come ulteriore esempio, si possono considerare alcune indicazioni contenute nelle Linee Guida del Ministero dei LL.PP. [MAURO 1997], secondo cui si definisce il 'grado di attacco' dello ione solfato contenuto nel terreno a contatto con opere in calcestruzzo (tabella 3.1).

Tabella 3.1 - Grado di attacco per il contenuto dello ione solfato nel terreno [MAURO 1997].

	GRADO DI ATTACCO		
	debole XA1	moderato XA2	forte XA3
$\text{SO}_4^-$ (mg/l)	200-600	600-3000	3000-6000
$\text{SO}_4^-$ (mg/kg)	2000-6000	6000-12000	> 12000

Supponendo che il valore medio di una serie di campionamenti su un terreno a contatto con un'opera in calcestruzzo sia pari a 7000 mg  $\text{SO}_4^-$ /kg, dovremmo [PEDEFERRI & BERTOLINI 1996; MAURO 1997] definire il grado di attacco dello ione solfato come moderato e non debole o forte, perché operiamo con le definizioni rigide 2000÷6000 mg  $\text{SO}_4^-$ /kg (debole), 6000÷12000 mg  $\text{SO}_4^-$ /kg (moderato), > 12000 mg  $\text{SO}_4^-$ /kg (forte), come mostrato in figura 3.3. In termini insiemistici ordinari stiamo sostenendo che la condizione caratterizzata da 7000 mg  $\text{SO}_4^-$ /kg appartiene all'insieme moderato e quindi non-appartiene agli insiemi debole o forte.

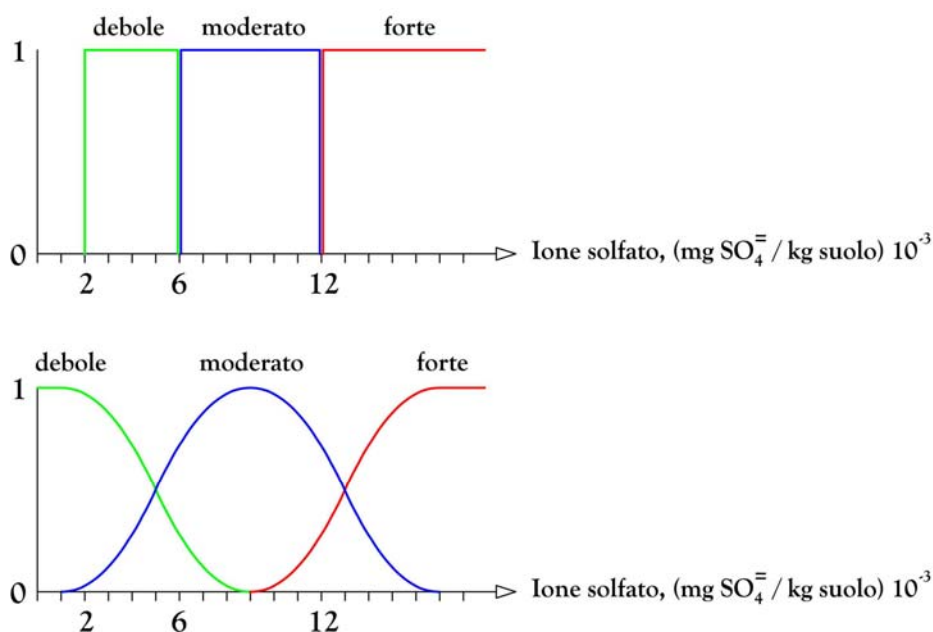


Figura 3.3 – Insiemi crisp e fuzzy del ‘grado di attacco’: debole / moderato / forte, per il contenuto di ione solfato nel terreno; rielaborato da dati in [MAURO 1997].

Adottando un approccio di tipo fuzzy invece, possiamo sostenere che la data condizione appartiene in parte all’insieme moderato ed in parte (anche) all’insieme debole (vedi figura 3.3).

Questo ultimo punto di vista ci pare decisamente più ragionevole di quello ordinario, anche considerando che sia la rappresentatività della misura che le caratteristiche dei materiali e lo stato delle nostre conoscenze complessive sul fenomeno inducono a mantenerci ‘sfocati’, cioè prudenti.

Tale classificazione ha delle conseguenze operative ben precise in termini di rapporto a/c massimo, contenuto minimo di cemento ecc., come mostrato in tabella 3.2.

Tabella 3.2 – Prescrizioni per cemento portland 32.5R, del tipo resistente ai solfati, diametro massimo dell’aggregato 20-32 mm [COLLEPARDI 2006].

	Rapporto a/c max	Quantità minima di cemento (kg/m <sup>3</sup> )	R <sub>ck</sub> (N/mm <sup>2</sup> )
XA1	0.55	300	37
XA2	0.50	320	37-40
XA3	0.45	350	45

La mancanza di gradualità caratterizza gli schemi di classificazione presenti nella Normativa (ma non solo!) e li rende artificiosamente lontani dal comune modo di sentire.

## 4 – MODELLAZIONE E APPROXIMATE REASONING

### 4.1 – CONSIDERAZIONI SUI MODELLI

La definizione e l'applicazione di 'modelli' si è sviluppata come una delle principali attività della ricerca scientifica in generale e in particolare dell'Ingegneria.

È opportuno richiamare alcune osservazioni di base sul significato e quindi sui limiti dei 'modelli', citando Hawking, uno dei più noti fisici teorici del XX secolo:

*“Per poter parlare della natura... e discutere problemi... occorre avere ben chiaro che cosa sia una teoria scientifica. Io adotterò qui la concezione ingenua che una teoria sia solo un modello... e un insieme di regole che mettono in relazione le quantità presenti nel modello con le osservazioni che facciamo nella realtà. Il modello esiste solo nella nostra mente e non ha alcun'altra realtà (qualsiasi cosa questa affermazione possa significare). Una teoria, per essere una buona teoria scientifica, deve soddisfare due richieste: descrivere con precisione una grande classe di osservazioni sulla base di un modello contenente solo qualche elemento arbitrario, e fare predizioni ben definite sui risultati di future osservazioni.*

*Qualsiasi teoria fisica è sempre provvisoria, nel senso che è solo un'ipotesi: una teoria fisica non può cioè mai venire provata. Per quante volte i risultati di esperimenti siano stati in accordo con una teoria, non si può mai essere sicuri di non ottenere la prossima volta un risultato che la contraddica.”*

*“Abitualmente noi scomponiamo il problema in varie parti e inventiamo teorie parziali. Ognuna di queste teorie descrive e predice una certa classe limitata di osservazioni, trascurando gli effetti di altre quantità, o rappresentandole per mezzo di semplici insiemi di numeri. Può darsi che questa impostazione sia completamente sbagliata.”*

[HAWKING 1988]

Questi concetti erano stati già introdotti nel 1926 da Smuts:

*“Vagueness, indefinite and blurred outlines, anything savoring of mysticism, was abhorrent to that great age of limited exactitude. The rigid categories of physics were applied to the indefinite and hazy phenomena of life and mind. Concepts were in logic as well as in science narrowed down to their most luminous points, and the rest of their contents treated as nonexistent. Situations were not seen as a whole of clear and vague elements alike, but were analyzed merely into their clear, outstanding, luminous points. A 'cause', for instance, was not taken as a whole situation which at a certain stage insensibly passes into another situation, called the effect. No, the most outstanding feature in the first situation was isolated and abstracted and treated as the cause of the most outstanding and striking feature of the next situation, which was called the effect. Everything between this cause and this effect was blotted out. .... This logic precision made it impossible to understand how the one passed into the other in actual causation.*

*There is no way out of this impasse but to retrace our steps and see that these concepts are partial and misleading abstractions.”*  
[SMUTS 1926]

Tradizionalmente i modelli sono espressi in forma matematica, ad esempio tramite una o più equazioni differenziali, risolvibili in modo ‘esatto’ o ‘analitico’ oppure ‘approssimato’ con procedure di Calcolo Numerico. Ad esempio, la cosiddetta ‘seconda legge di Fick’ è un modello della diffusione di carbonio in un processo di cementazione o del trasporto dello ione cloruro nello strato di copriferro nel cemento armato, oppure il cosiddetto ‘reticolo cubico a facce centrate’ è un modello geometrico del reticolo cristallino del ferro a 850°C, ecc.

Questi approcci per quanto eleganti e intellettualmente soddisfacenti, anche perché su di essi è basata la nostra formazione culturale, tuttavia non sono sempre necessariamente ‘efficienti’. Al riguardo si può citare un esempio ben noto nella letteratura fuzzy e nell’ambito dei controlli digitali e della sistemica in quanto spesso utilizzato come modello ‘fortemente’ non lineare sia nella didattica che nel testare nuove strategie di controllo: quello del pendolo inverso. Lo scopo è quello di ‘insegnare’ ad un robot a mantenere in equilibrio un’asta rigida attaccata con un perno ad una base motorizzata; il veicolo può muoversi avanti e indietro su un binario perciò per tenere l’asta in equilibrio è necessario variare in continuazione la velocità e il verso del moto (con un poco di esperienza un essere umano è in grado di mantenere l’equilibrio dell’asta sul palmo della mano... intuitivamente).

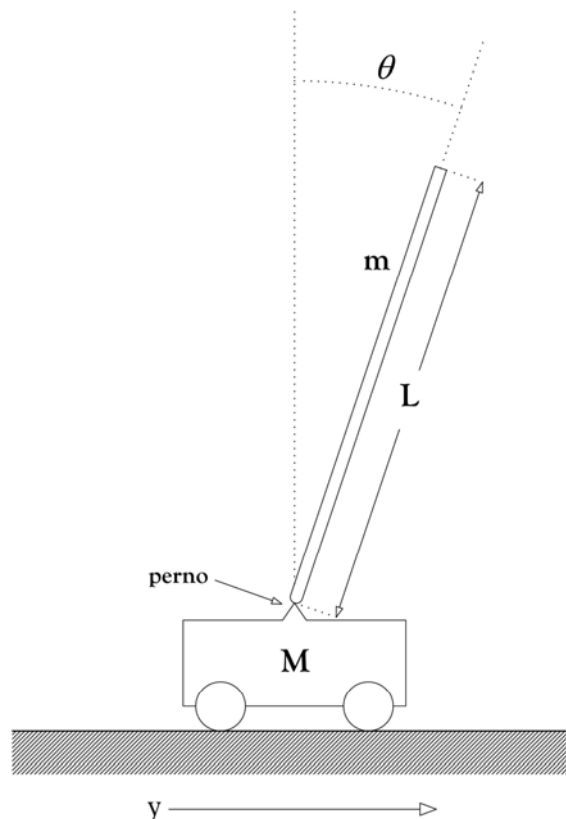


Figura 4.1 - Il pendolo inverso.

Il modello matematico ordinario consiste in quattro equazioni differenziali, di cui se ne riporta una come esempio, da cui si ricava la forza orizzontale  $H$  che agisce sul dispositivo:

$$H = my'' + m(L/2) \cdot (\theta'' \cos \theta - \theta'^2 \sin \theta)$$

nella quale  $y$  indica la posizione del veicolo sul binario ( $y''$  è la sua accelerazione),  $\theta$  è l'angolo formato dall'asta con la verticale ( $\theta'$  è la velocità angolare e  $\theta''$  è l'accelerazione angolare). Il tempo di risposta del dispositivo, legato alla risoluzione delle equazioni differenziali, affidato ad un computer attuale, si è rivelato nettamente superiore rispetto a quello ottenibile con un blocco di regole del tipo SE... E... ALLORA (IF/THEN). L'adozione di un modello fuzzy basato sull'utilizzo di sole sette regole IF/THEN semplici e apparentemente banali (tabella 4.1), risolve molto rapidamente il problema del controllo del dispositivo e del suo mantenimento in equilibrio. Il modello fuzzy ha come variabili di input l'angolo  $\theta$  e la sua derivata  $\theta'$ , fuzzificate nei 7 subset PP piccolo positivo, MP medio positivo, GP grande positivo, ZR zero, PN piccolo negativo, MN medio negativo e GN grande negativo. La variabile di output è  $y'$ , anch'essa fuzzificata in 7 subset.

Tabella 4.1 - Regole IF/THEN per modellare le condizioni necessarie all'equilibrio del pendolo inverso [SANGALLI 2000; COX 2005].

Regola	IF Angolo ( $\theta$ )	AND Velocità angolare ( $\theta'$ )	THEN Velocità ( $y'$ )
	IS	IS	IS
1	ZR	ZR	ZR
2	PP	PP	PP
3	MP	ZR	MP
4	PP	PN	ZR
5	MN	ZR	MN
6	PN	PN	PN
7	PN	PP	ZR

L'esempio riportato mostra che in ambito fuzzy la modellazione assume un carattere decisamente differente rispetto a quello tradizionale. In alcuni settori applicativi (controlli di singole apparecchiature o macchine o interi impianti industriali nell'industria chimica ed energetica, compreso il settore elettronucleare), tale nuovo approccio è ora largamente riconosciuto come un valido strumento, certamente non esclusivo ma, perlomeno, alla pari con altri.

Secondo alcuni ricercatori l'approccio fuzzy può sostituire efficacemente qualunque approccio tradizionale ed in qualsiasi settore della tecnologica e della scienza. Ben note al riguardo sono le affermazioni 'estremistiche' di KOSKO [1994]. Se questa è certamente una constatazione valida a livello di principio, tuttavia al di fuori delle tecniche di controllo occorre constatare che le applicazioni sono ancora limitate e debbono essere soggette, caso per caso, ad intenso studio. E questa è appunto l'ispirazione di questa Tesi, che esplora le possibilità della modellazione fuzzy nel settore dei fenomeni chimico-fisici della reologia, della resistenza meccanica e dei modelli di degrado dei materiali e delle strutture.

Esistono diversi tipi di modelli.

I **modelli narrativi** consistono nella rappresentazione formale di alcuni aspetti molto specifici; vengono utilizzati soprattutto nelle ricerche di mercato. La creazione di questi modelli consiste nell'elaborazione di una serie di questionari che vengono ripetutamente analizzati da Esperti per predire punti critici, margini di vendite o nuove tendenze del mercato.

I **modelli fisici** sono costruiti per valutare o testare alcuni sistemi fisici. Esempi di questo sono i modelli di velivoli utilizzati per i test nelle gallerie del vento, i modelli di ricostruzione e di rendering delle costruzioni in progetto, oppure i modelli utilizzati in chimica o biologia quali le rappresentazioni della molecola del DNA o il modello dell'anello benzenico.

I **modelli analogici** o similari utilizzano le proprietà di un sistema per descrivere quelle di un altro sistema caratterizzato da differenti forme fisiche. Questo tipo di approccio può essere utilizzato poiché esiste un'analogia o parallelismo tra i sistemi di forze che sovrintendono i due sistemi. Si utilizzano modelli analogici per lo sviluppo di modelli meccanici, elettrici, ecc.

I **modelli matematici** sono costituiti da equazioni, spesso interdipendenti tra loro, che legano le variabili o incognite del sistema e permettono una risoluzione matematica del problema. I modelli matematici comprendono anche i modelli statistici, i neural network e altre procedure di knowledge discovery.

I **modelli euristici**, chiamati anche modelli IF/THEN/ELSE possono essere considerati un mix tra i modelli visti in precedenza. Vengono oggi utilizzati negli Expert Systems e nei Decision Support Systems e possono riunire al loro interno elementi appartenenti ai modelli visti in precedenza quali dati numerici, esperienza soggettiva, regole empiriche, ecc. A differenza del modello matematico basato su equazioni, esso non è deducibile a priori; questo significa che il sistema di regole previsto deve essere verificato sperimentalmente, perchè a priori non si può dire nulla sulla sua validità [YAMAKAWA 1989].

*"The basic idea behind this approach was to incorporate the 'experience' of a human process operator in the design of the controller. From a set of linguistic rules which describe the operator's control strategy, a control algorithm is constructed where the words are defined as fuzzy sets. The main advantages of this approach seem to be the possibility of implementing 'rules of thumb' experience, intuition, heuristics, and the fact that it does not need a model for the process."*

[MAMDANI 1977]

Infine, un cosiddetto '**agent based model**' è basato sull'assunto che alcuni fenomeni possano essere modellati direttamente in termini di algoritmi più che in termini di equazioni. L'idea centrale è quella di avere parametri/variabili che interagiscono con altri secondo regole prestabilite. Questo tipo di modellazione in molti casi compete e spesso sostituisce i comuni modelli basati sull'uso di equazioni [OTTINO 2003].

La soluzione dei modelli matematici, eccetto i casi più semplici, richiede una serie di approssimazioni e l'inserimento di parametri empirici (costanti di ignoranza). Vedremo nei successivi capitoli, ad esempio, come la trattazione di un fenomeno apparentemente ben noto quale la formazione del ghiaccio all'interno della matrice porosa di un materiale porti alla formulazione di modelli matematici certamente complessi e sui quali non sussiste concordanza. Nei nostri contesti il più delle volte comunque il numero delle variabili coinvolte è tale da rendere impossibile una precisa modellazione matematica.

## 4.2 – LE REGOLE IF/THEN

Il concepire la conoscenza come un gruppo di regole è un concetto che si può far risalire ad Aristotele.

Un processo di ragionamento basato su regole che incorpora i concetti di insieme fuzzy, operatori fuzzy, ecc., è chiamato ‘approximate reasoning’. Questi processi fanno parte della più ampia famiglia ora nota come ‘soft computing’ e che prevede tra i suoi componenti anche ‘neural networks’, ‘evolutionary computations’, ‘probabilistic and evidential reasoning’, ‘multivalued logic’, ecc.

Vengono definite rules espressioni del tipo:

IF ... premise/antecedent ... THEN ... outcome/consequent,

in particolare:

IF x is X AND y is Y ... AND z is Z THEN w is W.

Una regola (rule) specifica una relazione fuzzy. Le rules sono delle espressioni che riassumono una frazione della conoscenza funzionale delle variabili ed operano sul livello dei gradi di appartenenza delle variabili indicate.

Ci sono due tipi di regole: condizionate e non-condizionate; le prime sono eseguite solo quando la premessa (predicato) della regola è vera, ad esempio IF A is Z THEN B is Y, l’espressione in uscita ‘B is Y’ è attivata (ad un certo grado) quando la premessa o predicato ‘A is Z’ è vera (ad un certo grado). La regola non-condizionata è invece sempre eseguita, ad esempio ‘C is X’ definisce una relazione fuzzy che viene sempre eseguita prima di qualsiasi altra regola condizionata. Un modello con quest’ultimo tipo di regole è utile nelle situazioni nelle quali le premesse delle regole condizionate non sono verificate, perché comunque viene garantito un output.

Il complesso costituito dalle variabili riconosciute, dalle loro membership functions e dalle rules costituisce la ‘Knowledge Base’ (KB) del modello fuzzy e raccoglie tutti i dati, le informazioni e financo le esperienze degli Esperti su un particolare fenomeno.

Le rules della KB possono essere definite in due modi: esse possono essere scritte da un Esperto del settore (o da un team di Esperti opportunamente coordinato) oppure, in presenza di un’ampia banca dati delle variabili, è possibile attuare procedure informatizzate di data mining. Una KB può consistere sia di regole condizionate, sia di regole non-condizionate. Tutte le regole vengono eseguite in parallelo e contribuiscono alla generazione dell’insieme fuzzy associato con le variabili in uscita.

Raramente nella pratica è sufficiente applicare un’unica regola del tipo IF/THEN, ma più spesso la KB è composta da tante regole. Il numero delle regole non è dato dalla combinazione lineare del numero dei subset delle variabili coinvolte, poiché non tutte le regole sono fisicamente possibili: ad esempio qualche combinazione tra variabili del sistema potrebbe risultare incompatibile dal punto di vista fisico; perciò si considerano solamente quelle che possono descrivere il fenomeno oggetto di indagine.

A ciascuna regola del KB può essere associato un grado di ‘effectiveness’ [COX 2005]; ad esempio in un caso di 4 variabili:

$$E(R_i) = \mu(x) \cdot \mu(y) \cdot \mu(z) \cdot \mu(w) ,$$

in cui  $\cdot$  indica il prodotto ordinario.

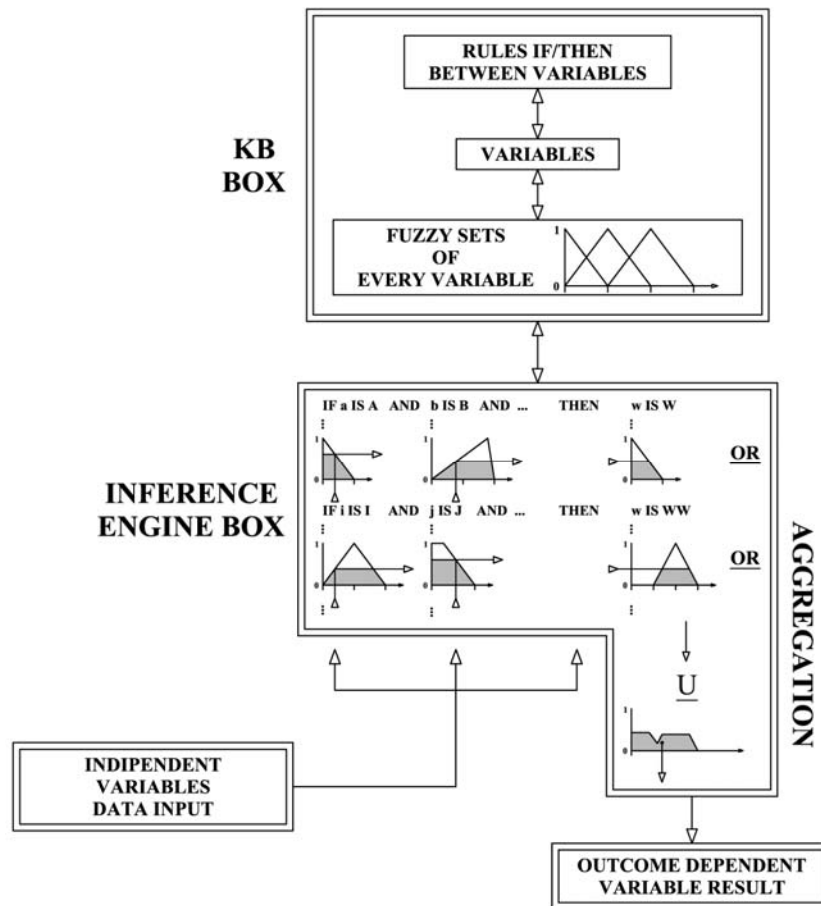


Figura 4.2 - Architettura della KB e dell'inferenza.

Ci sono due metodi per valutare il blocco delle regole costituenti la KB: il primo è noto con l'acronimo FITA (First Infer Then Aggregate), il secondo con la sigla FATI (First Aggregate Then Infer).

Nel caso dell'approccio FITA la singola regola ( $R_i$ ) ha un risultato (output) derivante dall'intersezione (operatore logico AND); quanto detto si traduce nella formula:

$$\mu_i'(w) = (\mu(x_0) \wedge \mu(y_0) \wedge \mu(z_0) \wedge \mu(w))_i ,$$

in cui  $\wedge$  indica il minimo (operatore AND) e significa che se  $x (= x_0)$  ha un grado di appartenenza in X,  $y (= y_0)$  un grado di appartenenza in Y e ...  $z (= z_0)$  un grado di appartenenza in Z, allora  $w$  avrà un corrispondente grado di appartenenza in W.

La valutazione finale, globale, della variabile dipendente nasce dalla combinazione (aggregazione) degli output derivanti dalle singole rules; per N rules si può porre:

$$\mu''(w) = \bigvee_{i=1}^N \mu_i'(w) ,$$



in cui  $\vee$  indica il massimo (operatore OR).

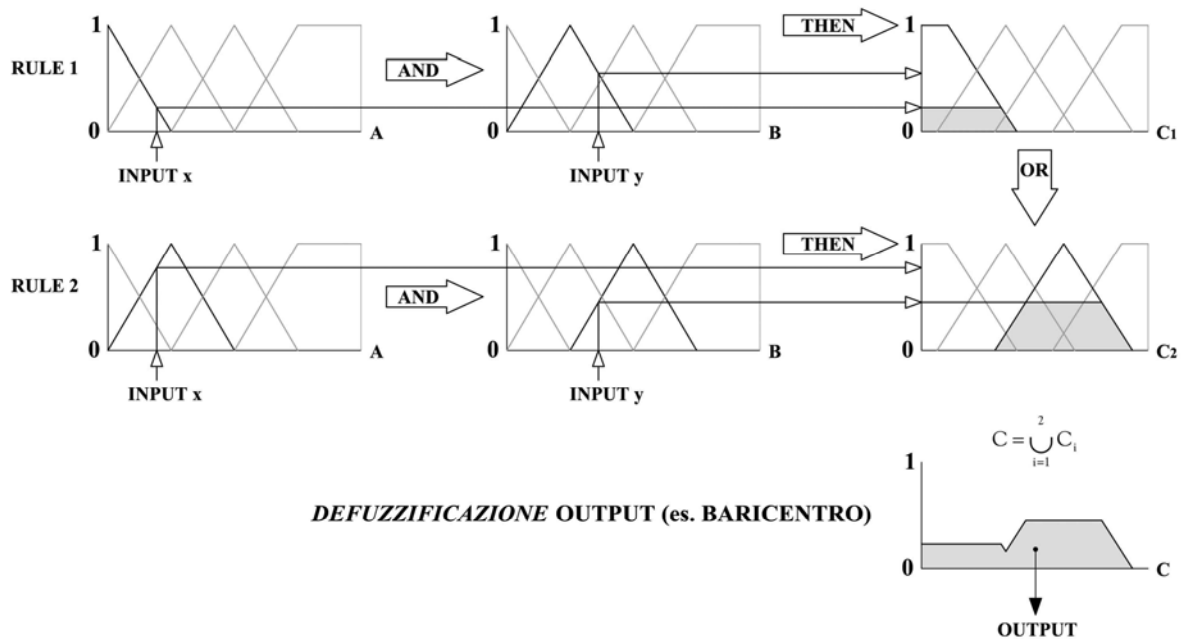


Figura 4.3 - Rappresentazione grafica del procedimento FITA.

Che questa formula corrisponda ad una sequenza di intersezioni e di unione è strettamente legato al concetto di appartenenza parziale; l'intersezione riguarda le condizioni 'a comune' e la comunanza di un termine tra più insiemi può riscontrarsi solo al suo 'livello più basso'; viceversa l'unione.

La procedura FATI, invece, attua prima l'aggregazione e poi l'intersezione.

La 'defuzzificazione' è un metodo che consente di assegnare un unico numero reale ad un fuzzy set di numeri reali. Esistono diversi procedimenti di defuzzificazione: il più comune è quello del baricentro o centro di gravità del fuzzy set. Il centro di gravità consente di ottenere come output finale una 'media pesata' della membership function. Per la defuzzificazione si può anche utilizzare il valore corrispondente al più alto grado di appartenenza in C (oppure il valore medio se ce ne sono diversi) ed in particolare si può decidere a priori di non considerare nel computo le 'code' con un grado di appartenenza inferiore ad un prestabilito valore, ad esempio 0.2. In figura 4.4 sono mostrate le rappresentazioni grafiche delle metodologie citate.

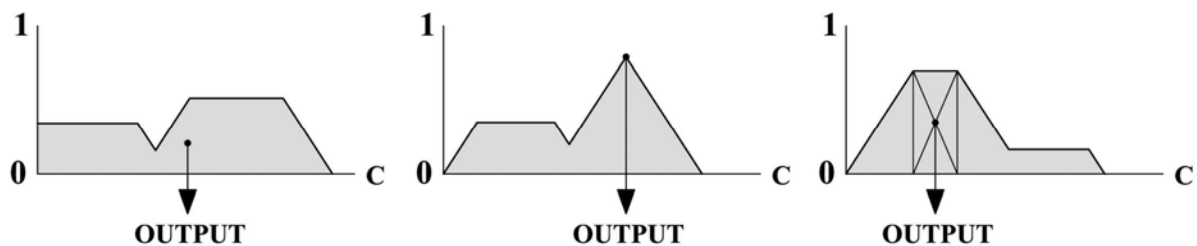


Figura 4.4 - Rappresentazione grafica di alcuni metodi di defuzzificazione.

L'operazione di defuzzificazione è indispensabile in procedure quali il controllo di macchine, ad esempio un elettrodomestico, che viene necessariamente effettuato tramite valori discreti di grandezze fisiche quali corrente o tensione elettrica.

La defuzzificazione ha quindi il vantaggio di ottenere un numero crisp ma, in altri casi, ha lo svantaggio di portare alla perdita delle sfumature e delle informazioni che invece possiede il fuzzy set da cui esso deriva.

Nelle applicazioni che saranno discusse nella Parte II di questa Tesi alcune delle procedure saranno implementate su programmi che forniscono un output finale ottenuto per defuzzificazione tramite il metodo del baricentro.

I 'modelli fuzzy' possono essere impiegati come approssimatori di funzioni non precisamente note. Il cosiddetto 'Fuzzy Approximation Theorem, FAT' garantisce che il campo di qualsiasi funzione non formulabile analiticamente può essere 'coperto' da un adeguato blocco di rules:

*"Knowledge is rules. Rules are patches. Patches cover the curve of a system... A FAT system can always turn inputs to outputs and turn causes to effects and turn questions to answers... a fuzzy system can model or approximate any system...."*  
[KOSKO 1994]

In via di principio è evidente che qualsiasi funzione non esprimibile analiticamente o ignota, rappresentativa di un fenomeno complesso sul quale esistono delle conoscenze (che comunque consapevolmente o inconsapevolmente utilizziamo o utilizzeremo per prendere delle decisioni), può essere approssimata attraverso un blocco di rules. L'idea alla base del FAT è che qualsiasi funzione anche la più complessa, non lineare e sconosciuta possa essere approssimata attraverso l'uso dell'approccio fuzzy. Il principio di funzionamento è quello di approssimare la funzione attraverso una serie di 'patch', ciascuna delle quali rappresenta un frammento di conoscenza del fenomeno, per esempio le conoscenze teoriche parziali, i dati di laboratorio, l'esperienza soggettiva, ecc. L'unione delle 'patch' serve per coprire l'intera funzione (figura 4.5).

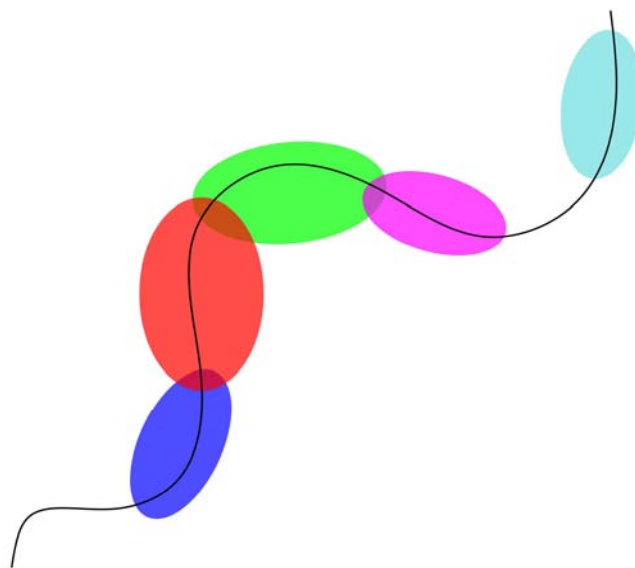


Figura 4.5 - Rappresentazione delle 'patch' che coprono e approssimano la funzione incognita.

Il FAT theorem viene operativamente applicato attraverso l'utilizzo della regole IF/THEN. Supponiamo di avere come variabile indipendente  $x$  e come variabile dipendente  $z$  (figura 4.6); procedendo alla loro fuzzificazione si costruisce la KB del fenomeno in oggetto attraverso una serie di regole IF/THEN. Supponendo di fuzzificare ciascuna delle variabili nei 5 fuzzy subsets VL, L, M, H e VH, la combinazione lineare delle regole fornisce un numero totale di 25 regole; tuttavia non tutte le regole sono fisicamente opportune (in fisica è possibile tutto ma non tutto è probabile), per esempio potrebbe risultare incompatibile dal punto di vista fisico la combinazione  $a=VL$  e  $b=VL$ , perciò si considerano solamente quelle che possono descrivere il fenomeno e che approssimano l'andamento della funzione.

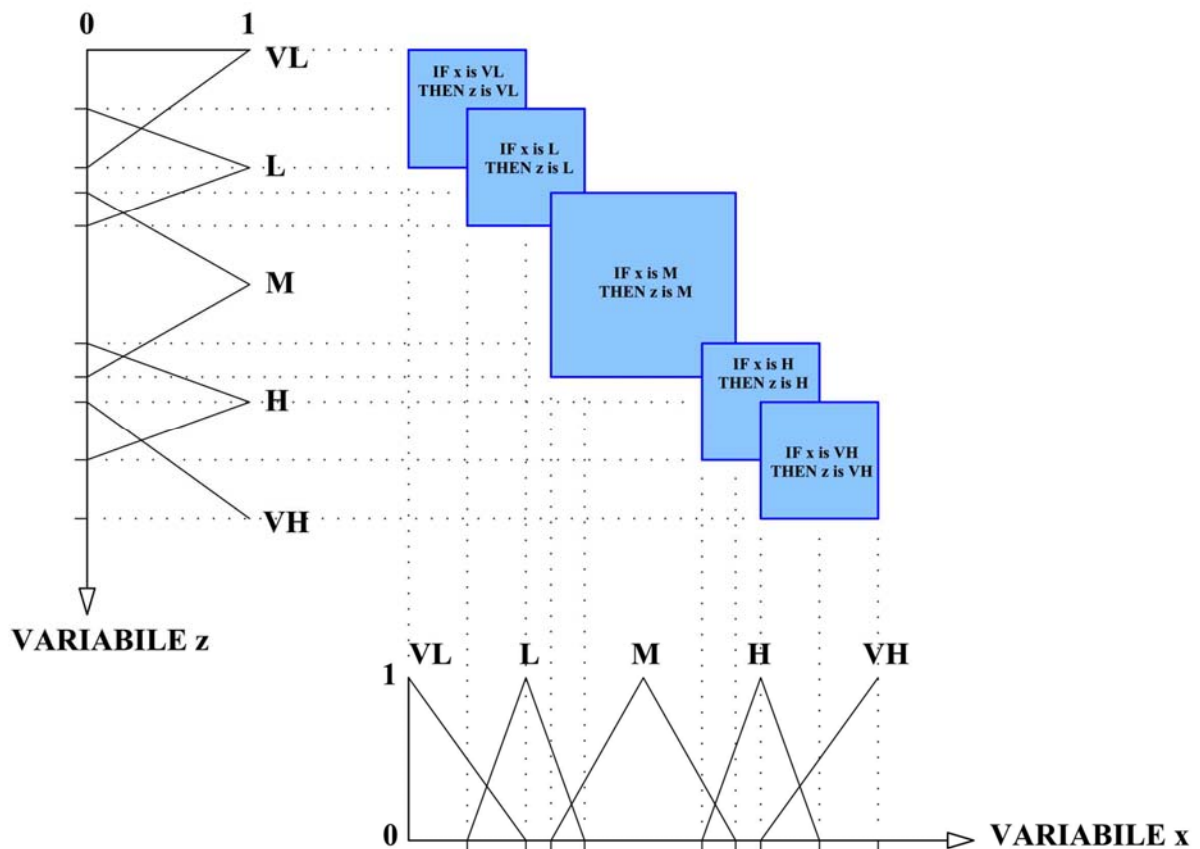


Figura 4.6 - Regole IF/THEN tra 2 variabili  $x$  e  $z$  per l'approssimazione della funzione secondo il FAT.

A regole approssimate corrispondono delle 'patch' grandi, mentre affinando la conoscenza e quindi aumentando il numero delle regole a disposizione queste diventano sempre più piccole. La figura 4.7 mostra come l'approssimazione possa essere ridotta man mano che crescono gli elementi di informazione a disposizione. Nel caso limite gli insiemi fuzzy diventano punti e quindi perdono il loro carattere fuzzy fino a coincidere con la funzione cercata.

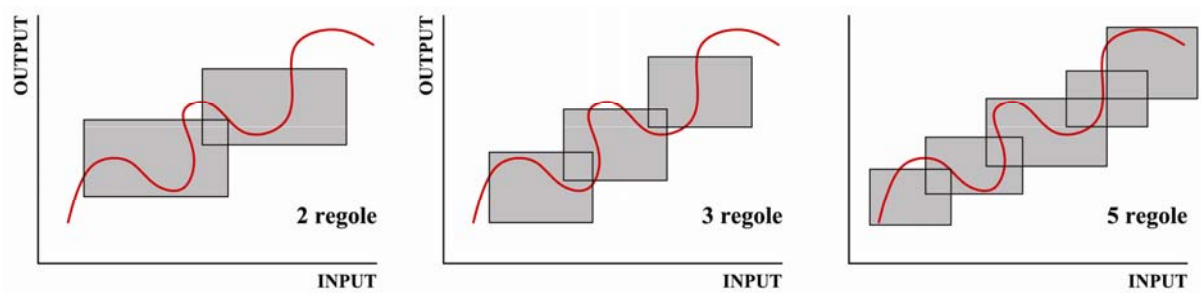


Figura 4.7 - Illustrazione del FAT su un'ipotetica funzione incognita; aumento della 'mappatura' al crescere del numero di regole definibili.

### 4.3 – GRAFICA DELLE FUZZY RELATIONS

Utilizzeremo di seguito (capitolo II-4) delle rappresentazioni grafiche per esprimere il complesso delle relazioni che legano le variabili introdotte nei modelli di durabilità. Esse costituiscono un utile supporto operativo per la stesura delle regole IF/THEN; in questo paragrafo si mostra l'equivalenza tra regole IF/THEN e rappresentazione grafica 'nodi-legami', in quanto entrambe espressioni delle 'fuzzy relations'; esse sono talvolta denominate fuzzy cognitive maps, FCM [KOSKO 1994].

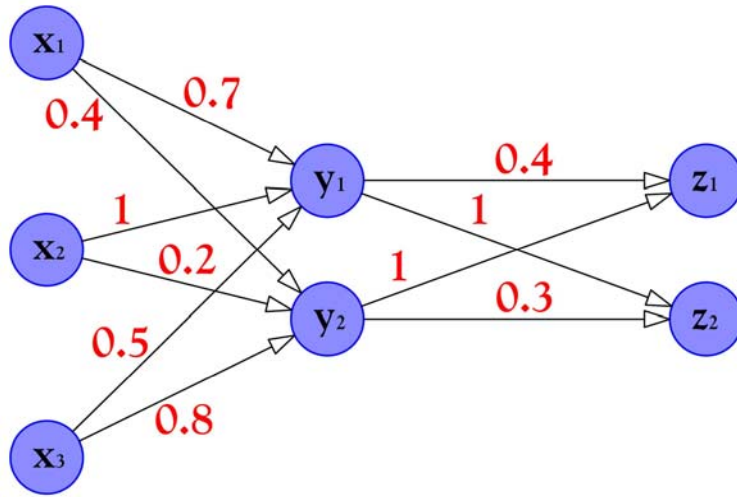
È noto che in ambito crisp (non-fuzzy o ordinario) se  $X$  e  $Y$  sono due insiemi allora si può porre  $X \times Y$  come l'insieme delle coppie ordinate  $(x, y)$  con  $x \in X$  e  $y \in Y$ . La relazione  $R$  tra  $X$  e  $Y$  è quindi un sottoinsieme  $R \subseteq X \times Y$  tale che se  $R(x, y) = 1$  significa che  $x$  e  $y$  sono associati tramite la  $R$  mentre se  $R(x, y) = 0$  allora  $x$  e  $y$  non sono legati. Tra più relazioni  $R_1, R_2, \dots, R_n$  possono formularsi le espressioni di unione  $\cup$ , intersezione  $\cap$ , complementazione  $^c$ , ecc.

Quanto sopra richiamato si estende quindi agevolmente in ambito fuzzy; in questo caso  $\bar{R}(x, y)$  potrà assumere tutti i valori tra 0 e 1 e costituirà una valutazione della forza del legame tra le due variabili  $x$  e  $y$ . Anche in questo caso è possibile considerare l'unione, l'intersezione e la complementazione tra più relazioni (fuzzy).

*“While a crisp relation represent just the presence or absence of interaction or association among elements of fine ....., the values of the membership function of a fuzzy relation represent degrees of....”*

*[Dubois & Prade 2000]*

La figura 4.8 mostra una tipica rappresentazione grafica e matriciale di due relazioni  $\bar{R}_1$  e  $\bar{R}_2$  e di come esse concorrono a legare gli input  $x_i$  agli output  $z_j$ .



$$\bar{R}_1 = \begin{pmatrix} 0.7 & 0.4 \\ 1.0 & 0.2 \\ 0.5 & 0.8 \end{pmatrix}$$

$$\bar{R}_2 = \begin{pmatrix} 0.4 & 1.0 \\ 1.0 & 0.3 \end{pmatrix}$$

$$\bar{R}_3 = \bar{R}_1 \circ \bar{R}_2 = \begin{pmatrix} 0.4 & 0.7 \\ 0.4 & 1.0 \\ 0.8 & 0.5 \end{pmatrix} = \max\{\min(1.0, 0.4), \min(0.2, 1.0)\} = 0.4$$

Figura 4.8 - Esempio di relazione INPUT/OUTPUT tramite fuzzy relations.

La comparazione (o) tra  $\bar{R}_1$  e  $\bar{R}_2$  viene attuata dalla relazione generale:

$$\bar{R}_k(x, y) = \max_y \{ T(\bar{R}_i(x, y), \bar{R}_j(x, y)) \}$$

essendo T una t-norm, generalmente  $T_m = \min$ . T è espressione della relazione fuzzy in  $X \times Z$  per la t-norm T (e sarà in generale differente utilizzando t-norm differenti). Utilizzando il calcolo matriciale le operazioni di moltiplicazione sono sostituite da min e quelle di addizione da max (vedi figura 4.8).

La più semplice formulazione delle regole IF/THEN è:

IF x IS  $\bar{A}$  THEN z IS  $\bar{C}$

perciò, posto il dato  $x = \bar{A}$  calcoliamo  $z = \bar{C}$ ; in simboli  $\bar{C}' = \bar{A}' \circ \bar{R}$  essendo R la fuzzy relation tra l'input x e l'output z, essendo:

$$\bar{C}'(z) = \sup_x \{ \min(\bar{A}'(x), \bar{R}(x, z)) \}$$

ne consegue l'equivalenza tra un blocco di regole IF/THEN, la rappresentazione grafica 'nodi/legami' e la sua espressione matriciale.

## 5 – NUMERI FUZZY

### 5.1 – DEFINIZIONI

Con l'espressione 'numero fuzzy' si intende un numero caratterizzato da una certa funzione di appartenenza (distribuzione di possibilità). Esso è quindi un particolare sotto-insieme fuzzy dell'insieme dei numeri reali, o dell'insieme dei numeri interi, ecc. Un numero fuzzy può essere per esempio definito con un'espressione linguistica del tipo 'molto più grande di ...' oppure 'approssimativamente ...' [KANDEL 1986; COX 2005].

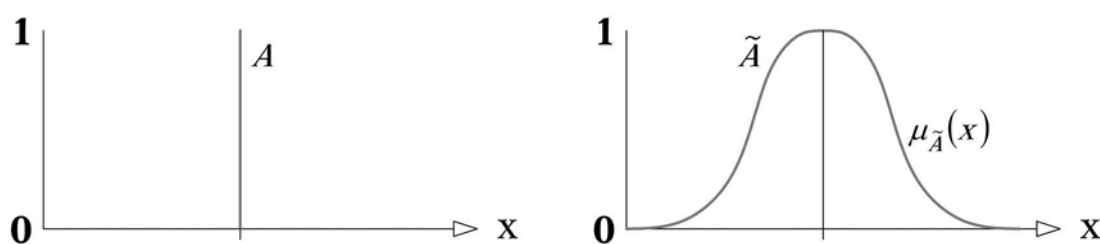


Figura 5.1 – Numero crisp A vs numero fuzzy 'approssimativamente  $\tilde{A}$ '.

Il fuzzy number è quindi una estensione, intuitiva e naturale, del concetto di numero, è una rappresentazione conveniente di concetti imprecisi e contiene più informazioni rispetto ad un numero crisp. '2' e '4' sono numeri interi; 'circa 2' e 'tra 3 e 4' sono numeri fuzzy, definibili tramite funzioni di appartenenza, ad esempio come mostrato nella figura 5.2 [DUBOIS & PRADE 2000; BUCKLEY & ESLAMI 2002].

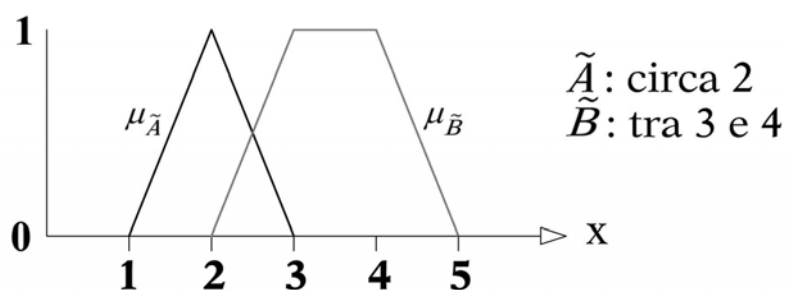


Figura 5.2 – Esempi di numeri fuzzy.

Nel caso specifico delle misure è ben noto che un numero di per sé non è completamente rappresentativo (il valore 'vero' di una grandezza misurabile non esiste, se non nella accezione relativa di 'valore assunto come standard'). La soluzione ordinaria a ciò è nella trattazione statistica dei numeri derivanti da un insieme di misure che ad un valore rappresentativo (media, mediana, ecc.) associa un secondo numero come misura della dispersione (deviazione standard, percentili, ecc.). Perciò, che espressioni del tipo 'circa 2' abbiano ragione d'essere nel discorso scientifico può suscitare una legittima perplessità e sembrare un anacronistico ritorno a concezioni pre-scientifiche. Al contrario, invece, l'impiego di numeri fuzzy consente ai dati scientifici di essere trattati in contesti nei quali non si può parlare di 'probabilità' ma solo di

‘possibilità’ [DUBOIS & PRADE 2000]. Ma la potenza del concetto si manifesta quando è necessario esprimere la valutazione numerica di una stima.

Alcuni utili termini sono quelli di specificità, precisione (vedi figura 5.3) e ‘expectancy’.

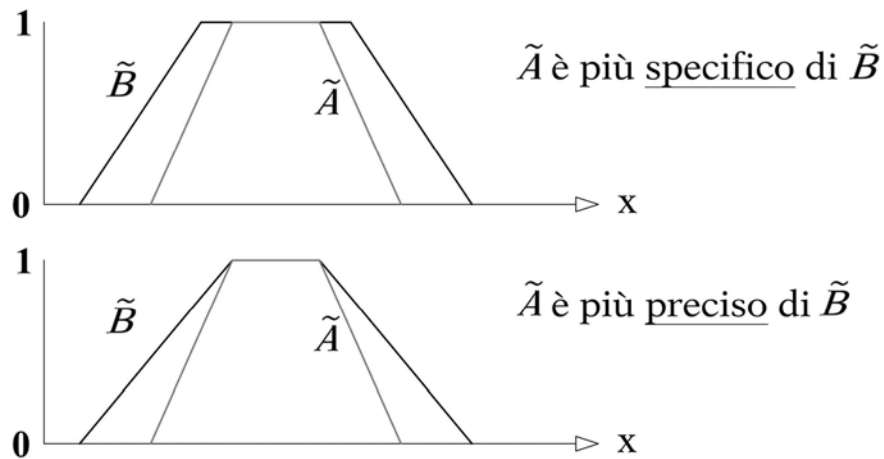


Figura 5.3 - Caratteristiche di due numeri fuzzy  $\tilde{A}$  e  $\tilde{B}$ .

La ‘larghezza’ o estensione del numero fuzzy sull’asse delle ascisse è detta ‘expectancy’; essa è misurata dal centro del numero fuzzy e costituisce una misura dell’‘elasticità’ del numero.

Nell’ambito delle Decision Analysis, quali quelle che verranno utilizzate nel presente lavoro al capitolo II-5, vengono richieste due caratteristiche fondamentali ai numeri fuzzy: la normalità e la convessità.

Come già visto per gli insiemi fuzzy, la normalità implica che esista almeno un punto completamente compatibile col predicato; in termini matematici:

$$\exists x \in X / \sup \{ \mu_{\tilde{A}}(x) \} = 1$$

La convessità implica che i punti  $x$  di  $\tilde{A}$  col massimo valore del grado di appartenenza sono raggruppati in un dato intervallo:

$$\mu[\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2] \geq \min [\mu_{\tilde{A}}(x_1), \mu_{\tilde{A}}(x_2)], x_1, x_2 \in \tilde{A} \text{ e } \lambda \in [0, 1]$$



## 5.2 – OPERAZIONI

Le operazioni con i numeri fuzzy possono essere condotte in due modi.

Il primo consiste nell'applicare il **principio di estensione**, che fornisce una generale estensione dei concetti applicabili agli enti non fuzzy anche in ambiente fuzzy. È quindi un'identità che permette di estendere una relazione dai punti di X ai subsets fuzzy di X.

Detti  $\tilde{A}$  e  $\tilde{B}$  due numeri fuzzy caratterizzati dalle funzioni di appartenenza  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  e  $\mu_{\tilde{B}}(x)$  allora, secondo il principio di estensione, la funzione di appartenenza dell'operazione 'estesa' tra i due numeri, è definita dalla relazione:

$$O(z) = \sup \{ T(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(y)) / z = x (+, -, \cdot, \div) y \}$$

in cui T rappresenta una t-norm.

Il secondo metodo consiste nel procedere tramite gli  $\alpha$ -cuts, utilizzando la cosiddetta matematica degli intervalli, e quindi le operazioni tra i numeri fuzzy  $\tilde{A}$  e  $\tilde{B}$  (vedi figura 5.4) si effettuano nel seguente modo:

$$[a, b] + [c, d] = [a + c, b + d]$$

$$[a, b] - [c, d] = [a - d, b - c]$$

$$[a, b] \cdot [c, d] = [\min(a \cdot c, a \cdot d, b \cdot c, b \cdot d), \max(a \cdot c, a \cdot d, b \cdot c, b \cdot d)]$$

$$\text{se } a > 0 \text{ e } c > 0 \quad \Rightarrow \quad [a, b] \cdot [c, d] = [a \cdot c, b \cdot d]$$

$$[a, b] / [c, d] = [a, b] \cdot [1/d, 1/c]$$

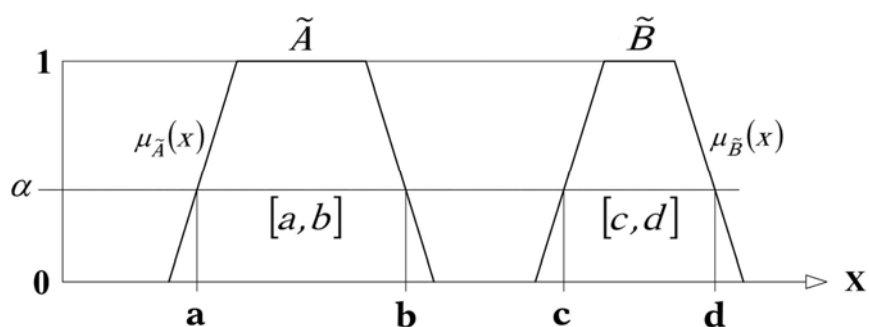


Figura 5.4 - Rappresentazione di due numeri fuzzy trapezoidali  $\tilde{A}$  e  $\tilde{B}$ .

I due metodi portano allo stesso risultato se come t-norm si adotta  $T = \min(\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}})$ .

Come può osservarsi in figura 5.5, le operazioni di somma e di sottrazione permettono di mantenere la forma del numero fuzzy iniziale, mentre questo avviene solo approssimativamente nel caso delle operazioni di moltiplicazione e divisione.

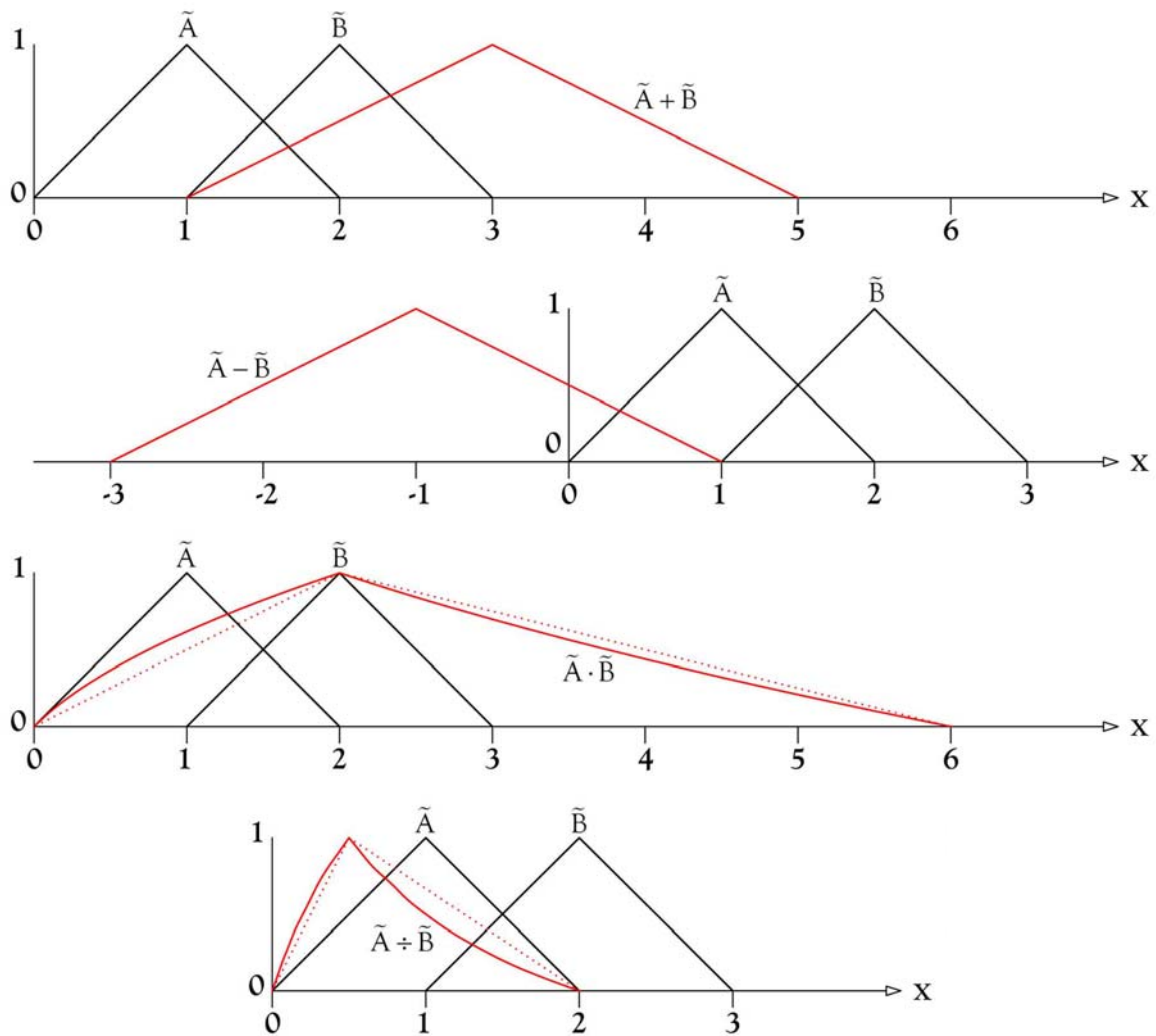


Figura 5.5 - Rappresentazione delle quattro operazioni tra due numeri fuzzy triangolari  $\tilde{A}$  e  $\tilde{B}$ .

La non linearità eventualmente conseguente alle operazioni di moltiplicazione e divisione non ha, come visto, influenza sui punti estremi e sui valori corrispondenti al massimo della funzione di appartenenza, pertanto, nel caso di numeri fuzzy trapezoidali, questi vengono in generale definiti nel seguente modo, e vengono assunti come rappresentazione del numero nella sua interezza:

$$\begin{aligned} \tilde{A} + \tilde{B} &= (a_1, a_2, a_3, a_4)(+)(b_1, b_2, b_3, b_4) = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3, a_4 + b_4) \\ \tilde{A} - \tilde{B} &= (a_1, a_2, a_3, a_4)(-)(b_1, b_2, b_3, b_4) = (a_1 - b_4, a_2 - b_3, a_3 - b_2, a_4 - b_1) \\ \tilde{A} \cdot \tilde{B} &= (a_1, a_2, a_3, a_4)(\cdot)(b_1, b_2, b_3, b_4) = (a_1 \cdot b_1, a_2 \cdot b_2, a_3 \cdot b_3, a_4 \cdot b_4) \\ \tilde{A} \div \tilde{B} &= (a_1, a_2, a_3, a_4)(\div)(b_1, b_2, b_3, b_4) = (a_1 \div b_4, a_2 \div b_3, a_3 \div b_2, a_4 \div b_1) \end{aligned}$$

### 5.3 – DISTANZA E ORDERING

Nelle Decision Analysis quali quelle che verranno affrontate nel capitolo II-5, i numeri fuzzy sono spesso impiegati per la valutazione delle possibili alternative. La scelta tra queste viene effettuata attraverso l'ordering che è un'operazione di collocamento dei termini dal più piccolo al più grande. Preliminare a questa trattazione è quindi la definizione del concetto e dell'operatività di 'distanza'.

La definizione di distanza  $d$  tra due numeri reali  $x$  e  $y$  è ben nota. La funzione  $d$  usata per il calcolo della distanza è una metrica. Le proprietà di base che una metrica deve soddisfare sono:

$$\begin{aligned} d(x, y) &\geq 0 \\ d(x, y) &= d(y, x) \\ d(x, y) &= 0 \Leftrightarrow x = y \\ d(x, y) &\leq d(x, z) + d(z, y) \end{aligned}$$

Anche nel caso dei numeri fuzzy  $\tilde{A}$  e  $\tilde{B}$  è necessario definire una metrica  $D$  che soddisfi le 4 proprietà viste, ma le metriche (o pseudo-metriche) definibili sono numerose [VOXMAN 1998; KURANO, YASUDA, NAKAGAMI, YOSHIDA 2000].

Riguardo all'ordering come operazione della Decision Analysis, è evidente che una prima possibile metodologia di confronto può essere basata sulla defuzzificazione del numero, cioè associando all'intera distribuzione un numero reale rappresentativo di essa, ad esempio quello baricentrico. Naturalmente questa trasformazione ha lo svantaggio di perdere parte delle informazioni insite e l'approccio che viene perseguito proprio attraverso l'utilizzo delle grandezze fuzzy [VOXMAN 1998].

In alcuni casi la separazione tra i numeri risulta sufficientemente accentuata, particolarmente se i numeri fuzzy sono triangolari, in questi casi l'approccio 'intuizionistico' (il numero fuzzy maggiore è quello con il punto vertice  $\mu_{\tilde{A}}(x)=1$  più a destra e con il più stretto supporto) è adeguato per il rating.

Per ADAMO [1980] il criterio ordinatore può essere costruito considerando l'estremo destro (che è un numero reale, non fuzzy) di un prescelto  $\alpha$ -cut, ad esempio per  $\alpha = 0.5$ ; questa procedura è ragionevole [WANG & KERRE 2001] e semplice.

TRAN & DUCKSTEIN [2002] propongono di valutare la distanza di ogni fuzzy number dai due numeri obiettivo definibili come 'massimo',  $M$ , e 'minimo',  $m$ , in modo che il ranking più alto spetti al fuzzy number che ha la minore distanza da  $M$  e la maggiore distanza da  $m$ . La scelta di  $M$  e  $m$  è tale che essi siano numeri che si pongono francamente alla destra/alla sinistra, rispettivamente, dei supporti di tutti i fuzzy numbers considerati. Le formule seguenti danno il quadrato della distanza assumendo un uguale peso (1) per i differenti livelli  $\alpha$  di ciascun numero  $\tilde{N}$  triangolare avente vertici  $n_1, n_2$  e  $n_3$ :

$$\begin{aligned} d^2[\tilde{N}, M; 1] &= (n_2 - M)^2 + \frac{1}{3}(n_2 - M)[(n_3 + n_1) - 2M] + \frac{1}{18}[(n_3 - n_2)^2 + (n_2 - n_1)^2] \\ &- \frac{1}{18}[(n_2 - n_1)(n_3 - n_2)] \end{aligned}$$

$$d^2[\tilde{N}, m; 1] = (n_2 - m)^2 + \frac{1}{3}(n_2 - m)[(n_3 + n_1) - 2m] + \frac{1}{18}[(n_3 - n_2)^2 + (n_2 - n_1)^2] - \frac{1}{18}[(n_2 - n_1)(n_3 - n_2)]$$

Per i numeri fuzzy trapezoidali  $n_1, n_2, n_3$  e  $n_4$  valgono le formule seguenti:

$$d^2[\tilde{N}, M; 1] = \left(\frac{n_2 + n_3}{2} - M\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{n_2 + n_3}{2} - M\right)[(n_4 - n_3) - (n_2 - n_1)]\frac{1}{3}\left(\frac{n_3 - n_2}{2}\right)^2 + \frac{1}{6}\left(\frac{n_3 - n_2}{2}\right)[(n_4 - n_3) + (n_2 - n_1)] + \frac{1}{9}[(n_4 - n_3)^2 + (n_2 - n_1)^2] - \frac{1}{9}[(n_2 - n_1)(n_4 - n_3)]$$

$$d^2[\tilde{N}, m; 1] = \left(\frac{n_2 + n_3}{2} - m\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{n_2 + n_3}{2} - m\right)[(n_4 - n_3) - (n_2 - n_1)]\frac{1}{3}\left(\frac{n_3 - n_2}{2}\right)^2 + \frac{1}{6}\left(\frac{n_3 - n_2}{2}\right)[(n_4 - n_3) + (n_2 - n_1)] + \frac{1}{9}[(n_4 - n_3)^2 + (n_2 - n_1)^2] - \frac{1}{9}[(n_2 - n_1)(n_4 - n_3)]$$

Tuttavia il problema, nei suoi termini generali, non ha ancora una riconosciuta univoca soluzione; le procedure proposte sono ormai decine [WANG & KERRE 2001].

## PARTE II



Sino a pochi anni fa l'attività del Restauro sui Beni Culturali era legata pressoché esclusivamente ad un numero ristretto di interventi, su opere d'arte eccezionali sottoposte a rischi grossi ed immediati, condotti senza limitazioni di tempo e di mezzi, da ristretti teams di specialisti, veri e propri artisti essi stessi.

Gli interventi necessari, 'd'urgenza' come venivano burocraticamente denominati, sui siti archeologici erano viceversa generalmente condotti con idee, maestranze, tempi, metodi e materiali dell'edilizia corrente, anche se non mancarono interventi 'innovativi' quali l'utilizzo di pannelli in materiali polimerici come nella copertura del teatro di Eraclea Minoa in Sicilia [STANLEY-PRICE & JOKILEHTO 2001]. Di questi interventi oggi non restano che i danni.

Le nuove 'Carte del Restauro' o documenti simili, a partire da quella 'di Atene' del 1931, non hanno frapposto ostacoli all'utilizzo ('giudizioso') dei materiali moderni. Il settore è stato anzi molto aperto nel recepire le proposte che l'industria andava sviluppando e ponendo in commercio (per scopi ben diversi e più remunerativi). La tabella 1 mostra, ad esempio, un confronto tra l'anno di commercializzazione e di primo impiego documentato nel restauro (che quindi può essere anche antecedente) dei principali polimeri impiegati nel tentativo di migliorare la durabilità delle pietre [BORGIOLO 2002].

La ricerca del polimero 'giusto' assunse il carattere della ricerca della 'pietra filosofale' negli anni '60-'70 del secolo scorso. Ma anche in questo caso, al pari delle speranze riposte negli anni '50-'60 riguardo al cemento ed alle iniezioni di cemento più o meno armate, i risultati sono infine largamente deludenti.

Tabella 1 - Confronto tra l'anno di commercializzazione e di primo impiego documentato nel restauro di alcuni polimeri.

POLIMERO	Anno di commercializzazione	Anno del primo utilizzo nel Restauro
Nitrocellulosa	1877	1899
Acetato di Polivinile	1917	1932
Resine Acriliche	1927	1932
Resine Poliuretaniche	'30	'50
Resine Poliestere	1946	1950
Resine Epossidiche	'40	1952
Siliconi	'40	'50
Cianoacrilati	'60	1976
Perfluoropolietteri	'70	1979
Elastomeri Fluorurati	'70	1985

In anni recenti quindi ci si scontra con i problemi della durabilità dei materiali (anche) moderni, con la complessità dei fenomeni, con l'assunto e stabile carattere di massa degli interventi e quindi col passaggio dall'attività di artisti/artigiani a quello dell'impresa e quindi dell'Ingegneria. Il vero problema risulta essere non tanto lo sviluppo di nuovi materiali, in quanto è ormai evidente che tutti i materiali, compresi quelli naturali/originari, possono e debbano essere impiegati, quanto piuttosto lo sviluppo di nuovi metodi per la caratterizzazione e l'impiego dei materiali in un contesto globale.





## 1 – MODELLAZIONE FUZZY NELL'INGEGNERIA DEI MATERIALI

Il complesso delle conoscenze su un fenomeno, in pratica/operativamente il legame che ci consente di attribuire un valore ad una variabile dipendente/incognita dalla conoscenza delle variabili indipendenti, è tradizionalmente espresso tramite una o più equazioni, risolvibili in modo esplicito/analitico oppure con metodi di calcolo numerico.

Nel caso dell'adozione di un approccio fuzzy, invece, il complesso delle conoscenze è raccolto in una forma diversa dalle equazioni ordinarie, e questo consente anche di ampliare il tipo di dati considerati. Nell'ipotesi minimale, quella che è chiamata KB (knowledge base) box raccoglie gli stessi dati di conoscenza utilizzata nella procedura tradizionale ed in più consente di tenere in conto altri elementi di conoscenza: variabili linguistiche, variabili numeriche che solo forzatamente si potrebbero considerare di tipo statistico, e aspetti dell'esperienza soggettiva degli Esperti del particolare settore. Secondo alcuni inoltre, nell'ipotesi massimale, l'approccio fuzzy, proprio a causa della sua estensione, permetterebbe di inquadrare un fenomeno complesso in una visione olistica, e ciò consentirebbe di apprezzare quell'essere 'più della somma delle parti', impossibile da realizzarsi con l'approccio tradizionale, tipicamente riduzionistico (isolamento e studio di singoli aspetti a parità di altre condizioni), che opera sotto il vincolo, piuttosto forte, del dover ottenere ed operare con equazioni 'risolvibili' [KOSKO 1994].

Mentre nella modellazione di fenomeni fisici che interessano poche variabili non ci sono motivi che debbano portare all'adozione di una metodologia non-tradizionale, tale problema si pone forzatamente per la modellazione di fenomeni che coinvolgono un gran numero di variabili e nella definizione di grandezze che, nate nell'ambito del laboratorio, debbono essere tradotte in ambito ingegneristico [BANINI & BEARMEN 1998]. Questa situazione è quella con la quale ci si confronta, ad esempio, nella caratterizzazione reologica di materiali tecnicamente importanti quali le malte e, soprattutto, i calcestruzzi a legante cementizio. Questo settore, inoltre, persiste nell'utilizzare da un lato concetti molto generali ma non chiaramente definibili in senso fisico (ad esempio quelli di lavorabilità, consistenza, plasticità, fluidità) e dall'altra metodi di misura decisamente grossolani (abbassamento al cono di Abrams, spandimento sulla tavola a scosse, tempi di efflusso da aperture variamente sagomate, ecc.) [UNI EN 206-1 2001; UNI EN 459/1 2002; UNI EN 459/2 2002; UNI 11040 2003; UNI 11041 2003; UNI 11043 2003; UNI 11044 2003]. In questi casi non sussiste neppure la questione di scegliere una procedura di modellazione tradizionale o non tradizionale, in quanto le prime sono risultate pressoché impossibili da realizzarsi, o comunque i pochi tentativi fatti non hanno trovato alcuna accettazione e sviluppo.

L'adozione di un approccio fuzzy consente di trattare variabili linguistiche congiuntamente alle variabili ordinarie numeriche e di formalizzare la stessa esperienza, consentendo di ottenere una soluzione (approssimata ma generalmente efficace e facilmente gestibile) anche per i fenomeni più complessi. L'impiego di queste procedure fuzzy nell'Ingegneria dei Materiali è recente; citazioni delle applicazioni presentate in letteratura verranno date nei successivi specifici paragrafi. Inoltre, è piuttosto indicativo che negli ultimi anni gli indici del «Ceramic Abstracts» o della rivista «Cement and Concrete Research», ad esempio, riportano voci quali 'fuzzy logic', 'fuzzy systems' e simili [CERAMIC ABSTRACTS 2004; CEMENT AND CONCRETE RESEARCH 2005].



## 2 – LA REOLOGIA NEL PROCESSING DEI MATERIALI

Il termine reologia (dal greco *rhéos* ‘flusso’) indica quella branca della fisica che studia l’origine, la natura e le caratteristiche di deformazione dei corpi sotto l’azione di un sistema di forze esterne. Essa si applica quindi sia allo stato solido che liquido, ma è su quest’ultimo stato che qui ci soffermeremo nel caso particolare, ma di grande rilevanza tecnologica, di dispersioni ad alto tenore di solidi in acqua.

La gran parte dei materiali correntemente utilizzati nel mondo moderno passano attraverso uno stadio fluido (vetri, ceramici tradizionali e avanzati, metalli, conglomerati con leganti inorganici, polimeri termoplastici, pitture e vernici, ecc.). Mentre in molti di questi materiali l’aspetto reologico è controllato industrialmente, nell’utilizzo dei leganti inorganici il controllo reologico viene effettuato spesso anche a livello di cantiere e risulta maggiormente empirico e critico nella lavorazione e sulle prestazioni finali del materiale.

La capacità di scorrere sotto l’applicazione di un sistema di forze (reologia) influenza in modo determinante le prestazioni tecnologiche globali di importanti classi di materiali costituiti da dispersioni ad alto tenore di solidi, di ampia granulometria, in una fase liquida acquosa, che vengono preparati e posti in opera allo stato ‘fluido’ (paste, malte e calcestruzzi, con fasi leganti costituite da calci o cementi).

La reologia delle paste e delle malte di calce viene qua affrontata per prima in quanto la sua ‘semplicità’ è propedeutica a quella più complessa del sistema reagente cementizio. Lo studio della reologia delle malte di calce non è solo quindi interessante di per sé ma è anche un primo stadio verso la caratterizzazione dei materiali cementizi, che sono ancora più difficili da trattare a causa della complessità della loro composizione chimica, dell’impiego congiunto con additivi con specifica funzione fluidificante e della loro reattività rispetto all’acqua di dispersione (idraulicità).

La reologia è certamente la proprietà meglio riconosciuta ed apprezzata a livello operativo. Paradossalmente, tuttavia, essa è anche una delle proprietà meno definite e misurabili in termini fisici e quindi è anche generalmente trascurata nelle specifiche dei produttori e degli utilizzatori. D’altro canto il conglomerato cementizio è il materiale di gran lunga più utilizzato al mondo; la produzione di cemento ha raggiunto i 2 miliardi di tonnellate/anno dai quali si può stimare una produzione di conglomerato 5-6 volte superiore. Esso è pressoché sempre posto in opera allo stato fluido, anzi è proprio la fluidità che è responsabile di una vera e propria recente (ed ancora in atto) rivoluzione nella logistica del cantiere e nell’affidabilità delle strutture. Il calcestruzzo nasce in cantiere e pertanto l’affidabilità e la rapidità delle operazioni di getto devono essere ‘a prova di ignorante’. La compattazione è un’operazione banale ma faticosa e perciò affidata a personale non qualificato. È pertanto la reologia che garantisce l’affidabilità di opere non solo diffuse, ma di rilevanza strategica quali le principali infrastrutture (dighe, porti, autostrade, ponti, aeroporti, ferrovie, ecc.) e gli edifici (nella realizzazione dei quali si è superata la soglia dei 500 m d’altezza). Le migliori prestazioni dipendono sia dalla qualità dei cementi che dalla reologia degli impasti.



## 2.1 – APPLICAZIONI AI MATERIALI CON LEGANTE CALCE O CEMENTO UTILIZZATI NELL’AMBITO DEL RESTAURO

Le calci sono un materiale antico il cui impiego viene attualmente riproposto nel settore, assai esigente nelle sue prescrizioni, del restauro delle costruzioni di interesse storico [ASHURST 1989; TSIMAS & RAIKOS 1995]. La loro qualità reologica era già riconosciuta duemila anni fa, come risulta dalla discussione fattane da Vitruvio nel suo trattato dell’arte edificatoria dei Romani.

*“Cum autem habita erit ratio macerationis, et id curiosius opus praeparatum erit, sumatur ascia et quaemadmodum materia dolatur, sic calx in lacu macerata ascietur. Si ad eam offenderint calculi, non erit temperata. Cumque siccum et purum ferrum educetur, indicabit eam evanidam et siticulosam. Cum vero pinguis fuerit et recte macerata, circa id ferramentum uti glutinum haerens omni ratione probabit se esse temperatam.”*

*“E dopo che si sarà osservata la regola della macerazione e il lavoro sarà stato predisposto molto accuratamente, si prenda una cazzuola e con essa si lavori la calce macerata in un mortaio allo stesso modo in cui si sgrossa il legno con l’ascia. Se alla cazzuola si attaccheranno particelle grumose, vorrà dire che l’impasto non è ben miscelato; se invece il ferro sarà estratto asciutto e pulito, sarà segno che la calce è priva di consistenza e arida. Ma quando sarà densa macerata al punto giusto essa aderirà come colla a quell’attrezzo di ferro e questa sarà la prova che l’impasto è perfetto.”*

[VITRUVIO]

Le conoscenze acquisite in decenni di studi reologici consentono una trattazione fisicamente rigorosa, teorica e sperimentale, della reologia del solo sistema ‘pasta’, ed anche in questo caso in modo non univoco [ATZENI, MASSIDDA, SANNA 1985 B; ROUSSEL 2005]. La reologia a scala superiore, quanto a dimensione della fase solida (massimo micrometri nella pasta, millimetri nella malta), è grossolanamente espressa e misurata con concetti e metodi empirici. Alla base di questa situazione francamente insoddisfacente dal punto di vista scientifico e fonte di fraintendimenti e cattiva qualità delle realizzazioni tecniche, stanno il gran numero di parametri influenti, l’incapacità di correlarli con le usuali procedure matematiche e la tenace persistenza di antichi concetti. Nel campo delle applicazioni della reologia compaiono, nella stessa normativa europea [UNI EN 459/1 2002; UNI EN 459/2 2002], termini quali ‘plasticità’, ‘consistenza’ o ‘lavorabilità’ che sono tanto straordinariamente comprensivi dei fenomeni di scorrimento di questi materiali, quanto ‘refrattari’ da definire, misurare e correlare.

Gli studi reologici sulle paste di calce (grasselli, con il 40÷50% in peso di solido) non sono numerosi [BACKMAN 1953; BACKMAN 1954; BOYNTON 1980; WITTNEBEN 1980; TSIMAS & RAIKOS 1995]. I grasselli sono assimilabili a fluidi non-newtoniani, di carattere tixotropico. La fase solida è costituita da particelle di idrossido di calcio a geometria esagonale, di dimensione dell’ordine dalla micrometrica alla nanometrica, forma dalla tabulare alla prismatica. Queste caratteristiche della fase solida sono funzione delle caratteristiche petrografiche e delle condizioni di calcinazione dei calcari di partenza, delle condizioni operative dell’estinzione dell’ossido di calcio ottenuto in cottura e del tempo di maturazione della dispersione, talvolta protratto per anni proprio per ottenere, attraverso una successione di

dissoluzioni/ricristallizzazioni, una morfologia ed una granulometria che migliorino la qualità reologica [ATZENI, FARCI, FLORIS, MELONI 2004]. La superficie specifica può variare nel campo  $10\div 30 \text{ m}^2/\text{g}$  [BOYNTON 1980].

### 2.1.1 – Preparazione delle calci e sperimentazione reologica

Allo scopo di verificare alcuni dei più importanti parametri influenti sulla reologia della calce, la sperimentazione è stata condotta a partire da due calcari di differenti caratteristiche: il calcare di Orosei (A) e uno dei calcari di Cagliari noto come 'Pietra Cantone' (B).

Il litotipo calcareo di Orosei, le cui varietà sono commercialmente note come marmi, proviene dal versante orientale del monte Tuttavista, dagli strati risalenti al Giurassico superiore [COCOZZA, JACOBACCI, NARDI, SALVATORI 1974].

La Pietra Cantone è invece una roccia sedimentaria, porosa, caratteristica dell'area cagliaritano, formatasi in epoca miocenica, largamente utilizzata a partire dall'epoca fenicio-punica e sino a tempi recenti nella locale tecnica delle costruzioni [PECORINI & POMESANO-CHERCHI 1969; BARROCCU, CRESPELLANI, LOI 1981; ATZENI, SANNA, SPANU 2006 C].

I blocchi originari sono stati sottoposti a riduzione di dimensione tramite mulino a macelle ed a setacciatura, sino ad ottenere un granulato tra 5 e 15 mm.

La composizione mineralogica è stata determinata tramite diffrazione di raggi X ( $\text{CuK}\alpha$ : 30 kV e 20 mA).



Figura 2.1 – A sinistra veduta del diffrattometro, a destra particolare del goniometro (cortesia del Centro CNR-IGAG di Cagliari).

Le figure 2.2 e 2.3 mostrano i diffrattogrammi a raggi X del calcare di Orosei, sia tal quale, sia dopo dissoluzione della fase carbonatica con soluzione di acido cloridrico.

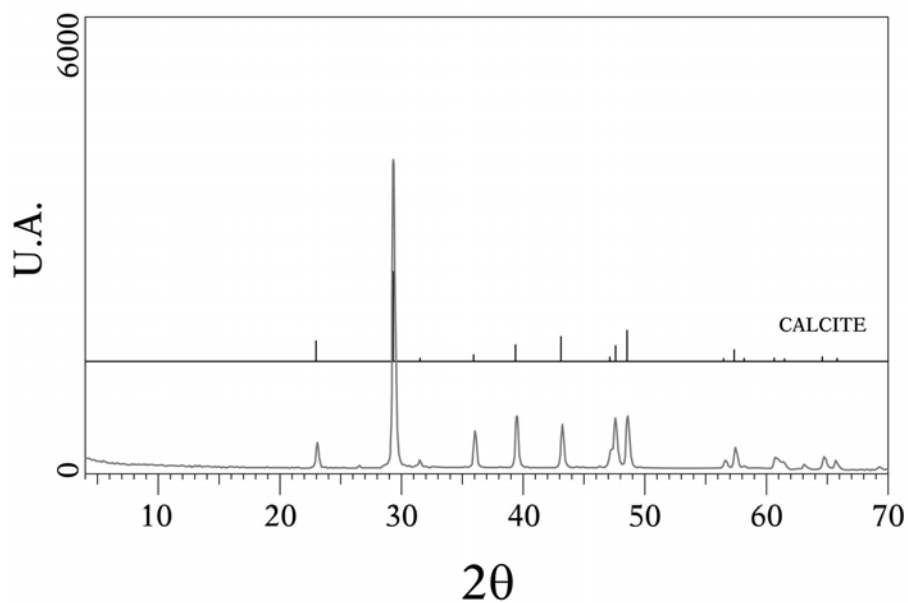


Figura 2.2 - Diffratogramma del campione A.

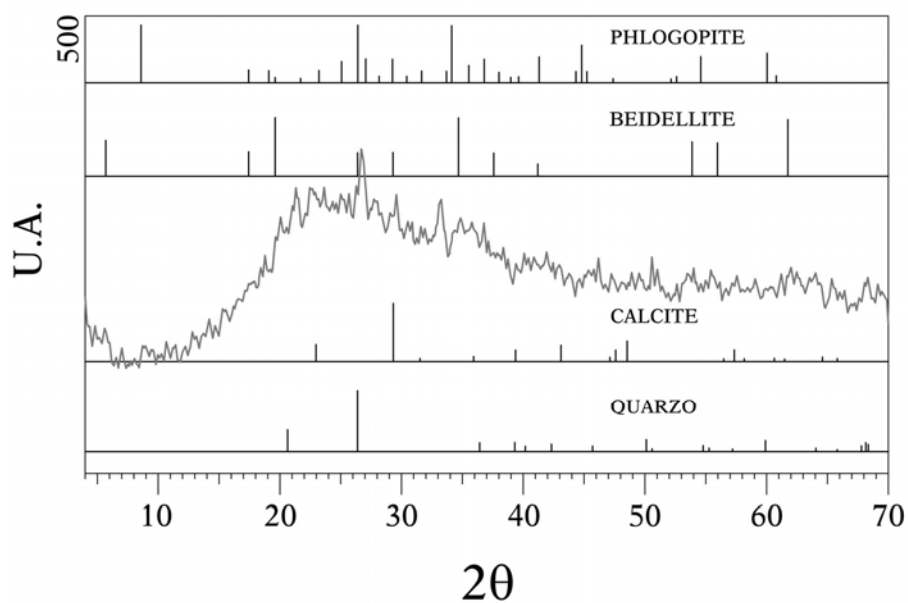


Figura 2.3 - Diffratogramma del campione A dopo attacco con soluzione a base di acido cloridrico.

È netta la prevalenza della componente calcitica, mentre nel residuo, insolubile all'attacco acido, si osserva la presenza di quarzo e di minerali del gruppo della montmorillonite. La componente 'non calcitica' è stata stimata a  $2 \pm 2\%$  in peso.

Le figure 2.4 e 2.5 riportano gli analoghi diffratogrammi ai raggi X di un campione rappresentativo di Pietra Cantone.



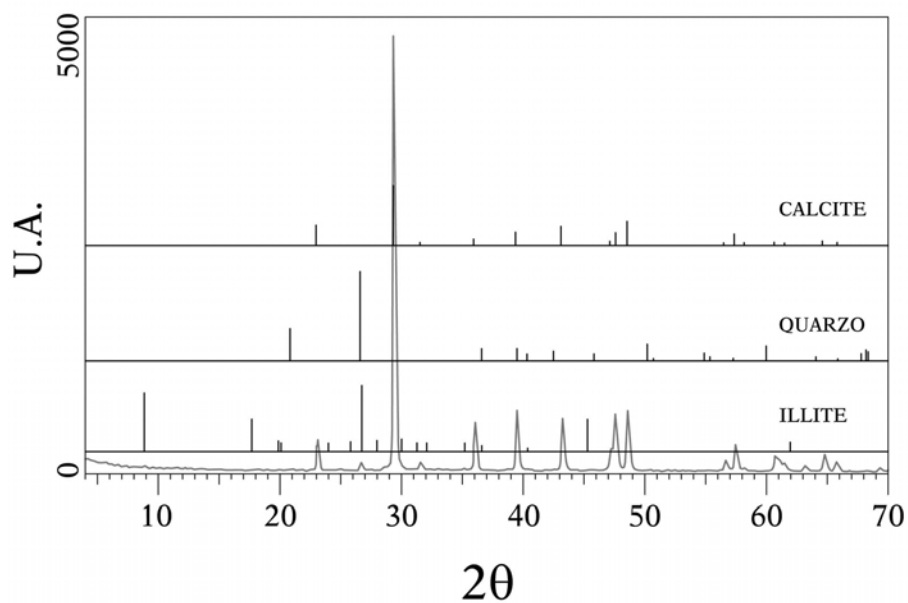


Figura 2.4 - Diffratogramma del campione B.

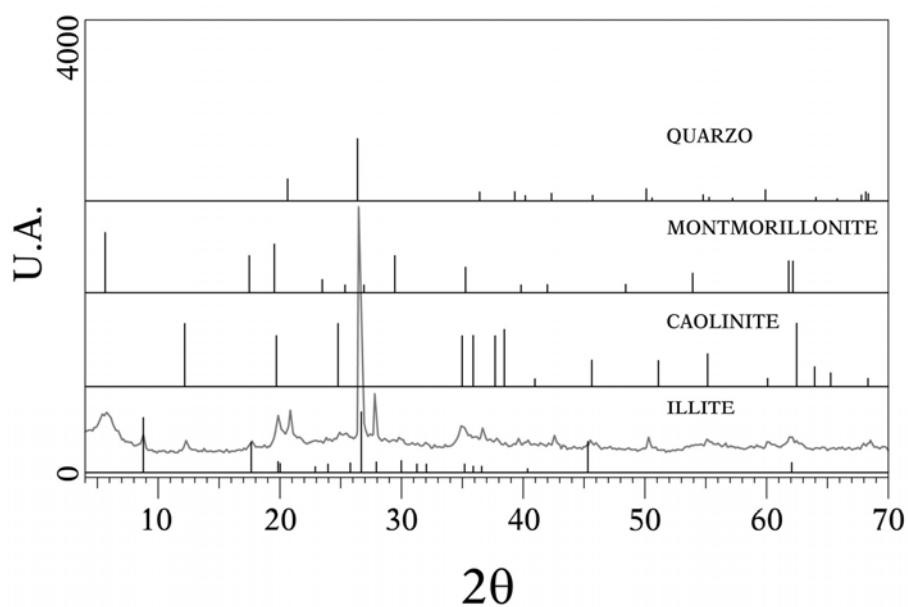


Figura 2.5 - Diffratogramma del residuo di B dopo attacco con acido cloridrico.

Il componente mineralogico di gran lunga prevalente è anche in questo caso la calcite, mentre quarzo e argille (illite, caolinite e montmorillonite) sono presenti in tracce. La valutazione quantitativa delle impurezze ha fornito valori di  $3 \pm 1\%$  in peso.

Operando con il metodo per intrusione forzata di mercurio (MIP) fino a pressioni di circa 400 MPa (dimensione minima dei pori circa 0.2 nm), sono state determinate la frazione volumica dei vuoti, la distribuzione dimensionale dei pori e la superficie specifica sia sui calcari che sugli ossidi [CNR-ICR NORMAL 4/80 1980; UNI 11060 2003].



Figura 2.6 - Il porosimetro a mercurio utilizzato nei test.

Il materiale A ha dato valori di porosità inferiori all'1%, per i quali non si può evidentemente parlare di distribuzione porosimetrica. Il valore medio della porosità del campione B, su 6 determinazioni, è risultato essere del  $35 \pm 4\%$ , e si estende in un intervallo compreso tra 2 e 20  $\mu\text{m}$ .

La figura 2.7 riporta, a titolo di esempio, la distribuzione dimensionale di un campione B.

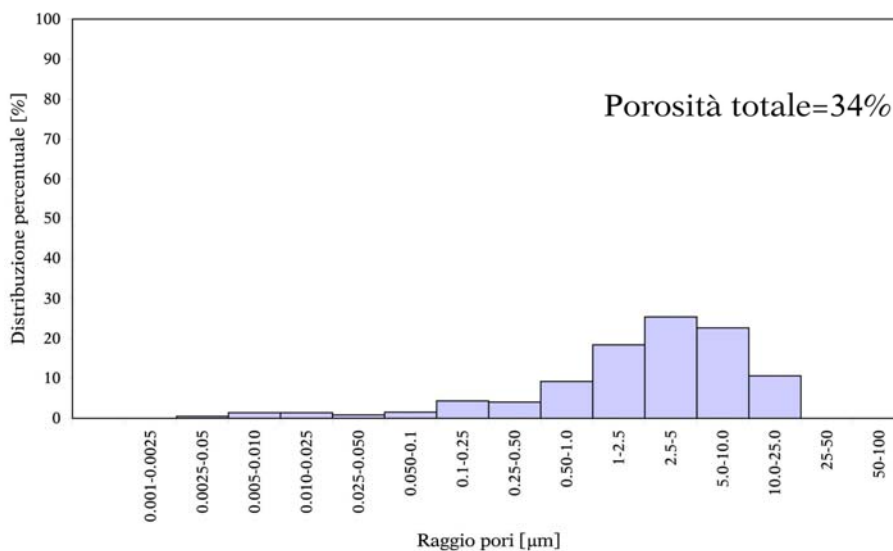


Figura 2.7 - Distribuzione dimensionale dei pori del materiale B.

Il granulato dei materiali A e B è stato calcinato in forno per 1 ora alla temperatura di  $950 \pm 10^\circ\text{C}$ .



Figura 2.8 – Forno per la calcinazione del calcare.

L'operazione di calcinazione comporta la decomposizione della calcite e l'allontanamento dell'anidride carbonica; la struttura della fase solida restante è quindi costituita quasi totalmente da ossido di calcio. La modificazione della microstruttura è ben evidenziata dai cambiamenti nella porosità; le figure 2.9 e 2.10 riportano i dati porosimetrici caratterizzanti gli ossidi di calcio derivanti da A e B.

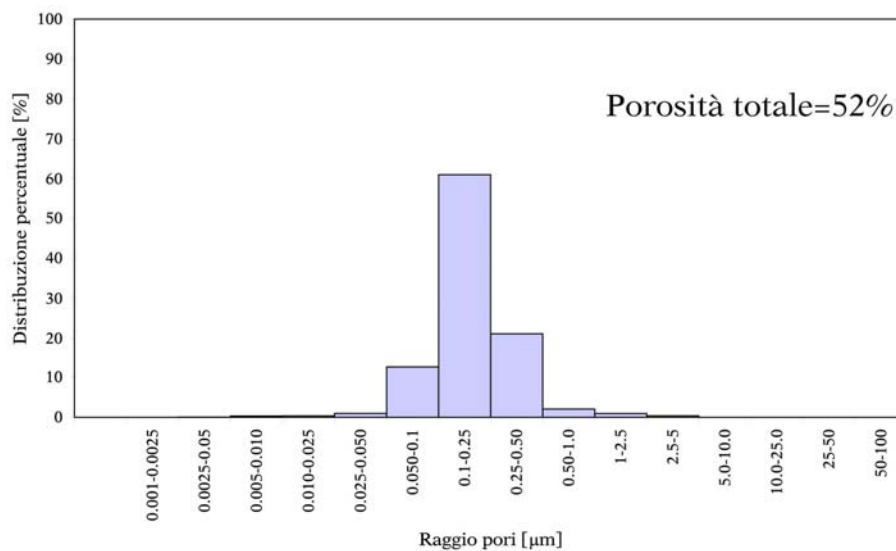


Figura 2.9 – Distribuzione dimensionale dei pori dell'ossido di calcio ottenuto per calcinazione del materiale A.

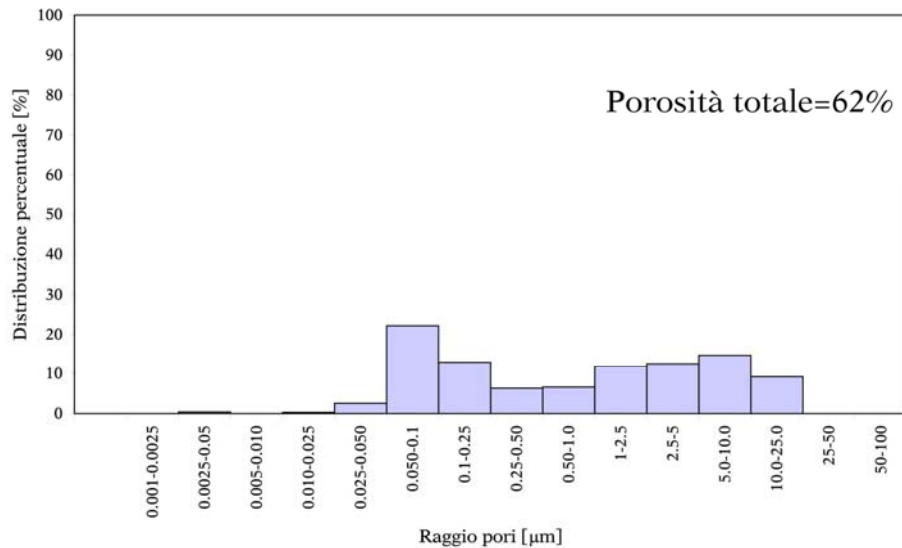


Figura 2.10 - Distribuzione dimensionale dei pori dell'ossido di calcio ottenuto per calcinazione del materiale B.

In accordo con quanto riscontrato in letteratura per temperature e tempi di calcinazione confrontabili [TURRIZIANI 1974; BOYNTON 1980; ATZENI, MASSIDDA, SANNA 1996; WOLTER, LUGER, SCHAEFER 2004], la porosità totale subisce un incremento corrispondente a circa il 50% del volume della fase solida preesistente, portandosi a valori che mediamente sono  $50 \pm 2\%$  per il campione A e del  $60 \pm 2\%$  per il campione B. Per quanto concerne il calcinato derivante da A, la distribuzione dimensionale risultante, piuttosto stretta, è caratterizzata da un valore massimo intorno a  $0.2 \mu\text{m}$ , mentre per il calcinato B la distribuzione dimensionale dei pori risulta essere spostata con lo sviluppo di un nuovo massimo locale in corrispondenza di  $0.1 \mu\text{m}$ .

Le superfici specifiche calcolate con la tecnica MIP sono di circa  $9 \pm 1 \text{ m}^2/\text{g}$  nel calcinato del calcare A e  $7 \pm 1 \text{ m}^2/\text{g}$  nel calcinato del materiale B. Questi ultimi valori lasciano prevedere come da parte del materiale A ci si debba aspettare una maggiore reattività nei confronti dell'acqua.

L'estinzione è stata condotta sul materiale calcinato subito dopo avere raggiunto la temperatura ambiente, utilizzando la minima quantità d'acqua distillata compatibile con l'obiettivo prefissato di ottenere un grassello con contenuto d'acqua che fosse circa 50%. La determinazione della reattività all'acqua dei due calcinati è stata effettuata secondo il procedimento previsto dalle norme; in sostanza si tratta di una cinetica termica condotta in condizioni specificate [UNI EN 459/2 2002].



Figura 2.11 – Dispositivo per la determinazione della curva di reattività degli ossidi.

Si riportano in figura 2.12 le curve di reattività ottenute sui campioni di calce viva A e B.

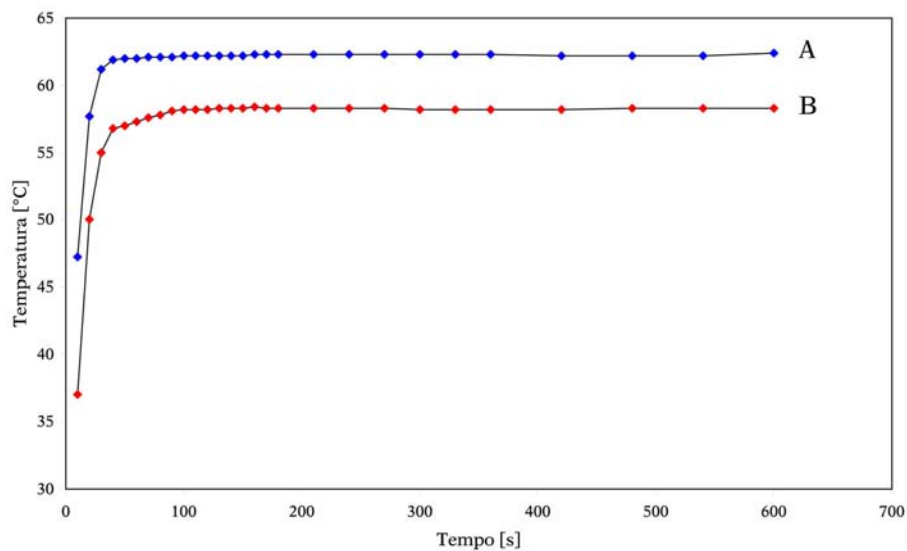


Figura 2.12 – Curve di reattività all'acqua dell'ossido di calcio ottenuto dai calcari A e B.

Le curve di reattività mostrano una maggiore attività rispetto all'acqua dell'ossido A, con una temperatura massima superiore di 4°C rispetto a quella derivante dall'ossido B (62.4°C vs 58.3°C). Il tempo  $t_u$  in A è di 12.5 s e 17.4 s in B.

Dopo una maturazione protratta per tre mesi si è proceduto alla caratterizzazione reologica dei grasselli ottenuti, che presentavano valori di contenuto d'acqua in peso del  $51 \pm 0.50\%$  e  $47.64 \pm 0.89\%$  per quello ottenuto da A e da B rispettivamente.



### 2.1.2 – Viscosimetria delle paste

Il complesso di procedimenti per la misura dei fenomeni di scorrimento prende il nome di **reometria**.

Tutte le sostanze presentano attriti interni che si oppongono allo scorrimento quando soggette a forze, cosicché tutte le sostanze sono dotate di una certa viscosità, più o meno elevata.

Il fenomeno della viscosità di una sostanza è illustrato nella figura 2.13.

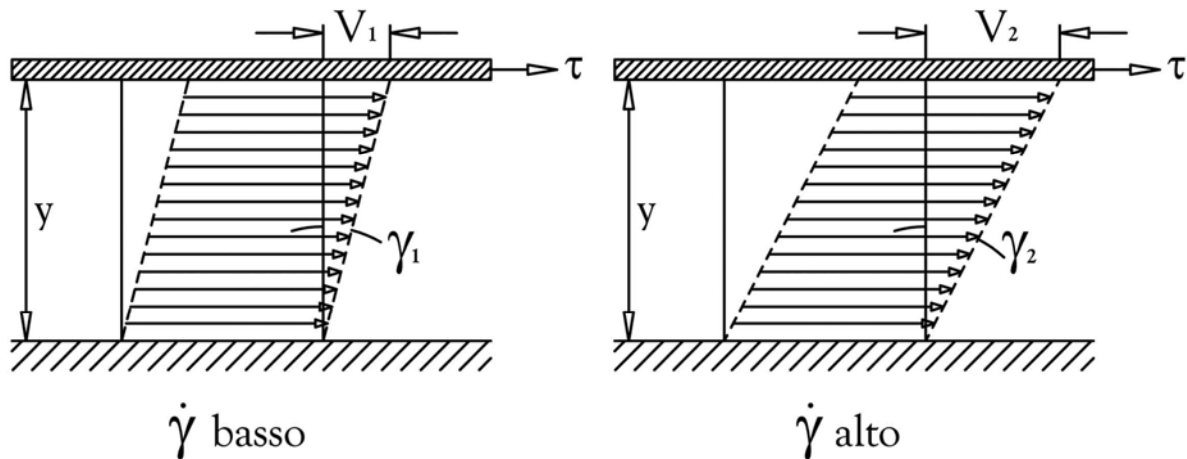


Figura 2.13 – Variazione della viscosità in funzione del gradiente di scorrimento.

Tra due piastre piane fra loro parallele, che si trovano alla distanza  $y$  l'una dall'altra, supponiamo venga posta una sostanza. Entrambe le piastre hanno la stessa grandezza, e sia  $A$  la loro superficie. Una di queste piastre è mobile e sulla superficie della stessa agisce una forza  $F$ . Di conseguenza sulla superficie e nella sostanza agisce una tensione di scorrimento  $\tau$  che è data da:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

A causa di tale tensione la piastra si muove (scorre) con una velocità  $V_{\max}$  costante, trascinando lo strato di sostanza ad essa immediatamente adiacente. Nella massa della sostanza tra le piastre, si manifesta in conseguenza di ciò un gradiente di velocità ossia di scorrimento  $\dot{\gamma}$ , dato che la sostanza stessa aderisce ad entrambe le piastre sia a quella fissa che a quella mobile. I vari strati di sostanza scorrono parallelamente l'uno sull'altro vincendo, attraverso la tensione di scorrimento applicata dall'esterno, l'attrito interno. Il gradiente di scorrimento  $\dot{\gamma}$  sarà quindi espresso da:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy}$$

Le sostanze che seguono rigorosamente la relazione:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

sono dette ‘corpi di Newton’. Tuttavia per altre sostanze estremamente importanti dal punto di vista tecnico (polimeri, cementi, argille, ecc.) la relazione tra tensione tangenziale e scorrimento non è di tipo lineare; tuttavia anche per esse può definirsi un valore di viscosità  $\eta$  che varia a seconda delle condizioni del moto e non è più un valore costante come nel caso dei fluidi newtoniani. Alcune sostanze vengono poste in movimento, scorrono, solo se la tensione tangenziale applicata supera un certo valore limite  $\tau_0$ : per  $\tau < \tau_0$  esse si deformano elasticamente come dei solidi, mentre per  $\tau > \tau_0$  scorrono come dei fluidi.

La relazione che esprime la viscosità sarà comunque data da:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Per poter condurre praticamente l’esperimento ideale sopra descritto, è opportuno disporre la sostanza in un dispositivo a geometria cilindrica, costituito da due cilindri coassiali con intercapedine di dimensione tale da essere per lo meno cento volte superiore alla massima dimensione delle particelle costituenti la fase solida.

Generalmente il cilindro esterno è fisso ed il fluido, aderente ad esso, ha velocità nulla, mentre il cilindro interno si muove con una velocità predeterminata trascinando il fluido aderente; si viene in tal modo a costituire un gradiente di velocità nell’intercapedine. Eventuali rigature sulle superfici migliorano l’adesione ed evitano il rischio di scorrimenti alla pareti che vanificherebbero la misura.

La tensione tangenziale necessaria per mantenere il cilindro alla velocità prestabilita viene misurata attraverso un dinamometro.

Il dispositivo così descritto viene generalmente chiamato ‘rotoviscosimetro’.

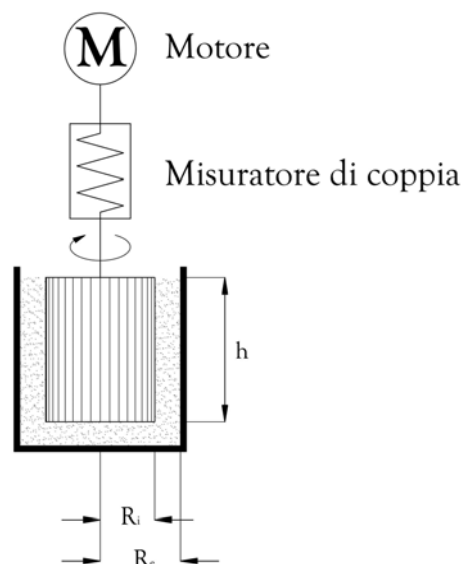


Figura 2.14 – Schema di un rotoviscosimetro a cilindri coassiali.

Una prima prova che viene correntemente effettuata con un dispositivo rotoviscosimetrico consiste nel seguire l’andamento della tensione tangenziale nel tempo a gradiente costante; differenti sostanze si comportano in maniera diversa: mentre alcune presentano una graduale diminuzione della tensione tangenziale a partire da un valore massimo iniziale tendendo verso



un valore minimo di equilibrio (seguendo per esempio un modello esponenziale tipo quello di Tattersall), altre presentano su lunghi tempi di scorrimento un ulteriore aumento dell'attrito interno, ad esempio cementi o altre sostanze reattive. Naturalmente è possibile calcolare la viscosità istante per istante e seguirne quindi l'evoluzione nel corso del tempo.

La seconda modalità di prova consiste nel seguire l'andamento della tensione tangenziale (di equilibrio o corrispondente ad un determinato tempo) in funzione del gradiente di velocità. Per un fluido newtoniano si ottiene una retta passante per l'origine, per un fluido 'di Bingham' si ottiene ancora una retta che parte da un valore limite della tensione di scorrimento  $\tau_0$ . Andamenti non lineari si ottengono per fluidi dilatanti o 'pseudoplastici' come schematizzato in figura 2.15.

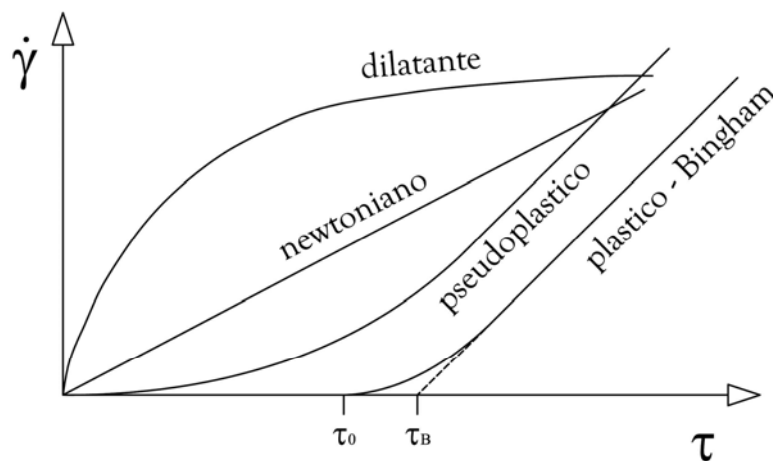


Figura 2.15 - Curve reologiche di fluidi di differenti caratteristiche.

In entrambi i casi, i dati rotoviscosimetrici sono strettamente correlabili alle modificazioni della microstruttura delle dispersioni ad alto tenore di solido.

Ad esempio i fluidi cosiddetti tixotropici, in condizioni di riposo, sono caratterizzati da una data microstruttura, ma sottoposti ad agitazione la modificano progressivamente acquisendo una situazione caratterizzata da un minore attrito interno e quindi da una bassa viscosità. Riportato in condizioni di riposo, il fluido tixotropico è in condizioni di riacquistare la struttura iniziale, irrigidendosi. Fluidi con un comportamento opposto a questo si chiamano reopectici.

La reologia dei grasselli, a tre mesi dall'estinzione, è stata studiata mediante rotoviscosimetria, con un apparato a cilindri rotanti coassiali, utilizzando un dispositivo di misura con diametro del bicchiere di misura 23.1 mm, corpo rotante rigato di diametro 20.2 mm e altezza 19.6 mm, al fine di valutare l'andamento delle tensioni di scorrimento nel tempo (fino a 900 s) ai gradienti di velocità 14 e 42  $s^{-1}$ . Durante le prove la temperatura è stata mantenuta costante a 20°C.

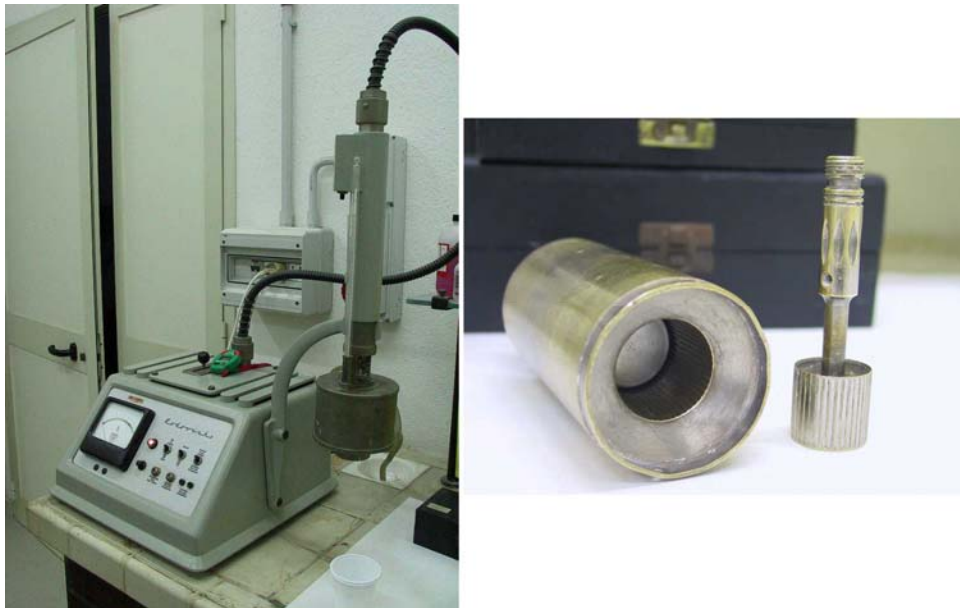


Figura 2.16 - Dispositivo per la determinazione della viscosimetria delle paste di calce.

I due calcri hanno portato all'ottenimento di grasselli di proprietà reologiche molto diverse. Le figure 2.17 e 2.18 riportano i dati sperimentali rappresentanti l'andamento della tensione tangenziale  $\tau$  nel tempo  $t$ , rispettivamente per i sistemi A e B. La figura 2.19 riporta gli stessi dati in termini di viscosità istantanea  $\eta(t) = \tau(t) / \dot{\gamma}$ , essendo  $\dot{\gamma}$  il gradiente di scorrimento.

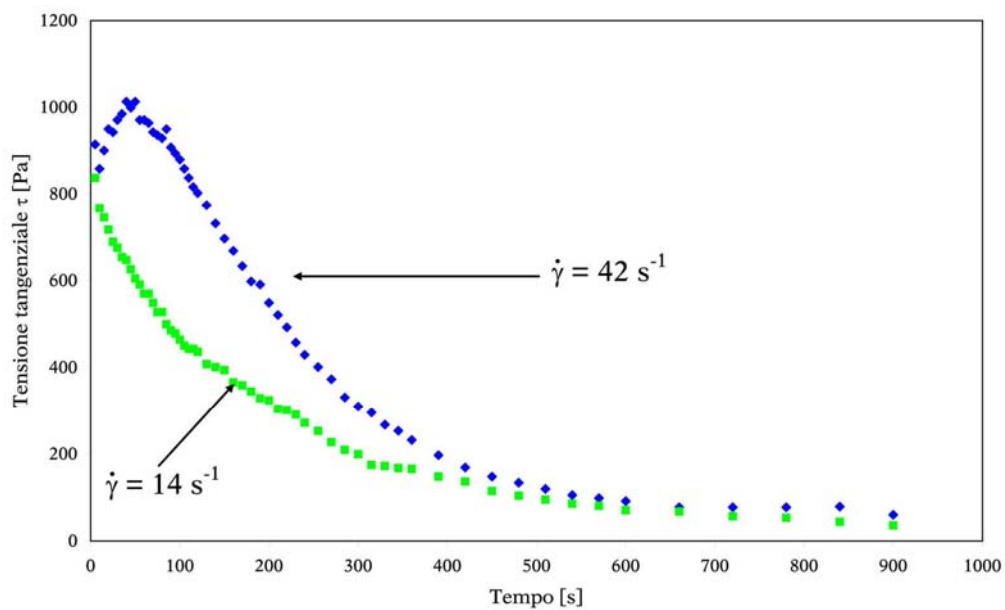


Figura 2.17 - Tensione tangenziale ( $\tau$ ) vs tempo ( $t$ ), per il grassello derivante da A.

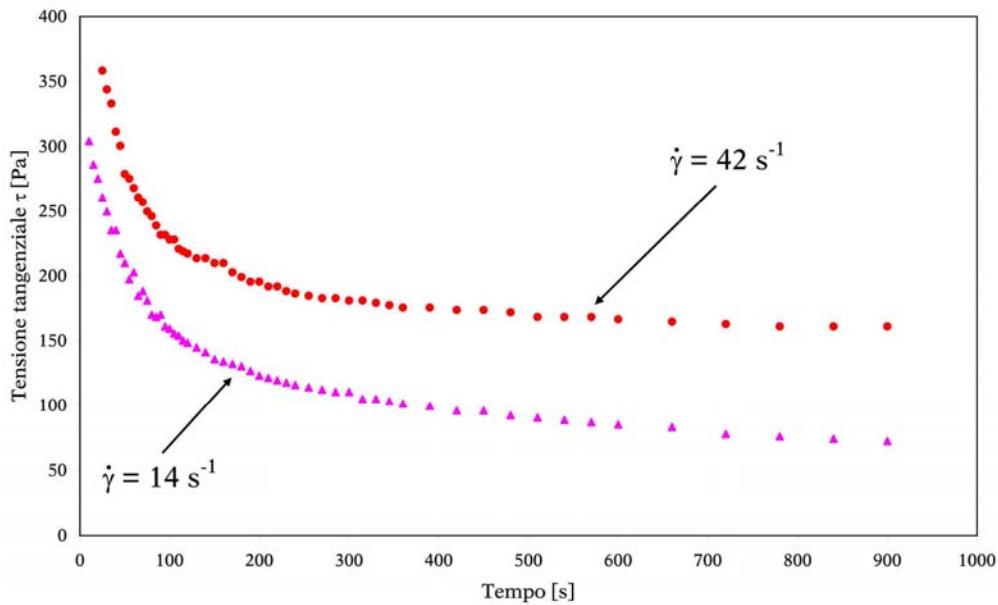


Figura 2.18 - Tensione tangenziale ( $\tau$ ) vs tempo (t), per il grassello derivante da B.

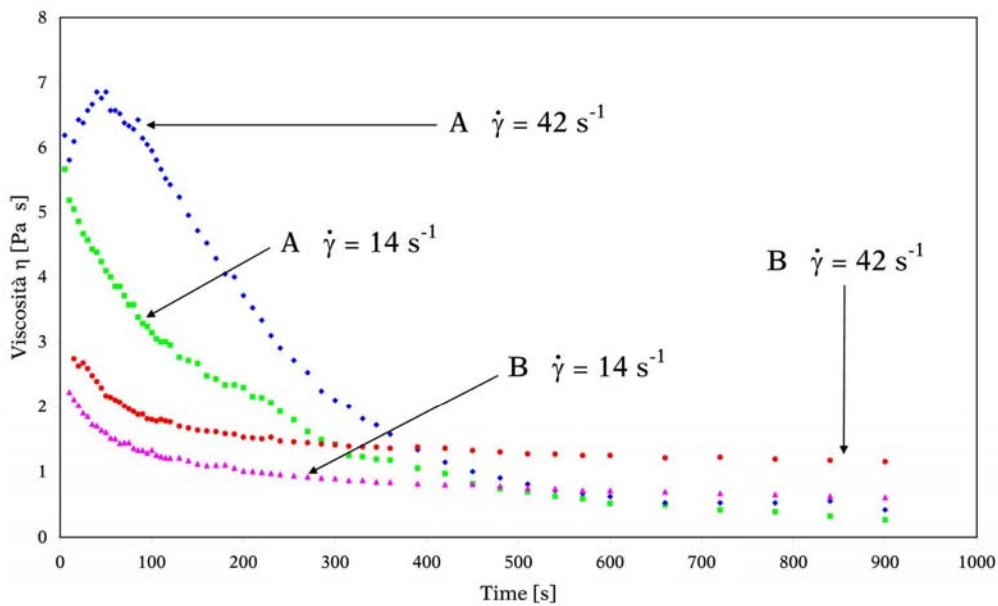


Figura 2.19 - Viscosità ( $\eta$ ) vs tempo (t), per i grasselli A e B.

L'andamento dei dati è, qualitativamente, quello tipico di un'ampia classe di dispersioni di un solido ad alto tenore in un liquido. A parte i primi secondi del moto, durante i quali possono verificarsi alcune anomalie dovute all'assestamento del materiale applicato all'intercapedine del rotoviscosimetro, la tensione tangenziale decresce con regolarità da un valore massimo verso valori progressivamente minori, fino ad una situazione di equilibrio o quasi-equilibrio, dipendente dal particolare valore del gradiente di scorrimento imposto al sistema.

Gli aspetti quantitativi del fenomeno sono in stretta relazione alla microstruttura della dispersione ed alla sua capacità di modificarsi durante il moto [WITTNEBEN 1980; TSIMAS & RAIKOS 1995]. Nel nostro caso è particolarmente evidente la differenza di comportamento tra i due grasselli; A presenta valori iniziali di tensione tangenziale molto superiori a quelli di B

(circa 740 e 1055 Pa vs 237 e 358 Pa, ai due gradienti di scorrimento considerati), ma già a partire dal terzo minuto tali valori si avvicinano a quelli del sistema B. Al trascorrere del tempo i due sistemi presentano un comportamento equivalente nella tendenza al raggiungimento dell'equilibrio, anzi la resistenza interna del grassello A è inferiore a quella del grassello B (circa 43 e 32 Pa vs 56 e 160 Pa). Il grassello A presenta un intervallo di viscosità nettamente più ampio rispetto al grassello B. Soggettivamente il grassello A risulta apprezzabilmente più untuoso e plastico rispetto al B.

Essendo stati ottenuti a parità di condizioni di calcinazione, di estinzione e di maturazione, il differente comportamento reologico è associabile alla differente microstruttura dei calcari. È noto che la calcite presenta una caratteristica anisotropia del coefficiente di dilatazione termica (a 800°C si hanno i valori di +2.5% e -1.0% in direzione, rispettivamente, parallela e ortogonale all'asse ottico) [TOULOUKIAN, JUDD, ROY 1981]. Le deformazioni e quindi gli stress in condizioni di vincolo dei cristalliti sono particolarmente intensi alle alte temperature che precedono la fase di decomposizione (calcinazione). Ma mentre nel caso del calcare poroso le deformazioni hanno degli spazi ove potersi sviluppare senza far insorgere forti tensioni, questo è solo limitatamente possibile nei calcari compatti; in quest'ultimo caso gli stress possono indurre una significativa fratturazione e quindi portare ad una situazione di fine frazionamento della fase solida che permarrebbe nel prodotto della calcinazione e quindi si tradurrebbe in cristalliti di dimensione particolarmente fine a seguito dell'estinzione [BUTENUTH, FREY, GOTTHARDT, KASIG 1993]. I valori di superficie specifica e quelli di reattività sembrano ben supportare questa ipotesi.

I termini posti alla base della descrizione della relazione  $\tau$ - $t$  di Tattersall (trascurabile processo ricostruttivo della struttura durante il flusso, energia dei legami tra le particelle costante, proporzionalità tra tensione e numero di legami) sono ragionevolmente applicabili nel caso dei grasselli [TATTERSALL 1955; TATTERSALL & BANFILL 1983; ATZENI, MASSIDDA, SANNA 1986]. In effetti la relazione di Tattersall:

$$\tau = \tau_{eq} + (\tau_M - \tau_{eq}) \cdot \exp\left(-\frac{t}{T}\right)$$

essendo: 
$$\begin{cases} \tau = \tau_M & \text{per } t = 0 \\ \tau = \tau_{eq} & \text{per } t \rightarrow \infty \end{cases} \quad \text{e } T \text{ una costante di tempo,}$$

come può vedersi dalla figura 2.20, correla i dati sperimentali con adeguata efficacia su tutto l'intervallo di tempo della sperimentazione, particolarmente nel caso del sistema A; l'ottimizzazione delle curve è stata effettuata con un metodo min-max e l'errore, espresso come scostamento percentuale tra valore sperimentale e valore calcolato dal modello, non supera che raramente il valore del 10%, mantenendosi spesso decisamente inferiore a tale limite.

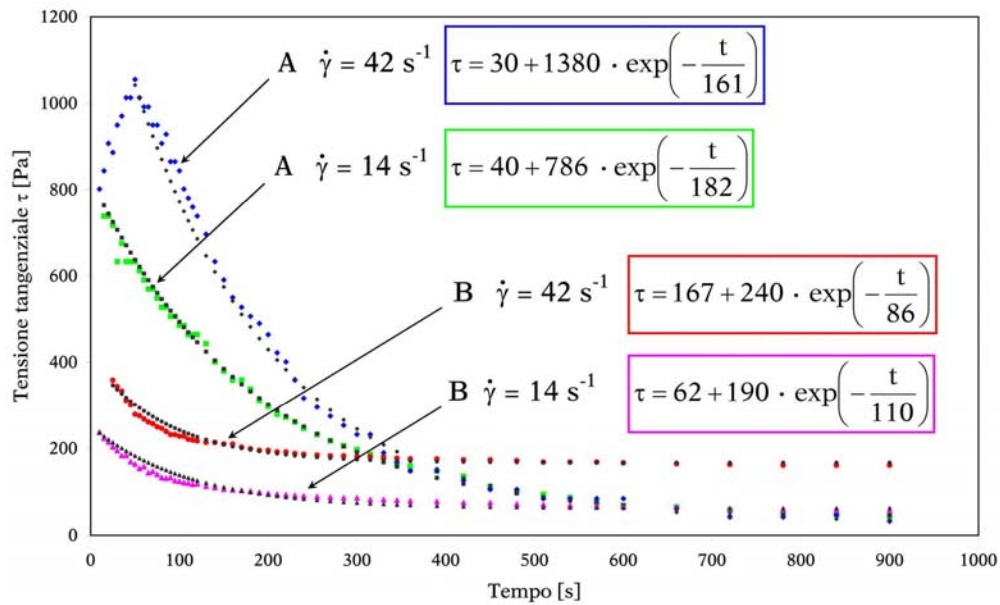


Figura 2.20 - Correlazione dei dati  $\tau/t$  tramite la relazione di Tattersall; valori sperimentali vs valori calcolati.

La reologia delle malte, e a maggior ragione dei calcestruzzi, non può essere definita in termini altrettanto rigorosi, cioè sotto condizioni di flusso semplici e sperimentalmente controllate, come nel caso dei grasselli. Un apparato rotoviscosimetrico è difficilmente configurabile per ragioni geometriche e fisiche (come detto la massima dimensione delle particelle costituenti la fase solida deve essere trascurabile rispetto alla larghezza dell'intercapedine, lo scorrimento deve avvenire per superfici regolari in assenza di slittamento alle pareti), seppure alcuni studiosi ne hanno costruito ed utilizzato taluni persino per il calcestruzzo [UZOMAKA 1974; TATTERSALL & BANFILL 1983]. I metodi di misura hanno quindi un carattere prevalentemente empirico [OHNEMUELLER 1967].



### 2.1.3 – Consistenza delle malte: l'approccio empirico

Nel presente lavoro si adottano due approcci per la valutazione della consistenza: il primo è di tipo tradizionale, empirico, il secondo è una modellazione fuzzy.

Le malte, confezionate utilizzando come inerte sabbia di quarzo a granulometria normale [UNI EN 459/2 2002], sono state realizzate con rapporti ponderali grassello/sabbia pari a 1:1, 1:1.5, 1:2 e 1:2.5, con corrispondenti rapporti nominali, idrossido di calcio/sabbia pari a 1:2, 1:3, 1:4, 1:5.

L'impasto, su una quantità base di sabbia pari a 600 g, è stato realizzato manualmente (l'uso delle usuali impastatrici meccaniche è risultato inefficiente sulle malte più rigide e propenso ad inglobare bolle d'aria nel caso di quelle più fluide, introducendo quindi un 'additivo reologico' non desiderato) ed è stato protratto fino ad ottenere il massimo della lavorabilità (con la tecnica proposta di seguito descritta), rispettivamente per 5 e 3 minuti per i sistemi A e B.

Le malte sono state preparate con diversi rapporti legante/aggregato, compresi tra 1 e 2.5, in modo da coprire l'intero intervallo tra la consistenza 'fluida' (1:1.5 per A e 1:1 per B) e quella di 'sabbia bagnata' (1:2.5 per A e 1:2 per B) e quindi l'intera gamma di pratica utilità. Come prevedibile dalle prove reologiche sulle paste, il grassello A ha consentito di spingere il rapporto legante/sabbia fino a valori più elevati (nella realizzazione delle malte non è stata aggiunta acqua).

Le più comuni tecniche di misura della lavorabilità delle malte (flow-table e slump-test) sono insufficienti per una buona caratterizzazione delle malte di calce. Sia lo spandimento che l'abbassamento al cono, in conseguenza della caratteristica coesività della calce, risultano, infatti, pressoché nulli e non permettono alcuna efficace discriminazione né tra grasselli, né al variare del tenore di sabbia.



Figura 2.21 – La forte capacità adesiva della malta di calce vanifica un normale flow-table test.

La procedura utilizzata per la valutazione della lavorabilità/consistenza richiede la misurazione degli abbassamenti subiti da un tronco di cono (caratteristiche geometriche della forma: diametri 8 e 4 cm, altezza 12 cm, volume 357 cm<sup>3</sup> [ATZENI, MASSIDDA, SANNA 1985 A]), riempito con il materiale in esame, al succedersi delle sollecitazioni (sino a 90) assestate mediante il dispositivo flow-table [UNI EN 459/2 2002]. Si ricorda che, nel dispositivo flow-

table, ogni colpo corrisponde ad una escursione verticale di 20 mm e ogni colpo è distanziato dal successivo di 1 secondo.

In queste condizioni sperimentali, la deformazione del tronco di cono (figure 2.22 e 2.23) può essere considerata il risultato di un vero e proprio flusso coinvolgente l'intera massa del materiale e la sua valutazione quantitativa più efficace e sensibile è la riduzione dell'altezza.



Figura 2.22 - Abbassamento al cono della malta ottenuta col grassello A, rapporto grassello/sabbia 1:2 dopo 0, 30 e 70 colpi.



Figura 2.23 - Abbassamento al cono della malta ottenuta col grassello B, rapporto grassello/sabbia 1:1.5 dopo 10, 70 e 90 colpi.

Come mostrato nelle figure 2.24 e 2.25, l'andamento dei dati appare regolare, riproducibile (sono riportati i risultati di tre determinazioni per ogni composizione) e fortemente discriminante.



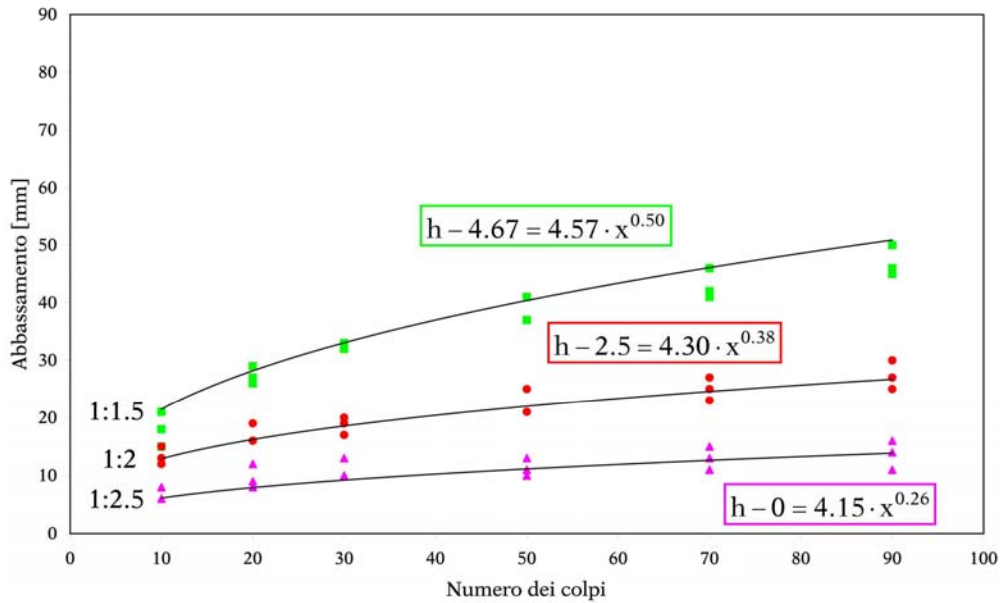


Figura 2.24 - Misure di lavorabilità/consistenza delle malte A.

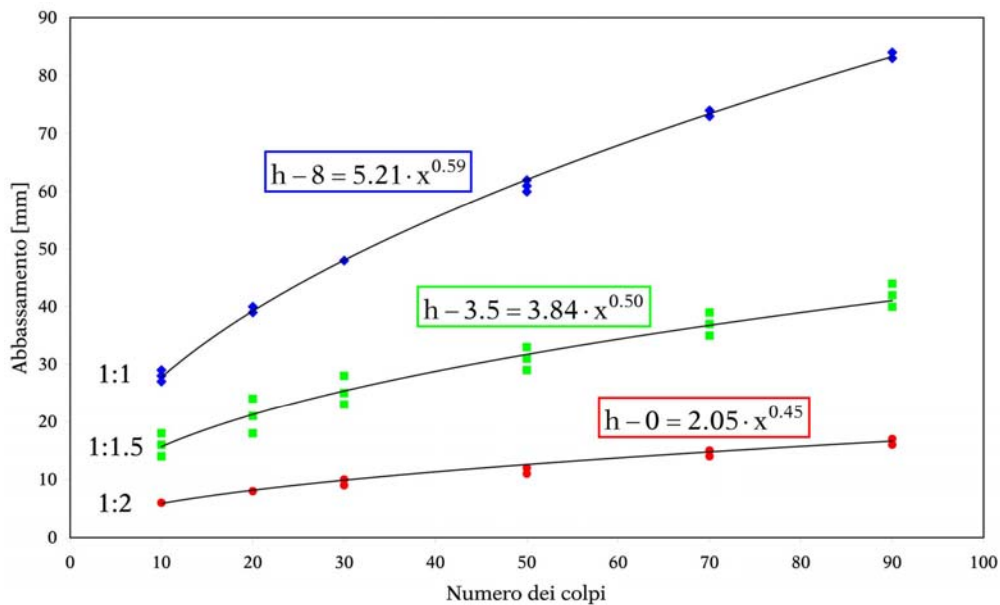


Figura 2.25 - Misure di lavorabilità/consistenza delle malte B.

Come indicato nelle figure le curve di lavorabilità delle malte (valore medio) sono efficacemente rappresentate dalla relazione:

$$h - h_0 = a \cdot x^b$$

essendo  $h$  l'abbassamento del tronco di cono dopo  $x$  colpi di sollecitazione e  $h_0$  l'abbassamento iniziale (per  $x=0$ ). I tre parametri,  $h_0$ ,  $a$  e  $b$  variano linearmente con il rapporto compositivo grassello/sabbia, e naturalmente in dipendenza del differente tipo di grassello (vedi figure 2.26 e 2.27).

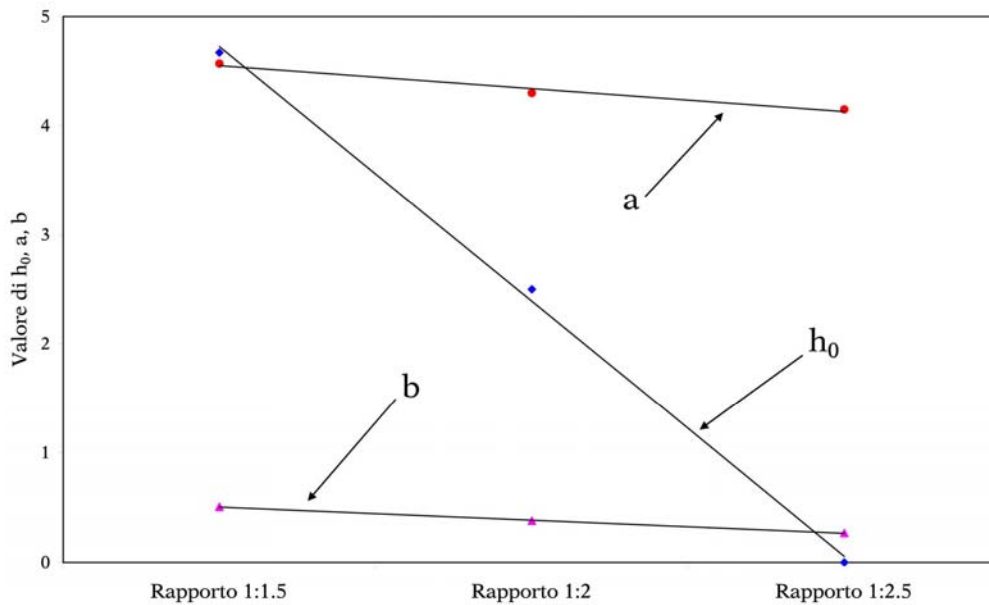


Figura 2.26 - I tre parametri caratterizzanti le curve di lavorabilità delle malte A.

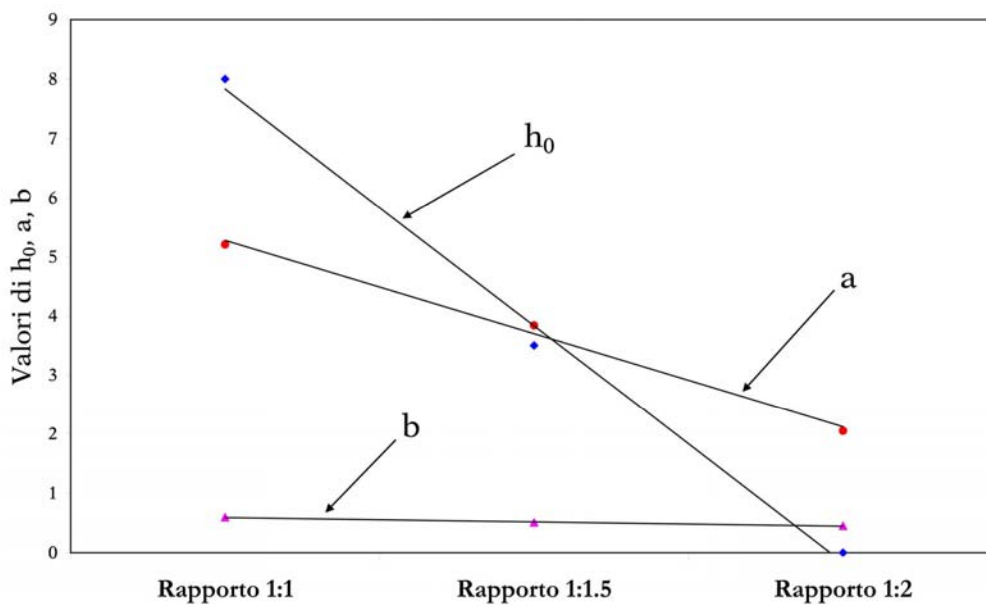


Figura 2.27 - I tre parametri caratterizzanti le curve di lavorabilità delle malte B.

Un andamento discriminante, regolare e semplice delle curve di correlazione concernenti il fenomeno della lavorabilità/consistenza consente, potenzialmente, di disporre di strumenti in grado di 'progettare' la composizione delle malte.

I dati presentati sono stati pubblicati sulla rivista «ZKG International» [ATZENI, ORRÙ, SANNA, SPANU 2006].

Nel paragrafo II-2.2 la questione della misura della consistenza delle malte di calce sarà riproposta in termini di modellazione fuzzy di carattere generale.

## 2.1.4 – Sviluppi reologici dei materiali per impieghi strutturali a base cementizia

Il settore dei conglomerati cementizi continua a definire e quindi a normare ed applicare materiali con caratteristiche di resistenza, compattezza e lavorabilità sempre migliori. Ad esempio, le Norme Tecniche sulle Costruzioni [N.T.C. D.M. 14/09/2005] prevedono ora l'utilizzo di calcestruzzi con  $R_{ck}$  molto alti, in accordo alla Normativa Europea ed alle esperienze giapponese e nordamericana.

In particolare, i migliori calcestruzzi SCC formulati ed utilizzati negli ultimi anni sono diventati sempre più rispondenti alla definizione fisica di liquido:

*“a state of the matter...in which a substance has the capacity to flow under extremely small shear stresses and conforms to the shape of a confining vessel, but is relatively incompressible, lack the capacity to expand without limit, and can possess a free surface.”*

[MCGRAW-HILL 1996]

In realtà calcestruzzi di caratteristiche simili vennero sviluppati già negli anni '60 da Collepari che li chiamò 'reoplastici', termine che indicava sia la loro capacità di fluire (come detto in precedenza *rheo* in greco significa 'scorrere'), sia la loro stabilità alla segregazione e quindi plastico o coesivo. Venne anche definito un indice di reoplasticità dato dal reciproco della capacità di bleeding. La produzione di un calcestruzzo con alto indice di reoplasticità richiese naturalmente l'adozione di additivi superfluidificanti affinché i calcestruzzi, pur essendo confezionati con bassi rapporti acqua/cemento, potessero essere molto fluidi e privi di segregazione. Oltre all'utilizzo di additivi superfluidificanti l'alto indice di reoplasticità dipende anche dall'alto dosaggio di cemento ( $350-450 \text{ kg/m}^3$ ; un dosaggio elevato garantisce una buona coesione), dalle caratteristiche granulometriche dell'inerte (per ostacolare la segregazione e il bleeding), dalla dimensione massima dell'aggregato (che deve essere inferiore a 20 mm) e dalla presenza di filler (ceneri volanti) in sostituzione del cemento fino al 35% (per ridurre il calore di idratazione).

Rispetto ai calcestruzzi reoplastici, i moderni SCC vengono confezionati anche con l'utilizzo di prodotti coesivizzanti (silice amorfa colloidale e/o fumo di silice) ma soprattutto di additivi viscosizzanti (spesso di origine naturale, bio-polimeri) [COLLEPARDI 2006]. Questi calcestruzzi possono scorrere per 10 m a partire dal punto di getto, attraversare le aree tra i ferri di armatura e riempire omogeneamente gli spazi confinati, sotto l'azione del solo proprio peso (senza vibrazione o battitura), e naturalmente mantenendosi omogenei sia durante il flusso che in condizioni statiche a getto ultimato [UNI 11040 2003].

Tabella 2.1 – Esempio di composizione di un calcestruzzo SCC [COLLEPARDI 2006].

COMPONENTE	DOSAGGIO
Cemento CEM I 52.5 R	$435 \text{ kg/m}^3$
Cenere volante	$115 \text{ kg/m}^3$
Sabbia (diametro 0-4 mm)	$895 \text{ kg/m}^3$
Ghiaia (diametro max 20 mm)	$840 \text{ kg/m}^3$
Acqua	$195 \text{ kg/m}^3$
Superfluidificante acrilico	$6 \text{ kg/m}^3$
Agente viscosizzante	$2.75 \text{ kg/m}^3$

La caratterizzazione reologica di questi ‘liquidi’ tuttavia non ha compiuto alcuno sviluppo. È oramai generalmente assunto che il calcestruzzo risponda alla relazione di Bingham [UZOMAKA 1974; TATTERSALL & BANFILL 1983; ATZENI, MASSIDDA, SANNA 1992; COPPOLA 2001], anche se la tecnica della roto-viscosimetria a cilindri coassiali non è utilizzabile per la sua effettiva validazione, considerata la dimensione massima dell’aggregato, in fase di studio e tanto meno nella corrente caratterizzazione del prodotto commerciale.

Un calcestruzzo SCC ha un abbassamento al cono di Abrams così elevato da non risultare significativo e pertanto è stato definito lo slump flow, ossia la misura del diametro del cls sformato dal cono che deve superare un valore di 600 mm. In particolare viene definita una velocità di deformazione che viene calcolata considerando il tempo necessario affinché lo slump flow raggiunga un diametro di 500 mm: tale valore non deve essere superiore a 12 s [UNI 11041 2003].

Si sono inoltre adottate nuove procedure empiriche quali gli apparati cosiddetti L-box, ad armatura verticale (figure 2-28 2.29) e ad armatura orizzontale (figura 2.30) e U-box (figura 2.31) che simulano su scala ridotta le condizioni di flusso durante la posa in opera [COPPOLA 2001; UNI 11043 2003; UNI 11044 2003].



Figura 2.28 - L-box ad armatura verticale.

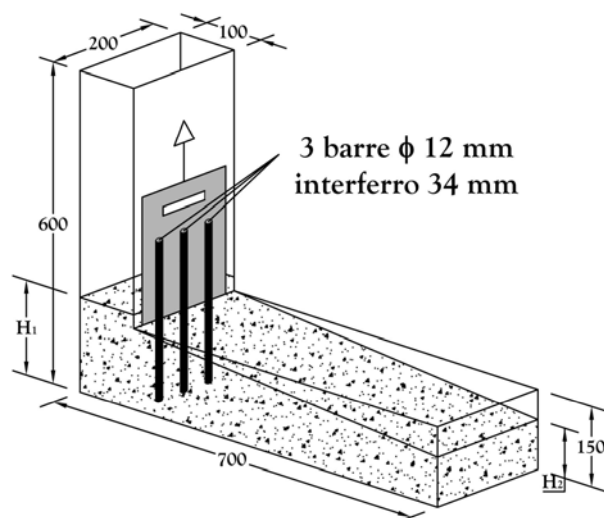


Figura 2.29 - Schema di L-box ad armatura verticale (le misure sono espresse in mm).

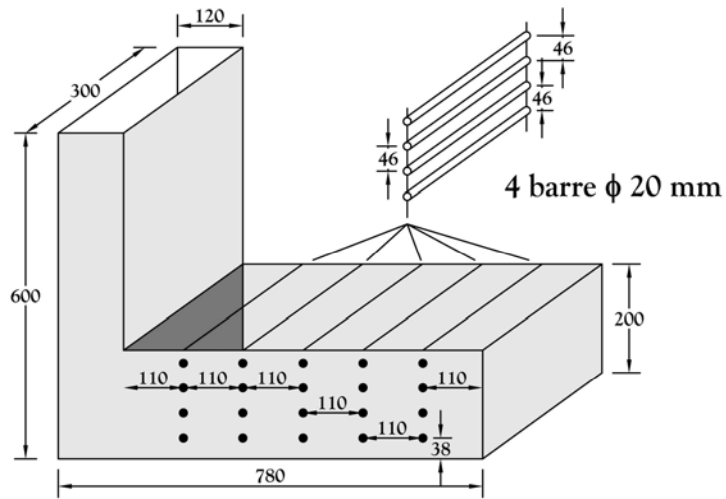


Figura 2.30 - Schema di L-box ad armatura orizzontale (le misure sono espresse in mm).

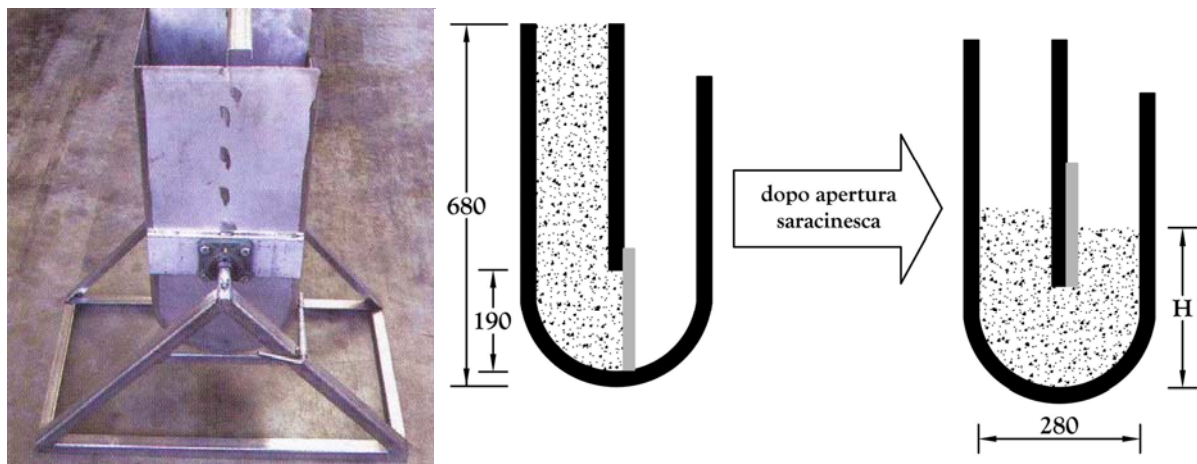


Figura 2.31 - U-box e schema di funzionamento (le misure sono espresse in mm).

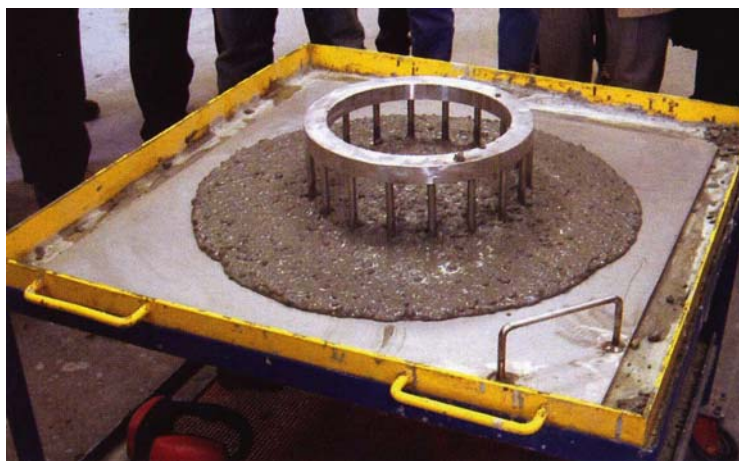


Figura 2.32 - Un altro dispositivo empirico per la valutazione del calcestruzzo SCC.

Come osservato da DARI & PASCALI [2003]:

*“è essenziale effettuare, contestualmente alle prove prescritte sul SCC fluido, sempre una valutazione visiva sulla possibilità di segregazione e di sedimentazione... La valutazione e l’interpretazione dei risultati va sempre effettuata tenendo conto del tipo di getto da realizzare.”*

*[Dari & Pascali 2003]*

È chiaro perciò che accanto ad una normazione del materiale e delle sue specifiche è fondamentale l’esperienza dell’operatore, fattore empirico che naturalmente non viene preso in considerazione nelle procedure normative.

La ‘qualità reologica’ del calcestruzzo allo stato fluido dipende quindi da un gran numero di fattori (variabili), tutti rigorosamente enunciabili ma il cui concorso alla definizione si è sino ad ora dimostrato pressoché impossibile da esplicitare in una formula. Per un generico indice di qualità reologica, RQI, si può porre:

RQI = f (cemento - tipo e quantità,  
filler - tipo e quantità,  
additivi - tipo e quantità,  
inerte - tipo, granulometria e quantità,  
acqua - quantità,  
aria - quantità e distribuzione,  
tempo,  
temperatura,  
energia di miscelazione) .

Le variabili sono molte ed interagiscono in modo complesso: la f non è esplicitabile. Naturalmente un esperto Concrete Engineer è in grado di gestire il complesso dei dati, ma sarebbe utile avere un’efficiente procedura che lo aiuti nell’organizzazione delle sue conoscenze, riduca l’ammontare del lavoro sperimentale per la messa a punto di nuove formulazioni e possa essere utilizzato da tutti gli operatori del settore.

Per lo studio delle ‘tradizionali’ paste di cemento sono stati proposte numerose trattazioni; di seguito si riportano alcune delle equazioni dai dati di letteratura che ne descrivono il comportamento  $\tau$  vs  $\dot{\gamma}$  [COSTA & MASSAZZA 1986]:

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma} \quad \text{BINGHAM 1922}$$

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n \quad \begin{cases} n > 1 & \text{dilatanti} \\ n < 1 & \text{viscoplastici} \end{cases} \quad \text{HERSCHEL \& BUCKLEY 1926}$$

$$\dot{\gamma} = k_1 \tau + k_2 \tau^n \quad \text{ELLIS 1927}$$

$$\tau = \sum_{i=1}^n A \sinh^{-1}(\dot{\gamma} B_i) \quad \text{EYRING 1936}$$

$$\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + k_1 \dot{\gamma}^{1/2} \quad \text{CASSON 1959}$$

$$\tau = A(\dot{\gamma} + C)^B \begin{cases} B > 1 & \text{dilatanti} \\ B < 1 & \text{viscoplastici} \end{cases}$$

ROBERTSON & STIFF 1976

$$\tau = \tau_0 + B \sinh^{-1}(\dot{\gamma}/C)$$

VOM BERG 1979

$$\dot{\gamma} = \alpha \tau^2 + \beta \tau + \delta$$

ATZENI, MASSIDDA, SANNA 1983

Per quanto riguarda invece il comportamento  $\tau$  vs  $t$  tra le relazioni più utilizzate vi è quella di Tattersall che è stata discussa e utilizzata nel precedente paragrafo per le paste di calce.





## 2.2 – MODELLO REOLOGICO FUZZY PER PASTE, MALTE E CALCESTRUZZI

È questa la prima applicazione della metodologia fuzzy nell'ambito di questa ricerca.

La sola citazione fuzzy reologica nota in letteratura è quella di BANINI & BEARMEN [1998] e si riferisce alla caratterizzazione degli slurry nei processi di macinazione e separazione in idrocycloni.

Come accennato nei precedenti paragrafi, termini quali 'untuosità', 'plasticità', 'coesione', 'lavorabilità' o 'consistenza' vengono correntemente utilizzati senza che ne vengano dati né una definizione rigorosa dal punto di vista fisico, né metodi per la loro valutazione quantitativa. Ma 'plasticità', 'lavorabilità', 'consistenza' sono tipiche variabili linguistiche come intese nella teoria fuzzy e hanno una valenza olistica, mentre invece la pratica realizzazione/misurazione è in grado di esprimere solo aspetti parziali del fenomeno.

Il comportamento delle paste di calce e di cemento può essere caratterizzato tramite la tecnica rotoviscometrica; abbiamo visto che esistono numerosi studi su questo argomento e alcuni dati originali sono stati ottenuti in questa ricerca e presentati nel paragrafo II-2.1. Come visto, la relazione tra tensione tangenziale  $\tau$  e il tempo  $t$  a gradiente di scorrimento  $\dot{\gamma}$  costante può essere rappresentata efficacemente dalla formula di Tattersall e quindi dal valore massimo e di equilibrio dello shear stress e da una costante di tempo ( $\tau_M$ ,  $\tau_{eq}$ ,  $T$  per caratterizzare il comportamento tempo dipendente) [TATTERSALL 1955; CHENG & EVANS 1965; TATTERSALL & BANFILL 1983; ATZENI, MASSIDDA, SANNA 1986; NKINAMUBANZI & AÏTCIN 2004; ROUSSELL 2005; ATZENI, ORRÙ, SANNA, SPANU 2006]. Per la relazione tra tensione tangenziale  $\tau$  e gradiente di scorrimento  $\dot{\gamma}$  a tempo  $t$  costante può impiegarsi quella di Bingham, dalla quale si determinano  $\tau_0$  (termine rappresentativo del comportamento a basso shear) e  $\eta_p$  (termine rappresentativo del comportamento ad alto shear).

Sia che si impieghi la relazione di Tattersall sia che si utilizzi quella di Bingham occorrono 5 parametri reologici per descrivere il complesso di dati derivanti dalle misure in condizioni di flusso rigorosamente definite in un viscosimetro rotante a cilindri coassiali. Adottare relazioni diverse non cambia sostanzialmente questo computo [TATTERSALL 1955; CHENG & EVANS 1965; ATZENI, MASSIDDA, SANNA 1986; ROUSSEL 2005].

Se esprimere la reologia della pasta con i dati derivanti dalle tecniche rotoviscosimetriche comporta l'utilizzo di almeno cinque parametri, sarebbe evidentemente conveniente utilizzare un unico parametro caratterizzante, cioè un 'rappresentante', come in democrazia, con gli stessi vantaggi e svantaggi. Il candidato ideale per questa operazione è, evidentemente, proprio la 'plasticità', che però in questa trattazione definiremo come variabile linguistica, fuzzificandola e valutandola attraverso una KB ed una procedura di inferenza.

La 'plasticità' della pasta è una componente chiave del comportamento reologico delle corrispondenti malte e calcestruzzi; questo può essere descritto definendo un Rheological Quality Index, RQI, che esprime quanto il comportamento al flusso del materiale si approssimi a quello di un fluido perfetto.

Convenzionalmente si potrebbe scrivere:

$RQI = f(\text{plasticità della pasta, proprietà reologiche dell'aggregato, rapporto aggregato/pasta, contenuto e distribuzione dell'aria})$ .

Naturalmente la funzione  $f$  è praticamente inconoscibile, dato il grande numero delle variabili in gioco nella definizione di ciascun termine; riguardo a questi occorre poi osservare che la loro elencazione non è da intendersi in modo riduzionistico: anche la più completa delle caratterizzazioni non esaurisce la gamma delle reciproche influenze.

### 2.2.1 – Fuzzificazione della variabile dipendente RQI

La figura riporta la fuzzificazione proposta per RQI, intesa come variabile linguistica. Il dominio di tale variabile si estende a 0 (relazione tra forza e deformazione come in un solido perfetto) a 100 (relazione tra forza e deformazione come in un liquido perfetto) granulati nei sub-sets: very low (VL), low (L), medium (M) e high (H).

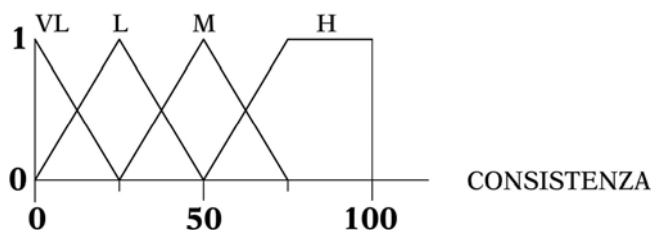


Figura 2.33 – Fuzzificazione della variabile dipendente RQI.

### 2.2.2 – Riconoscimento e fuzzificazione delle variabili indipendenti

Come detto, la plasticità delle paste può essere vista, nell'ambito della fuzzy logic, come una tipica variabile linguistica. La figura 2.34 riporta la fuzzificazione proposta per la variabile linguistica 'plasticità'.

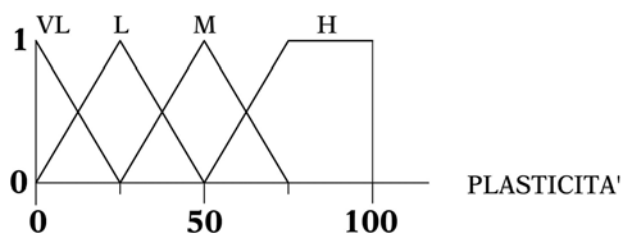


Figura 2.34 – Fuzzificazione della variabile 'plasticità'.

Posto 'plasticità' =  $f(\tau_e, \tau_M, T, \tau_o, \eta_p)$ , si procede alla fuzzificazione di tali ulteriori variabili. Per i sistemi considerati,  $\tau_e$  raggiunge, in tempi differenti a seconda delle condizioni operative, valori compresi in un range limitato e poco discriminante; i parametri  $\tau_e$  e  $\tau_M$  possono quindi essere considerati congiuntamente, sotto forma di differenza  $\Delta\tau$ . La figura 2.35 riporta la fuzzificazione dei dati sperimentali acquisiti nell'ambito della presente ricerca sulle paste di calce.

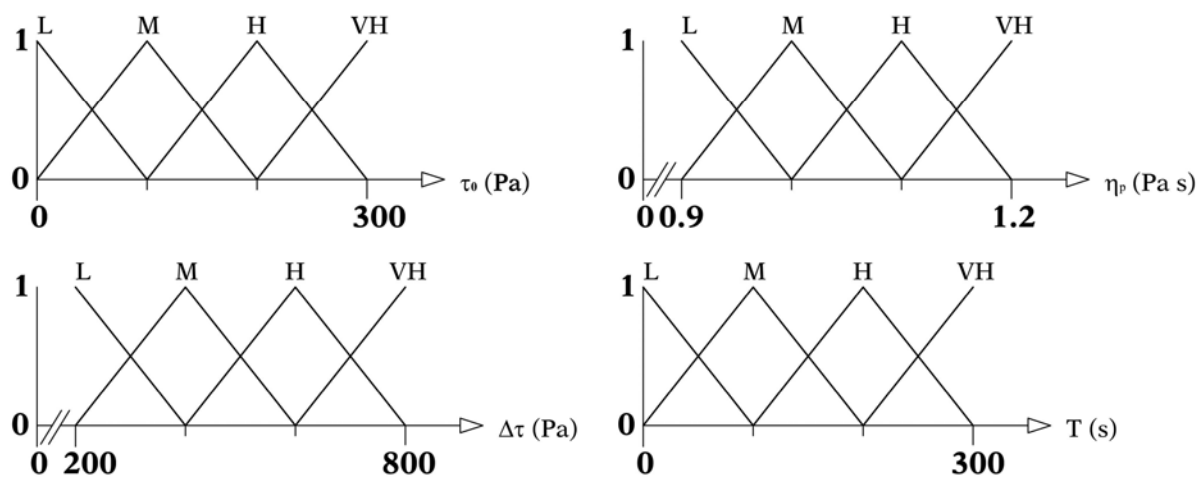


Figura 2.35 – Fuzzificazione delle variabili da cui dipende la ‘plasticità’ delle paste di calce. Tutti i dati sono riferiti ad un range di  $\dot{\gamma}$  di  $10\div 50\text{ s}^{-1}$ ;  $\tau_0$  ed  $\eta_p$  sono valutati a 1’.

Anche nel caso delle paste di cemento ‘plasticità’ può essere considerata dipendente dagli stessi parametri, ma ovviamente cambiano i range di riferimento. La figura 2.36 mostra la fuzzificazione nel caso delle paste di cemento di SCC.

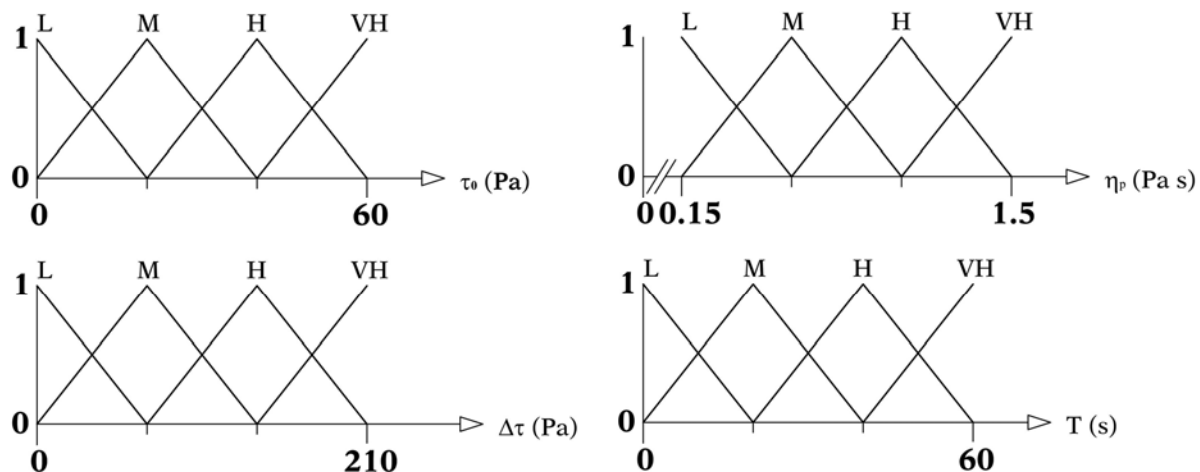


Figura 2.36 – Fuzzificazione delle variabili da cui dipende la ‘plasticità’ delle malte di cemento. Tutti i dati sono riferiti ad un range di  $\dot{\gamma}$  di  $10\div 50\text{ s}^{-1}$ ;  $\tau_0$  ed  $\eta_p$  sono valutati a 1’.

### 2.2.3 – Il modello reo-fuzzy

In tabella 2.2 si riporta l'enunciazione delle regole di tipo IF/THEN per la variabile 'plasticità' (n = 34).

Tabella 2.2 - Le rules della KB per valutare la 'PLASTICITÀ' (- indifferente).

Rule n.	IF $\tau_o$ is:	AND $\eta_p$ is:	AND $\Delta\tau$ is:	AND T is:	THEN PLASTICITÀ is...
1	L	L	-	-	VL
2	-	-	L	L	VL
3	L	M	-	-	L
4	-	-	L	M	L
5	M	L	L	-	L
6	M	L	M	L	L
7	M	M	L	-	L
8	M	M	M	M	M
9	M	M	M	H	H
10	M	M	H	M	M
11	M	M	H	H	H
12	M	H	M	M	H
13	M	H	M	H	H
14	M	H	H	M	H
15	M	H	H	H	H
16	M	H	VH	M	H
17	M	H	VH	H	H
18	H	M	M	M	H
19	H	M	M	H	M
20	H	M	H	M	H
21	H	M	H	H	M
22	H	M	VH	H	M
23	H	M	VH	VH	L
24	H	H	H	H	M
25	H	H	H	VH	M
26	H	H	VH	H	M
27	H	H	VH	VH	L
28	H	VH	H	-	M
29	H	VH	VH	-	L
30	VH	H	H	M	M
31	VH	H	H	H	L
32	VH	H	VH	M	L
33	VH	H	VH	H	M
34	VH	VH	-	-	L

L'aggiunta dell'aggregato alle paste porta alla costituzione della malta di calce e del calcestruzzo. La presenza dell'aggregato ha rilevanti vantaggi tecnici per il materiale allo stato indurito (stabilità dimensionale, rapidità e regolarità nella carbonatazione, resistenza all'usura, economicità), ed un solo inconveniente: peggiora la fluidità.

La presenza dell'aggregato è comunque variamente 'sfavorevole' in relazione alle caratteristiche fisico-morfologiche dei grani e della loro distribuzione; viene definito un indice

di questa penalizzazione: 'aggregate rheo-index', ARI, fuzzificato come mostrato nella figura 2.37.

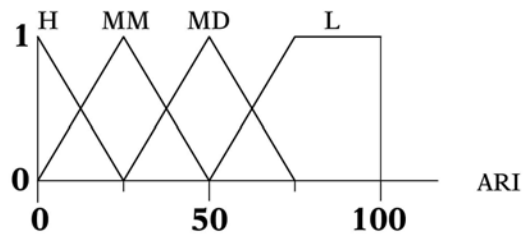


Figura 2.37 - Fuzzificazione dell'ARI.

In generale si può porre [PETTIJOHN, POTTER, SIEVER 1972]:

$ARI = f(\text{forma, angolarità, tessitura, distribuzione granulometrica})$ .

Le variabili 'forma', 'angolarità', 'tessitura' possono essere fuzzificate come mostrato nelle figure 2.38-2.40.

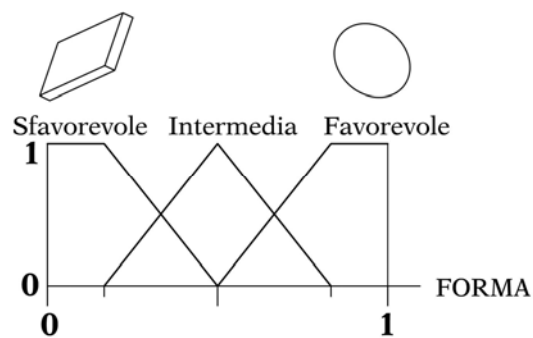


Figura 2.38 - Fuzzificazione della 'forma' dell'aggregato.

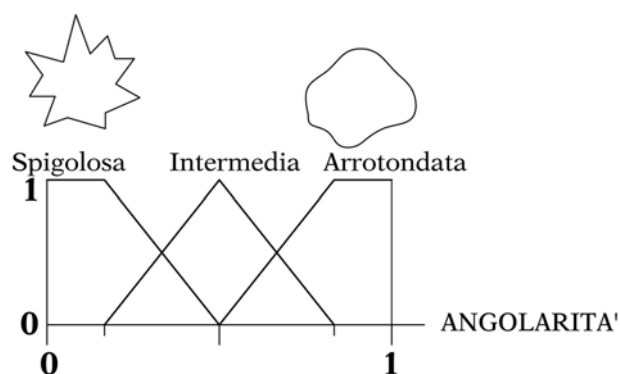


Figura 2.39 - Fuzzificazione della 'angolarità' dell'aggregato.

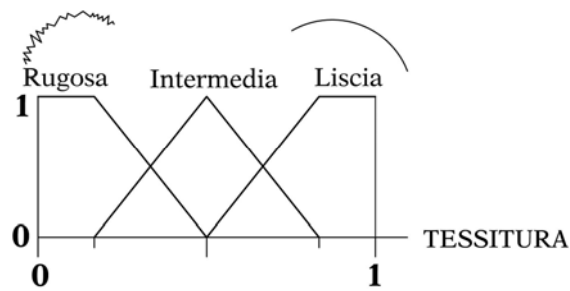


Figura 2.40 - Fuzzificazione della 'tessitura' dell'aggregato.

La granulometria, nel caso non sia soggetta a forti variazioni (questo si può considerare il nostro caso, per via dei vincoli derivanti dalla richiesta di compattezza necessaria per il raggiungimento di buone prestazioni meccaniche del materiale), può essere valutata attraverso un unico parametro, ad esempio il 'modulo di finezza' [NEVILLE & BROOKS 1993], fuzzificato come mostrato in figura 2.41.

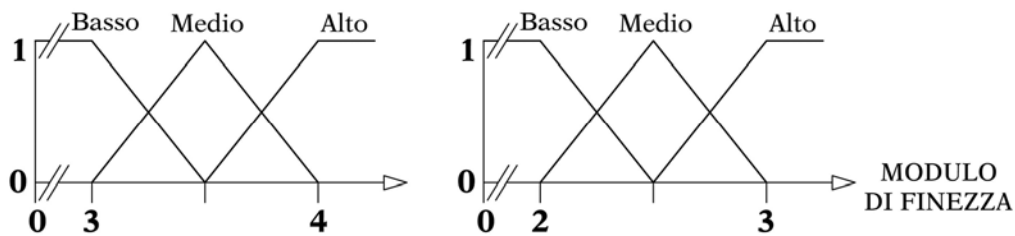


Figura 2.41 - Fuzzificazione del 'modulo di finezza': a sinistra i valori da utilizzarsi per il confezionamento delle malte di calce, a destra per SCC.

La valutazione del ARI richiede evidentemente uno specifico blocco di regole IF/THEN. Le possibili combinazioni tra forma, angolarità, tessitura e modulo di finezza di un aggregato sono soggette a dei vincoli derivanti dalla sua genesi (naturale: disgregazione, trasporto, erosione; artificiale: frantumazione) e dalle sue caratteristiche cristalline (sfaldabilità, durezza).

La tabella 2.3 riporta il complesso delle regole IF/THEN per l'ARI (n = 26).

Tabella 2.3 – Le rules della KB per la valutazione dell'‘ARI’ (- indifferente).

Rule n.	IF FORMA is:	AND ANGOLARITÀ is:	AND TESSITURA is:	AND FINEZZA is:	THEN ARI is:
1	Sfavorevole	Spigolosa	-	Basso	H
2	Sfavorevole	Spigolosa	-	Medio	H
3	Sfavorevole	Spigolosa	-	Alto	MM
4	Sfavorevole	Intermedia	-	Basso	H
5	Sfavorevole	Intermedia	-	Medio	MM
6	Sfavorevole	Intermedia	-	Aalto	MD
7	Intermedia	Spigolosa	Rugosa	Basso	H
8	Intermedia	Spigolosa	Rugosa	Medio	H
9	Intermedia	Spigolosa	Rugosa	Alto	MM
10	Intermedia	Spigolosa	Intermedia	-	MM
11	Intermedia	Spigolosa	Liscia	-	MM
12	Intermedia	Intermedia	Rugosa	Basso	MM
13	Intermedia	Intermedia	Rugosa	Medio	MD
14	Intermedia	Intermedia	Rugosa	Alto	MD
15	Intermedia	Intermedia	Intermedia	-	MD
16	Intermedia	Intermedia	Liscia	Basso	MD
17	Intermedia	Intermedia	Liscia	Medio	MD
18	Intermedia	Intermedia	Liscia	Alto	L
19	Intermedia	Arrotondata	Liscia	-	L
20	Favorevole	Intermedia	Intermedia	Basso	MD
21	Favorevole	Intermedia	Intermedia	Medio	L
22	Favorevole	Intermedia	Intermedia	Alto	L
23	Favorevole	Intermedia	Liscia	Basso	MD
24	Favorevole	Intermedia	Liscia	Medio	L
25	Favorevole	Intermedia	Liscia	Alto	L
26	Favorevole	Arrotondata	Liscia	-	L

All'aumentare del rapporto aggregato/pasta, in peso, la reologia della malte è penalizzata; il rapporto si estende al massimo nel range tra 1 e 5; la figura 2.42 riporta la ‘penalizzazione’ indotta da tale rapporto.

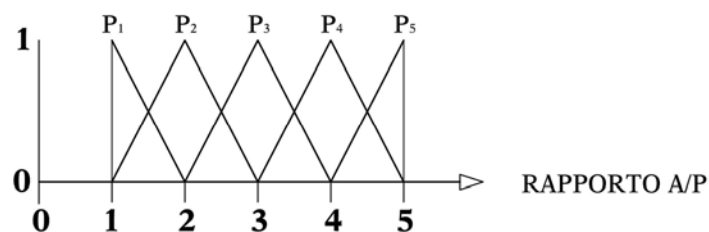


Figura 2.42 – Fuzzificazione del ‘rapporto aggregato/pasta’ A/P.

La presenza di aria sotto forma di un sistema di bolle di dimensione generalmente submillimetrica funge da importante agente fluidificante della malta, e può essere sia fortuita che intenzionalmente prodotta per aggiunta di appositi additivi (per l'isolamento termico, per la resistenza al gelo o per fronteggiare gli effetti della cristallizzazione salina). La fuzzificazione del ‘contenuto d'aria’ è riportata nella figura 2.43.



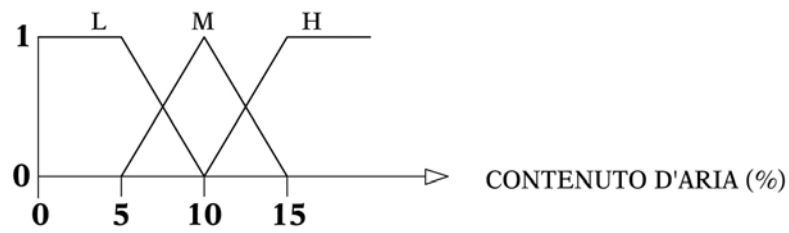


Figura 2.43 - Fuzzificazione del 'contenuto d'aria'.

La tabella 2.4 riporta le rules (N = 79) per la valutazione della consistenza delle malte.

Tabella 2.4 - Le rules della KB per la valutazione di 'RQI' (- indifferente).

Rule n.	IF PLASTICITY is:	AND RAPPORTO A/P is:	AND ARI is:	AND CONTENUTO D'ARIA is:	THEN RQI is...
1	VL	P2	MD	L	VL
2	VL	P2	L	L	VL
3	VL	P2	L	M	L
4	VL	P1	MM	L	VL
5	VL	P1	MD	L	VL
6	VL	P1	L	L	L
7	VL	P1	L	M	L
8	L	P3	MD	L	VL
9	L	P3	L	L	VL
10	L	P3	L	M	L
11	L	P2	MM	L	L
12	L	P2	MD	L	L
13	L	P2	MD	M	L
14	L	P2	L	L	L
15	L	P2	L	M	M
16	L	P2	L	H	M
17	L	P1	H	L	L
18	L	P1	H	M	L
19	L	P1	MM	L	L
20	L	P1	MM	M	L
21	L	P1	MD	L	L
22	L	P1	MD	M	M
23	L	P1	MD	H	M
24	L	P1	L	L	M
25	L	P1	L	M	M
26	L	P1	L	H	H
27	M	P4	MD	L	VL
28	M	P4	L	L	VL
29	M	P4	L	M	L
30	M	P3	MM	L	L
31	M	P3	MD	L	L
32	M	P3	MD	M	L
33	M	P3	L	L	L
34	M	P3	L	M	M
35	M	P3	L	H	M

36	M	P2	H	L	L
37	M	P2	H	M	M
38	M	P2	MM	L	L
39	M	P2	MM	M	M
40	M	P2	MD	L	M
41	M	P2	MD	M	M
42	M	P2	MD	H	M
43	M	P2	L	L	M
44	M	P2	L	M	H
45	M	P2	L	H	H
46	M	P1	H	L	H
47	M	P1	H	M	H
48	M	P1	MM	L	H
49	M	P1	MM	M	H
50	M	P1	MM	H	H
51	M	P1	MD	L	H
52	M	P1	MD	M	H
53	M	P1	L	L	M
54	M	P1	L	M	M
55	H	P5	MD	L	VL
56	H	P5	L	L	L
57	H	P4	MM	L	L
58	H	P4	MD	L	L
59	H	P4	MD	M	L
60	H	P4	L	L	L
61	H	P4	L	M	M
62	H	P3	MM	L	L
63	H	P3	MM	M	L
64	H	P3	MM	H	M
65	H	P3	MD	L	L
66	H	P3	MD	M	M
67	H	P3	MD	H	M
68	H	P3	L	L	M
69	H	P3	L	M	M
70	H	P3	L	H	H
71	H	P2	H	L	L
72	H	P2	H	M	M
73	H	P2	H	H	M
74	H	P2	MM	L	M
75	H	P2	MM	M	M
76	H	P2	MM	H	H
77	H	P2	MD	L	H
78	H	P2	MD	M	H
79	H	P2	L	L	H

I risultati delle precedenti ricerche sono stati pubblicati sulla rivista «Applied Rheology» per quanto concerne le malte di calce [ATZENI, SANNA, SPANU 2006 A] e sugli Atti del «Eight CANMET-ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete» per quanto concerne le applicazioni ai calcestruzzi SCC [ATZENI, SANNA, SPANU 2006 D].

### 3 – LA RESISTENZA A COMPRESSIONE DEI MATERIALI

La caratterizzazione tecnologica dei materiali da costruzione in opera nei siti archeologici (a fini archeometrici, di conoscenza delle antiche tecniche, o come indispensabile premessa per la conduzione degli interventi di consolidamento e conservazione) presenta degli aspetti difficili da esprimere in termini ordinari (statistici). Questo in relazione alle limitazioni ineludibili riguardo alla quantità di campioni prelevabili dalle opere monumentali, particolarmente per la conduzione di test meccanici e riguardo alle risorse di laboratorio dedicabili per la caratterizzazione dei materiali. In alternativa le tecniche cosiddette non-distruttive, ad esempio ultrasoniche e sclerometriche, presentano a loro volta altri problemi, persino per la caratterizzazione delle moderne opere in calcestruzzo [PUCINOTTI 2005; AUGUSTI, PODESTÀ, STAGNO, TORRE 2004] e quindi non possono considerarsi ancora una valida e risolutiva alternativa ai metodi basati sul prelievo di campioni e sulla loro ‘rottura’ in laboratorio. L’utilizzo di materiali di moderna estrazione presenta, a sua volta, altre limitazioni. In ambito archeologico, la cava originaria è spesso una delle incognite della ricerca, mentre i fronti e le facies originarie possono essere state asportate del tutto nel corso dei secoli o essere occultate sotto rovine o moderne costruzioni. L’equivalenza tra materiali originari e materiali di moderna estrazione è spesso soggettivamente assunta sulla base della caratterizzazione petrografica e microstrutturale, operando, ancora una volta, su campionamenti di dubbia rappresentatività statistica.

Pertanto il carattere distintivo delle determinazioni microstrutturali e tecnologiche conducibili sui litotipi in opera nei monumenti non può considerarsi statistico, se non forzatamente. Bisogna, quindi, prendere atto che in questi contesti dobbiamo gestire dati incompleti ed imprecisi, correlazioni di tipo spiccatamente non lineare e conoscenze qualitative ed empiriche. Il complesso di questi dati è oggi in ‘qualche modo’ sintetizzato dagli studiosi dei materiali, dai progettisti e dai realizzatori degli interventi di restauro e di conservazione. Tutto ciò però è lungi dal potersi considerare soddisfacente perché avviene al di fuori di un contesto formalizzato e quindi universalmente intelligibile, ricostruibile, riproducibile. Uno strumento concettuale per realizzare la trattazione completa di questi dati in forma matematica, e quindi anche informatizzabile, è la fuzzy logic.

Algoritmi derivati dalla teoria degli insiemi fuzzy sono già stati sperimentati nella geotecnica e nell’Ingegneria dei Materiali, proprio per la valutazione delle caratteristiche meccaniche [YUZHOU 1994; FINOL, GUO, JING 2001; GOKCEOGLU 2002; KAYABASI, GOKCEOGLU, ERCANOGLU 2003; SONMEZ, GOKCEOGLU, ULUSAY 2003; WEI, WANG, ZHOU 2003; AKKURT, TAYFUR, CAN 2004; GOKCEOGLU & ZORLU 2004; DEMIR 2005; KARAKUS & TUTMEZ 2006].



### 3.1 – Classi di resistenza, crisp e fuzzy, nelle rocce e nei materiali artificiali

Gli elementi di aleatorietà insiti nella caratterizzazione meccanica di ogni roccia

*“when the materials are natural rocks, the only thing know with certainty is that this material will never be known certainty”*

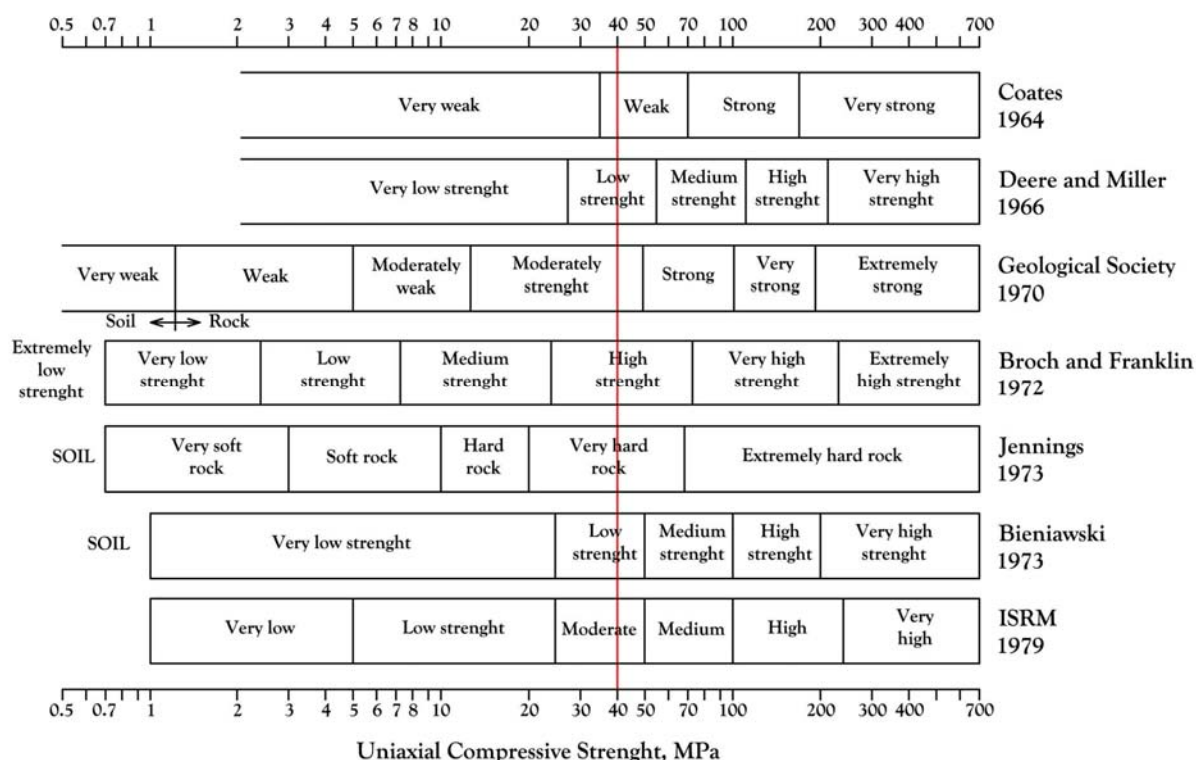
[GOKCEOGLU 2002]

sono ulteriormente accentuati nel caso del suo impiego nelle costruzioni archeologiche o in generale a carattere monumentale. In questo caso è, infatti, pressoché impossibile condurre un campionamento su basi statistiche per valutare le prestazioni meccaniche, attuali o residue, delle strutture portanti.

Fortunatamente l’acquisizione di valori ‘esatti’ è sostanzialmente inutile ai fini tecnici (ad esempio per la progettazione e la conduzione di un eventuale intervento di consolidamento e restauro), essendo operativamente adeguata la definizione della ‘classe resistenziale’.

La definizione della resistenza a compressione delle rocce secondo ‘classi’ piuttosto che con ‘esatti’ valori numerici è una scelta ampiamente giustificata e pratica. La tabella 3.1 riporta una serie di classificazioni elaborate da diversi Autori o Enti (ad esempio ISRM, International Society of Rock Mechanics 1979, oppure Geological Society 1970).

Tabella 3.1 – Classificazioni in termini linguistici della resistenza a compressione, con limiti rigidi, crisp tra le diverse classi.



Le espressioni che compaiono nella tabella 3.1 ad esempio ‘weak’, ‘strong’, ‘low’ sono tipici quantificatori linguistici (vedi capitolo I-2).

Come può osservarsi, un valore rigido di 40 MPa viene valutato nelle diverse classificazioni in termini linguistici, con espressioni che vanno da ‘weak’ a ‘low’, da ‘moderately’ fino a ‘high’.

strenght': ed è perciò evidente riconoscere quell' 'adeguamento al contesto' che è stato discusso come uno dei termini caratteristici della teoria degli insiemi fuzzy.

La figura 3.1 mostra a titolo di esempio una possibile fuzzificazione dei set definiti da Bieniawski.

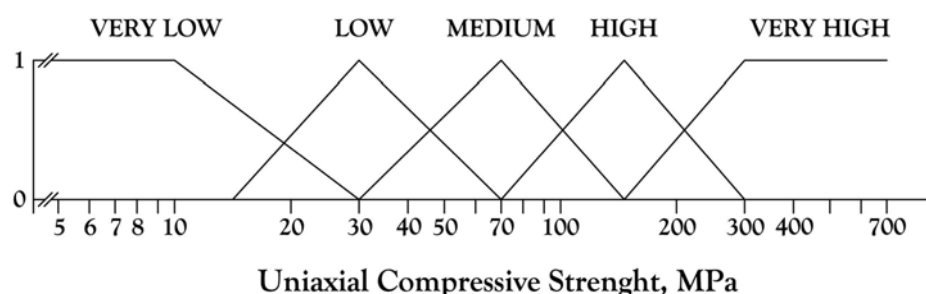


Figura 3.1 - Rielaborazione in termini fuzzy delle classi di resistenza delle rocce secondo Bieniawski.

Quanto detto vale anche per i moderni materiali artificiali quali i calcestruzzi [UNI EN 206-1 2001], tabella 3.2, assimilabili ai litoidi in questo contesto.

Tabella 3.2 - Classi di resistenza a compressione dei calcestruzzi secondo la Normativa Europea.

CLASSE DI RESISTENZA	$R_{ck}$ (MPa)	IMPIEGO
Molto bassa	5 ÷ 15	Strutture in cls non armato o a bassa percentuale di armatura
Bassa	15 ÷ 30	Strutture armate
Media	30 ÷ 55	Strutture armate e precomprese
Alta	55 ÷ 85	Strutture armate e precomprese

La caratterizzazione tecnologica del materiale roccioso è soggetta a tanti e tali elementi di aleatorietà che è risultato conveniente nella pratica, piuttosto che l'utilizzo di singole grandezze fisiche, la definizione di indici tipo RMR (Rock Mass Rating) [BIENIAWSKI 1989], stimato considerando congiuntamente differenti parametri. La tabella 3.3 illustra a titolo di esempio l'utilizzo del concetto di 'intervallo' di valori della resistenza a compressione, della spaziatura e dello stato di alterazione dei giunti e indica il 'peso' assegnato tramite dei coefficienti.

L'indice RMR è dato dalla somma dei diversi termini.

Tabella 3.3 – Alcuni parametri della classificazione di Bieniawski e loro coefficienti numerici.

PARAMETRI	INTERVALLI DI VALORI						
Resistenza a compressione monoassiale (MPa)	> 250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	< 1
Coefficienti numerici	15	12	7	4	2	1	0
Spaziatura delle discontinuità	> 2 m	0.6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm		
Coefficienti numerici	20	15	10	8	5		
Condizione dei giunti	Superfici molto rugose. Discontinuità chiuse e non persistenti. Pareti non alterate	Superfici debolmente rugose. Apertura delle discontinuità < 1 mm. Pareti leggermente alterate	Superfici debolmente rugose. Apertura delle discontinuità < 1 mm. Pareti completamente alterate	Superfici lisce o riempimenti argillosi di potenza < 5 mm o discontinuità collegate e con apertura di 1-5 mm	Riempimenti di argilla di potenza > 5 mm o discontinuità collegate e con apertura > 5 mm, persistenti		
Coefficienti numerici	30	25	20	10	0		

La tabella 3.4 definisce quindi la qualità della roccia utilizzando come indice la somma dei coefficienti.

Tabella 3.4 – Classificazione dell'ammasso roccioso secondo Bieniawski.

CLASSE	I	II	III	IV	V
Descrizione	Ottima	Buona	Mediocre	Scadente	Molto scadente
Somma dei coefficienti	100-81	80-61	60-41	40-21	< 20

Questo approccio, cioè l'espressione di un indice di qualità, è stato già utilizzato in questo lavoro, nel paragrafo II-2.2.3, nella trattazione della reologia (RQI) e lo sarà successivamente nella definizione del rating dei progetti conservativi (capitolo II-5). Nel seguito di questo paragrafo invece sarà la classificazione della resistenza a compressione a venire espressa considerando una serie di parametri microstrutturali, alcuni dei quali definiti esplicitamente come variabili linguistiche.





### 3.2 – Applicazione al basalto utilizzato nei siti archeologici della Sardegna

Il basalto compatto, con una frazione di vuoti inferiori all'1%, è, tra le rocce comuni, probabilmente quella che presenta i picchi di resistenza a compressione e di modulo elastico più alti: oltre 300 MPa e oltre 100 GPa, rispettivamente. Ma i basalti di tipo vescicolare, con vuoti macroscopici che arrivano alla dimensione di alcuni centimetri, derivanti dallo sviluppo della fase gassosa del magma in stato semifluido, hanno prestazioni inferiori. Del resto gli antichi, in epoche nelle quali non si era ancora sviluppata la tecnologia del ferro ed esisteva solo una limitata disponibilità di utensili in rame e bronzo, potevano operare agevolmente la lavorazione solo di quest'ultimo tipo.

In talune zone quali il Decan nella penisola Indiana, aree del Centro America e nell'area mediterranea significative estensioni della Turchia, della Sardegna e della Sicilia, i basalti sono largamente presenti e spesso utilizzati a fini edificatori e scultorei. In Egitto sono state riconosciute alcune cave coltivate dalla IV alla VI Dinastia (Antico Regno); le applicazioni del materiale erano prevalentemente indirizzate alla realizzazione di pavimenti in costruzioni templari [ASTON, HARRELL, SHAW 2000]. Anche in Sardegna questa roccia è stata utilizzata fin dalla preistoria per la realizzazione di alcune imponenti opere di fortificazione quali, ad esempio, le strutture nuragiche di Barumini (Su Nuraxi, patrimonio dell'umanità UNESCO), di Orroli (Arrubiu) e di Abbasanta (Losa) [LILLIU 1988; WEBSTER 1996].

I dati sperimentali (tabella 3.5) utilizzati in questa elaborazione (originale) derivano in larga parte da PIA [2005]; per agevolare la lettura si riassumono di seguito alcuni termini.

Il campionamento è stato condotto in un quadro di 'realistiche limitazioni', poste dalle locali Autorità incaricate della tutela dei monumenti, sulla quantità di materiale asportabile. Il prelievo di blocchi di dimensione decimetrica è stato autorizzato in tre aree archeologiche: 5 blocchi dall'area di Dorgali (denominazione D1-5), 6 dall'area di Villanovaforru (GM2-7), 8 da due differenti siti dall'area di Sardara (A1-4 e M1-4). Dai reperti si sono ricavati provini cubici di 4 - 5 cm di lato, in modo tale da evitare il prelievo di parti visivamente lesionate, per la misura della resistenza a compressione uniassiale, dell'assorbimento capillare d'acqua (i dati si riferiscono al valore conseguito dopo 10 giorni di esposizione) e del peso specifico apparente (rapporto tra peso e dimensione geometrica esteriore). I valori riportati sono la media aritmetica di un numero di provini che, in relazione al volume originario a disposizione, è compreso tra 3 e 15. Sono state effettuate determinazioni di composizione mineralogica tramite diffrazione di raggi X (XRD,  $\text{CuK}\alpha$ ), peso specifico della fase solida con picnometro ad acqua, microporosità per intrusione forzata di mercurio (MIP, nell'intervallo tra circa 2 nm e 75  $\mu\text{m}$ ), macroporosità tramite analisi di immagine (IA, nell'intervallo tra circa 80  $\mu\text{m}$  e 10 mm) su campioni levigati, impregnati con cemento bianco per migliorare il contrasto, e quindi osservazioni in microscopia elettronica a scansione (SEM) e ottica (OM).

Le osservazioni al SEM mostrano che i componenti cristallini sono inglobati in una matrice amorfa, come caratteristico di questa categoria di rocce. Gli spettri XRD mostrano come componente predominante la bytownite, un plagioclasio ad alto tenore di calcio e secondariamente un pirosseno (diopside). Talvolta sono state riscontrate tracce di quarzo e di un'argilla montmorillonitica derivante probabilmente dai processi di alterazione della roccia originaria. La porosità costituisce un parametro fortemente determinante per le prestazioni meccaniche dei materiali. Sulla resistenza a compressione uniassiale UCS sono presumibilmente influenti non solo la frazione volumica globale POR, che è il parametro

correntemente considerato nella letteratura [AL-HARTHI, AL-AMRI, SHEHATA 1999; GOKCEOGLU & ZORLU 2004] ma anche la distribuzione dimensionale e la forma dei vuoti.

La classe dei vuoti determinabile tramite MIP è limitata al valore del 5-7% (tabella 3.5); le osservazioni della microstruttura al microscopio elettronico indicano che si tratta di pori scarsamente connessi tra loro e questo spiega i modestissimi valori della capacità di assorbimento capillare d'acqua riscontrati. La POR può essere determinata dai valori dei pesi specifici SG,  $POR = [(1 - (SG_b/SG_p)) \cdot 100]$ , o come somma dei termini IA e MIP (tabella 3.5). Si riscontra l'equivalenza tra i due valori, seppure con una certa dispersione dei dati (retta  $y = 1.03 \cdot x$ ,  $x = POR \cdot SG$  con coefficiente di correlazione pari a 0.86).

La dimensione dei pori sui basalti vescicolari si estende per ben sette ordini di grandezza, dal nm al cm. Differente è l'origine di questi vuoti; quelli più grandi derivano dalla diffusione dei gas del magma e dalla coalescenza delle bolle così formatesi, mentre quelli più piccoli derivano sia dall'imperfetto consolidamento della massa fluida che dai processi alterativi della fase vetrosa e dei feldspati. Per quanto concerne i macropori/vescicole, si propone come parametro rappresentativo la pendenza SLP della retta di miglior correlazione del diagramma  $\log(-dV/dr)$  vs  $\log r$ .

Infine, le osservazioni in microscopia ottica pur non portando a vere e proprie misure, consentono comunque una stima della morfologia prevalente delle vescicole, SHP in termini di rotondità e dello stato di alterazione della microstruttura, WTH. Riguardo a quest'ultimo aspetto, si osserva che le prime fasi di degrado di questi litotipi si manifestano con patinature di colore rossiccio dovute ad ossidi di ferro derivanti dai processi di alterazione della fase vetrosa e dei plagioclasti, di entità non ancora tali da essere rivelate tramite XRD, ma che già costituiscono significativi punti di debolezza meccanica della microstruttura [HOUSTON & SMITH 1997; KARRAT, PERRUCHOT, MACAIRE 1998]. Alle variabili SHP e WTH vengono attribuiti i 'voti' {0.1, 0.2, ..., 0.9}.

La tabella 3.5 riporta quindi il complesso dei dati derivanti da misure strumentali e da stime osservative, acquisiti nel corso della sperimentazione.

Tabella 3.5 – Caratteristiche dei campioni.

	UCS (MPa)	SG <sub>B</sub> (g/cm <sup>3</sup> ) SG <sub>P</sub> , (g/cm <sup>3</sup> )	POR (%): SG / IA+MIP / MIP	- SLP	Assorb. acqua (g/cm <sup>2</sup> )	SHP	WTH
D1	45	2.38 / 2.90	18 / 20 / 6	1.66	2.5	0.6	0.3
D2	70	2.35 / 2.90	19 / 17 / 2	0.92	4.5	0.3	0.1
D3	62	2.50 / 2.93	15 / 19 / 7	0.99	0.7	0.3	0.4
D4	35	2.33 / 2.98	22 / 21 / 4	1.21	2.2	0.4	0.5
D5	29	2.03 / 2.99	32 / 30 / 5	1.89	1.9	0.3	0.6
GM2	36	2.07 / 2.86	28 / 31 / 6	1,22	1.4	0.7	0.3
GM3	22	1.87 / 2.86	35 / 31 / 5	0.95	1.6	0.2	0.7
GM4	42	1.78 / 2.48	28 / 32 / 5	0.55	1.2	0.4	0.5
GM5	48	2.21 / 2.88	23 / 30 / 5	0.93	0.9	0.2	0.4
GM6	27	2.02 / 3.02	33 / 30 / 10	1.06	1.6	0.4	0.8
GM7	23	2.16 / 2.85	29 / 29 / 6	0,78	1.0	0.1	0.7
A1	58	2.26 / 2.89	22 / 28 / 9	0.86	1.3	0.4	0.3
A2	69	1.95 / 2.89	32 / 36 / 6	1.16	1.1	0.9	0.1
A3	70	2.42 / 2.85	15 / 12 / 6	0.44	1.0	0.5	0.3
A4	56	2.39 / 2.82	15 / 12 / 6	0.82	1.9	0.5	0.5
M1	18	2.14 / 2.85	32 / 35 / 6	0.70	0.7	0.1	0.6
M2	41	2.18 / 2.78	25 / 27 / 7	0.60	1.3	0.2	0.5
M3	18	2.04 / 2.89	29 / 32 / 9	1,6	6.3	0.4	0.9
M4	33	2.02 / 2.86	29 / 23 / 8	0.47	3.8	0.1	0.5

UCS è risultata pressoché indipendente dal peso specifico della fase solida, dalla porosità MIP e dalla capacità di assorbimento capillare d'acqua. La correlazione o regressione multipla sulla funzione  $UCS = f(POR, SLP, SHP, WTH)$  porta al risultato:

$$UCS = 91.952 - 0.979 \cdot POR - 8.318 \cdot SLP + 16.153 \cdot SHP - 47.438 \cdot WTH, \quad r = 0.92.$$

La figura 3.2 a sinistra mostra la correlazione tra i valori di UCS così calcolati e quelli sperimentali.

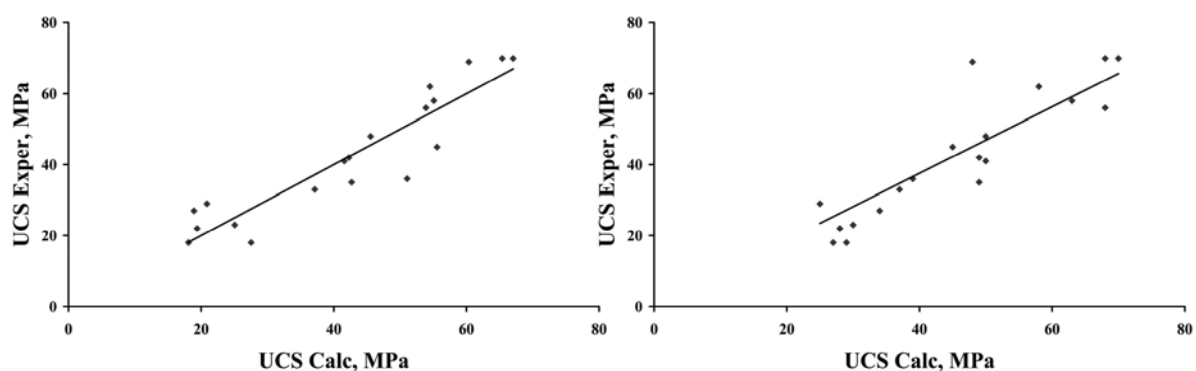


Figura 3.2 – Correlazione tra i valori sperimentali e calcolati di UCS: a sinistra dalla regressione multipla ( $r = 0.92$ ), a destra dall'inferenza fuzzy ( $r = 0.89$ ).

La generalizzazione del risultato ottenuto dalla regressione multipla e quindi il passaggio da un particolare set di dati sperimentali ad un prototipo di modello che vuole essere

rappresentativo della classe dei materiali in questione, può essere effettuato definendo una KB ed una procedura di inferenza fuzzy.

Come noto dal capitolo I-4, l'operazione di 'fuzzificazione delle variabili' porta a definire la loro appartenenza (grado di appartenenza) a insiemi fuzzy 'dai confini sfumati'; per la variabile dipendente UCS definiamo cinque sub-sets fuzzy: Very Low, Low, Medium, High, Very High (figura 3.3).

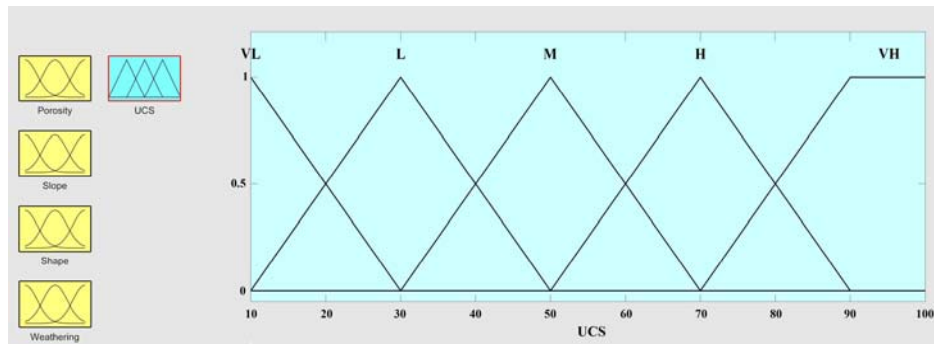


Figura 3.3 - Membership functions dei sub-sets fuzzy di UCS, nella rappresentazione del Toolbox Fuzzy di MatLab®.

La figura 3.4 riporta la proposta di fuzzificazione delle variabili indipendenti.

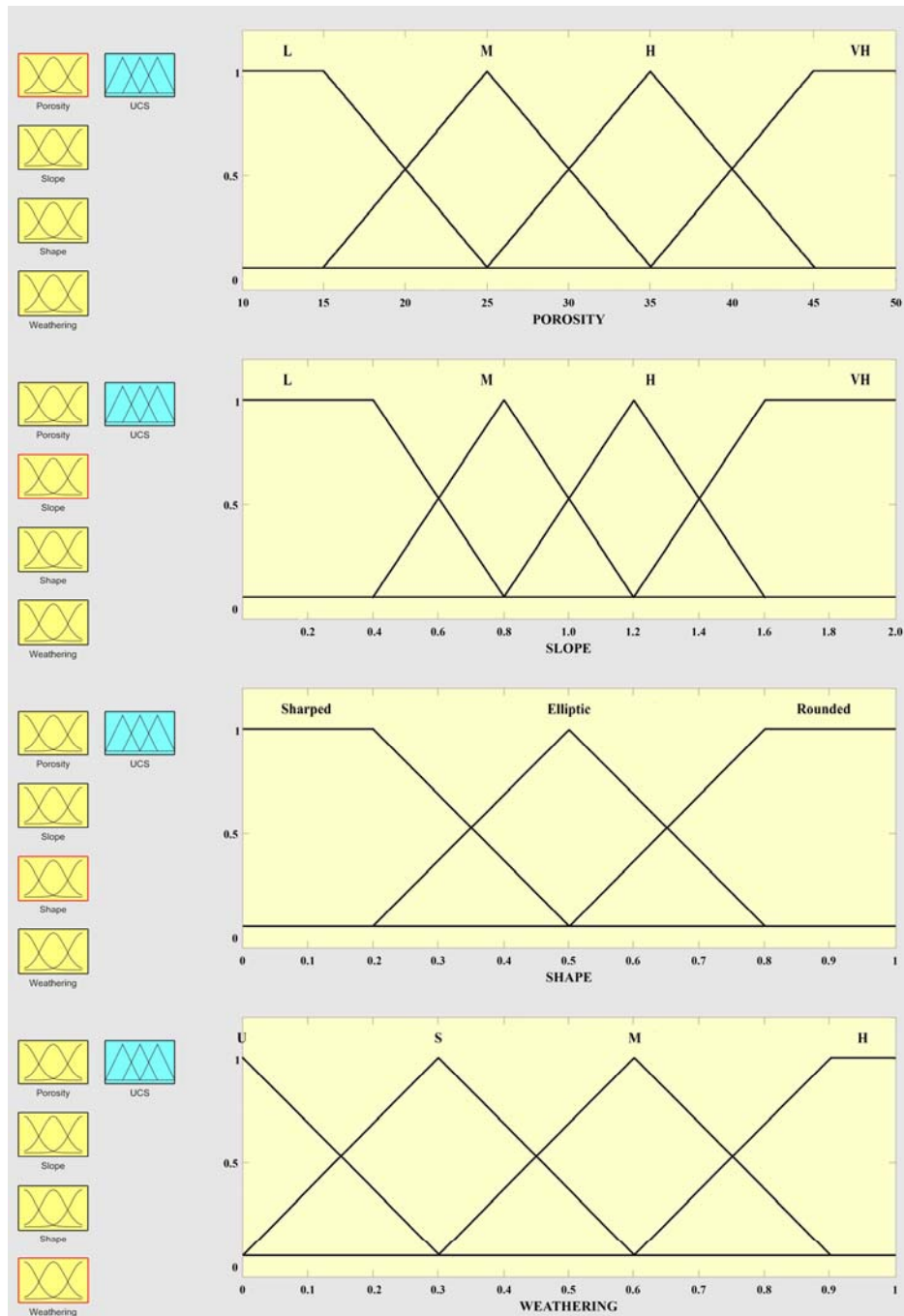


Figura 3.4 - Membership functions dei subsets fuzzy di POR, SLP, SHP e WTH, nella rappresentazione del Toolbox Fuzzy di MatLab®.

La tabella 3.6 riporta il complesso delle regole IF/THEN proposte. La procedura di inferenza adottata è quella FITA, implementata sul Toolbox Fuzzy di MatLab®. La figura 3.5 mostra una procedura di inferenza su un generico campione caratterizzato dai valori di input 18/0.6/0.2/0.2.

È ragguardevole osservare che l'applicazione delle procedure fuzzy al particolare set di dati sperimentali di tabella 3.5 porta ad un risultato sostanzialmente equivalente rispetto a quello conseguito con la tradizionale regressione multipla, figura 3.2 a destra.



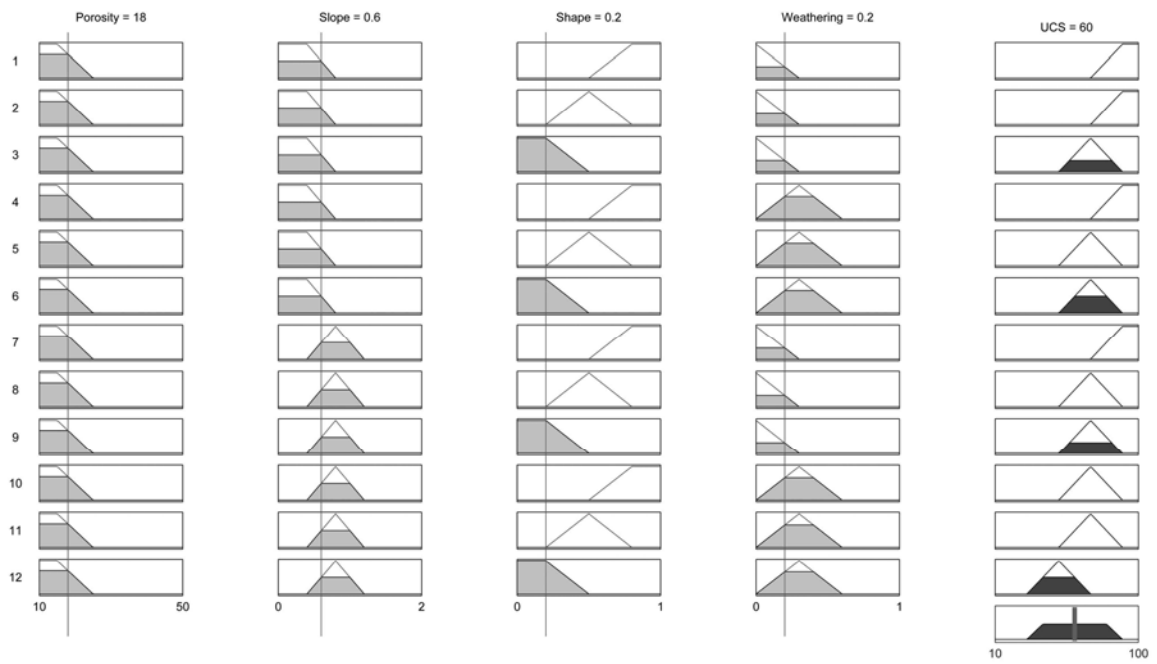


Figura 3.5 – Esempio grafico di attivazione di alcune regole e dell’inferenza.

Un articolo con i risultati di questo capitolo è in stampa sulla rivista «Materials Characterization» [ATZENI, PIA, SANNA, SPANU].





## 4 – LA DURABILITÀ DEI MATERIALI

Un altro settore molto importante dell'Ingegneria dei Materiali, al quale l'approccio tradizionale è risultato inadeguato, è quello della 'durability'. Questo settore incontra notevoli difficoltà a sviluppare degli affidabili modelli interpretativi e previsionali. In particolare, risulta difficile un efficace utilizzo ingegneristico della notevole mole di dati sperimentali e di interpretazioni teoriche formulate mediante l'isolamento di singoli aspetti chimico-fisico-biologici, in genere molto specifici e definiti su scala microscopica, per condizioni spesso strettamente 'di laboratorio'. L'alto numero e la complessità delle interazioni tra le variabili hanno sino ad ora reso difficile porre su basi quantitative l'impostazione olistica allo studio della durabilità delle costruzioni in generale e di quelle di interesse storico-monumentale in particolare. Essendo risultate sostanzialmente sterili le impostazioni modellistiche tradizionali, in questo capitolo si propongono alla discussione alcuni aspetti della logica e della matematica fuzzy che in un prossimo futuro potrebbero risultare una scelta efficace per la modellazione dei fenomeni in oggetto [MÖLLER, GRAF, NGUYEN 2004].

Concetti quali quelli di 'ciclo di vita utile' o di 'vita di esercizio' di una costruzione, con particolare riguardo alla durabilità dei materiali costituenti, si stanno lentamente ma saldamente affermando. Una concreta manifestazione di questa nuova sensibilità progettuale può essere riscontrata in recenti Norme Nazionali ed Europee [UNI EN 206/1 2001; N.T.C. D.M. 14/09/2005]. È evidente che la valutazione della 'vita' o durata di una costruzione richiede la disponibilità di un qualche modello del suo comportamento nel tempo. I modelli attualmente formulabili sono inevitabilmente rudimentali; il loro sviluppo richiede certamente una gran mole di ricerca teorica e di sperimentazione.

Stupisce piuttosto che nel campo specifico delle costruzioni antiche alle quali si riconosce lo status di Beni Culturali la variabile 'vita', riferita alla durata della configurazione attuale o di quella acquisibile in seguito agli interventi conservativi e di valorizzazione, sia ancora ignorata pur dovendo essere, come evidente, un fondamentale parametro di valutazione. Gli elementi di incertezza sul comportamento nel tempo delle strutture e dei materiali, l'incompletezza delle caratterizzazioni, la complessità delle relazioni, l'aleatorietà delle condizioni ambientali e culturali future, sono tutti potenti ostacoli alla stima di una 'vita' della costruzione, particolarmente nel caso che essa derivi da uno scavo archeologico e sia allo stato di rudere. Riteniamo che, attraverso gli strumenti concettuali della fuzzy logic attualmente a disposizione, sia possibile avviare lo sviluppo di modelli previsionali sulla complessa 'vita' di una costruzione antica secondo un approccio olistico [BURNS 1991; COLLEPARDI 2000; IDORN 2005].



## 4.1 – SVILUPPO DELLA MODELLAZIONE FUZZY DI UN SINGOLO FENOMENO DI ALTERAZIONE

La modellazione chimico-fisica ordinaria dei processi di degrado dei materiali da costruzione nei monumenti è attualmente in un'evidente situazione di impasse [PRICE 1996]: problemi interpretativi tradizionali non trovano una concorde soluzione (effetti dell'espansione termica, della cristallizzazione dei sali, della formazione del ghiaccio, dell'azione dissolvente delle acque, della colonizzazione lichenica e della formazione degli ossalati o delle croste nere, ecc.) e permane non chiaro come i dati di laboratorio possano entrare nel processo decisionale che porta alla definizione del progetto di intervento.

### 4.1.1 – Il gelo/disgelo nei materiali porosi

Uno dei fenomeni più comuni e più frequentemente riscontrati di alterazione dei materiali in opera, è costituito dalla fratturazione, scagliatura o polverizzazione conseguente all'espansione del ghiaccio nei loro pori o discontinuità, preliminarmente saturati a vario grado e soggetti ad escursioni termiche ambientali nell'intorno di 0°C. Il fenomeno ha una rilevante incidenza economica e tecnica anche riguardo ai materiali moderni (calcestruzzi, laterizi), ed è stato perciò largamente studiato, soprattutto in nord Europa, negli Usa ed in Canada. CHATTERJI, dopo decenni di studi sul fenomeno, concludeva in recenti pubblicazioni [1999 A, B] che:

*“in spite of a large volume of work carried out on the frost damage of consolidated porous materials...the mechanism of damage remains unresolved”.*  
[CHATTERJI 1999 A]

Infatti, pur essendo ben chiara la termodinamica alla base del fenomeno, il numero e la complessità dei termini da considerare per valutarne la cinetica e quantificarne gli effetti macroscopici in condizioni reali di esposizione hanno sino ad ora reso impossibile la precisa modellazione teorica e l'affidabilità della simulazione di laboratorio [PENTTALA 1999; SCHERER 1999; PENTTALA & NESAWY 2002].

La sperimentazione diretta della gelività viene fatta generalmente su provini di materiale non in opera, del quale non è possibile prelevare una quantità statisticamente adeguata, ma di un materiale soggettivamente valutato come equivalente, di forma definita, in condizioni di saturazione controllate, e quindi sottoposti a cicli temporali di gelo-disgelo tra due temperature estreme (spesso molto diverse da quelle riscontrabili in opera, es. -20°C) che accelerino (senza alterarne il meccanismo?) il fenomeno [UNI 8635-11 1984; UNI 7087 2002].

È certamente possibile definire un valore medio del numero di cicli che portano ad un prestabilito livello di degrado (valutato ad esempio dal peso dei frammenti distaccatisi o da una riduzione della resistenza meccanica o della velocità di propagazione degli ultrasuoni). Ma è evidente che le condizioni sperimentali adottate in laboratorio costituiscono una simulazione lontana dalle condizioni reali dei particolari siti.

Anche l'approccio teorico ha dei grossi difetti [UNI 8635-12 1984]. In pratica da un modello del fenomeno si calcola una pressione di cristallizzazione e la si confronta con il valore della resistenza a trazione del materiale. Su entrambe queste variabili tuttavia esistono grosse incertezze. La pressione di cristallizzazione può essere calcolata in modo diretto secondo

l'approccio termodinamico di EVERETT [1961], ma sotto l'ipotesi di una struttura porosa semplificata che comprende solo due classi dimensionali di pori, e anche in questo caso già BLACHERE & YOUNG [1974] contestarono alcuni dei presupposti del modello. L'estensione ad una distribuzione dimensionale reale della porosità è stata fatta secondo procedure di media sui rispettivi volumi [FITZNER & SNETHLAGE 1982], ma ciò è di dubbio significato fisico e non risulta del resto essere stata ampiamente utilizzata dagli stessi proponenti. Modelli molto più complessi dal punto di vista matematico vengono regolarmente proposti, ma il loro utilizzo non esce generalmente dalla cerchia dei loro Autori; a titolo di esempio, in Appendice è mostrato un approccio modellistico analitico come presentato da ZUBER & MARCHAND [2000].

Un'ultima interessante teoria è stata avanzata da ERLIN & MATHER [2005], i quali prendono in considerazione il fenomeno della riduzione volumica del ghiaccio durante la fase di raffreddamento. Un poro capillare completamente riempito d'acqua sarebbe in un primo momento colmato dal ghiaccio che subirebbe una contrazione (fenomeno generalmente trascurato nelle teorie fino ad ora citate) all'ulteriore ridursi della temperatura, richiamando un sottile strato di acqua allo stato liquido, la quale a sua volta congelerebbe all'ulteriore abbassamento della temperatura. Il succedersi di una serie di questi cicli comporterebbe l'insorgere delle lesioni disgiungenti. Peraltro questa teoria non si è tradotta in relazioni matematiche a carattere previsionale.

La determinazione sperimentale della resistenza a trazione del tipo di materiali in opera sui siti archeologici, fragili e fortemente eterogenei, è, inoltre, molto imprecisa.

Infine, bisogna prendere atto che manca completamente una procedura che consenta il passaggio dai dati di laboratorio a quella che potrebbe essere definita la 'significatività dei dati sul sito' (è come se nell'ambito delle costruzioni moderne il progettista non sapesse come utilizzare la resistenza a compressione del calcestruzzo o quella a trazione dei ferri, determinata in laboratorio secondo procedure normalizzate, ma non certamente coincidenti con quelle in opera).

In definitiva, bisogna constatare che il carattere delle conoscenze sulla gelività è attualmente incerto, non del tutto precisabile, sfumato e che le decisioni conservative sono basate anche su dati di esperienza soggettiva che, nella redazione di un progetto e nella sua attuazione, possono risultare efficaci, ma che non essendo formalizzati difficilmente lasceranno traccia di sé nella documentazione degli interventi: siamo in una situazione intrinsecamente fuzzy.

Come detto nel capitolo I4, una funzione che lega un numeroso gruppo di variabili può non essere esprimibile analiticamente (per ignoranza, o per incapacità di soluzione analitica o numerica, o semplicemente perché sarebbe troppo oneroso definirla e/o usarla).

La possibilità della gelività (GLVT) può assumersi 'granulata' in un gruppo di subsets fuzzy definiti: 'bassa', 'media' e 'alta' possibilità, ad esempio come riportato graficamente nella figura 4.1, nella rappresentazione del Toolbox Fuzzy di MatLab®.

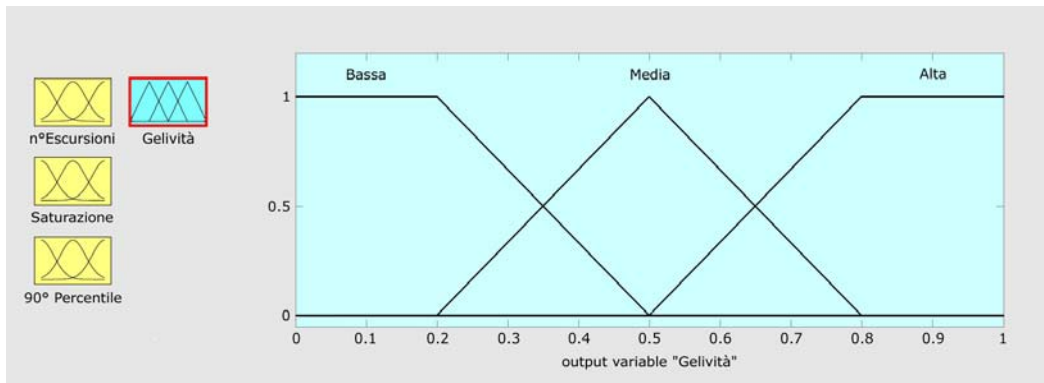


Figura 4.1. - Variabile 'Gelività'.

L'entità assunta da questa variabile linguistica si può considerare derivare dal concorso di tre fattori (intersezione di tre insiemi). Consideriamo i tre insiemi universali, o del discorso (non fuzzy):

- N: numero delle escursioni termiche attraverso 0°C, in un anno (può essere il valore medio tra gli anni per i quali è disponibile la rilevazione)  
 $N = \{0, 1, 2, \dots 365 \text{ 1/anno}\};$
- U: percentuale di saturazione d'acqua congelabile del materiale per un abbassamento di pochi °C sotto lo zero  
 $U = \{0, 1, 2, \dots 100\% \};$
- P: distribuzione dimensionale della porosità ad esempio espressa tramite il raggio dei pori in corrispondenza del 90° percentile della distribuzione dimensionale dei vuoti del materiale  
 $P = \{0.001, \dots 10 \mu\text{m}\}.$

Su ciascuno di questi insiemi universali, definiamo, tramite convenienti espressioni letterali, i seguenti 9 sotto-insiemi fuzzy:

$$\begin{array}{ll}
 N' = \{(n, \mu_n)\}, & n \in N \text{ e "n è poche/ medie/ molte escursioni"} \\
 U' = \{(u, \mu_u)\}, & u \in U \text{ e "u è bassa/ media/ alta saturazione"} \\
 P' = \{(p, \mu_p)\}, & p \in P \text{ e "p è valore molto/ mediamente/ poco critico della} \\
 & \text{dimensione media del raggio della distribuzione dei pori"}
 \end{array}$$

essendo  $\mu_n$ ,  $\mu_u$ ,  $\mu_p$  i gradi di appartenenza dei vari fattori ai rispettivi insiemi fuzzy, e potendo tali gradi assumere i valori nell'intervallo [0, 1], come mostrato in figura 4.2.

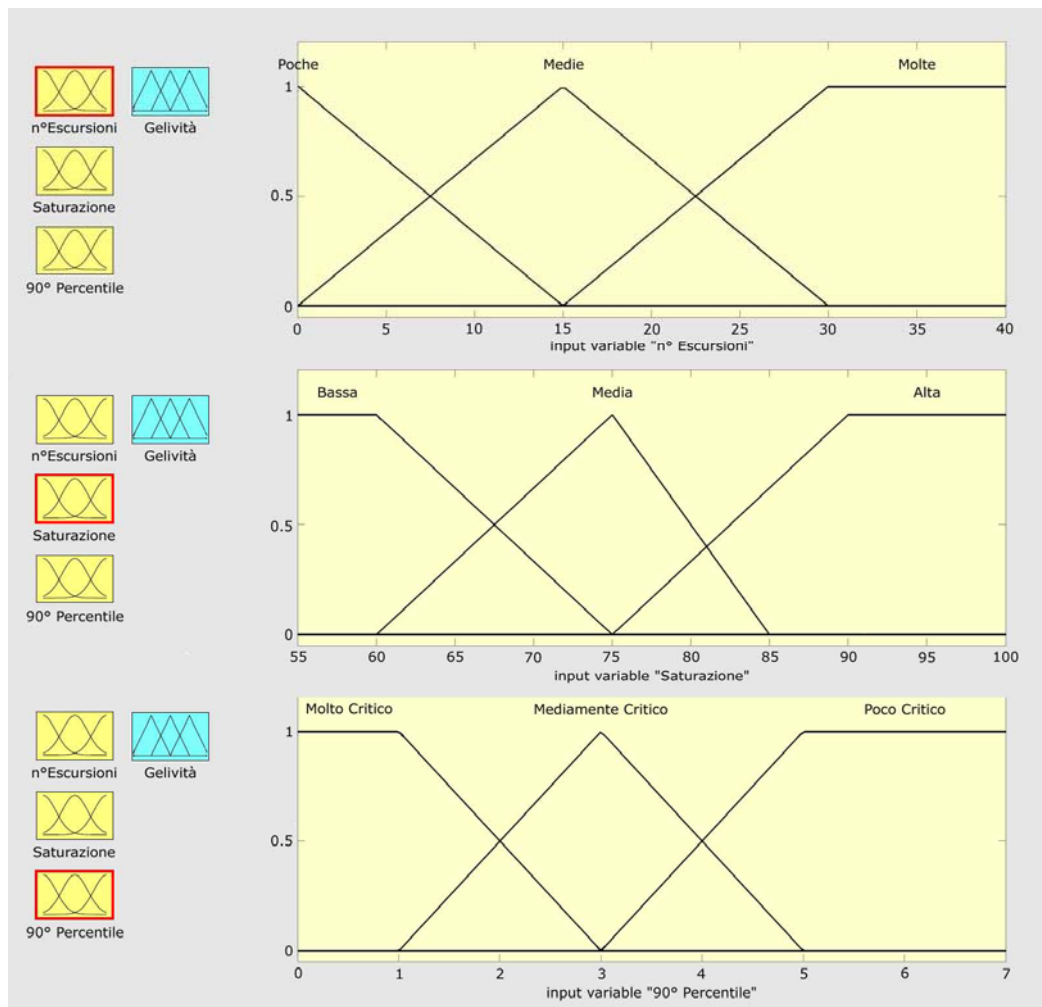


Figura 4.2 - Membership functions delle 3 variabili di input.

A queste membership functions si associa un complesso di regole IF/THEN, come ad esempio mostrato in figura 4.3.

1. If (n°-Escursioni is Poche) and (Saturazione is Bassa) and (90°-Percentile is Molto-Critico) then (Gelività is Bassa) (1)
2. If (n°-Escursioni is Poche) and (Saturazione is Bassa) and (90°-Percentile is Mediamente-Critico) then (Gelività is Bassa) (1)
3. If (n°-Escursioni is Poche) and (Saturazione is Bassa) and (90°-Percentile is Poco-Critico) then (Gelività is Bassa) (1)
4. If (n°-Escursioni is Poche) and (Saturazione is Media) and (90°-Percentile is Molto-Critico) then (Gelività is Bassa) (1)
5. If (n°-Escursioni is Poche) and (Saturazione is Media) and (90°-Percentile is Mediamente-Critico) then (Gelività is Bassa) (1)
6. If (n°-Escursioni is Poche) and (Saturazione is Media) and (90°-Percentile is Poco-Critico) then (Gelività is Bassa) (1)
7. If (n°-Escursioni is Poche) and (Saturazione is Alta) and (90°-Percentile is Molto-Critico) then (Gelività is Media) (1)
8. If (n°-Escursioni is Poche) and (Saturazione is Alta) and (90°-Percentile is Mediamente-Critico) then (Gelività is Media) (1)
9. If (n°-Escursioni is Poche) and (Saturazione is Alta) and (90°-Percentile is Poco-Critico) then (Gelività is Bassa) (1)
10. If (n°-Escursioni is Medie) and (Saturazione is Bassa) and (90°-Percentile is Molto-Critico) then (Gelività is Bassa) (1)
11. If (n°-Escursioni is Medie) and (Saturazione is Bassa) and (90°-Percentile is Mediamente-Critico) then (Gelività is Bassa) (1)
12. If (n°-Escursioni is Medie) and (Saturazione is Bassa) and (90°-Percentile is Poco-Critico) then (Gelività is Bassa) (1)
13. If (n°-Escursioni is Medie) and (Saturazione is Media) and (90°-Percentile is Molto-Critico) then (Gelività is Alta) (1)
14. If (n°-Escursioni is Medie) and (Saturazione is Media) and (90°-Percentile is Mediamente-Critico) then (Gelività is Media) (1)
15. If (n°-Escursioni is Medie) and (Saturazione is Media) and (90°-Percentile is Poco-Critico) then (Gelività is Bassa) (1)
16. If (n°-Escursioni is Medie) and (Saturazione is Alta) and (90°-Percentile is Molto-Critico) then (Gelività is Media) (1)
17. If (n°-Escursioni is Medie) and (Saturazione is Alta) and (90°-Percentile is Mediamente-Critico) then (Gelività is Media) (1)
18. If (n°-Escursioni is Medie) and (Saturazione is Alta) and (90°-Percentile is Poco-Critico) then (Gelività is Bassa) (1)
19. If (n°-Escursioni is Molte) and (Saturazione is Bassa) and (90°-Percentile is Molto-Critico) then (Gelività is Bassa) (1)
20. If (n°-Escursioni is Molte) and (Saturazione is Bassa) and (90°-Percentile is Mediamente-Critico) then (Gelività is Bassa) (1)
21. If (n°-Escursioni is Molte) and (Saturazione is Bassa) and (90°-Percentile is Poco-Critico) then (Gelività is Bassa) (1)
22. If (n°-Escursioni is Molte) and (Saturazione is Media) and (90°-Percentile is Molto-Critico) then (Gelività is Alta) (1)
23. If (n°-Escursioni is Molte) and (Saturazione is Media) and (90°-Percentile is Mediamente-Critico) then (Gelività is Media) (1)
24. If (n°-Escursioni is Molte) and (Saturazione is Media) and (90°-Percentile is Poco-Critico) then (Gelività is Bassa) (1)
25. If (n°-Escursioni is Molte) and (Saturazione is Alta) and (90°-Percentile is Molto-Critico) then (Gelività is Alta) (1)
26. If (n°-Escursioni is Molte) and (Saturazione is Alta) and (90°-Percentile is Mediamente-Critico) then (Gelività is Alta) (1)
27. If (n°-Escursioni is Molte) and (Saturazione is Alta) and (90°-Percentile is Poco-Critico) then (Gelività is Bassa) (1)

Figura 4.3. – Regole IF/THEN della KB della ‘Gelività’.

L’inferenza per la valutazione della possibilità del degrado per gelività si ottiene quindi combinando con l’operatore OR le implicazioni di ciascuna delle rules. Operativamente si può utilizzare l’operatore min per AND e max per OR e condurre la defuzzificazione finale col metodo del baricentro [KOSKO 1994; DUBOIS & PRADE 2000; COX 2005]. Le figure 4.4-4.6 riportano 3 esempi di applicazione, implementati sul Toolbox Fuzzy di MATLAB®. Per esempio (figura 4.4), un input, caratteristico di un dato project, costituito da 25 ciclici termici all’anno, una saturazione dell’80% ed un raggio dei pori in corrispondenza del 90° percentile del volume dei vuoti di 4 micron,  $g = (25, 80, 4)$ , ha come risultato una ‘possibilità di gelività GLVT’ di 0.46. Se la soluzione progettuale in esame portasse ad un drastico controllo di anche uno solo dei termini determinanti la gelività, ad esempio si impedisse che la saturazione d’acqua del materiale si porti in campo critico, si avrebbe  $GLVT \rightarrow 0$ . Viceversa, la certezza del degrado per azione del gelo si conseguirebbe solo se i gradi appartenenza fossero tutti nelle regioni di valore  $GLVT \rightarrow 1$ .

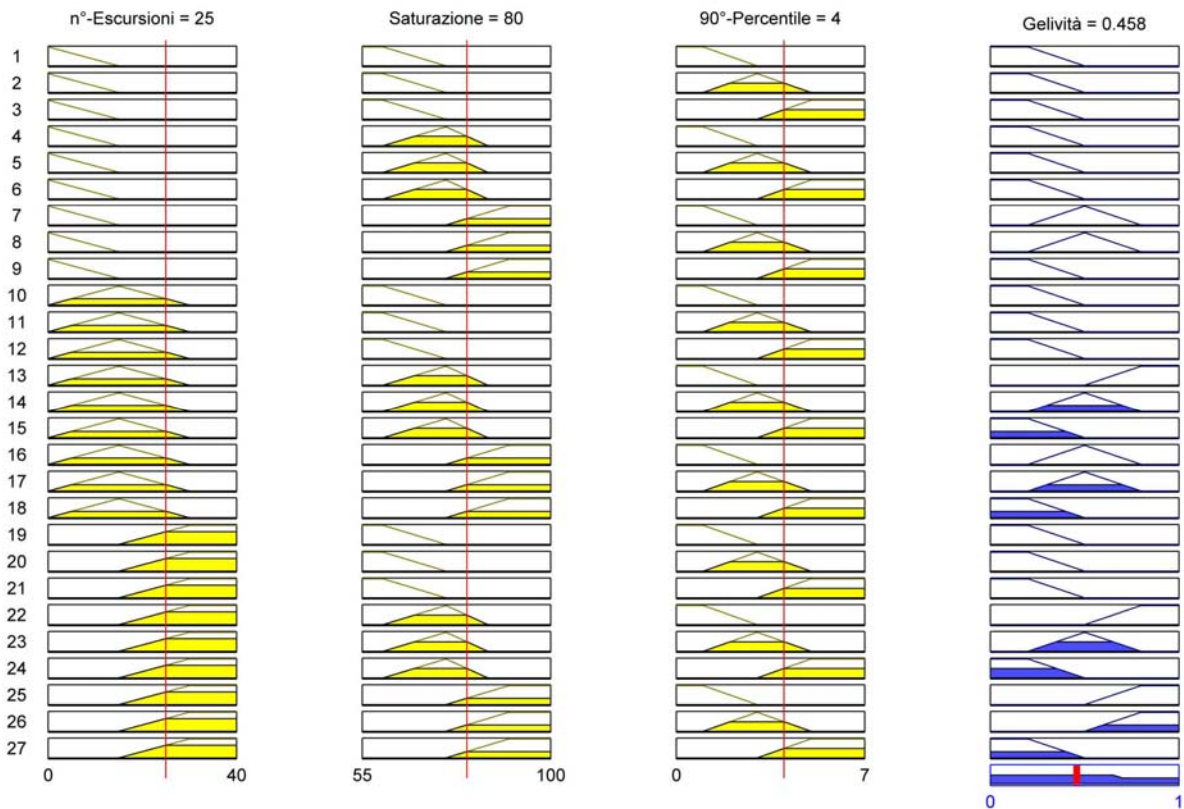


Figura 4.4 - Esempio di applicazione dell'inferenza per l'input (n° escursioni, saturazione, 90° percentile) = (25, 80, 4).

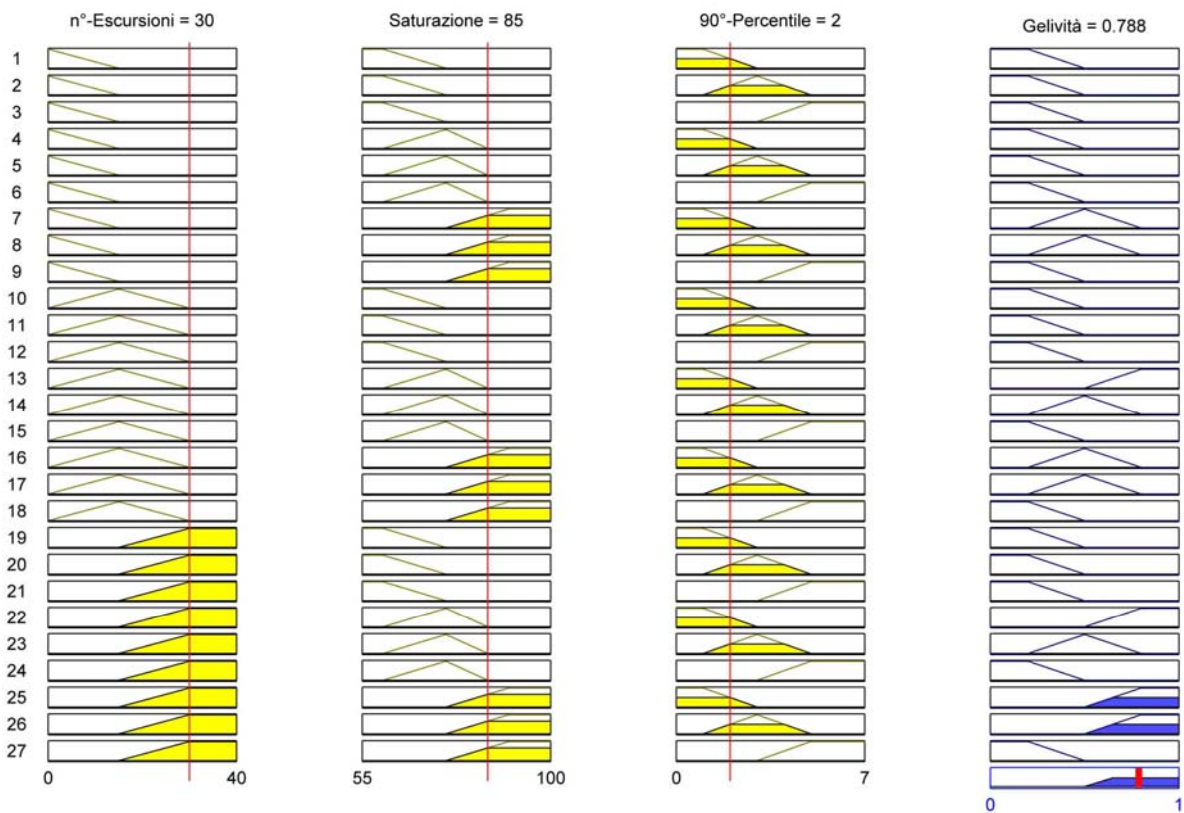


Figura 4.5 - Esempio di applicazione dell'inferenza per l'input (n° escursioni, saturazione, 90° percentile) = (30, 85, 2).



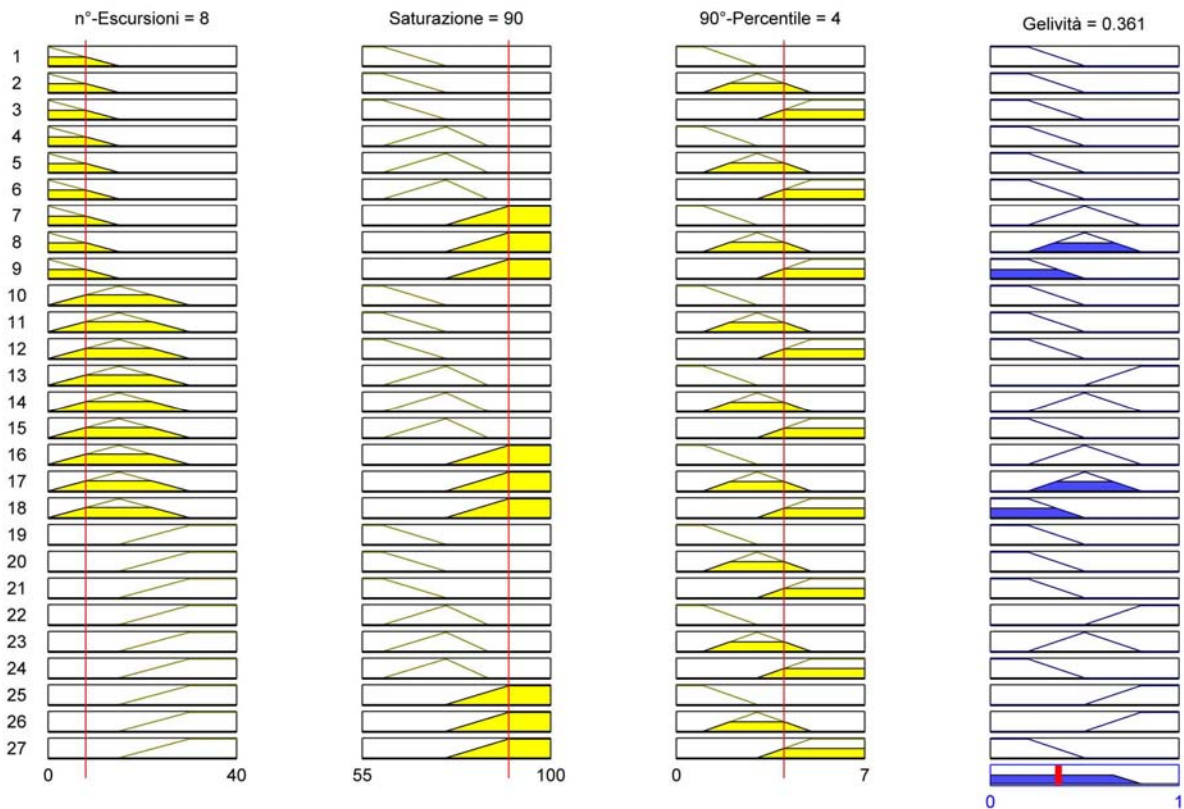


Figura 4.6 - Esempio di applicazione dell'inferenza per l'input (n° escursioni, saturazione, 90° percentile) = (8, 90, 4).

Una comunicazione che raccoglie gli aspetti della ricerca ora illustrata è in stampa sugli «Atti del IV Congresso Nazionale AIAr. Archeometria Scienza e Beni Culturali» [ATZENI, SANNA, SPANU 2007].



#### 4.1.2 – Degrado dei materiali moderni utilizzati nel restauro strutturale

L'utilizzo dei materiali cementizi nel campo del Restauro è iniziato molto presto ed al di fuori di un quadro normativo definito. Alla fine dell'800 l'industria cementiera muoveva i suoi primi passi nell'Europa Occidentale ed in Nord America. Le conoscenze scientifiche su questa nuova classe di materiali erano ancora molto limitate (il primo Convegno internazionale sulla chimica del cemento si tenne nel 1918 a Londra organizzato dalla Faraday Society [AA.VV. 1919]). Nonostante questo, in taluni ambienti, era invalsa l'opinione che si trattasse di materiali di alta resistenza e grande durabilità e non sorprende pertanto che ne venisse fatto un significativo utilizzo anche nell'ambito di importanti interventi di restauro quali quelli condotti da Nikolaos Balanos nell'Acropoli di Atene negli anni 1909-1917 [MALLOUCHOU-TUFANO 2006]. Durante tali interventi, molte delle preesistenti inserzioni di metallo tra i conci del monumento vennero sostituite con ferri sigillati con cemento. In figura 4.7 viene mostrata una possibile ricostruzione del *modus operandi* degli antichi greci [VAROUFAKIS 1992; KORRES 1994] che per la sigillatura dei ferri utilizzavano una colata di piombo.

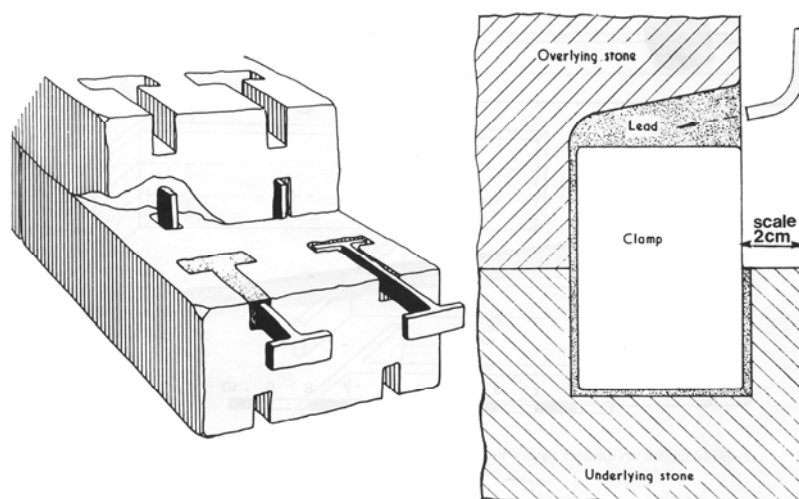


Figura 4.7 – A sinistra: posizionamento di grappe a doppia T e di perni; a destra sigillatura degli stessi con piombo fuso [VAROUFAKIS 1992].

Nell'intervento di Balanos la sostituzione delle grappe e dei perni venne effettuata realizzando la 'sigillatura' delle cavità con materiale cementizio, intrinsecamente poroso, con conseguente mancanza di protezione e quindi rapida corrosione dei nuovi ferri. Tale problema si verificò tanto rapidamente e severamente da rendere necessario un altro intervento di restauro, condotto negli anni 1946-1957. Nei restauri successivamente condotti negli anni '80 del secolo scorso, tali elementi vennero poi definitivamente sostituiti con altri in lega di titanio. Il vantaggio di questo materiale, che presenta prestazioni strutturali simili all'acciaio, è dato dal suo basso peso specifico ( $4.5 \text{ g/cm}^3$  vs  $7.9 \text{ g/cm}^3$  degli acciai) ma molto più importante è il fatto che esso non subisce corrosione negli ambienti naturali [VAROUFAKIS 1992; KORRES 1994].



Figura 4.8 – Acropoli di Atene: una grappa ossidata sino alla rottura e la sostitutiva in lega di titanio [KORRES 1994].

A partire dalla CARTA DEL RESTAURO DI ATENE [1930] l'utilizzo dei materiali moderni, ed in modo particolare del cemento e del calcestruzzo armato negli interventi di restauro, fa il suo ingresso ufficiale nel campo della Conservazione. L'impiego di questi materiali, la cui disponibilità ed il cui costo divennero progressivamente più favorevoli, assunse pertanto dimensioni massicce. Successive versioni della Carta del Restauro o di Norme equivalenti confermarono la possibilità di impiego di questi materiali anche in anni recenti.

*“V. Gli esperti hanno inteso varie comunicazioni relative all'impiego di materiali moderni per il consolidamento degli antichi edifici; ed approvano l'impiego giudizioso di tutte le risorse della tecnica moderna, e più specialmente del cemento armato. Essi esprimono il parere che ordinariamente questi mezzi di rinforzo debbano essere dissimulati per non alterare l'aspetto ed il carattere dell'edificio da restaurare, e ne raccomandano l'impiego specialmente nei casi in cui essi permettono di conservare gli elementi in situ evitando i rischi della disfattura e della ricostruzione”.*

[CARTA DEL RESTAURO DI ATENE 1931]

*“...principi essenziali...*

*9. che allo scopo di rinforzare la compagine statica di un monumento e di reintegrare la massa, tutti i mezzi modernissimi possono recare ausili preziosi e sia opportuno valersene quando l'adozione di mezzi costruttivi analoghi agli antichi non raggiungano lo scopo;”.*

[CARTA ITALIANA DEL RESTAURO 1931]

*“Art. 10. – Quando le tecniche tradizionali si rivelino inadeguate, il consolidamento di un monumento può essere assicurato, mediante l'ausilio di tutti i più moderni mezzi di struttura e di conservazione, la cui efficienza sia stata dimostrata da dati scientifici e sia garantita dall'esperienza.”*

[CARTA DEL RESTAURO DI VENEZIA 1964]

Solo a partire dagli anni '70 del secolo scorso, sorgono dei dubbi sulla liceità e sulla reale efficacia dei materiali cementizi nell'ambito della conservazione. A partire da quegli anni, il susseguirsi di una serie di crisi energetiche portò ad una radicale modifica dell'industria di produzione del cemento, con abbandono della tecnica 'a umido' a favore del processing delle materie prime con metodologie esclusivamente 'a secco', che richiedevano minore dispendio di

energia. Pressoché contemporaneamente, la necessità di garantire un minore livello di emissioni gassose delle cementerie, portò ad un aumento del riciclo dei flussi gassosi dei forni di trattamento. I cementi prodotti a partire da quegli anni risultarono pertanto maggiormente ricchi di componenti idrosolubili, passibili di portare alla formazione di efflorescenze o subflorescenze e quindi di degrado, anche sui materiali in opera contigui se le realizzazioni non erano a perfetta regola d'arte (impermeabilità).

I cementi prodotti inoltre presentavano una maggiore resistenza specifica a compressione, e questo induceva gli operatori ad un dosaggio di legante inferiore nella realizzazione di malte e calcestruzzi (tabella 4.1), con risultato di non avere in taluni casi abbastanza pasta legante da garantire la completa impermeabilità e alcalinità del materiale, inducendo quindi una serie di fenomeni di degrado che assunsero dimensioni preoccupanti anche nelle costruzioni moderne. La durabilità del calcestruzzo divenne quindi una vera e propria specialità nell'ambito degli studi su questo materiale, portando alla fine del secolo anche ad un esplicito riconoscimento normativo nella qualificazione dei cementi, prima limitata al controllo del tenore di solfati e cloruri.

Tabella 4.1 - Caratteristiche delle composizioni dei calcestruzzi nel corso degli anni, necessarie per ottenere una resistenza a compressione di 30 MPa.

ANNI	CEMENTO (kg/m <sup>3</sup> )	ACQUA (kg/m <sup>3</sup> )	ACQUA/CEMENTO
1945-1950	340	170	0.50
1950-1960	300	170	0.57
1960-1980	270	170	0.63

È noto che per un rapporto acqua/cemento di 0.50 l'isolamento dei pori capillari si consegue a circa 2 settimane dal getto, mentre con un rapporto 0.60 occorrono per lo meno 6 mesi ed oltre 0.70 è praticamente impossibile da conseguire [COLLEPARDI 1992].

Le Carte del Restauro e documenti simili emessi più di recente registrano una maggiore prudenza nel raccomandare l'utilizzo di materiali a base cementizia. I fenomeni di degrado, infatti, divennero estremamente evidenti nei siti archeologici, dove gli interventi venivano attuati da una forza lavoro scarsamente consapevole delle problematiche tecnologiche sull'impiego del materiale cementizio. Inoltre l'esperienza oramai decennale nell'affiancamento di materiali moderni a quelli antichi, aveva mostrato la scarsa collaborazione tra i due, oltreché la sopravvalutazione della durabilità dei primi. Da qui l'emergere in modo determinante della richiesta di reversibilità dei materiali e delle tecniche impiegate, richiesta questa che il materiale cementizio evidentemente non era in grado di soddisfare. Le citazioni che seguono sono una manifestazione di questa nuova linea di prudenza progettuale invalsa nel settore della conservazione.

*“Art. 8 – Ogni intervento sull’opera o anche in contiguità con l’opera... deve essere eseguito in modo tale e con tali tecniche e materie da potere fare affidamento che nel futuro non renderà impossibile un nuovo intervento di salvaguardia o di restauro.”*

*“Istruzioni... Per il restauro dei monumenti archeologici... L’uso di cemento con superficie rivestita di polvere del materasso stesso del monumento da restaurare può risultare utile anche nell’integrazione di rocchi di colonne antiche di marmo o di tufo o calcare...”*

[CARTA ITALIANA DEL RESTAURO 1972]

*“Nel caso specifico dell’architettura, l’esperienza degli ultimi venti anni ha insegnato a diffidare delle inserzioni occulte in materiali speciali quali l’acciaio, l’acciaio armonico pre-teso, le cuciture armate ed iniettate con malte di cemento... a causa della loro invasività, poca durabilità, irreversibilità e relativamente scarsa affidabilità.”*

*“Ogni intervento sull’opera, o anche in continuità di essa... deve essere eseguito in modo tale e con tali tecniche e materie da poter dare affidamento che nel futuro non renderà impossibile un nuovo eventuale intervento di conservazione e restauro.”*

[CARTA C.N.R. 1987]

Esistono attualmente innumerevoli applicazioni generalmente legate al consolidamento statico-strutturale, comprese le iniezioni nei nuclei delle vecchie murature a sacco [COPPOLA & COLLEPARDI 1993], ma non solo, ad esempio nella ricostruzione dei massetti di fondazione dei mosaici, che sono spesso interessati da macroscopici fenomeni di alterazione e degrado. Talvolta la rimozione di questi materiali utilizzati in passato nel restauro, pone problemi estremamente gravi. Nell’ambito della presente ricerca, si sono incontrati una serie di concreti fenomeni di degrado associati all’utilizzo del calcestruzzo armato e non in siti archeologici.

Il sito archeologico di Nora-Pula, in prossimità del mare, che per altri aspetti sarà oggetto di più ampia trattazione nei paragrafi II-5.3 e II-5.4, costituisce un caso esemplare della leggerezza con la quale sono stati condotti interventi di ‘restauro’ nel corso degli anni ’60-’70 del secolo scorso, adottando nel sito archeologico materiali, tecniche e personale dell’ordinario cantiere edile. Particolarmente drammatico è risultato il riposizionamento di una serie di importanti mosaici romani su massetto in calcestruzzo armato con rete elettrosaldata e l’impiego di pilastri e mensole realizzate con gli stessi materiali per riposizionare parti delle strutture originarie quali cisterne o pavimenti sopraelevati (calidarium e tepidarium delle terme).

La figura 4.9 mostra il tipico distacco del copriferro in presenza di ossidazione delle armature [ATZENI, CINCOTTI, DEMURTAS, MASSIDDA, SANNA 1997].



Figura 4.9 - Sito archeologico Romano di Nora-Pula: esempi di corrosione delle armature su opere di consolidamento.

Le macrografie riportate in figura 4.10 mostrano alcuni esempi di ferri di armatura ossidatisi in opera nel sito di Nora-Pula.

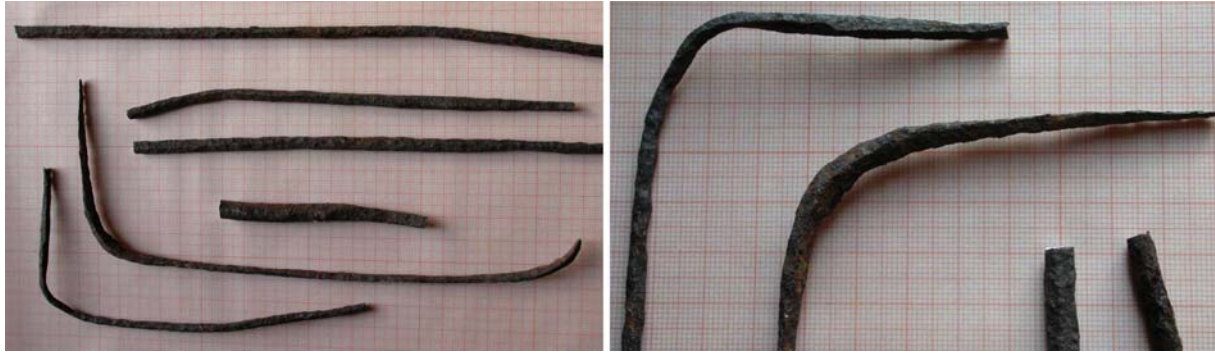


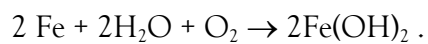
Figura 4.10 - Esempi di corrosione di ferri provenienti dal sito archeologico di Nora-Pula.

La riduzione di sezione è drammatica e per interi tratti dei ferri originari non resta che l'ombra dell'ossido che impregna la malta, come può osservarsi in figura 4.11.



Figura 4.11 - Frammenti di un massetto di ri-fondazione di mosaici dal sito di Nora-Pula.

Il processo corrosivo sulla superficie dei ferri d'armatura può notoriamente essere schematizzato con la reazione [PEDEFERRI & BERTOLINI 1996; COLLEPARDI 2000]:



Lo svolgersi delle reazioni richiede quindi un'attività non nulla dei tre reagenti ferro, acqua e ossigeno. Il concorso di questi tre fattori è stato brillantemente posto in evidenza in una

comunicazione nell'anno 2000 da Collepardi, che fornì una 'rappresentazione ternaria del modello olistico' per alcuni aspetti della durabilità dei calcestruzzi [COLLEPARDI 2000].

Nella nota citata, importanti processi di degrado quali la reazione alcali-silice (ASR), la corrosione delle barre di armatura e diverse manifestazioni di attacco solfatico (ESA) vennero qualitativamente interpretate come derivanti ciascuno dal concorso di tre fattori (rispettivamente: contenuto di alcali / presenza di silice reattiva / ambiente umido, depassivazione dell'acciaio / presenza di ossigeno / intermittente umidità, permeabilità / ambiente umido / attività di solfati). Le rappresentazioni grafiche 'ternarie' di tale lavoro richiama implicitamente i noti diagrammi di Venn dell'Algebra degli Insiemi, e la condizione di degrado era associata alla concomitante presenza dei tre fattori, rappresentata come intersezione.



Figura 4.12 - Riproposizione degli schemi di [COLLEPARDI 2000].

In questa ricerca si sostiene che l'intersezione può essere interpretata in senso insiemistico, utilizzando però gli insiemi non ordinari ma fuzzy. Si fornisce quindi di seguito un modello per la corrosione dei ferri d'armatura.

È noto che l'attività è una funzione termodinamica, ed esprime la concentrazione effettiva o efficace di una specie, con riferimento alla sua capacità di reagire nelle condizioni reali [ATKINS 1986]. Nel caso particolare del ferro, l'attività può essere vista come una misura dell'entità della depassivazione.

La figura 4.13 mostra le funzioni di appartenenza (ipotetiche) degli insiemi 'attività del ferro', 'dell'acqua' e 'dell'ossigeno', secondo la rappresentazione di FuzzyTECH<sup>®</sup>: si definiscono i tre sub-insiemi fuzzy bassa / media / alta.



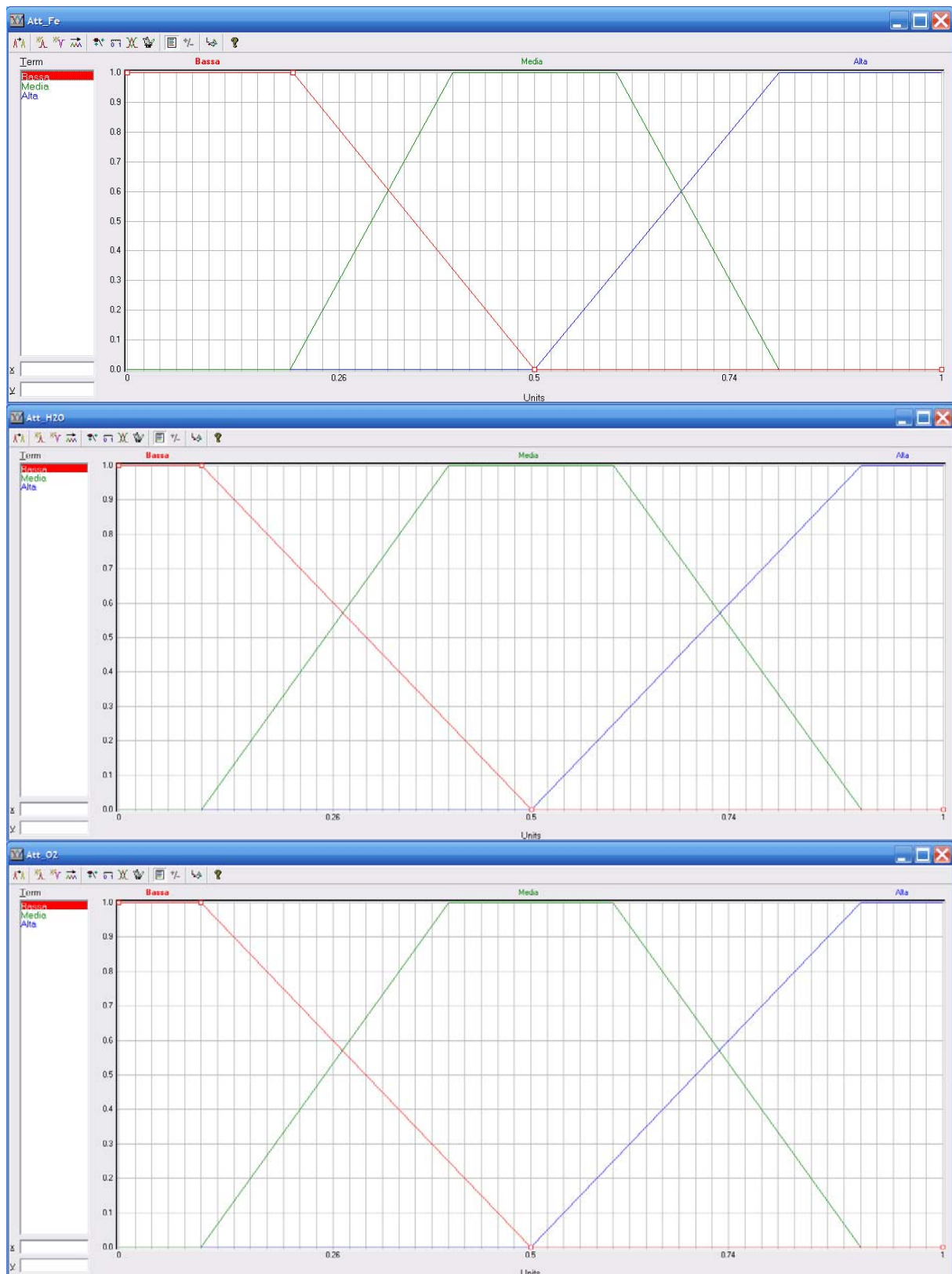


Figura 4.13 - Rappresentazioni fuzzy dei tre insiemi 'attività del ferro', 'attività dell'acqua' e 'attività dell'ossigeno'.

La figura 4.14 riporta i subsets fuzzy della variabile linguistica 'velocità di corrosione': bassa / moderata / intermedia / alta / molto alta.

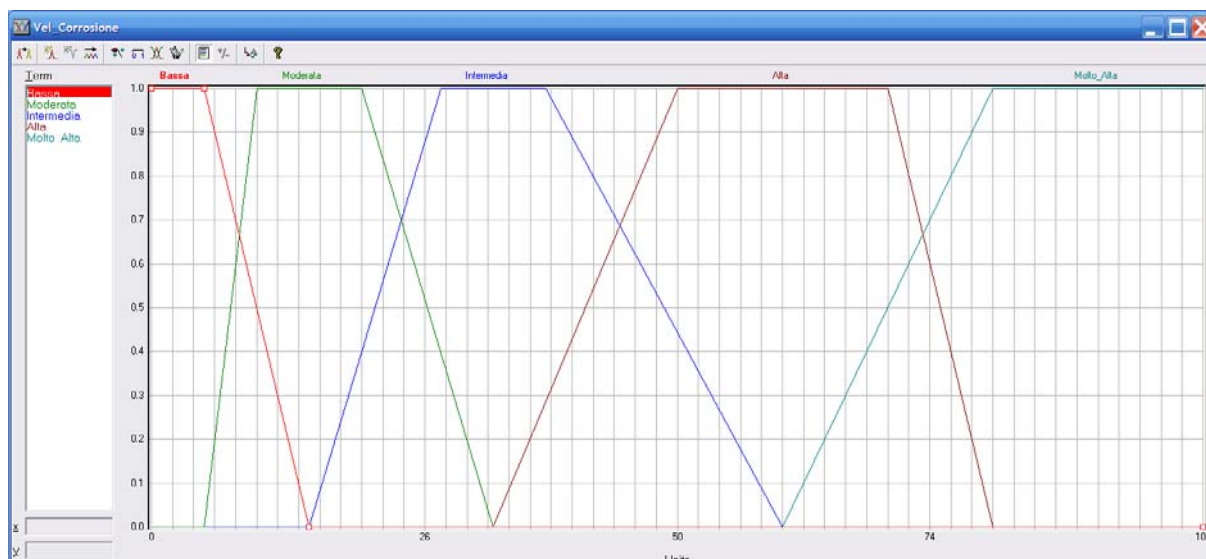


Figura 4.14 - Funzioni di appartenenza per la velocità di corrosione (in  $\mu\text{m}/\text{anno}$ ).

Come già riscontrato nelle precedenti applicazioni, il numero di regole definibili considerando tutte le possibili combinazioni è in genere molto alto (uguale al prodotto del numero dei subsets fuzzy definiti per ciascuna delle variabili); nel nostro caso esse risulterebbero 135, ma generalmente un gran numero di quelle possibili sono corrispondenti a situazioni irrealistiche e pertanto non vengono inserite nel modello finale, per esempio, nessun esperto potrebbe associare un'attività bassa dei tre reagenti a condizioni di corrosione alta.

La figura 4.15 riporta, secondo la rappresentazione di FuzzyTECH<sup>®</sup>, alcune delle regole che costituiscono la KB per la determinazione della corrosione.

The figure shows a screenshot of a 'Spreadsheet Rule Editor - RB1' window. It displays a table of fuzzy rules. The columns are: '#', 'IF', 'THEN', and 'Dof'. The 'IF' column contains combinations of 'DEPASSIVAZIONE', 'OSSIGENAZIONE', and 'UMIDITA' (BASSA, MEDIA, ALTA). The 'THEN' column contains the resulting corrosion rate (BASSA, MODERATA, INTERMEDIA, MOLTO\_ALTA). The 'Dof' column contains the value 1.00 for all rules.

#	IF	THEN	Dof
1	BASSA	BASSA	1.00
2	BASSA	BASSA	1.00
3	BASSA	BASSA	1.00
4	BASSA	BASSA	1.00
5	BASSA	BASSA	1.00
6	BASSA	BASSA	1.00
7	BASSA	BASSA	1.00
8	BASSA	BASSA	1.00
9	BASSA	BASSA	1.00
10	BASSA	BASSA	1.00
11	BASSA	BASSA	1.00
12	BASSA	BASSA	1.00
13	BASSA	BASSA	1.00
14	BASSA	BASSA	1.00
15	BASSA	BASSA	1.00
16	BASSA	BASSA	1.00
17	BASSA	BASSA	1.00
18	BASSA	BASSA	1.00
19	BASSA	BASSA	1.00
20	BASSA	BASSA	1.00
21	BASSA	BASSA	1.00
22	BASSA	BASSA	1.00
23	BASSA	BASSA	1.00
24	BASSA	BASSA	1.00
25	BASSA	BASSA	1.00
26	BASSA	BASSA	1.00
27	BASSA	BASSA	1.00
28	BASSA	BASSA	1.00
29	MEDIA	BASSA	1.00
30	MEDIA	BASSA	1.00
31	MEDIA	BASSA	1.00
32	MEDIA	BASSA	1.00
33	MEDIA	BASSA	1.00
34	MEDIA	BASSA	1.00
35	MEDIA	BASSA	1.00
36	MEDIA	BASSA	1.00
37	MEDIA	BASSA	1.00
38	MEDIA	BASSA	1.00
39	MEDIA	BASSA	1.00
40	MEDIA	BASSA	1.00
41	MEDIA	BASSA	1.00
42	MEDIA	BASSA	1.00
43	MEDIA	BASSA	1.00
44	MEDIA	BASSA	1.00
45	MEDIA	BASSA	1.00
46	MEDIA	BASSA	1.00
47	MEDIA	BASSA	1.00
48	MEDIA	BASSA	1.00
49	MEDIA	BASSA	1.00
50	MEDIA	BASSA	1.00

Figura 4.15 - Alcune regole costituenti la KB per la determinazione della corrosione.

La fase finale della procedura di inferenza attua quindi l'unione dei risultati di tutte le regole con effectiveness non nulla o superiore ad un valore minimo prestabilito. Dalla regione fuzzy così definita può ricavarsi, utilizzando ad esempio il valore baricentrico, un output, nel nostro caso il dato di velocità di corrosione stimabile dall'input considerato.

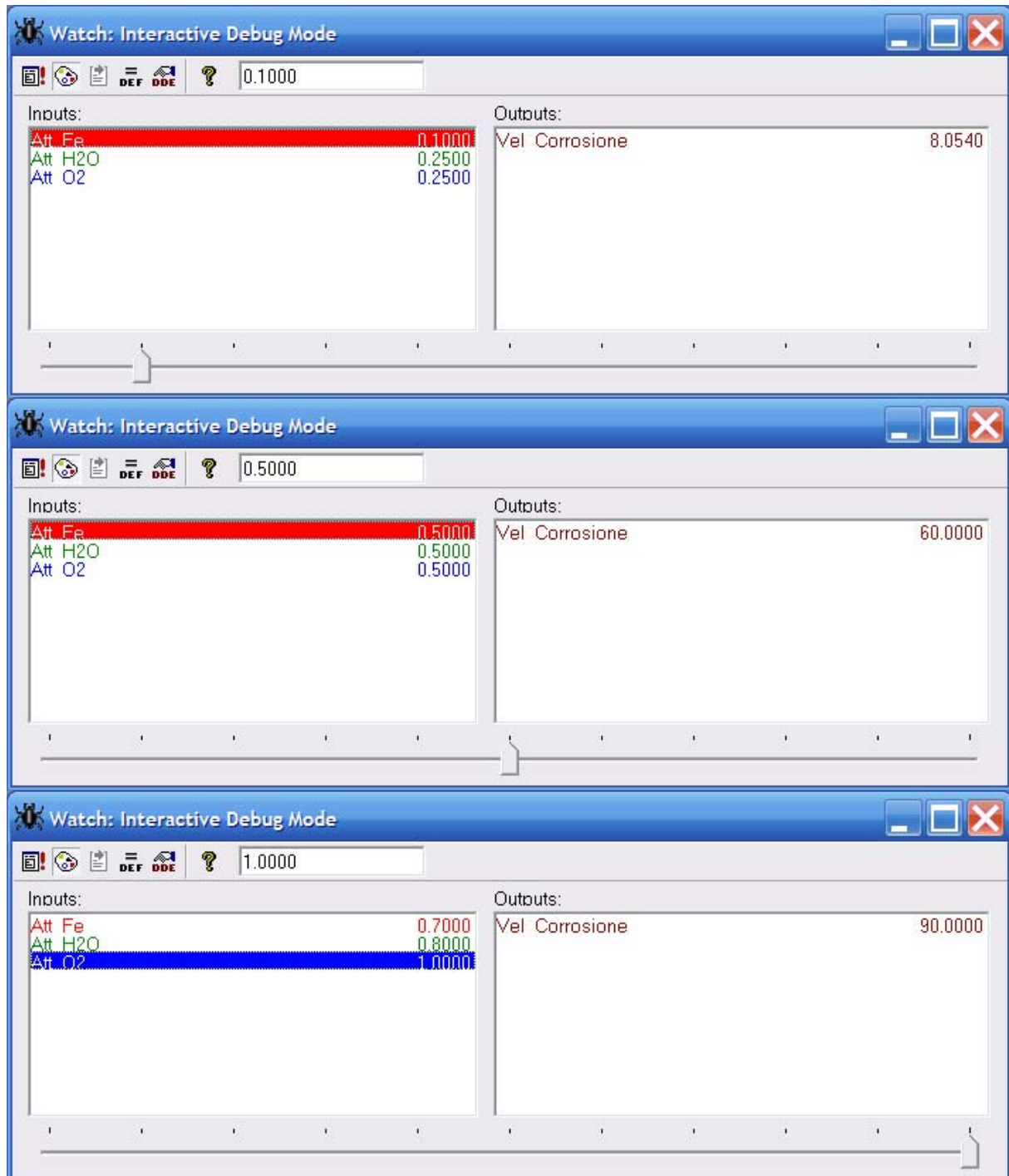


Figura 4.16 - Output in termini di 'velocità di corrosione' al variare del valore dei tre input.

Alcuni dei risultati presentati in questo paragrafo sono stati oggetto di pubblicazione sulla rivista «L'Industria Italiana del Cemento» [ATZENI, SANNA, SPANU 2006 B].

Un modello fuzzy può fornire i dati di input per un altro modello fuzzy. È evidente che a monte devono essere conosciuti i dati di permeabilità del materiale che, come sappiamo, influenzano direttamente l'accesso (e quindi l'attività) dell'acqua e dell'ossigeno e la depassivazione. La permeabilità può definirsi come intersezione tra le sollecitazioni meccaniche / termiche / idrometriche. La depassivazione dipende a sua volta da permeabilità / anidride carbonica (e/o cloruri) / umidità [COLLEPARDI 2000].

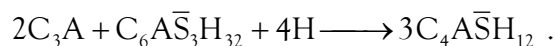
Anche la presenza di solfati coinvolge la durabilità di diversi siti archeologici considerati in questo studio ed è probabilmente associata all'impiego del cemento negli interventi di consolidamento attuati in passato.

Tale termine viene ora illustrato nelle sue manifestazioni nei siti di Genna Maria-Villanovaforru e Is Paras-Isili e sarà soggetto nei successivi paragrafi II-4.4.2 e II-4.4.3 a trattazione in termini di componente dell'usura ambientale'.

È noto [TAYLOR 1977] che il gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; ma talvolta anche sotto forma di anidrite o emidrato) aggiunto al clinker di cemento portland in fase di macinazione (3-5%) serve al controllo dei tempi di presa del materiale. Dopo circa 30' dal contatto con l'acqua, il gesso ha reagito con le fasi idraulicamente più rapide ( $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$ ), con formazione di ettringite  $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ :



Dopo circa 24-48 ore si registra quindi la trasformazione, non necessariamente totale, dell'ettringite in monosolfato  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ :



Quindi nel prodotto cementizio indurito e stagionato, il gesso aggiunto in produzione si ritrova, in generale, combinato prevalentemente come monosolfato ed in parte come ettringite. Questi due componenti sono tuttavia soggetti a decomposizione per contatto con acque circolanti, soprattutto se l'ambiente non si mantiene fortemente alcalino (con un  $\text{pH} < 10.7$  si decompone l'ettringite, con un  $\text{pH} < 11.6$  si decompone il monosolfato) [GABRISOVÁ, HAVLICA, SAHU 1991]. Tra le fasi del cemento indurito l'ordine di dilavamento è:

portlandite  $\rightarrow$  monosolfato  $\rightarrow$  ettringite  $\rightarrow$  CSH.

I prodotti della decomposizione delle fasi solfatiche sono sempre il solfato di alluminio (molto solubile in acqua) ed il gesso, limitatamente solubile e quindi più facilmente riscontrabile.

Oltre al solfato aggiunto sotto forma di gesso come regolatore di presa, è comune che i cementi presentino di per sé un certo tenore di solfati di metalli alcalini (K e Na). È, infatti, inevitabile introdurre nel forno con le materie prime ed i combustibili anche alcuni tenori di K, Na e S. Una parte di questi elementi entra nel reticolo cristallino di alite e belite ma in parte permangono liberi sotto forma di solfati alcalini di diversa stechiometria (esiste anche una traccia di carbonati di K e Na). Questi sali sono estremamente solubili e pertanto vengono molto facilmente veicolati dalle eventuali acque circolanti.

Le foto riportate nelle figure 4.17-4.19 illustrano alcune delle situazioni riscontrate nel 2005 nell'ambito di questa ricerca nel sito archeologico di GennaMaria-Villanovaforru. La presenza dei sali sulle superfici è stata segnalata e sottoposta ad indagini già nel 1983 [BALDI, MARIOTTINI, LAURENZI TABASSO 1983]. Patine ed efflorescenze occupano larga parte delle superfici dei conci nelle nicchie dell'ingresso del monumento, ma essendo le condizioni di umidità, ventilazione ed irraggiamento localmente sostanzialmente stabili (limitati cicli termoigrometrici), la conservazione dei conci direttamente interessati non sembra risentirne in modo specifico. Le efflorescenze e le patine saline sono una presenza solo stagionale anche nella torre sud e nelle parti basse del lato sinistro del corridoio che porta all'interno del mastio.



Figura 4.17 - Aspetto 'spettrale' della nicchia destra dell'ingresso (luglio e marzo 2005).



Figura 4.18 - Presenza di sali in torre sud (marzo 2005).



Figura 4.19 - Presenza di sali nel corridoio di accesso al mastio (marzo-aprile 2005).

Le indagini XRD (vedi figura 4.20) documentano che i sali presenti sono costituiti da varie specie di solfati (di sodio: thenardite e mirabilite, di calcio: gesso).

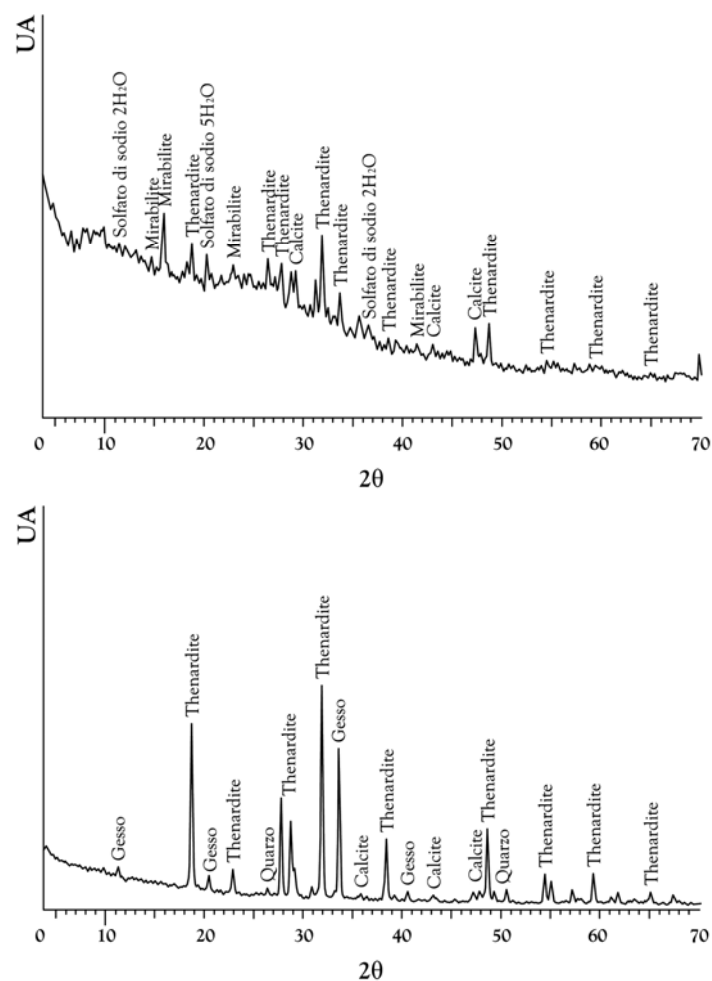


Figura 4.20 - Spettri XRD di alcuni campioni di sali (marzo 2005).

I sali provengono presumibilmente dal dilavamento del materiale cementizio utilizzato nel corso degli interventi di consolidamento condotti nei primi anni successivi allo scavo. Nel 1995 sono stati installati dei piccoli supporti in calcestruzzo per poggiare la passerella (figura 4.21) ed una certa quantità di ‘calce idraulica’ è stata introdotta come stabilizzante per la realizzazione delle stuccature a base di terra cruda. Gli spettri XRD di campioni di questo stucco e del plinto (legante presumibile: cemento idraulico) hanno dato risultati pressoché sovrapponibili; questa coincidenza è indicativa del fatto che alcune comuni ‘calci idrauliche’ commercialmente disponibili negli anni ’90 erano prodotti di miscela e presentavano tra i loro componenti anche cemento portland.



Figura 4.21 - Passerella e particolare di uno dei basamenti in calcestruzzo (marzo 2005).

Nel nuraghe Is Paras di Isili non sono mai state riscontrate efflorescenze, a differenza di quanto invece osservato per GennaMaria ma, come mostrato da alcuni diffrattogrammi in figura 4.22, la presenza di gesso è chiaramente evidente su una serie di campionamenti delle polveri riscontrate nelle aperture tra i conchi del paramento interno della tholos principale (figura 4.23).

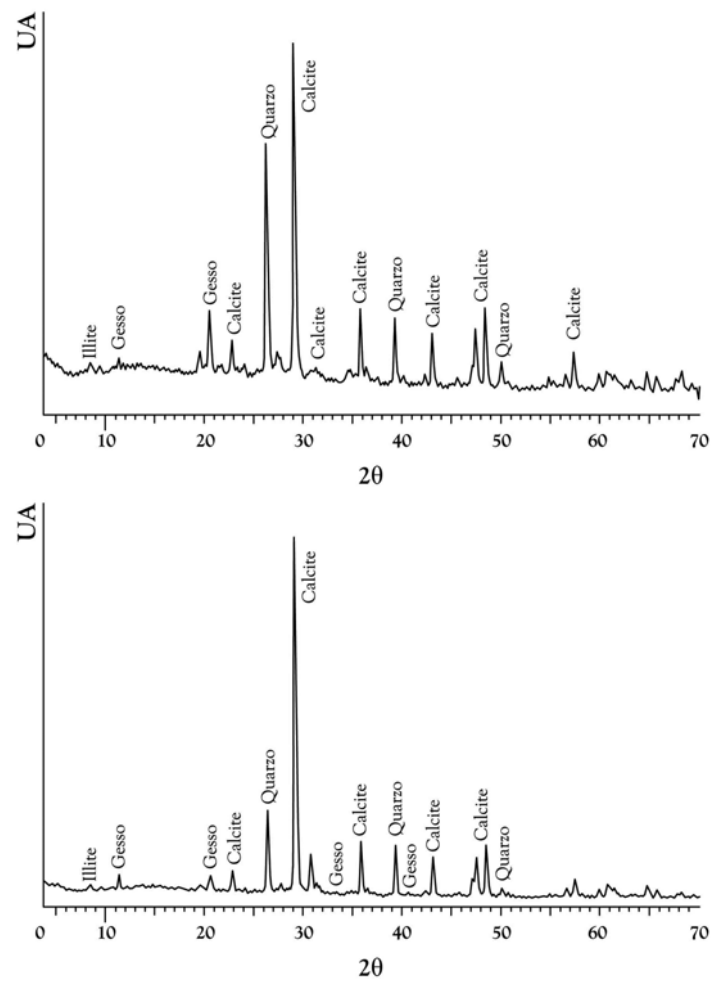


Figura 4.22 - Diffrattogrammi XR di alcuni campioni di polveri.





Figura 4.23 - Polveri nell'interspazio tra i conci della tholos (aprile 2006).

In alcuni campioni la presenza di gesso è stimabile tra il 10 ed il 20%.

Anche in questo sito è stato impiegato cemento in interventi di consolidamento statico strutturale.

Le foto riportate in figura 4.24 documentano l'esistenza di una serie di inserti, risalenti agli interventi di 'restauro' effettuati negli anni '70.



Figura 4.24 - Utilizzo di materiale cementizio nei restauri strutturali condotti a Is Paras-Isili negli anni '70.

I fenomeni connessi al rilascio dei solfati diventano chiaramente tanto più intensi e significativi quanto maggiore è la porosità del materiale cementizio. Questo parametro dipende essenzialmente dal rapporto in peso tra acqua e cemento utilizzato nella preparazione. È molto probabile che, come correntemente accade negli interventi con cemento nei siti archeologici, questo aspetto non sia affatto stato considerato nella preparazione del materiale. Su due campioni di materiale cementizio prelevati sono state condotte determinazioni porosimetriche per intrusione forzata di mercurio.

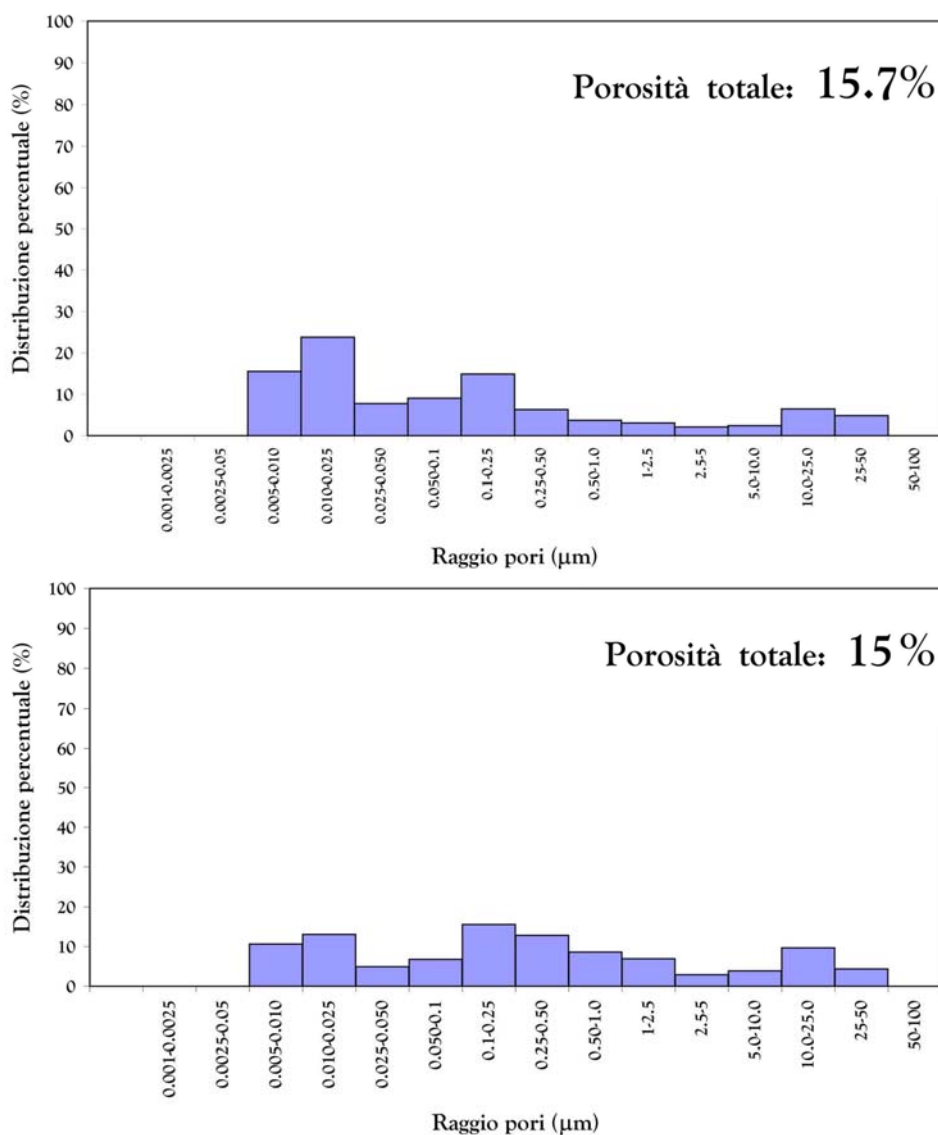


Figura 4.25 – Distribuzione dimensionale dei pori di due campioni di malta cementizia (Is Paras-Isili).

Sia nel campione 41 sia in quello 41b la frazione volumica dei vuoti è superiore al 15%. La distribuzione (figura 4.25) mostra anche una significativa frazione di pori nell'intervallo tra 5 e 50 μm, che sono certamente in grado di veicolare una notevole quantità d'acqua per capillarità. Il test è stato condotto fino alla pressione di 120 MPa, ma le curve cumulative (un esempio è mostrato in figura 4.26) indicano che l'assorbimento non presenta, a tale pressione, alcuna tendenza a saturazione, anzi è evidente la tendenza ad assorbire ancora con decisione nel campo dei pori di dimensione inferiore al centesimo di micron. È presumibile quindi, per quanto

detto prima, che materiali porosi di queste caratteristiche possano aver rilasciato significative quantità di solfati.

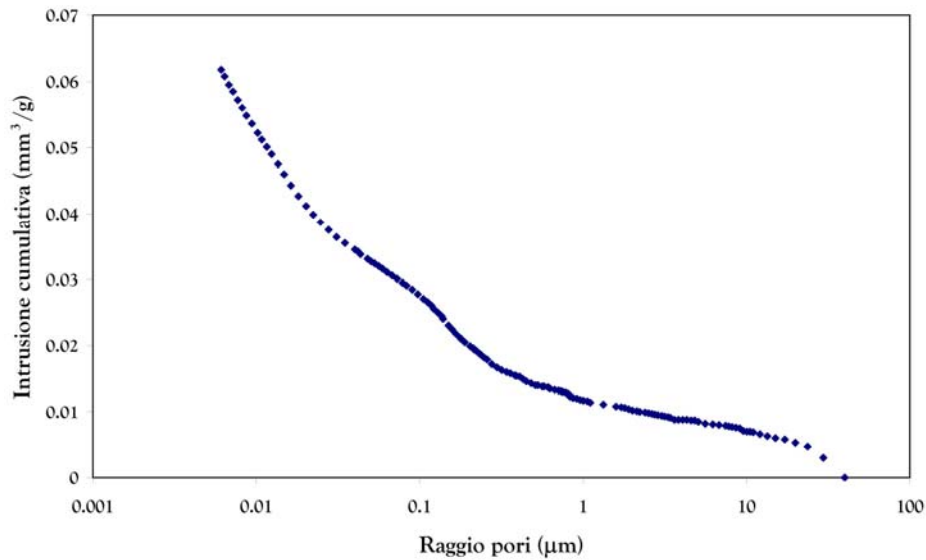


Figura 4.26 – Curva cumulativa di intrusione di mercurio di uno dei campioni cementizi (Is Paras-Isili).

La polverizzazione riscontrata nel paramento interno di Is Paras farebbe effettivamente pensare ad un'azione di degrado dovuta alla cristallizzazione di gesso nei pori delle parti marnoso-arenacee dei conci. Non è tuttavia da trascurarsi anche il concorso al degrado legato alla presenza di argille, in particolare di quelle fortemente espandenti di tipo smectitico come la montmorillonite, riscontrata in alcuni campioni (figura 4.27).

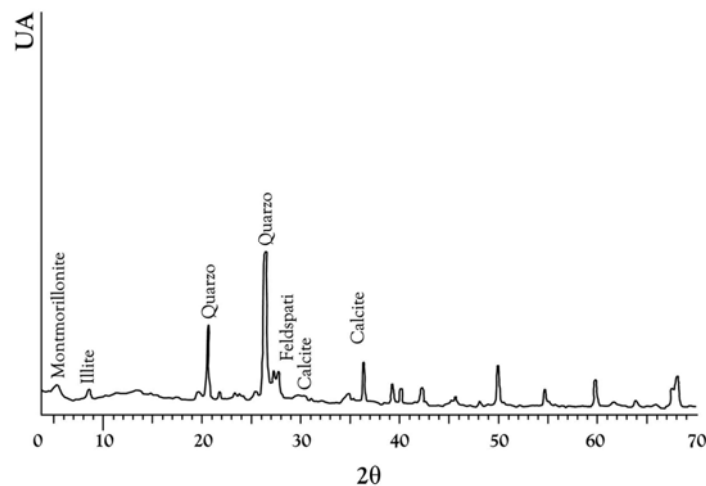


Figura 4.27 – Spettro XRD di un campione in cui è evidente la presenza della montmorillonite.



## 4.2 – SVILUPPO DELLA MODELLAZIONE FUZZY DELLA DURABILITY ALLA SCALA DEL SITO ARCHEOLOGICO

La termodinamica, nella sua generalità, porta ad assumere che un sito archeologico sia un sistema aperto, non in equilibrio con l'ambiente; quindi le modificazioni alle quali noi diamo il connotato negativo di degrado non possono essere bloccate ma solo rallentate (tanto meno possono essere fatte retrocedere, che implicherebbe qualche forma di ricostruzione, di per sé sinonimo di falsificazione del documento, quali il ri-facimento della struttura del costruito e/o della microstruttura dei materiali). Conservare significa rallentare la cinetica del degrado; un buon project è quello che porta la cinetica del degrado verso valori inferiori a quelli che si avrebbero senza intervento.

Supponendo data una generica struttura ruderizzata, il suo modello di durabilità può prevedere la valutazione della variabile dipendente 'cinetica del degrado' DGRD. Tale variabile può essere fuzzificata come variabile linguistica e quindi valutata con procedura FITA, dopo aver raccolto le conoscenze a disposizione in una KB sotto forma di membership functions e di regole IF/THEN.

La figura 4.28 riporta un quadro di base (non univoco) delle relazioni tra le variabili concorrenti al DGRD, assimilabile ad una fuzzy cognitive map, FCM (paragrafo I-4.3).

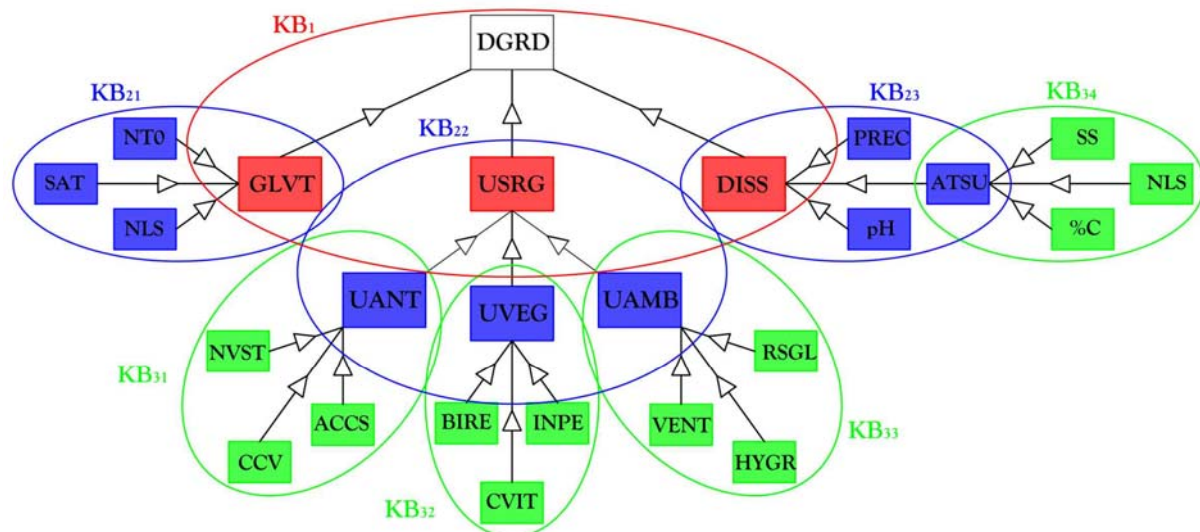


Figura 4.28 - Variabili e relazioni per la stima della cinetica di degrado (DGRD).

Una funzione pressoché inesprimibile analiticamente  $f_1$  collega la 'cinetica del degrado' a tre variabili rappresentative dei fenomeni di espansione ESP (rappresentati in particolare dalla gelività GLVT), di usura USRG e di dissoluzione chimica DISS, ma gli elementi conoscitivi acquisiti possono essere presentati sotto forma di una  $KB_1$ :  $DGRD = f_1 (GLVT, USRG, DISS) \approx KB_1$ . Ciascuna delle variabili indipendenti da cui dipende DGRD viene valutata attraverso 3 differenti blocchi.

GLVT indica l'azione di degrado esercitata dal gelo/disgelo sul materiale:  $GLVT = f_{21} (SAT, NTO, NLS) \approx KB_{21}$ . SAT indica il grado di saturazione della pietra, NTO è il

numero dei giorni con temperatura inferiore a 0°C e NLS è il numero di lesioni per strato, oppure una frazione critica di porosità come precedentemente discusso nel paragrafo II-4.1.1. Tra le azioni che esercitano una espansione sul materiale potremmo considerare anche il fenomeno della cristallizzazione salina.

Sotto la denominazione di ‘usura’ si possono comprendere alcuni termini che si presumono presenti e diffusi in un sito archeologico del tipo dato, ma che essendo spesso azioni di bassa intensità sono attualmente noti solo imprecisamente, ad esempio la dilatazione differenziale dei minerali, le espansioni dell’acqua liquida e del vapore, le azioni meccaniche degli agenti meteorici (pioggia, neve, grandine), le azioni chimiche e fisiche delle varie specie di vegetali insediate sulla superficie, il contatto antropico. Questi fenomeni sono attualmente trattabili teoricamente e riproducibili in laboratorio con difficoltà. Per quanto riguarda l’usura essa può essere considerata dipendente da tre fattori: la frequentazione antropica UANT, la presenza di vegetazione UVEG, ed un’altra serie di azioni raccolte sotto il termine ‘ambientale’ UAMB; questi tre termini andranno a costituire la KB della variabile  $USRG = f_{22}(UANT, UVEG, UAMB) \approx KB_{22}$ .

UANT indica l’usura antropica che è funzione del numero dei visitatori NVST, della loro consapevolezza culturale CCV e dell’accessibilità delle strutture ACCS:  $UANT = f_{31}(NVST, CCV, ACCS) \approx KB_{31}$ .

UVEG [CANEVA, NUGARO, SALVADORI 2005] è l’usura determinata dalle specie vegetali insediate: ovviamente questo tipo di azione di degrado è funzione della biorecettività della superficie BIRE [GUILLETTE 1995; GUILLETTE & DREESEN 1995], dell’indice di pericolosità delle specie insediate INPE [SIGNORINI 1996] e della vitalità dell’ambiente CVIT:  $UVEG = f_{32}(BIRE, CVIT, INPE) \approx KB_{32}$ .

UAMB è una variabile che può ricondursi alle condizioni climatiche del sito determinate dalla ventilazione VENT, dalla radiazione solare globale RSGL e dall’umidità HYGR:  $UAMB = f_{33}(VENT, RSGL, HYGR) \approx KB_{33}$ .

DISS indica le azioni di dissoluzione ad opera dell’acqua delle fasi mineralogiche, ed in particolare della calcite dei materiali calcarei o delle malte/conglomerati legati da calce:  $DISS = f_{23}(PREC, pH, ATSU) \approx KB_{23}$ . PREC sta ad indicare l’entità delle precipitazioni del sito, pH è la misura dell’acidità dell’acqua piovana e ATSU indica l’attività della superficie che a sua volta è funzione della percentuale di calcite %C, della superficie specifica del materiale SS e di NLS:  $ATSU = f_{34}(\%C, SS, NLS) \approx KB_{34}$ .

In figura 4.29 viene mostrata una fuzzificazione della variabile DGRD tramite i 5 fuzzy subsets:  $RL_2$  molto rallentata,  $RL_1$  poco rallentata, ATT cinetica attuale,  $AC_1$  poco accelerata,  $AC_2$  molto accelerata, mostrati sotto forma di membership functions triangolari, nella rappresentazione del Toolbox Fuzzy di MathLab®. La situazione (cinetica) attuale è posta in posizione centrale in un campo che deve prevedere simmetricamente sia la possibilità che subisca un’accelerazione sia quella che subisca, sperabilmente, un rallentamento. In particolare ogni project di conservazione o di valorizzazione del sito in valutazione avrà come risultato un output dalla figura 4.29, da intendersi in termini fuzzy, cioè come appartenente per un certo grado a due subsets contigui.

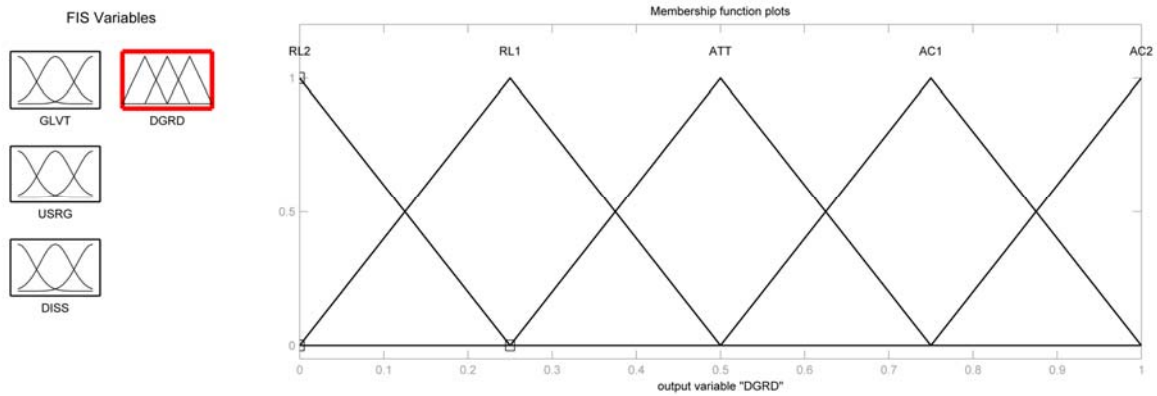


Figura 4.29 - Fuzzificazione della variabile DGRD.

Le variabili indipendenti GLVT (per espansione ESP), USRG e DISS vengono granulate anch'esse in 5 fuzzy subsets (MB molto basso, B basso, M medio, A alto, MA molto alto) (figura 4.30).

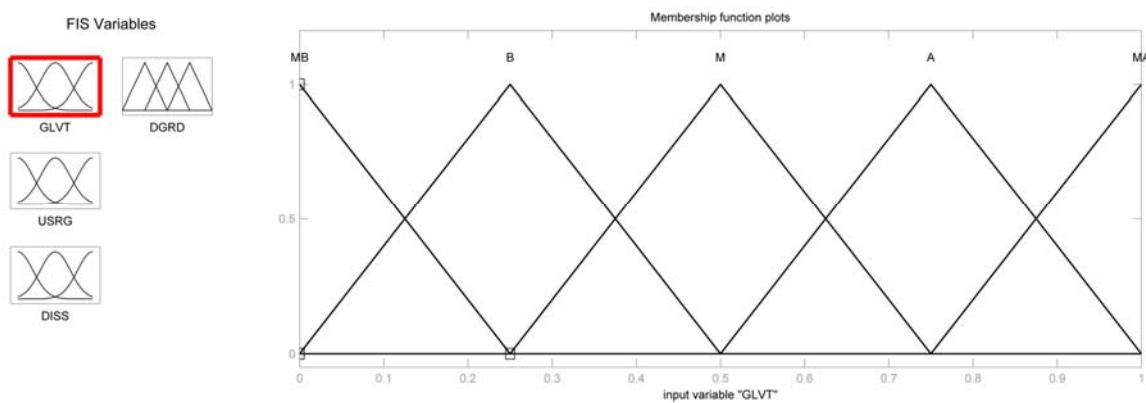


Figura 4.30 - Fuzzificazione della variabile GLVT; una rappresentazione analoga vale per USRG e DISS.

La tabella 4.2 riporta un complesso di regole IF/THEN che, utilizzate in associazione con le membership functions, consente di stimare i valori assumibili dalla variabile DGRD.

Tabella 4.2 – Regole per la valutazione della cinetica di degrado DGRD (- indifferente).

Numero rule	IF GLVT IS	AND IF USRG IS	AND IF DISS IS	THEN DGRD IS
1	MA	-	-	AC2
2	-	MA	-	AC2
3	-	-	MA	AC2
4	M	M	M	AC2
5	A	-	-	AC1
6	-	A	-	AC1
7	-	-	A	AC1
8	M	M	B	AC1
9	B	M	M	AC1
10	M	B	M	AC1
11	M	B	B	ATT
12	B	M	B	ATT
13	B	B	M	ATT
14	B	B	B	RL1
15	M	MB	MB	RL1
16	MB	M	MB	RL1
17	MB	MB	M	RL1
18	MB	MB	MB	RL2

La redazione delle KB relative ai blocchi GLVT, USRG e DISS richiede quindi una trattazione sito per sito.

Essendo questo studio, come detto nella Presentazione, finalizzato alla esplorazione (motivazioni, applicazioni, difficoltà, risultati, efficacia, confronto con altre metodiche, ecc.) delle applicazioni della logica e della matematica fuzzy alla Scienza e Tecnologia dei Materiali, si è scelto di puntare su una ricognizione generale come premessa ad un futuro approfondimento di quegli aspetti che si rivelano maggiormente promettenti. È evidente che non tutte le applicazioni hanno potuto essere spinte al massimo delle loro potenzialità.

Probabilmente la modellazione della durability dei siti archeologici è da un lato quella nella quale le premesse fuzzy sono più forti ed interessanti, ma anche quella nella quale è attualmente più difficile giungere alla piena attuazione del programma.

Alcuni sviluppi di questa ricerca sono agli «Atti dell’VIII Convegno Nazionale AIMAT» [PIA, SANNA, SPANU 2006 A, B].



#### 4.3 – ACQUISIZIONE DI DATI SULLA CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI E DELL’AMBIENTE DI ALCUNI SITI ARCHEOLOGICI

Un sito archeologico non è un impianto industriale, una macchina o una compagnia di assicurazioni, organismi che consentono di acquisire e disporre in tempi brevi di un gran numero di dati, sia sotto forma tradizionale numerica che come (utile ed irrinunciabile) esperienza soggettiva degli operatori. La relativamente limitata quantità di dati generalmente disponibile su un sito pone comunque, allo stato attuale, dei limiti oggettivi alla precisione di qualunque approccio modellistico, compreso evidentemente anche quello fuzzy.

Come esempi di applicazione della procedura fuzzy sono stati scelti tre siti archeologici tutti risalenti alla fine Età del Bronzo-prima Età del Ferro della cultura nuragica, realizzati con tecnica costruttiva a secco che prevedeva l’uso di grossi conci litici. L’ambiente di pertinenza dei tre siti è abbastanza simile essendo tutti nella fascia centrale collinare della Sardegna, un’area di limitata urbanizzazione (figura 4.31). Nei tre casi le comunità locali sono fortemente interessate alla conservazione della loro memoria storica ed alla valorizzazione turistica degli insediamenti. Noto è in tutti i casi l’interesse culturale generale.

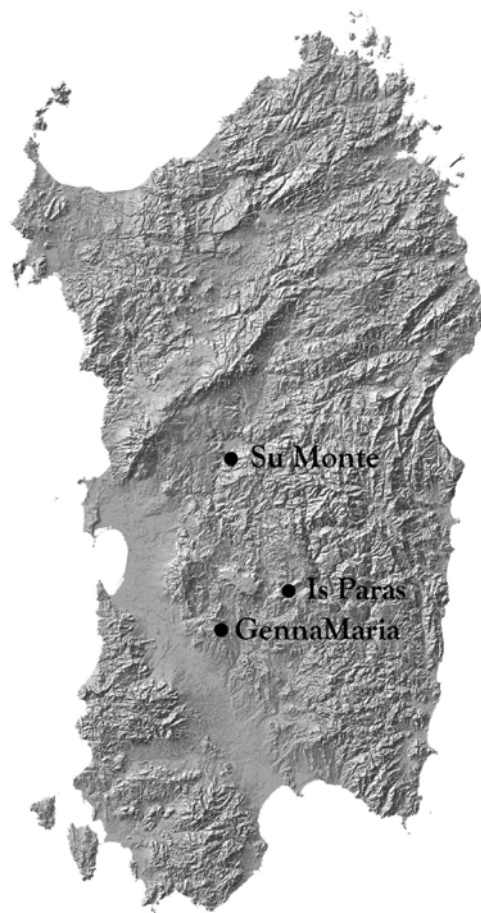


Figura 4.31 – Localizzazione dei siti.

La trattazione delle tre situazioni oggetto della ricerca è ordinata secondo un criterio cronologico (tempo) riferito allo scavo. Si tratterà quindi inizialmente di ‘Su Monte’, oggetto di scavo da circa 15 anni, si proseguirà con la trattazione del sito ‘GennaMaria’, le cui prime

campagne di scavo risalgono a circa 40 anni fa ed infine si arriva al nuraghe 'Is Paras' del quale esiste una documentazione che risale alla metà dell'800. Questa articolazione dei tempi consente una stima della cinetica del degrado DGRD, riferita a situazioni storicamente documentate. Tale criterio, peraltro, coincide, come si vedrà, con quella della complessità dell'approccio.

Nella prima parte di questo capitolo verranno raccolti i dati relativi alla caratterizzazione dei materiali, delle strutture e dell'ambiente dei tre siti. Nell'ambito di questa Tesi si è proceduto all'acquisizione originale dei dati per quanto concerne i siti di Su Monte-Sorradile e di Is Paras-Isili, mentre per il sito di GennaMaria una parte dei dati, quelli riferentisi alla caratterizzazione mineralogica e tecnologica dei materiali litici in opera, è stata acquisita dalla letteratura già pubblicata, mentre ulteriori indagini sulla durabilità del complesso sono state condotte nel 2005 espressamente per la presente ricerca.

Nella seconda parte di questo capitolo i dati a disposizione verranno utilizzati per la costruzione di una KB (relativa a ciascun sito) elaborata secondo le indicazioni fornite nel paragrafo I-4.2, in grado di dare, una volta completamente articolata, la stima della cinetica di degrado DGRD.

#### 4.3.1 – Su Monte-Sorradile

A Su Monte in comune di Sorradile (figura 4.32) è stato, nel recente passato, scoperta un'area ora riconosciuta come un importante centro culturale protostorico [BACCO & SANTONI 2001]. Di particolare rilevanza è una struttura denominata Tempio, attribuita alla locale Età del Bronzo finale (fine del XII, inizi del IX secolo a.C.), realizzata con grossi conci ignimbratici, in opera isodoma di alta qualità. I blocchi sono accuratamente martellinati e posti in opera senza legante con estrema precisione: negli spazi tra essi non passerebbe un foglio di carta. Al suo interno, con lo stesso materiale, è realizzata una singolare vasca-altare riprodotte in scala ridotta una struttura fortificata nuragica.

La struttura residua pressoché esclusivamente in pianta e rivela una tecnica costruttiva uniforme, a sacco, con un riempimento centrale/nucleo di materiale di varia pezzatura e terra, compreso tra filari in blocchi isodomi. Il piano di calpestio dell'ambiente 'A' è ora inferiore, di circa un filare, rispetto al piano esterno di campagna (figure 4.33-4.36).

Un deposito di oggetti in bronzo è stato recuperato in una delle nicchie interne. Singolare è inoltre il fatto che alcuni vani circostanti siano realizzati in modo da inglobare alcuni affioramenti rocciosi (figura 4.36).

Attualmente sono in attuazione le prime fasi di un ampio intervento di conservazione e di valorizzazione del sito.

Il sito è posto in un pianoro a circa 150 m slm, al di sotto della strada che attraversando Tadasuni ed il ponte sul lago Omodeo porta al paese di Sorradile. È in vista del lago Omodeo, del quale si gode un'eccellente vista panoramica, in una posizione quindi molto favorevole per una valorizzazione turistica. Le sue coordinate sono: 40°06'18" N, 8°54'13" E.



Figura 4.32 – Localizzazione del sito di Su Monte, in vista del lago artificiale Omodeo, sulla valle del Tirso.

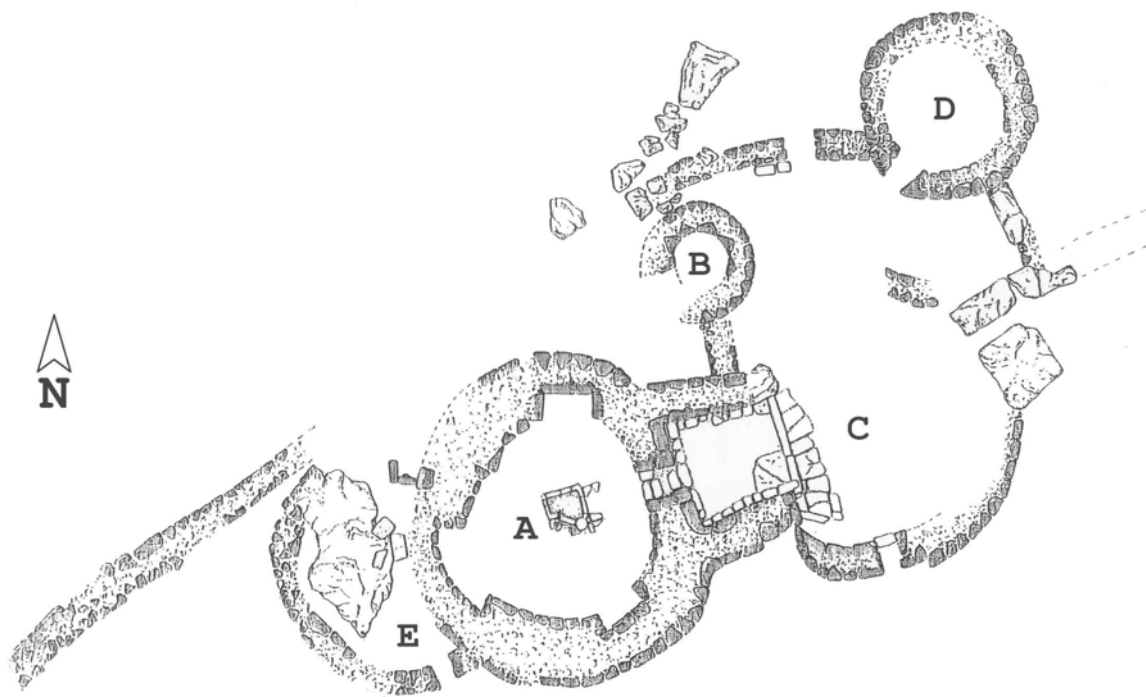


Figura 4.33 - Pianta del sito archeologico Su Monte-Sorradile [BACCO & SANTONI 2001].



Figura 4.34 - L'ingresso all'ambiente A, visto da C.



Figura 4.35 - A sinistra la vasca-altare al centro di A; a destra particolare della sezione muraria e della nicchia ovest di A.



Figura 4.36 - A sinistra muratura esterna del lato nord di A; a destra vano E.

Le rocce piroclastiche, cui le ignimbriti appartengono, pur derivando da fenomeni vulcanici, hanno un processo di formazione di tipo sedimentario comprendente la deposizione, la litificazione e la diagenesi. Esse derivano, infatti, dalla deposizione di ceneri e frammenti dovuti all'attività vulcanica di tipo esplosivo. Sono costituiti da una matrice cineritica all'interno della

quale sono presenti clasti pomicei o frammenti litici, in molti casi orientati in direzione del flusso piroclastico. In base alla granulometria dei frammenti tali rocce possono essere distinte in breccie vulcaniche, tufi vulcanici, pomici o cineriti. I componenti sono generalmente di natura silicea, con una saldatura medio-bassa ed una porosità conseguente che genera una struttura generalmente porosa e friabile.

In ambito geologico, oltre ad un degrado di tipo fisico, tali tipi di roccia possono degradarsi anche per effetto di processi di alterazione di tipo idrotermale, consistenti in devetrificazione, argillificazione dei silicati, ecc. Le proprietà meccaniche sono relativamente basse, fatto questo che peraltro ha agevolato l'estrazione e la lavorazione dei conci, caratterizzati inoltre da basso peso specifico.

Nell'ambiente A (il 'Tempio'), l'alterazione della roccia interessa particolarmente la fila inferiore del paramento interno, in associazione alla presenza di umidità derivante dal dislivello dei piani di calpestio interno/esterno. Essa si manifesta con scagliature e polverizzazioni, comunemente associate ad una fitta rete di apparati radicali di erbe e arbusti di differenti specie. Le indagini sperimentali sono state condotte su una serie di scaglie prelevate dall'anello di conci del paramento interno, di campioni di roccia esterna e di specie vegetali con particolare attenzione al loro apparato radicale.

L'ignimbrite presente a Su Monte risulta essere un materiale fortemente eterogeneo, con clasti di dimensione anche superiore al centimetro. Il colore dei campioni litici è prevalentemente rosato, la loro consistenza è tenera, e nelle superfici di frattura sono evidenti inclusi di dimensione fino al centimetro, talvolta con aspetto pomiceo (figura 4.37).



Figura 4.37 - Macrografie delle sezioni di una serie di campioni del vano A.

Dai diffrattogrammi XR (figura 4.38) sono stati rilevati quarzo e sanidino; molto limitata, nei campioni esaminati, la presenza di componenti argillose, in particolare di tipo smectitico.

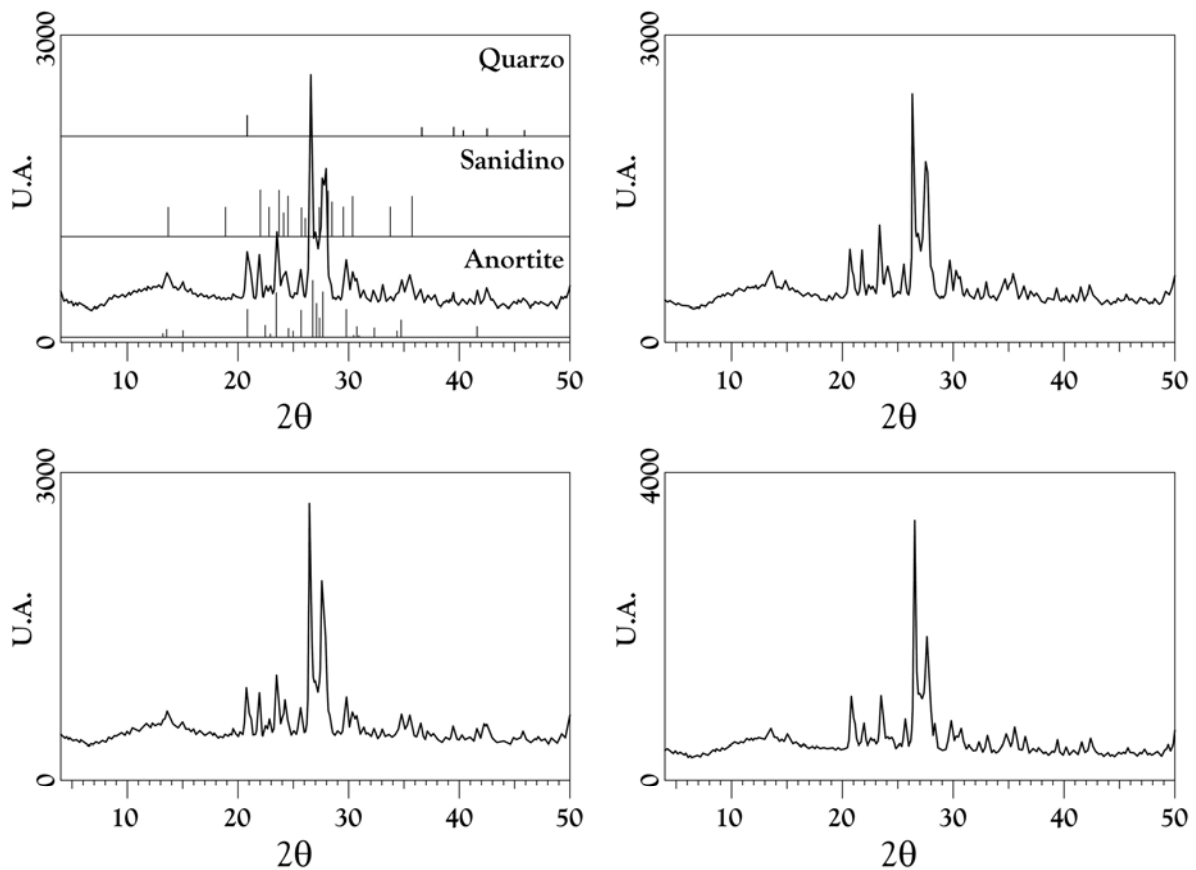


Figura 4.38 - Diffratogrammi di alcuni campioni di materiale prelevato dal sito Su Monte.

Sul Foglio 205-206 della CARTA GEOLOGICA D'ITALIA [1969 A], l'area sulla quale insiste il sito archeologico Su Monte è caratterizzata in termini di 'detriti di falda' delle colline circostanti, la cui quota si eleva rapidamente oltre i 500 m, costituite da rocce della cosiddetta 'formazione ignimbrica del ciclo vulcanico oligo-miocenico (Trachitoide)', che costituisce evidentemente anche il basamento del pianoro.

Questa parte della valle del Tirso è indicata, sulla CARTA GEOLOGICA DELLA SARDEGNA [1996], come una delle formazioni del ciclo vulcanico calcoalcalino oligo miocenico (di età genericamente compresa tra 14 e 32 Ma), costituita da 'rioliti, riodaciti, daciti e subordinatamente comenditi, in espandimenti ignimbrici, cupole di ristagno e rare colate, a cui si associano prodotti freatomagmatici ('fall' e 'surge'); talora livelli epiclastici intercalati'.

Queste indicazioni sono quindi del tutto compatibili con le risultanze degli esami XRD e microscopici sui campioni prelevati dai conci in opera. Rocce di questo tipo sono in pratica denominate con differenti termini, in realtà non del tutto equivalenti e talvolta non del tutto corretti dal punto di vista petrografico: piroclastiti, trachiti, tufi, tufi trachitoidi.



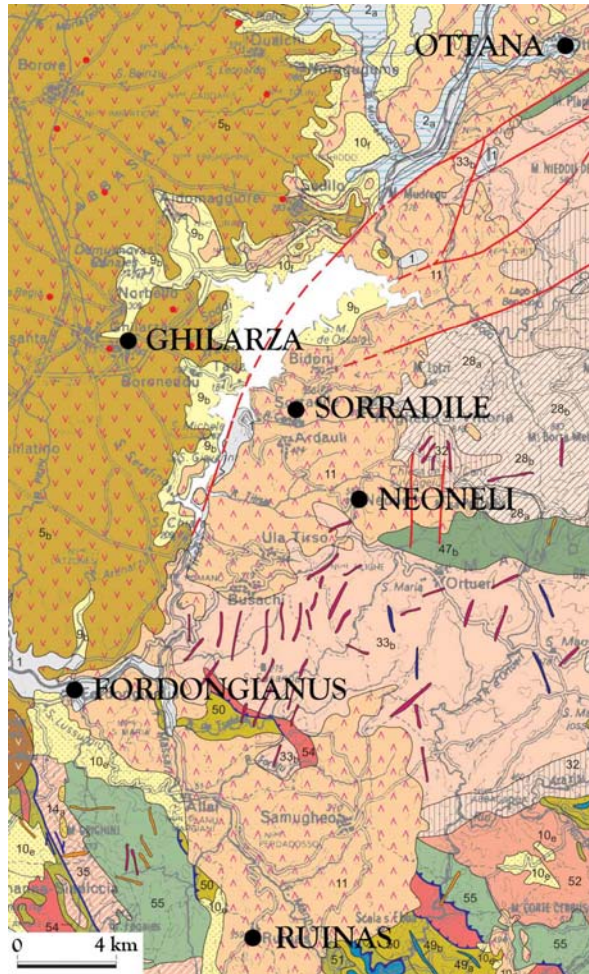


Figura 4.39 – Carta geologica dell'area con indicazione delle località citate [CARTA GEOLOGICA DELLA SARDEGNA 1996].

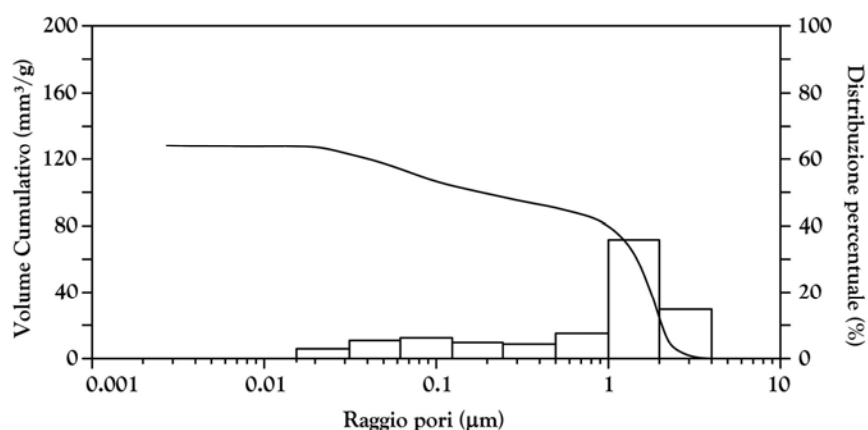
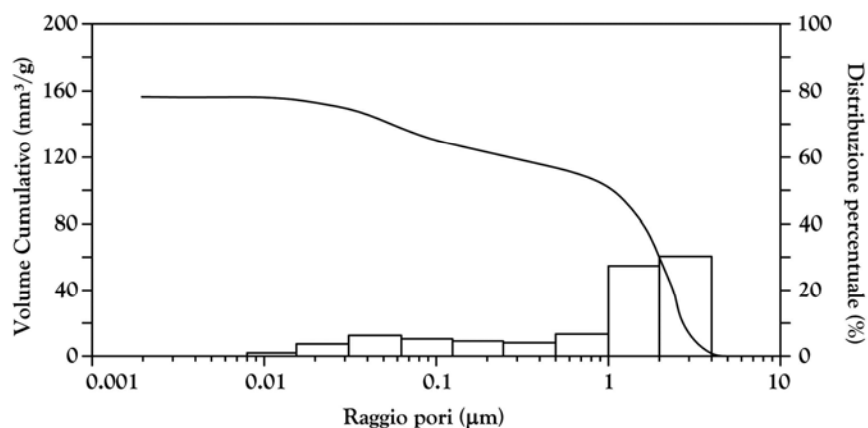
Ai fini conservativi, i materiali in opera sono parte integrante dell'ambiente. Il sito è a meno di 20 km dalla zona industriale di Ottana (168 m slm, 40°14'07", N 09°1'07" E), in direzione NE; il tipo di lavorazioni e la ridotta attività degli ultimi anni, rendono piuttosto improbabile un qualche contributo aggressivo da parte dell'inquinamento industriale. Altrettanto trascurabili sono gli effetti tipici dell'urbanizzazione e dell'ambiente marino. Il sito è per ora pressoché sconosciuto e pertanto non sono in gioco fenomeni di usura legati alla frequentazione, più o meno vandalica, di visitatori. Pertanto le azioni sui materiali sono pressoché esclusivamente legate al succedersi dei 'normali' eventi meteorici ed alla presenza delle specie vegetali.

Non potendo acquisire dati da stazioni meteorologiche locali, si riportano alcuni dati d'area desunti dalla documentazione storica del SAR [SAR SARDEGNA 2006]:

- il numero di giorni dell'anno nei quali la temperatura dell'aria scende al di sotto di 0°C è stimabile tra 15 e 20;
- la temperatura più bassa registrata negli anni recenti, nella stazione di Ghilarza, quella più prossima al sito, è stata di -1.7°C, nell'anno 2003;
- il valore medio della temperatura minima è di 8-10°C;

- il valore medio annuo delle precipitazioni è di 600-900 mm (a dicembre: 100-150 mm, a gennaio ed a febbraio: 80-100 mm, a marzo: 60-80 mm);
- l'umidità media a gennaio è del 60-65% e ad aprile del 45-50%;
- la radiazione solare globale è a gennaio di circa 170 MJ/m<sup>2</sup> e ad agosto di circa 580 MJ/m<sup>2</sup>.
- i venti prevalenti spirano da nord-est (la direzione della valle del Tirso), da ovest e da sud ovest mentre meno significativo è il vento da nord-ovest (maestrale), probabilmente a causa dell'effetto di schermo esercitato dalla catena del Marghine, dal Monti Ferru e dall'altopiano di Campeda.

Data l'eterogeneità del materiale, le misure di porosità hanno mostrato valori variabili, ma sempre in assoluto notevoli, compresi tra il 20 ed il 30%; conseguentemente anche il peso dell'unità di volume del materiale è basso, mediamente 1.7 g/cm<sup>3</sup>. La distribuzione dimensionale dei pori è risultata compresa in prevalenza tra 1 e 4 µm. Si tratta di un campo limite riguardo ai fenomeni espansivi che possono svilupparsi nei micropori a seguito della discesa della temperatura sotto 0°C in condizioni di saturazione d'acqua (gelività) o per cristallizzazione di eventuali sali veicolati dalla circolazione delle acque. Come visto in II.4.1.1 i materiali porosi con un raggio prevalente > 3-5 µm sono scarsamente gelivi mentre per raggi al di sotto di 1-2 µm la sensibilità al gelo è generalmente elevata.



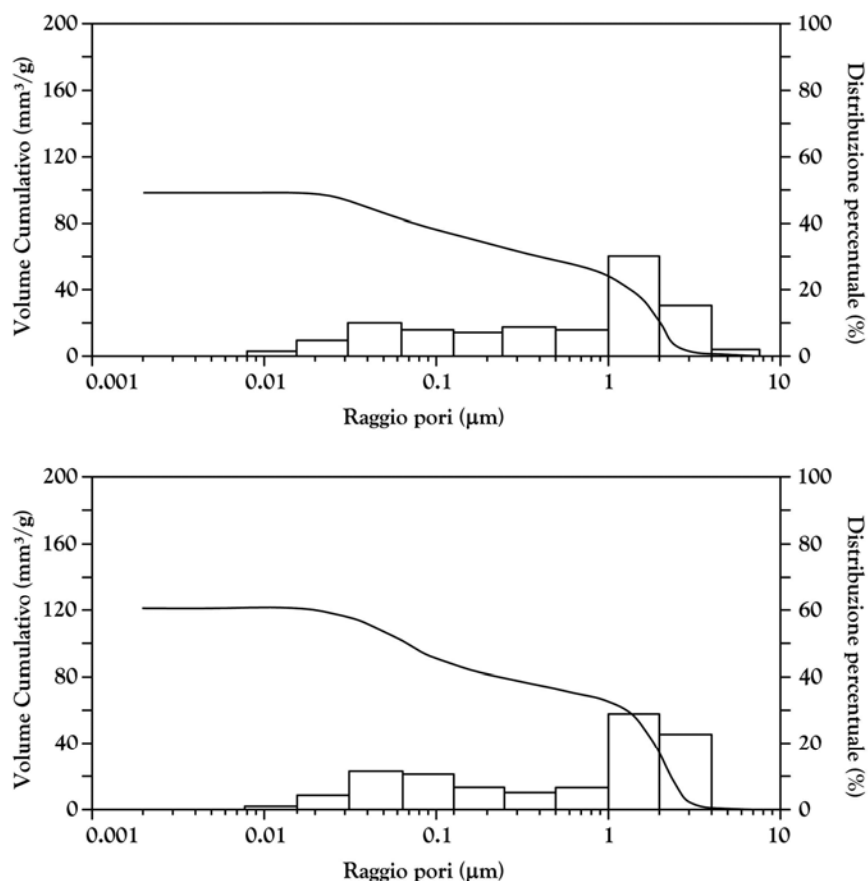


Figura 4.40 - Distribuzioni dimensionali dei pori di una serie di provini.

Le caratteristiche porosimetriche spiegano anche la notevole capacità di assorbimento d'acqua riscontrata nei test di capillarità [CNR-ICR NORMAL 11/85 1985; UNI 10859 2000]. In appena trenta minuti di contatto i provini sono soggetti ad aumenti di peso che raggiungono valori tra il 60 ed il 90%. La pietra in esame ha quindi una tendenza molto rapida a saturarsi. La resistenza a compressione in condizioni di saturazione non è risultata superare i 7 MPa. Nel caso del monumento di Su Monte questo dato è di per sé di limitata utilità, non essendo i conci soggetti a particolari sollecitazioni statiche di questo tipo (i filari sono appena 2 o 3, per un'altezza che può superare di poco il metro), ma è indice di una resistenza a trazione (praticamente non misurabile affidabilmente in modo diretto) altrettanto bassa, stimabile, noto il tipo di materiali, a non più del 10% di quella a compressione (considerata l'eterogeneità del materiale, vedi figura 4.37). Siamo evidentemente in presenza di una roccia in grado di opporre una resistenza pressoché trascurabile a fenomeni espansivi.

È evidente che sussistono condizioni di discontinuità strutturale molto forti, di mancata/parziale saldatura tra i suoi diversi componenti: su questi piani di discontinuità gli apparati radicali con le loro ramificazioni possono infiltrarsi con facilità.

Le specie erbose ed arbustive presenti sul monumento sono spesso caratterizzate dalla presenza di radici legnose che abbisognano di poco suolo per crescere, perfettamente capaci di inserirsi nelle spaccature delle pietre, quali *L'Asparagus Acutifolius* L. e *l'Ariseum Vulgare* L., ecc.

Le figure 4.41-4.42 mostrano una serie di situazioni nelle quali la scagliatura e la polverizzazione è sempre associata alla presenza di apparati radicali.



Figura 4.41 - Apparato radicale strettamente associato al degrado del materiale litico.



Figura 4.42 - Manifestazioni di scagliatura e polverizzazione sempre associate a radici, paramento interno del vano A ('Tempio').

È evidente che, purtroppo, esiste un buon 'feeling' tra gli apparati radicali delle erbe e degli arbusti e la microstruttura del materiale piroclastico. Il limitato grado di saldatura di quest'ultimo, la sua componente amorfa, la porosità e quindi l'alto valore della superficie specifica, sono termini che costruiscono un ambiente chimicamente in disequilibrio e fisicamente favorevole affinché le radici (e in generale tutte le forme biotiche) possano penetrare, insediarsi e svilupparsi. Il fenomeno tuttavia appare strettamente legato alla prossimità della superficie dei soli conci dei filari interni all'anello del vano 'A'.

Nello sviluppo di un apparato radicale entrano in gioco un termine geotropico (la crescita è lungo il campo gravitazionale), uno idrotropico (la crescita è verso le zone a maggiore attività dell'acqua) e uno chemiotropico (la crescita è verso le aree più ricche di elementi nutritivi). È pertanto ipotizzabile che il ristagno dell'acqua sul pavimento interno dell'ambiente A e le condizioni di scarsa ventilazione tipiche di una 'sacca', l'alterazione degli strati superficiali per azioni anche deboli di crioclastismo ed espansioni argillose, l'insediamento di alghe e altri microrganismi, abbiano creato le condizioni per indirizzare le radici verso uno sviluppo preferenziale in tale verso. Viceversa il paramento esterno essendo esposto alla ventilazione ed all'irraggiamento solare, funge da supporto ai soli licheni e muschi, ma non alle erbe.

L'interazione radice-pietra è un tipico processo olistico. È certamente significativo che le radici, oltre che un'azione meccanica, creino nelle loro prossimità un ambiente chimico-fisico particolare attraverso il rilascio di sostanze metaboliche di una svariatissima varietà. Il pH ed il potenziale ossidoriducete della pietra in prossimità delle radici possono essere assai diversi, più aggressivi, che in massa. Tra le specie rilasciate si riconoscono zuccheri, amminoacidi e amidi, enzimi, vitamine, etanolo, solfuri alchidici, ioni (potassio, idrossile, nitrato, fosfato), acidi alifatici (acetico, ossalico, tartarico, citrico, formico, ecc.) ed aromatici, fenoli, steroli e acidi grassi (oleico, linoleico, ecc.). Queste e altre sostanze costituiscono nutrimento per colonie di microrganismi e taluni sono anche direttamente in grado di attaccare la roccia [SEQUI 2005]. Non a caso si osserva che la faccia delle scaglie a diretto contatto con le radici appare pulverulenta.

I frammenti prodotti mantengono la stessa composizione chimica del materiale originario ma si staccano facilmente dal substrato a causa della pressione esercitata dalla crescita degli organismi o di loro parti (per esempio ife fungine, radici di piante). Il substrato ridotto in frammenti offre una superficie maggiore ad altri fattori di degrado, soprattutto in ambienti esterni (per esempio pioggia, vento, cicli gelo-disgelo, inquinanti, ecc.).

La separazione tra processi di natura fisica e chimica è una schematizzazione utile dal punto di vista didattico, anche se bisogna tener conto che, nella maggior parte dei casi, i due processi sono sinergici e simultanei, per cui l'azione di spinta meccanica è accompagnata e favorita dalla contemporanea interazione chimica con il substrato da parte dei metaboliti prodotti dagli organismi.

### 4.3.2 – GennaMaria-Villanovaforru

Il complesso archeologico di Genna Maria in comune di Villanovaforru, GM, è venuto alla luce nel corso di una serie di campagne di scavo condotte negli anni a cavallo del 1970 (figura 4.43). Attualmente è uno dei siti dell'Isola che può vantare di essere stato curato e studiato pressoché continuamente per oltre trenta anni. Perciò, potendo contare su una disponibilità di dati, di vario tipo, superiore a quello di altri monumenti, può essere considerata un'utile 'palestra' per sviluppare modelli a carattere olistico, che fungano da indispensabile supporto per i futuri processi decisionali finalizzati alla sua conservazione e valorizzazione.

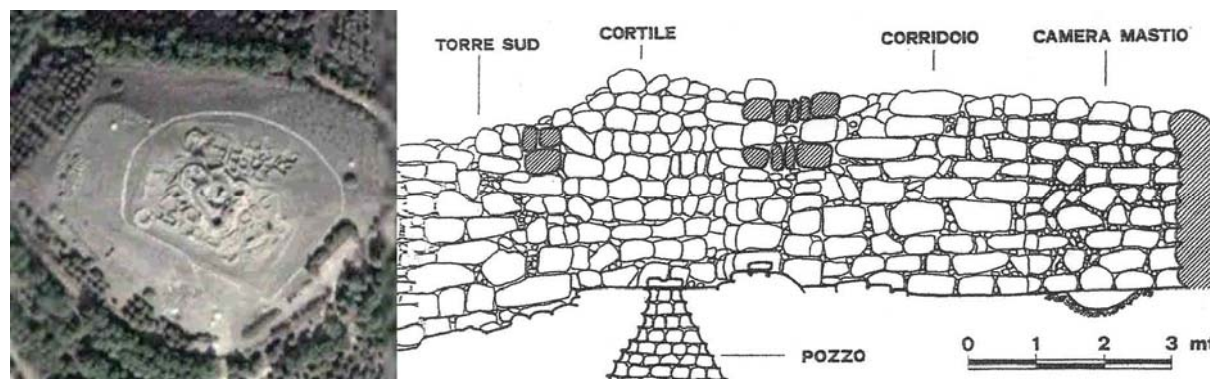


Figura 4.43 – Il complesso archeologico GM (39°38'05" N, 8°51'16" E) ed una sezione tra il mastio e la torre S.

Il GM è stato realizzato con i materiali litici disponibili sia in situ che nel raggio di pochi chilometri (prevalentemente marne ed arenarie mioceniche, secondariamente piroclastiti e basalti), vedi figura 4.44.

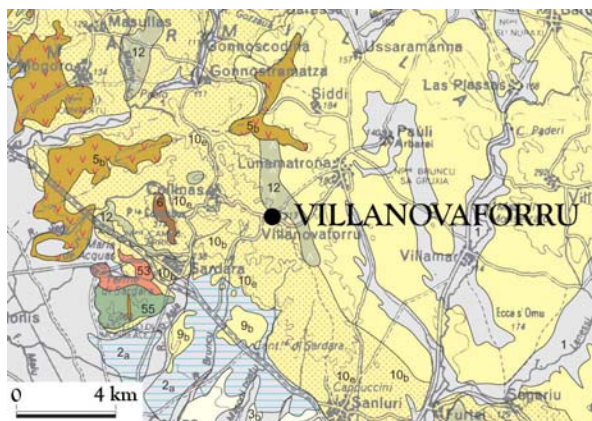


Figura 4.44 – Carta geologica della zona [CARTA GEOLOGICA DELLA SARDEGNA 1996].

La configurazione attuale è nata a partire da una tipica torre troncoconica, mastio, nell'Età del Bronzo Medio, poi sviluppatasi durante il Bronzo Recente con aggiunta di altre torri e di un antemurale turrato. Consistenti interventi di restauro statico-strutturale (rifasci) sono documentati anche durante i secoli dell'utilizzo. Le cause del dissesto antico erano probabilmente da ricercarsi in cedimenti della collina (paleofrane), sottoposta al carico di una struttura megalitica di forte spessore murario, che si elevava perlomeno per una dozzina di

metri, e quindi di grande massa, in problemi statico-costruttivi e nella natura poco durevole dei materiali. Nella successiva Età del Ferro parte dei materiali originari di piccole dimensioni vennero reimpiegati nella realizzazione delle strutture abitative di un villaggio addossato alle antiche strutture. La frequentazione del sito si è protratta fin in epoca Romana [LILLIU 1988; ATZENI 1992].

All'atto dello scavo le strutture residue non superavano l'altezza di pochi metri. Gli Archeologi dovettero affrontare immediatamente alcune situazioni staticamente malsane e la questione della evidente scarsa durevolezza dei materiali in opera sottoposti allo shock del disseppellimento, provvedendo con una serie di interventi di urgenza con i pochi mezzi a disposizione nel cantiere. Sugli effetti dell'utilizzo del materiale cementizio si è riferito in II-4.1.2.

Già dai primi anni gli Archeologi e la Comunità locale con i suoi Amministratori riuscirono a far assumere al sito un ruolo esemplare nell'ambito della archeologia sarda, come vivace centro propulsore di attività culturali ed imprenditoriali. È facilmente prevedibile che negli anni futuri si possa ripresentare la necessità di valutare interventi di tipo conservativo; da qui l'interesse a raccogliere in modo sistematico il complesso dei dati acquisiti in questo trentennio, seguendo una procedura ben definita e finalizzata.

Il complesso dei dati a disposizione è costituito dalla valutazione degli 'interventi di urgenza' e della copertura temporanea installata fino agli anni '90, dai rilievi e dalle valutazioni dei funzionari dell'ICR e della locale Soprintendenza e dei progettisti (1983-1987), dalle indagini di laboratorio condotte dall'Università di Cagliari (1992 e seguenti), dalle misure e stime connesse all'intervento di stuccatura con formulato a base di terra (1995-2005) e per il controllo biologico e della frequentazione antropica (dal 1995) [BALDI, MARIOTTINI, LAURENZI TABASSO 1983; UGAS 1984; MELUCCO VACCARO 1987; CAMBONI 1990; ATZENI, FARCI 1991; MELUCCO VACCARO 1991; ATZENI, MARCIALIS, MASSIDDA, SANNA 1992; LILLIU 1992; ATZENI, CABIDDU, MASSIDDA, SANNA, SISTU 1994; ATZENI, CABIDDU, MASSIDDA, SANNA 1995; ATZENI, CABIDDU, MASSIDDA, SANNA 1996; ATZENI, FARCI, FLORIS, MASSIDDA, MELONI, SANNA 2003] ed infine da un'indagine in situ ed in laboratorio condotta nell'ambito di questa ricerca con quattro sopralluoghi (inverno, primavera, estate, autunno) nel 2005.

Si riportano alcuni dati climatici desunti dalla documentazione storica del SAR [SAR SARDEGNA 2006]:

- il numero di giorni dell'anno nei quali la temperatura dell'aria scende al di sotto di 0°C è stimabile tra 12 e 16;
- il valore medio della temperatura minima è di circa 10°C;
- il valore medio annuo delle precipitazioni è di 600-700 mm (a dicembre: 90-100 mm, a gennaio: 80-90 mm, a febbraio 70-80 mm, a marzo: 60-70 mm);
- l'umidità media a gennaio è del 60-65% e ad aprile del 45-50%;
- la radiazione solare globale a gennaio del 2006 è stata di circa 180-190 MJ/m<sup>2</sup> e ad agosto dello stesso anno di circa 580-600 MJ/m<sup>2</sup>.
- i venti prevalenti spirano da nord-ovest.

Anche in questo caso, quindi, i dati sono sia di tipo numerico, derivanti da alcune indagini di laboratorio su ampi (ma non statistici) campionamenti, sia in situ che su materiale di cava stimato 'equivalente' a quello originario, che di tipo qualitativo, ancora da indagini di laboratorio o test in situ, sia francamente linguistico, espressi nel corso degli anni da differenti



soggetti (Archeologi, Restauratori, Amministratori, Architetti, ecc.) che col monumento si sono in varia maniera confrontati. Tutti questi dati presentano, di per sé, dei limiti evidenti, ma certamente nessuno di essi è arbitrario.

Generalmente, per i ruderi di un complesso archeologico, la stima della ‘cinetica di degrado’ DGRD può essere valutata attraverso un confronto tra riprese fotografiche o altro materiale documentario acquisito in anni differenti; la figura 4.45 mostra, a titolo di esempio, alcune delle immagini a disposizione.



Figura 4.45 - Esempi di confronti fotografici per la valutazione della cinetica del degrado su un intervallo di tempo di 13 anni.

Negli ultimi 13 anni, nel caso dei litotipi più deboli (piroclastiti, calcareniti) in molti conci non si riscontrano sensibili modifiche nello stato del degrado, fatto questo che può definirsi addirittura sorprendente rispetto alle pessimistiche previsioni fatte nei primi anni conseguenti allo scavo, ma occorre tenere presente che i primi tempi del disseppellimento sono probabilmente quelli più critici.

Attualmente la manifestazione più evidente di degrado è quella della frantumazione di conci di marne e arenarie ‘compatte’. In figura 4.46 sono riportati alcuni chiari esempi di gelifrazione (variabile linguistica GLVT), databili affidabilmente alla stagione invernale 2004/2005, su conci non sottoposti ad alcun carico statico [CHATTERJI & CHRISTENSEN 1979].



Figura 4.46 – Manifestazioni di gelifrazione verificatesi nell’inverno 2004/2005.

La gelività dei materiali in opera è stata riconosciuta come causa predominante del degrado in tutti gli studi condotti nel passato [ATZENI, MARCIALIS, MASSIDDA, SANNA 1992; ATZENI, CABIDDU, MASSIDDA, SANNA, SISTU 1994; ATZENI, CABIDDU, MASSIDDA, SANNA 1995].

Lo stato generale di fratturazione e polverizzazione dei conci e l’accessibilità a tutte le sue strutture rendono il sito particolarmente sensibile all’usura legata alla frequentazione antropica. In anni passati si sono registrate punte di frequentazione di oltre 40000 visitatori/anno; attualmente l’accesso risulta limitato e controllato e la visita avviene tramite il percorso costituito da una passerella sopraelevata, installata nel 1995, certamente efficace, seppure il suo impatto paesaggistico sia stato non esente da critiche ed in un futuro prossimo potrebbe essere rimossa (figura 4.47).



Figura 4.47 – La passerella in opera dal 1995 per il controllo dell’usura antropica ed i relativi appoggi in calcestruzzo, direttamente sul monumento.

Come detto in II.4.2, sotto il termine di ‘usura ambientale’ sono comprese azioni diverse che si manifestano con polverizzazione e sottile scagliatura, che non possono essere attribuite inequivocabilmente alle manifestazioni sino ad ora citate (gelività, usura antropica), ma che talvolta ne costituiscono un’indispensabile premessa. Anche in questi casi è possibile datare a tempi recenti ed attuali il complesso dei fenomeni in quanto le stilature sono state pulite nel corso dell’intervento attuato nel 1995. La figura 4.48 mostra alcuni esempi.



Figura 4.48 – Manifestazioni di ‘usura ambientale’ delle superfici dovuta probabilmente ad un concorso di cause.

Con il termine ‘usura ambientale’ si comprendono alcune azioni ‘di bassa intensità’ che si possono presumere assai diffuse nel sito ma che sono attualmente note solo imprecisamente. Tra esse si può considerare la presenza dell’acqua tra i grani che costituiscono l’unità base dei materiali in opera come causa di indebolimento dei legami. Le argille poi, presenti in tenori bassi e variabili ma pressoché ubiquitarie (le determinazioni XRD mostrano caolinite, illite, glauconite e montmorillonite) sono responsabili della capacità di fissare, rigonfiando a vario grado, rilevanti quantità d’acqua data la loro alta superficie specifica.

Le rapide fasi di riscaldamento, soprattutto su configurazioni ‘a lastra’ tipica delle marne in opera (alta superficie esposta all’insolazione) ed a sandwich (uno strato sottile lentamente saturabile, compreso tra due strati meno permeabili), pongono in pressione l’acqua allo stato liquido, incontrando questa una certa resistenza idraulica a scorrere; la stessa formazione di vapore (l’acqua ha una tensione di vapore non trascurabile anche a temperatura ambiente, talvolta si osservano i ruderi esposti al sole ‘fumare’ in inverno) può comportare l’insorgenza di pressioni. A questi fenomeni si possono affiancare le azioni meccaniche esercitate sulle superfici dagli impatti della pioggia, della grandine e delle particelle trasportate dal vento.

Tra le manifestazioni di usura ambientale (a causa della limitata localizzazione e per il fatto che esso è associato probabilmente al sovrapporsi di altri fenomeni quali la gelività e la presenza di argille anche di tipo francamente espandente) può comprendersi in questi casi anche la presenza di sali localizzata in alcune parti del monumento e documentata nel paragrafo II-4.1.2.

La circolazione delle acque meteoriche sulle superfici fortemente irregolari, porose e lesionate in modo estremamente sottile, è certamente responsabile anche di fenomeni di dissoluzione della calcite, la specie mineralogica più abbondante e solubile nei litotipi in opera. Il fenomeno di dissoluzione carbonatica non porta a manifestazioni eclatanti di degrado ma certamente predispone un progressivo indebolimento microstrutturale delle particelle e dei loro cementi sul quale possono quindi far leva le altre (con)cause di alterazione sopra individuate. Considerata la dinamica dei fenomeni di inquinamento a scala globale non è da escludersi che in futuro l’acidità delle acque meteoriche che interessano il sito (al momento pressoché assente) possa modificarsi significativamente.



### 4.3.3 – Is Paras-Isili

Il complesso nuragico polilobato Is Paras è localizzato nell'immediata periferia settentrionale di Isili (39°45'12" N, 9°6'56" E, 510 m s.l.m.). Struttura, tempi di realizzazione ed esperienze culturali sono chiaramente parallele a quelle del sito di GennaMaria, ed entrambi i siti sono parte di comprensori ad altissima densità di insediamenti protostorici. Tuttavia mentre nei conchi di GennaMaria la marnosità è spesso generalizzata, a Is Paras è limitata ai piani terminali dei conchi.

La torre centrale (XV-XIV secolo a.C.), mastio, si eleva per un'altezza di 12.70 m, con misure diametrali esterne di 12.70 x 12.50. Essa rappresenta uno dei monumenti più noti della Sardegna. In particolare la parte interna della tholos, che si eleva per 11.80 m (33 filari), a sezione basale quasi circolare con diametri 6.40 x 6.20 m, è considerata una delle più eleganti ed alte tra quelle esistenti (figura 4.49). Di particolare rigore formale risulta anche l'ingresso/corridoio voltato a ogiva retrostante l'ingresso, alto 2.8 m all'ingresso e 5.75 allo sbocco nella camera (figura 4.50).



Figura 4.49 - La parte sommitale della tholos.



Figura 4.50 - Ingresso a ogiva, visto dall'interno del nuraghe.

Alla scala si accedeva, dall'interno, da un'apertura posta a 5.25 m dal piano di calpestio, probabilmente a livello di un soppalco. Essa gira in senso orario, passando sopra l'ingresso, e sviluppandosi dapprima, per circa 4.50 m, come piano inclinato e successivamente nella parte terminale con 11 alti gradini (figura 4.51).



Figura 4.51 - Apertura della scala intramuraria: a sinistra vista dal tetto, a destra vista dall'interno (maggio 2006).

Il nuraghe è descritto da LILLIU [1988] come esempio di opera muraria subquadrata, composta da:

*“strutture a filari scanditi geometricamente in piani orizzontali, a blocchi tagliati in quadro più o meno accuratamente e talora con studiata eleganza. Risultano paramenti ben ordinati, spesso tesi e riposati nella cadenza ritmica delle assise che vanno aumentando in regolarità e nel lavoro delle pietre col salire delle composte murature”.*

La figura 4.52 riporta le piante del complesso nuragico come presentata dal LILLIU [1988] e quella elaborata a seguito dell'ultima campagna di scavo (1998) ed una foto che mostra la configurazione attuale del pavimento della camera del mastio, caratterizzata da un pozzo (diametro 1.25 m, esplorato sino ad una profondità di 5 m).

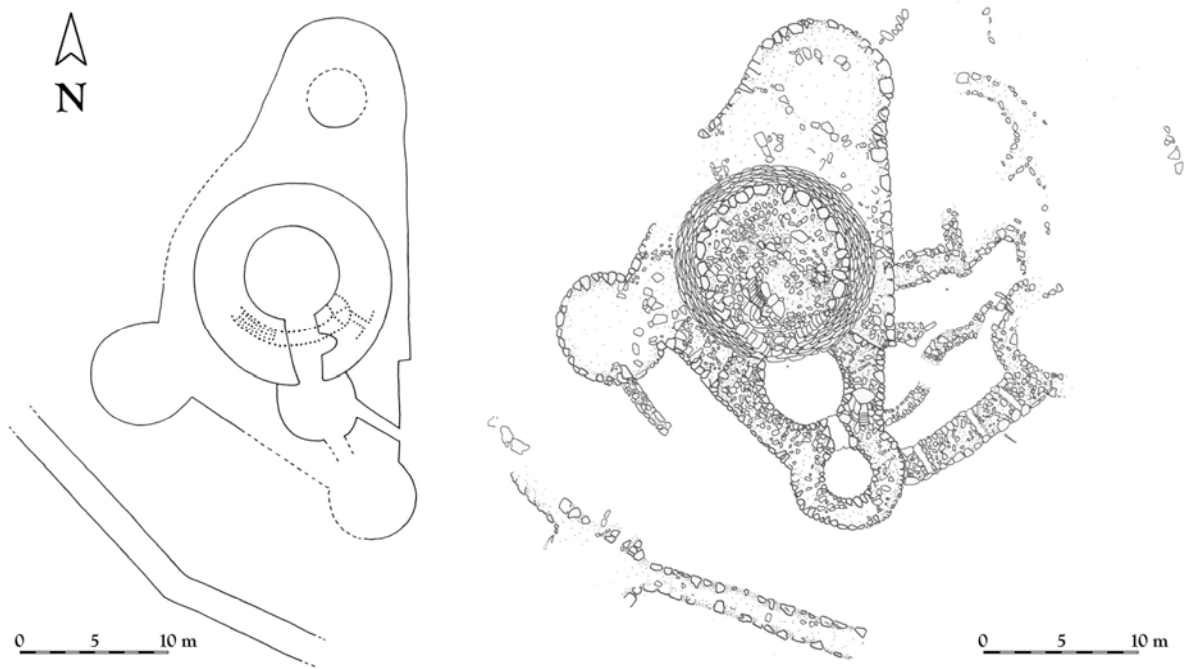


Figura 4.52 – Piante del complesso nuragico secondo LILLIU [1988] e secondo COSSU & SABA [2000] e vista del piano di calpestio, dall'apice della tholos;a destra è la luce dell'ingresso/corridoio (maggio 2006).



La valutazione della cinetica di degrado può in questo caso vantare una relativamente buona documentazione, infatti la prima descrizione sistematica del nuraghe è contenuta nell'“Itinerario dell'Isola di Sardegna” di Alberto Della Marmora, edizione italiana stampata a Torino nel 1860, ma opera pubblicata in francese qualche decennio prima. Si riportano di seguito gli elementi desunti da tale rilievo (e aggiunte/note nella traduzione ed edizione del 1868 curata da Giovanni Spano) risalente a circa un secolo e mezzo fa.

*“Lo chiamano Nur. de is Paras perché rinchiuso in un possesso dei PP. Scolopi, trovasi appena uscito dal villaggio allo stradone a mano sinistra. Il collegio fu fondato nel 1661 coi beni di G. Battista Mura (N.S..)”*

[SPANO 1854]

*“...un nuraghe isolato ad un centinaio di passi da Isili: consiste in un cono attualmente isolato, forse accompagnato un tempo da altri piccoli coni e anche da uno o due muri di cinta. Di tutto ciò non restano che le macerie, e il cono principale è la sola parte di quest'antico monumento che attiri oggi l'attenzione. L'ingresso è volto a sud, 8° verso est, e non supera il mezzo metro di altezza, ma è notevole per essere formato dallo spazio compreso tra l'architrave, come in tutti gli altri monumenti del genere, e un'altra pietra che funge da soglia: così che per raggiungere l'interno occorre salire uno scalino, come si può vedere nella figura 1.1. Dopo essere passati senza non poche difficoltà tra le due pietre a, ci si trova più a proprio agio in un corridoio più largo a forma di ogiva che va ingrandendosi man mano che ci si avvicina alla camera b, che non è diversa da quelle degli altri nuraghi: ha un diametro di circa 6 metri ed un'altezza di 10; entrando, sulla destra, ad un'altezza di circa 4 metri, nel muro della camera interna si vede un'apertura quadrata di 80 centimetri di lato che mette in comunicazione con una specie di spiraglio molto inclinato, che a sua volta comunica con una scala a spirale di dodici gradini che conduce sulla terrazza e che, essendo quasi verticale, è molto difficile da percorrere.*

*Questo monumento è già stato pubblicato dal Micali, al quale ne inviai un disegno una dozzina di anni fa. Il vestibolo, o meglio il corridoio d'ingresso, è interessante per la forma della volta che differisce da quella degli altri corridoi simili, che terminano quasi tutti con una pietra piatta posta trasversalmente sulle pietre delle pareti laterali; anche la porta d'ingresso è interessante nella parte interna perché l'architrave attraversa il corridoio alla metà della sua altezza, invece di costituirne la parte più alta come negli altri casi”.*

[DELLA MARMORA 1868]

Il testo del Della Marmora non fa cenno alla grossa lesione/frana del paramento esterno che caratterizza oggi la vista frontale del nuraghe. La lacuna doveva però già essere presente se Giovanni Spano, in “Memorie sopra i nuraghi della Sardegna”, asseriva esplicitamente:

*“...dovrebbe ripararsi quella parte che manca onde non crollare.”*

[GIOVANNI SPANO 1854]

La figura 4.53 riporta il rilievo eseguito dal Della Marmora. Si osserva che la sommità del nuraghe era largamente occupata da specie arboree. Tale disegno, di non univoca orientazione, non aiuta purtroppo a stabilire quale fosse l'estensione del crollo frontale.

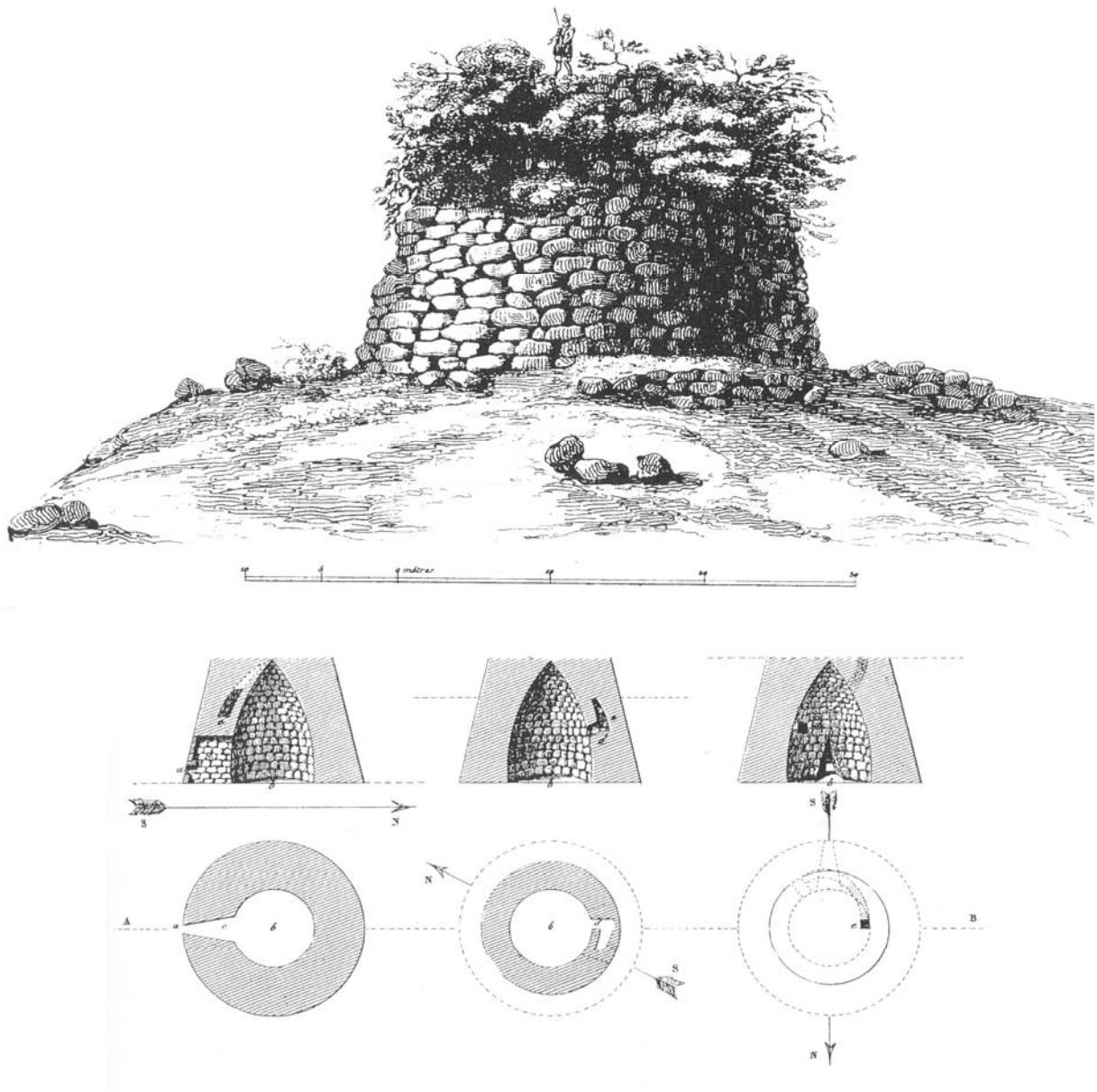


Figura 4.53 - Riproposizione del rilievo (anteriore al 1860) del Della Marmora.

La figura 4.54 mostra alcune viste del monumento, confrontando la situazione prima e dopo un parziale intervento di conservazione attuato nell'estate del 2006.



Figura 4.54 - Alcune riprese fotografiche del monumento (a sinistra aprile 2006, a destra settembre 2006).

In figura 4.55 è mostrato lo stato della parte sommitale della torre centrale, al maggio 2006.



Figura 4.55 – Scorcio della parte sommitale della torre centrale, ‘sigillata’ con un massetto in malta cementizia negli anni '70.

Sulla parte sommitale della torre centrale, fino al settembre 2006, erano visibili 3 aperture: una costituita dal vertice della tholos, parzialmente chiuso da due lastre (figura 4.56), una seconda legata alla presenza di un piccolo silos di forma cilindrica (figura 4.57) e la terza rappresentata dallo sbocco della scala intramuraria (figura 4.51).



Figura 4.56 – Particolare della chiusura della tholos (maggio 2006).



Figura 4.57 - Silos sulla parte sommitale (maggio 2006).

A seguito dei lavori di restauro condotti nell'estate 2006, la vegetazione presente sulle strutture e sulla parte sommitale è stata rimossa e la superficie di quest'ultima è stata sigillata con una 'malta' in terra fortemente argillosa, con conseguente occultamento dell'apertura sommitale della tholos (figura 4.58).



Figura 4.58 - Particolare della copertura della parte sommitale con 'malta' di terra (settembre 2006).

La geologia dell'area in prossimità del nuraghe, dalla quale è stata probabilmente cavata la parte predominante dei materiali impiegati nella sua edificazione, è caratterizzata da litologie prevalentemente calcaree. La formazione dei 'calcari di Isili' è attribuita al cosiddetto primo ciclo sedimentario Miocenico della Sardegna meridionale, risalente all'età Aquitaniana, agli inizi del Miocene, tra 20 e 23 milioni di anni fa. In particolare, il più recente rilievo a disposizione [SPANO, BARCA, CASU, MUNTONI 2002] indica:

*“areniti, conglomerati e tufiti arenitiche, calcari sublitorali con Foraminiferi plactonici, Molluschi pelagici e bentonici, Coralli etc...; marne argillose ittiolitiche, sabbie e siltiti con Molluschi bentonici...conglomerati poligenici continentali ed areniti con matrice argillosa rossastra, e nella parte alta, conglomerati, areniti e siltiti di ambiente litorale con Ostracoidi, Mitiloidi etc.”.*

[SPANO, BARCA, CASU, MUNTONI 2002]

Sul foglio 218 ‘Isili’ (I edizione) della CARTA GEOLOGICA D’ITALIA [1969 B] si riscontra un:

*“complesso di sedimenti...nel quale prevale ora l’uno ora l’altro dei seguenti termini: mc – calcari grossolani, calcari organogeni, calcari arenacei, calcari di deposito chimico, marne calcaree;...”.*

[CARTA GEOLOGICA D’ITALIA 1969 B]

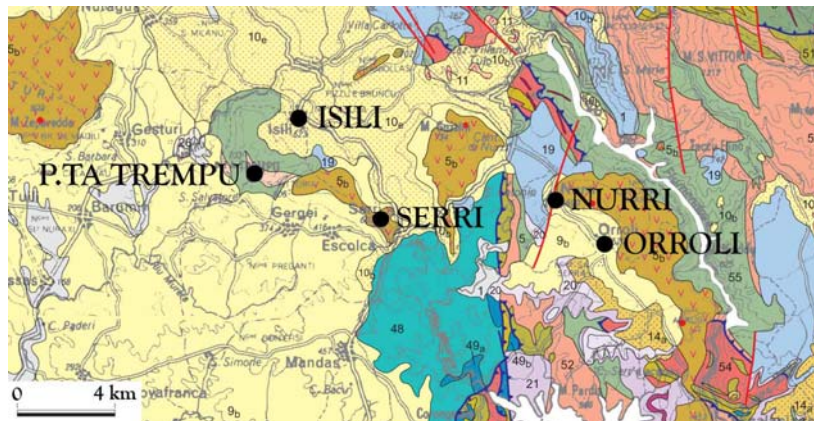


Figura 4.59 – Carta Geologica dell’area circostante il nuraghe [CARTA GEOLOGICA DELLA SARDEGNA 1996].

A distanza di pochi chilometri dal sito è possibile reperire anche basalti (giare di Serri, di Gesturi, di Monte Guzzini-Nurri e Orroli) e una varietà di rocce metamorfiche nell’area di Punta Trempu a SW di Isili.

Si riportano alcuni dati climatici desunti dalla documentazione storica del SAR [SAR SARDEGNA 2006]:

- il numero di giorni dell’anno nei quali la temperatura dell’aria scende al di sotto di 0°C è stimabile tra 15 e 20;
- il valore medio della temperatura minima è di circa 8-10°C;
- il valore medio annuo delle precipitazioni è di 600-700 mm (a dicembre: 120 mm, a gennaio: 90 mm, a febbraio: 100 mm, a marzo: 70 mm);
- l’umidità media a gennaio è del 60-65% e ad aprile del 45-50%;
- la radiazione solare globale a gennaio del 2006 è stata di circa 150 MJ/m<sup>2</sup> e ad agosto dello stesso anno di circa 700 MJ/m<sup>2</sup>.
- i venti prevalenti spirano da nord-ovest.

Le caratteristiche dei materiali in opera sono state definite attraverso una serie di campionamenti per la cui rappresentatività statistica valgono le osservazioni precedentemente effettuate. Le foto riportate in figura 4.60 documentano alcuni dei punti di campionamento.



Figura 4.60 – Alcuni campionamenti all'esterno (in alto) ed all'interno (in basso) del nuraghe Is Paras-Isili.

Gli spettri di diffrazione dei raggi X (figura 4.61) mostrano che in tutti i campioni oggetto dell'indagine il componente mineralogico cristallino di gran lunga prevalente è la calcite. In alcuni casi è apprezzabile anche il segnale della dolomite. Tra i componenti non carbonatici è talvolta importante il segnale e quindi la presenza, del quarzo e subordinatamente di feldspati e delle argille illite e montmorillonite.

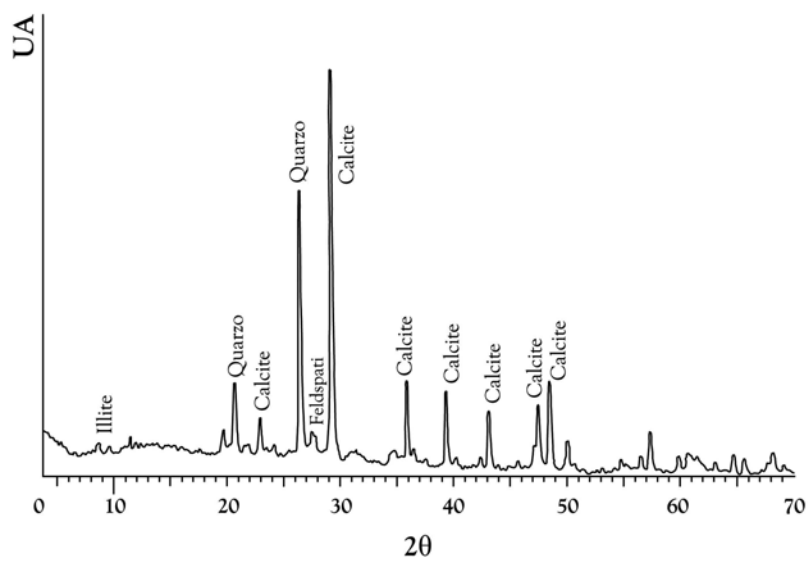
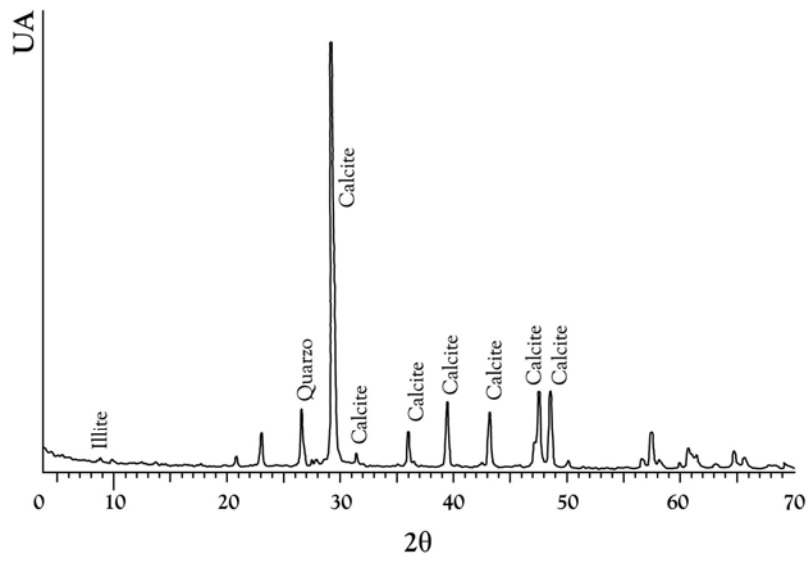
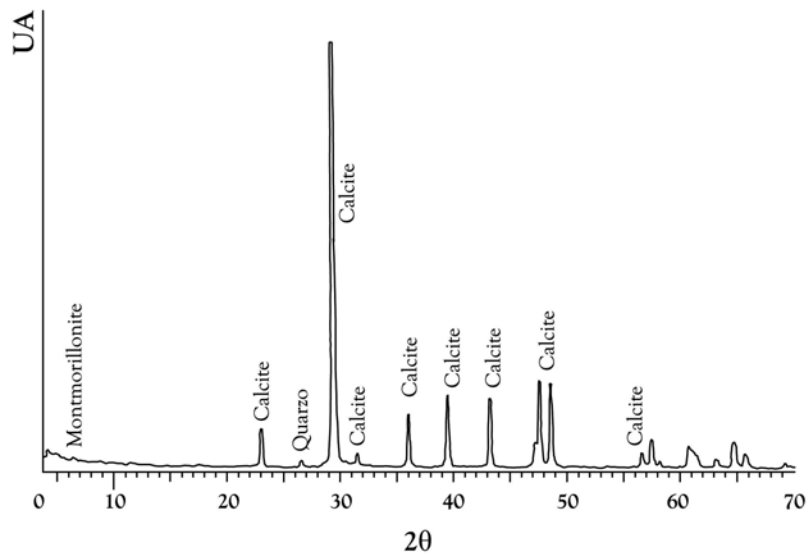


Figura 4.61 - Determinazione XRD di alcuni campioni del nuraghe Is Paras.



La determinazione quantitativa del tenore di calcite è stata effettuata per trattamento di una serie di campioni con una soluzione acquosa diluita 1/3 di acido cloridrico 37%, operando a temperatura ambiente (a freddo); in queste condizioni sperimentali si ha la dissoluzione pressoché completa della sola calcite mentre le altre fasi mineralogiche (compresa la dolomite la cui solubilità è significativa solo operando a caldo) restano come fase insolubile che viene quindi lavata ed essiccata fino a peso costante. Le determinazioni hanno dato valori di calcite nella roccia compresi tra il 75 ed il 99% in peso, con prevalenza dei valori superiori al 90%.

Le determinazioni XRD condotte sui residui insolubili (figura 4.62) hanno quindi consentito, senza il 'disturbo' rappresentato dai segnali della massiccia presenza di calcite, una precisa conferma della natura e della distribuzione, perlomeno qualitativa, dei componenti mineralogici secondari: il quarzo è il componente principale degli insolubili mentre l'argilla più comune è del tipo dell'illite ma talvolta si conferma anche la presenza di specie del gruppo della montmorillonite (smectiti), particolarmente influenti ai fini conservativi in quanto notoriamente soggetti a forti escursioni di volume durante i cicli igrometrici.

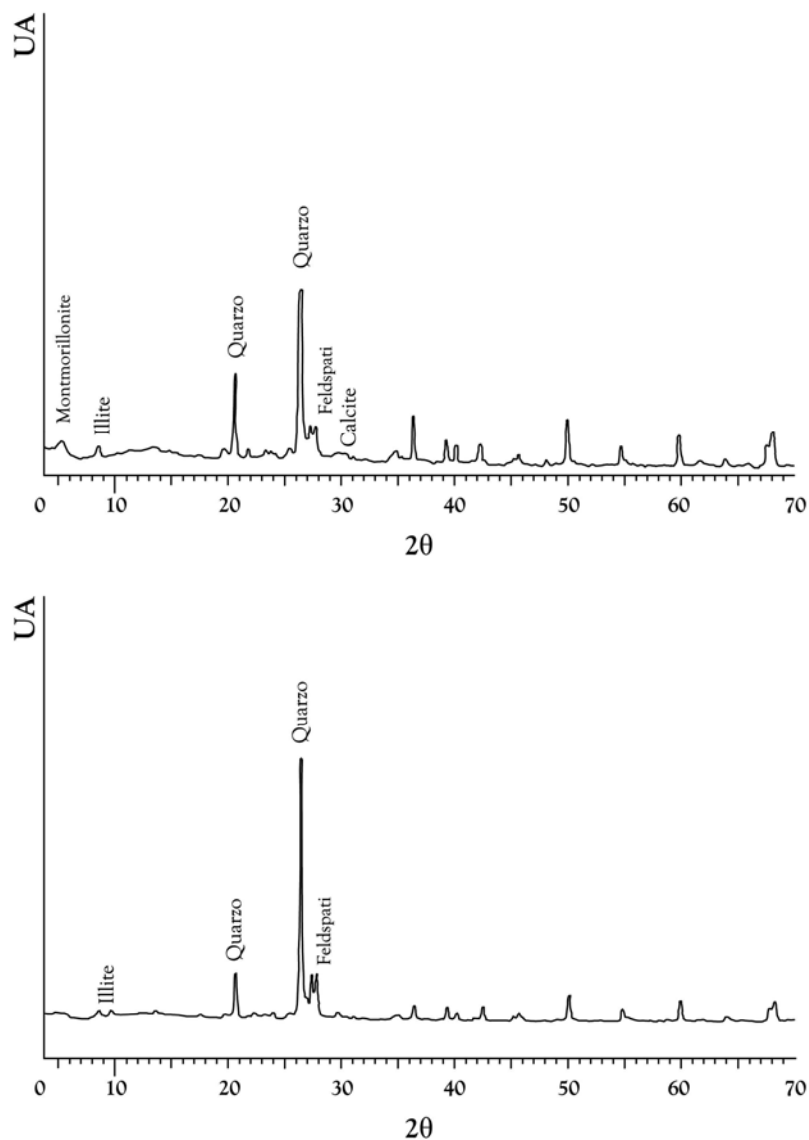


Figura 4.62 - Spettri XRD del residuo insolubile di due campioni.

Alcune utili indicazioni sulla tessitura della roccia possono essere ricavati da un preliminare esame visivo delle superfici di taglio e di quelle di frattura, sia diretto che supportato dallo stereomicroscopio a basso ingrandimento. Nella figura 4.63 sono riportate le macrografie delle sezioni di alcuni campioni.



Figura 4.63 - Sezioni macrografiche di una serie di campioni.

Facendo riferimento alle macrografie riportate si osserva:

- il campione 40 si presenta macroscopicamente omogeneo, di aspetto arenaceo monogranulare, con porosità submillimetrica uniformemente diffusa e da assenza di frammenti fossili a vista, di colore beige tendente al bianco;

- il campione 43 è macroscopicamente eterogeneo, con evidenti ed abbondanti frammenti di resti fossili e vuoti di dimensione fino al millimetro derivanti dall'imperfetta compattazione tra i bioclasti e la matrice; alcuni nuclei che emergono per il loro biancore, di forma globulare e dimensione fino a mezzo centimetro risultano costituiti da materiale a grana molto fine e sono generalmente più scalfibili del resto della sezione; il colore globale tende al bianco;
- i campioni 44 ed M4 sono macroscopicamente simili tra loro, e rappresentano una larga parte dei conci in opera. La pietra si presenta macroscopicamente omogenea, a grana fine e regolare, senza presenza di bioclasti visibili ad occhio nudo, con una regolare ed estesa frazione di porosità submillimetrica; il colore è grigio chiaro.
- il campione 45 è macroscopicamente eterogeneo ricchissimo di frammenti fossili e richiama 40 per l'aspetto arenaceo e poroso e 43 per la presenza dei globuli bianchi; il colore è il beige chiaro;
- il campione 49 è fortemente eterogeneo con grossi frammenti fossili ed una porosità cavernosa con aperture anche centimetriche; anche in questo caso sono presenti i globuli bianchi; il colore è bianco tendente al giallo. Di questa roccia, definibile in senso tecnico come calcare organogeno, si sono comunque riscontrati pochi conci, localizzati in precedenza nelle strutture periferiche, esterne alla torre centrale;

Esami petrografici sono stati eseguiti su un gruppo di dieci campioni; in larga parte di essi è stata disponibile anche una sufficiente quantità di materiale per effettuare le determinazioni porosimetriche e tecnologiche.

Frammenti di misura circa 4 x 5 cm sono state preparati come sezioni sottili con procedure standard [CNR-ICR NORMAL 10/82 1982; CNR-ICR NORMAL 14/83 1983] che sono state quindi sottoposte all'esame del microscopio petrografico. L'esame petrografico non è tanto legato al riconoscimento delle fasi mineralogiche, essendo come visto nel precedente paragrafo i campioni costituiti in larga prevalenza da calcite, quanto piuttosto finalizzato ad avere informazioni sulla tessitura, cioè sull'organizzazione dei diversi granuli costituenti il materiale sedimentario, con particolare riferimento alla presenza, forma e distribuzione dei vuoti, alla cementazione tra i vari componenti discreti e quindi al grado di eterogeneità e di 'saldatura' della compagine litica. È infatti su questi termini di discontinuità della microstruttura (da valutare in associazione ai dati porosimetrici ed idrometrici) che si giocano in larga parte le caratteristiche tecnologiche ed in particolare la durezza di un materiale.

A livello microscopico, dall'esame delle sezioni sottili, appare una struttura sempre intrinsecamente eterogenea, con la tipica caratteristica granulare variamente cementata dalla calcite dei calcari (figure 4.64-4.67).

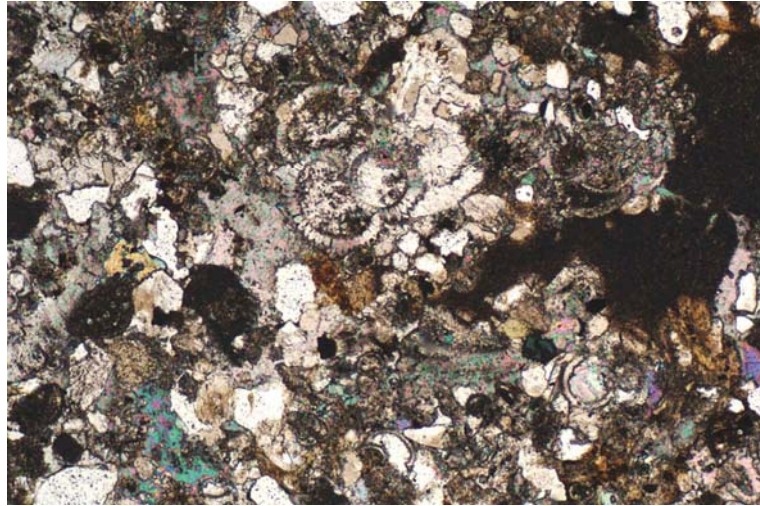


Figura 4.64 - Sezione sottile del campione 44 (80x, ×)

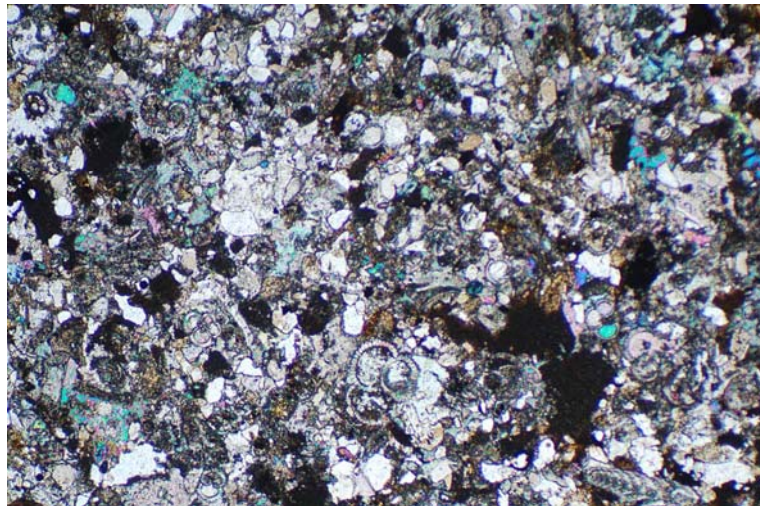


Figura 4.65 - Sezione sottile del campione 45 (40x, =)

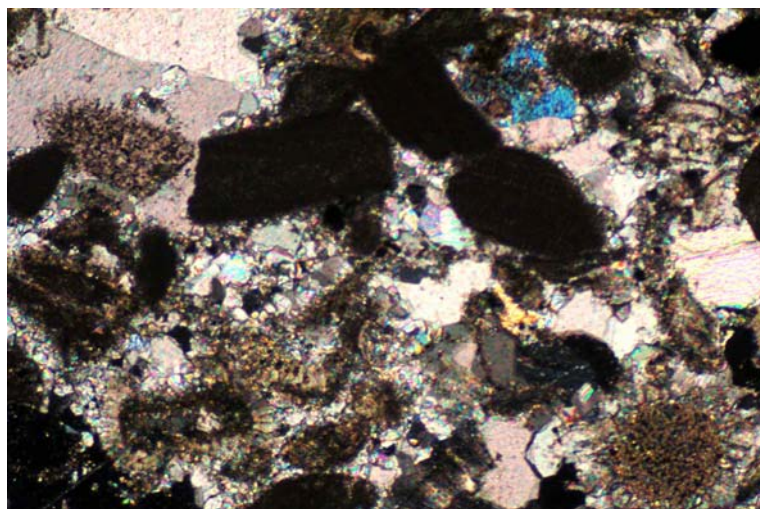


Figura 4.66 - Sezione sottile del campione 48 (40x, ×)

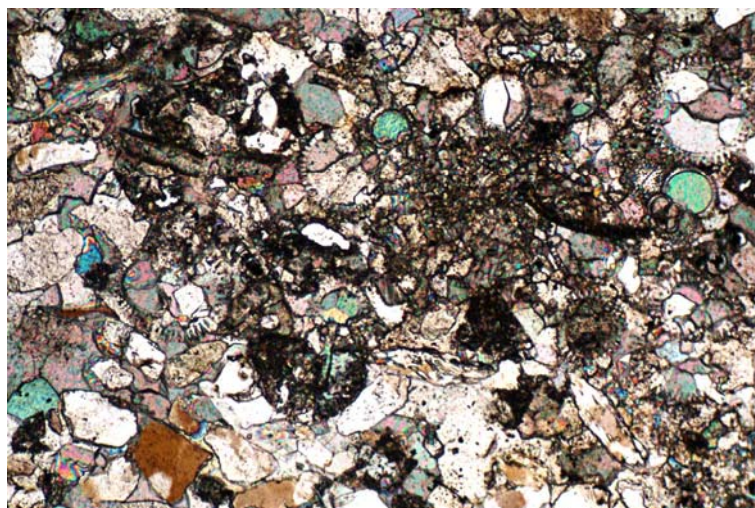


Figura 4.67 - Sezione sottile del campione M1 (80x, =)

Si può osservare che i bioclasti sono costituiti da frammenti delle conchiglie calcaree dei molluschi di diverse specie (bentonici o pelagici), frammenti di spine e piastrene di echinodermi e di gusci di foraminiferi planctonici. Nei campioni dove il tenore di materiale non carbonatico sale al 20-25% si individuano in modo particolare i clasti costituiti da quarzo.

La tessitura è spesso 'a mosaico', con i clasti a contatto reciproco uniti da un cemento da micritico a sparitico. La porosità è generalmente limitata, a questa scala, a quella di tipo interparticellare. Secondo la classificazione di Dunham [BOSELLINI 1991] i nostri campioni rientrano in genere tra i termini packstone (calcarenite lutitica) e grainstone (calcarenite spatata).

Nelle rocce di tipo sedimentario quali i calcari e le calcarenite riscontrate in opera nel complesso nuragico Is Paras, la microporosità deriva quindi dall'imperfetto contatto tra le particelle costituenti, siano esse frammenti di scheletri di fossili di origine marina, grani di detriti continentali trasportati dalle acque nei bacini di sedimentazione o costituenti del fango carbonatico. Il processo di litificazione, la trasformazione cioè in pietra di questo complesso di detriti, ha numerosi aspetti chimici e fisici che vedono agire l'azione della pressione, della dissoluzione e della riprecipitazione, tutte sviluppatasi alla scala del tempo geologico. La saldatura tra i componenti granulari tuttavia è lungi dall'essere completa (al limite un calcare sottoposto a metamorfosi per azione di pressione e di alta temperatura ricristallizza in marmo, con porosità trascurabile).

Le caratteristiche microporosimetriche sono determinate in questa indagine tramite la tecnica di intrusione forzata di mercurio, operando fino a pressioni di circa 120 MPa (e quindi nel range dimensionale di tre ordini di grandezza compreso tra circa 50  $\mu\text{m}$  e circa 50 nm), adeguata per valutare le classi dei pori influenti sulle proprietà tecnologiche dei materiali in oggetto. I campioni esaminati sono da considerarsi rappresentativi della massa dei conchi (non delle loro parti periferiche a carattere marnoso o arenaceo). Due esempi caratteristici di distribuzione dei pori sono sotto riproposti nelle figure 4.68-4.69.

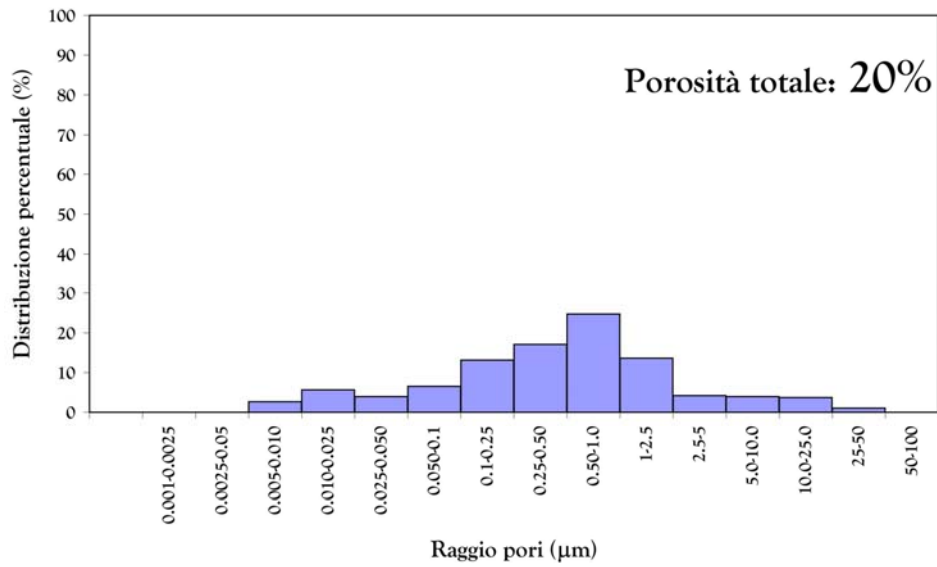


Figura 4.68 - Distribuzione porosimetrica del campione 49b.

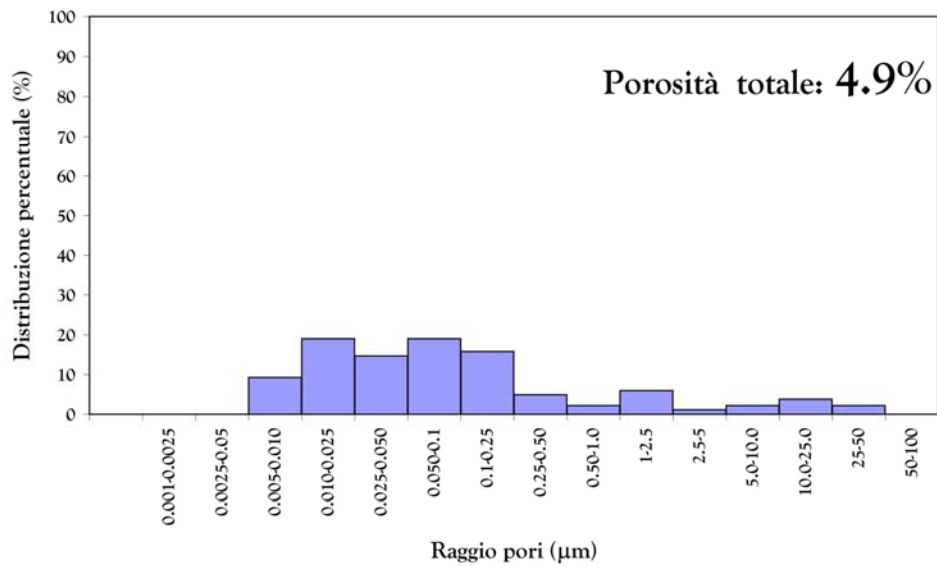


Figura 4.69 - Distribuzione porosimetrica del campione M2.

La tabella 4.3 riporta la frazione volumica dei vuoti, i pesi specifici, la superficie specifica e il raggio corrispondente al massimo della distribuzione.

Tabella 4.3 – Caratteristiche porosimetriche da intrusione forzata di mercurio di una serie di campioni del nuraghe Is Paras-Isili.

	Porosità (%) Volum.	Peso specifico (g/cm <sup>3</sup> )	Superficie specifica (m <sup>2</sup> /g)	Raggio corrispondente alla classe volumetricamente prevalente (µm)
40	18.2	2.04	0.96	1
42a	6.8	2.62	2.10	0.03
42b	5.8	2.67	1.31	0.07
42c	3.9	2.65	1.79	0.02
43	18.5	2.28	1.46	0.45
44	7.3	2.60	2.06	0.04
45	22.3	2.16	1.52	0,70
47	4.5	2.65	1.81	0.02
48	5.1	2.64	1.17	0.10
49	1.0	2.68	---	---
49b	20.0	2.27	1.89	0.5
50	8.1	2.61	2.15	0,07
M1	4.8	2.65	1.32	0.05
M2	4.9	2.62	1.17	0.02
M3	7.7	2.54	1.71	0.07
M4	4.8	2.67	1.45	0.03
M5	3.4	2.67	1.48	0.03

I calcari che appaiono compatti anche visivamente risultano avere una frazione di vuoti molto bassa, tra 3 ed 8% del volume globale. Praticamente nulla è la porosità di un frammento madreperlaceo che è stato possibile separare dalla matrice inglobante (rispettivamente 49 e 49b). Un numero limitato di campioni è risultato avere una porosità compresa tra il 15-20%; essi corrispondono a quei calcari la cui tessitura 'arenosa' è chiaramente percepibile anche visivamente (vedi figura 4.61).

La superficie corrispondente ai vuoti è bassa e generalmente compresa tra 1-3 m<sup>2</sup>/g. Assai uniforme è anche il raggio dei vuoti in corrispondenza del massimo della distribuzione volumica ed ha generalmente il valore di una frazione di µm. I dati illustrati lasciano presumere una buona resistenza intrinseca ai fenomeni di weathering di larga parte del volume del materiale costituente i conci.

Associate alle caratteristiche microporose dei materiali è la loro capacità di assorbimento capillare d'acqua. Tale fenomeno è, come noto, determinante ai fini della durezza della roccia essendo l'acqua un agente dissolvente (e ciò è particolarmente vero nel caso dei calcari: solubilità della calcite = 14 mg/l a 25°C, solubilità della dolomite = 320 mg/l a 18°C) e potendo essa veicolare sali, essere soggetta quindi a trasformazioni in vapore, con deposizione di sali, o in ghiaccio con effetti espansivi potenzialmente dirimpenti, promuovere la bioricettività o comunque indebolire la compagine dei legami interparticellari.

La capacità di assorbimento capillare mostrano che l'assorbimento d'acqua è generalmente limitato. Il fenomeno si sviluppa prevalentemente nelle prime 24 ore di contatto e solo molto limitatamente in seguito. È da ritenersi improbabile che questa limitata quantità d'acqua possa essere il tramite di significativi fenomeni alterativi. Si osserva però che i campioni testati sono rappresentativi della massa calcarea sostanzialmente compatta dei conci e non delle parti periferiche terminali a carattere marnoso o arenaceo sulle quali non sono stati effettuati test in

quanto il campionamento si è reso problematico a causa del loro stato di degrado, ma che può essere dedotto da esperienze analoghe condotte in altri contesti (esempio GennaMaria) dove l'intero concio era spesso marnoso.

Per la comprensione delle caratteristiche resistenziali e della durabilità dei conci costituenti il monumento, è necessario considerare termini a due differenti scale dimensionali. Pressoché in ogni concio sono riconoscibili una massa visivamente compatta, ma talvolta attraversata da lesioni-diaclasi e giunti (parallele o ortogonali al piano di giacitura, sia quello della roccia nel suo ambiente deposizionale originario, che peraltro coincide generalmente con quello di posa in opera), compresa, come a sandwich, tra due strati di limitato spessore, di carattere marnoso-arenaceo. La figura 4.70 riporta alcune foto rappresentative del fenomeno.

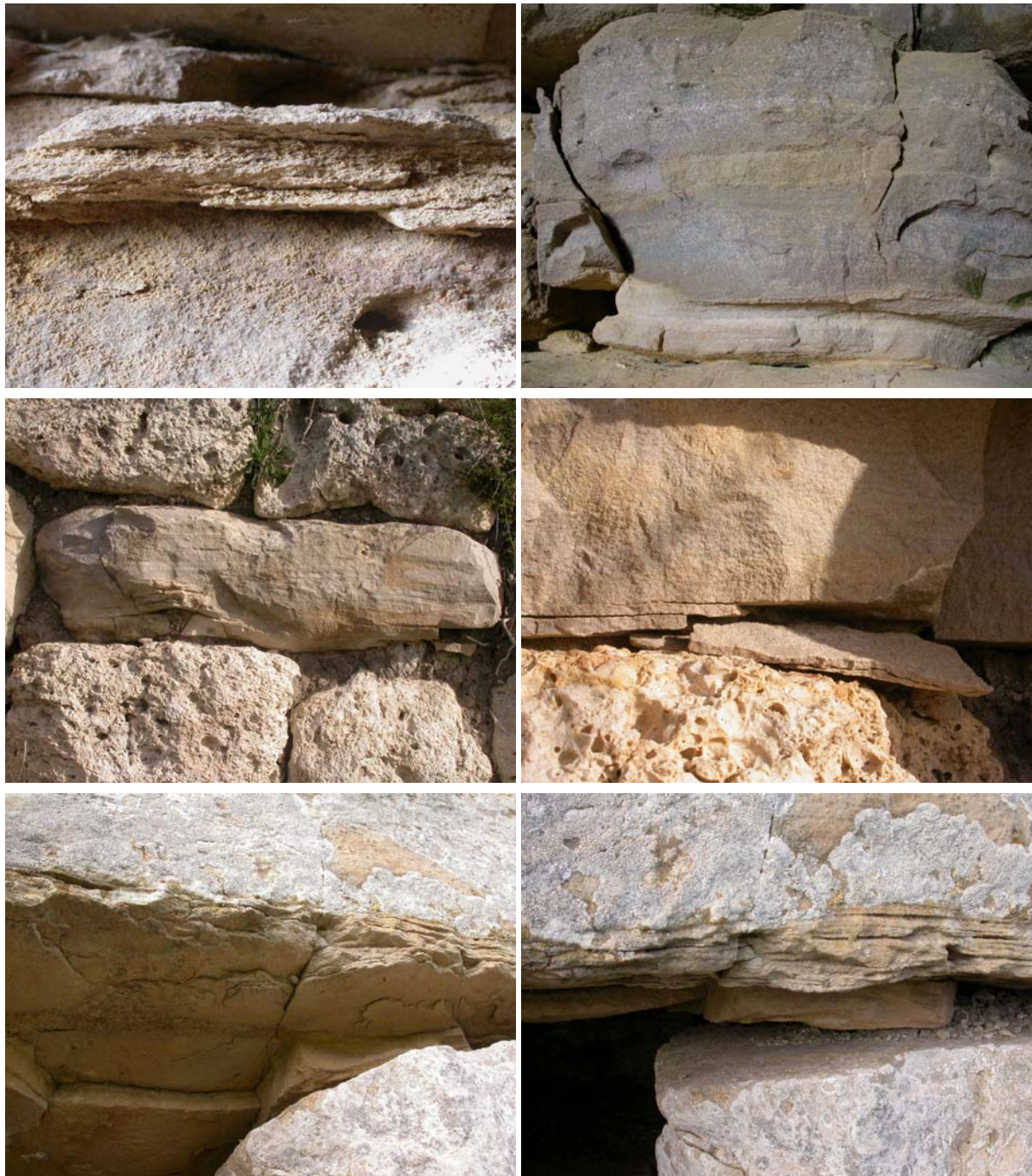






Figura 4.70 - Tipica struttura macroscopica dei conci in opera.

La tabella 4.4 riporta i valori medi della resistenza a compressione uniassiale, del peso specifico, della velocità di propagazione degli ultrasuoni e del conseguente modulo elastico dinamico di una serie rappresentativa di campioni. La resistenza a compressione è stata determinata su cubi di lato di circa 5 cm, a secco, operando con una pressa idraulica. La velocità di propagazione degli ultrasuoni è stata determinata, sempre a secco, su provini di dimensione di circa 5x5x15 cm, alla frequenza di 150000 Hz, in modalità di trasmissione diretta [CNR-ICR NORMAL 22/86; CNR-ICR NORMAL 42/93].

Tabella 4.4 - Caratteristiche meccaniche di una serie di campioni.

	Resistenza a compressione (MPa)	Peso specifico (g/cm <sup>3</sup> )	Velocità ultrasuoni (m/s)	Modulo elastico dinamico (GPa)
42	54	2.64	4905	64
43	35	2.30	4303	43
44	71	2.51	5859	86
47	55	2.52	5294	71
48	90	2.84	5540	87
M1	56	2.10	4915	51
M2	70	2.63	5407	77
M3	71	2.61	4351	50
M4	76	2.60	5663	83
M5	64	2.62	5150	70

Dai dati ottenuti è evidente che le caratteristiche resistenziali dei calcari in opera sono intrinsecamente molto buone. I valori sperimentali raggiungono correntemente i 50 MPa (e talvolta superano i 100 MPa). Le velocità di propagazione degli ultrasuoni, generalmente comprese tra 5000 e 6000 m/s sono chiaro indice di una massa assai compatta e consistente.

È tuttavia ben noto che queste caratteristiche non implicano affatto che il materiale sia resistente anche a sollecitazioni flessionali e di taglio; infatti gli stessi nuragici utilizzavano i conci 'a compressione'; è il venir meno dei piani d'appoggio per weathering o l'assestamento della struttura che induce localmente questo tipo di sollecitazione con conseguente fratturazione.



## 4.4 – APPLICAZIONI DEL MODELLO FUZZY AI SITI

### 4.4.1 – Su Monte-Sorradile

Lo schema in figura 4.71 riassume il complesso delle variabili e delle loro connessioni, che costituiscono il nocciolo del modello del processo di degrado nel sito Su Monte-Sorradile. L'attenzione viene focalizzata sui termini di usura vegetale UVEG e ambientale UAMB. Siamo di fronte ad un caso 'semplice' ma particolarmente evidente di insufficienza di un approccio riduzionistico:

*“Plants roots may help to initiate disruption of the rock structure, but the forms produced may be overwhelmed by subsequent effects of other weathering agents ... This transience makes the determination of the potential significance of this agent in ... weathering difficult.”*

[MOTTERSHEAD, BAILY, COLLIER, INKPEN 2003]

Si osserva che l'articolazione di questo schema è maggiormente dettagliata rispetto al quadro riassuntivo riportato in figura 4.28, paragrafo II-4.2. Il suo carattere è ora quello di una vera e propria FCM. Come detto nel paragrafo I-4.2 una FCM può essere sviluppata attraverso una serie di regole IF/THEN o con metodi matriciali. In questa ricerca, anche per omogeneità con il resto della trattazione, si seguirà la prima via.

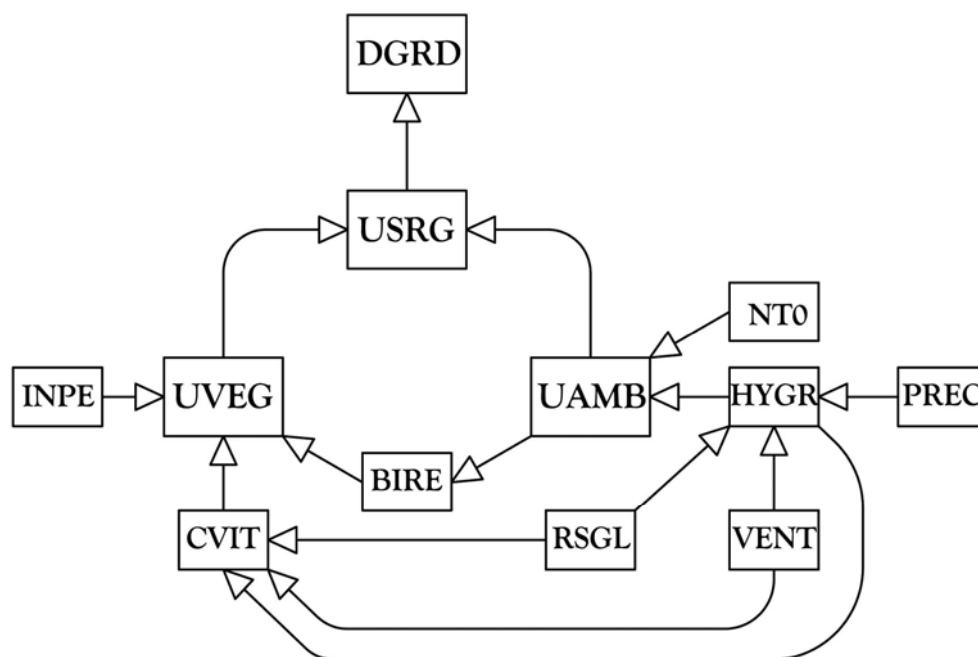


Figura 4.71 -Schema delle variabili che influenzano la cinetica di degrado DGRD per il sito archeologico di Su Monte-Sorradile.

DGRD è direttamente legato a USRG quindi, utilizzando le membership functions di figura 4.29 e 4.30, paragrafo II-4.2, per questo primo blocco di regole si pone:

Tabella 4.5 – Regole IF/THEN per la valutazione di DGRD.

IF USRG is	THEN DGRD is
MA	AC2
A	AC1
M	ATT
B	RL1
MB	RL2

Nel contesto in esame, UVEG e UAMB non possono essere in contraddizione; si escludono a priori situazioni di UVEG alta e UAMB bassa, perché nell'approccio olistico considerato non può esserci una forte colonizzazione radicale su una pietra che non sia 'congiuntamente' lesionata in modo significativo e viceversa una pietra lesionata in modo significativo non può che favorire l'insediamento vegetale. Le membership functions di queste due variabili sono riportate in figura 4.72.

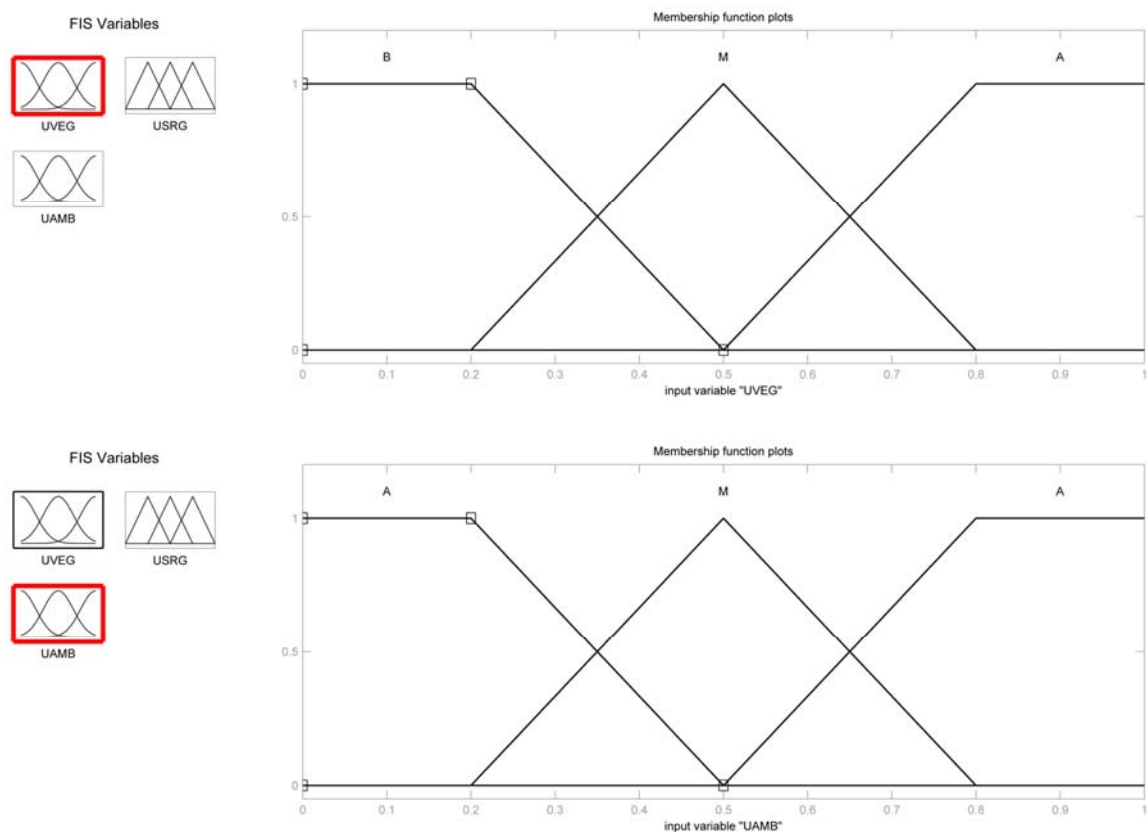


Figura 4.72 – Membership functions di UVEG e UAMB.

La tabella 4.6 riporta alcune delle regole per la valutazione di USRG a partire dai valori assunti dalle sue due componenti: le sue variabili linguistiche UVEG e UAMB.

Tabella 4.6 – Esempi di regole IF/THEN per la valutazione di USRG.

IF UVEG is	AND IF UAMB is	THEN USRG is
...	...	...
B	B	MB
B	M	B
M	B	M
M	M	A
M	A	MA
A	M	MA
...	...	...

Per la fuzzificazione di UVEG si può fare riferimento alla figura 4.73 e alla tabella 4.7 in cui è riportata una parte della KB per la valutazione di questo parametro.

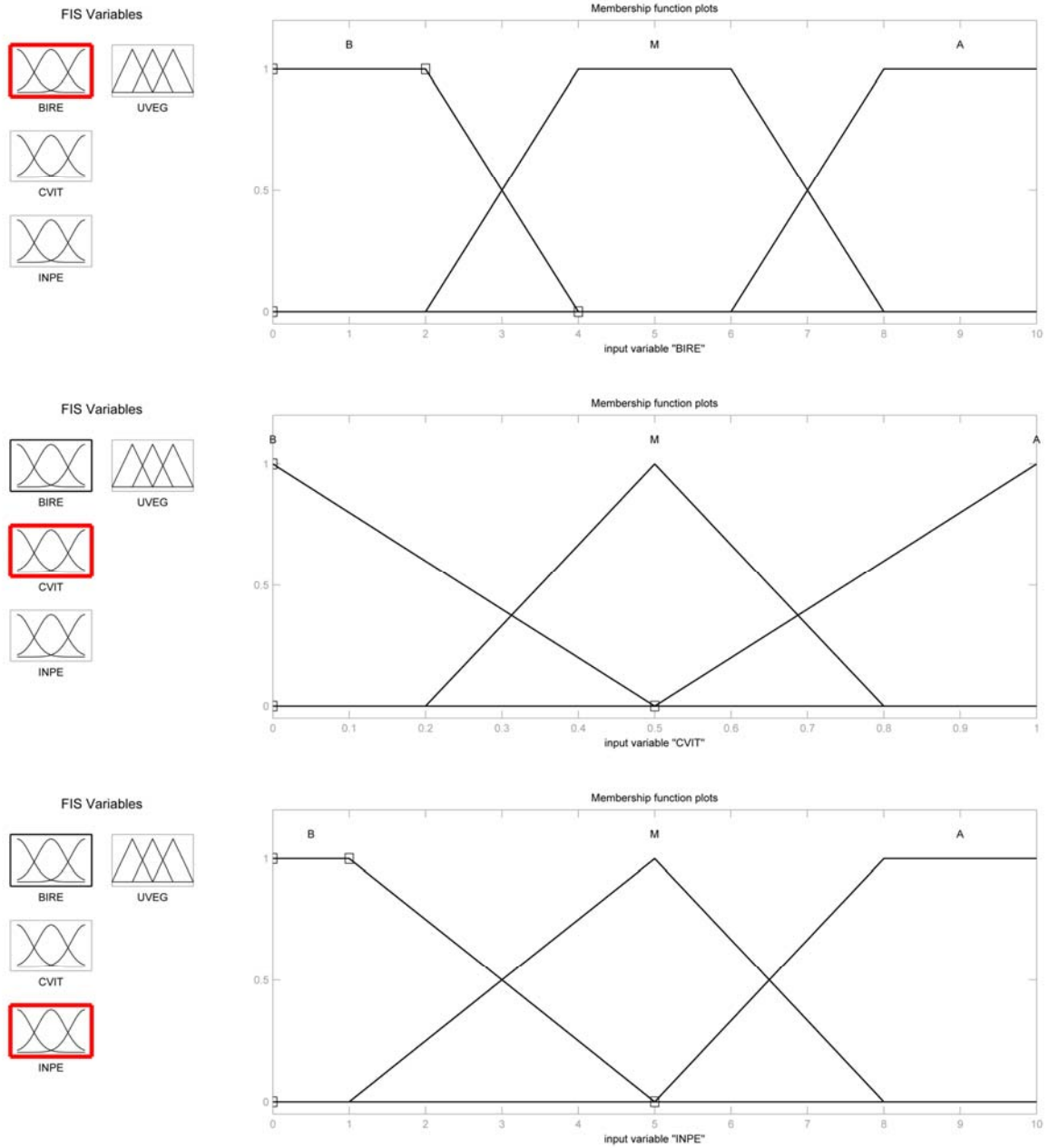


Figura 4.73 - Membership functions di BIRE, CVIT e INPE.

Tabella 4.7 – Esempi di regole IF/THEN per la valutazione di UVEG.

IF BIRE is	AND IF CVIT is	AND IF INPE is	THEN UVEG is
...	...	...	...
M	M	B	M
M	M	M	M
M	M	A	A
M	A	B	B
M	A	M	A
M	A	A	A
B	B	B	B
B	B	M	B
B	B	A	M
...	...	...	...

BIRE è legata a UAMB, CVIT lo è a RSGL, VENT e HYGR. Nel primo caso è conveniente instaurare un legame diretto o di equivalenza, che quindi non richiede di essere ulteriormente esplicitata. La messa a punto della fuzzificazione di CVIT richiede evidentemente ampie competenze di tipo botanico ed è pertanto qui tralasciata.

Pertinenza più strettamente materialistica presenta la valutazione dello stato igrometrico HYGR e quindi del termine di usura ambientale UAMB. Le caratteristiche peculiari dei materiali, delle strutture e del particolare sito in questione sono alla base della valutazione di questi termini.

Si osserva che variabili come RSGL e VENT agiscono su più nodi (ad esempio CVIT e HYGR), ma lo fanno naturalmente in diverso grado: saranno le regole specifiche che indicheranno di volta in volta come e quanto (in termini fuzzy) una stessa variabile agirà nei diversi contesti.

La figura 4.74 riporta le membership functions di HYGR e NT0 che concorrono alla definizione di UAMB e la tabella 4.8 riporta alcune regole della KB per la valutazione di tale variabile.

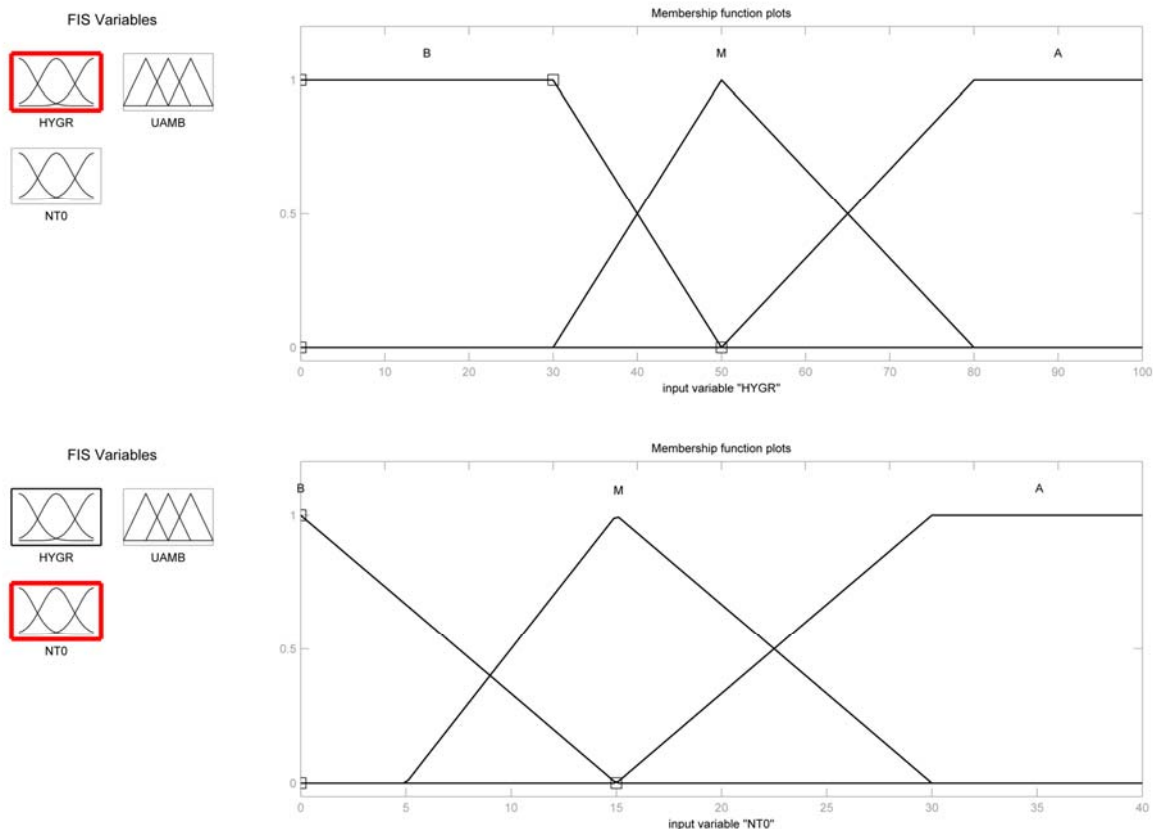


Figura 4.74 - Membership functions di HYGR (0-100%) e NT0 (n° escursioni intorno a 0°C/anno).

Tabella 4.8 - Esempi di regole IF/THEN per la valutazione di UAMB.

IF HYGR is	AND IF NT0 is	THEN UAMB is
...	...	...
B	B	B
M	B	B
A	B	M
B	M	B
M	M	M
A	M	A
B	A	M
M	A	A
A	A	A
...	...	...

Lo stato igrometrico HYGR del materiale è quindi funzione del livello delle precipitazioni PREC, dell'esposizione alla radiazione solare RSLG e della ventilazione VENT (figura 4.75 e tabella 4.9).

La variabile HYGR dipende in modo evidente dal contesto, cioè dal tipo di materiale considerato. Così pur essendo il suo excursus 0-100% si tenga presente che, per una piroclastite con il 40% di porosità saturabile e per un calcare con il 10% di porosità saturabile, il collegamento con la variabile PREC è ovviamente diverso.

Si osserva, e ciò vale anche per i successivi due casi trattati, che i dati meteorologici si riferiscono a stazioni prossime ai siti e pertanto sono (particolarmente VENT) indicativi della



procedura, ma non specifici. La presenza di una stazione meteo locale sarebbe un elemento fondamentale per la razionale gestione di ogni sito archeologico.

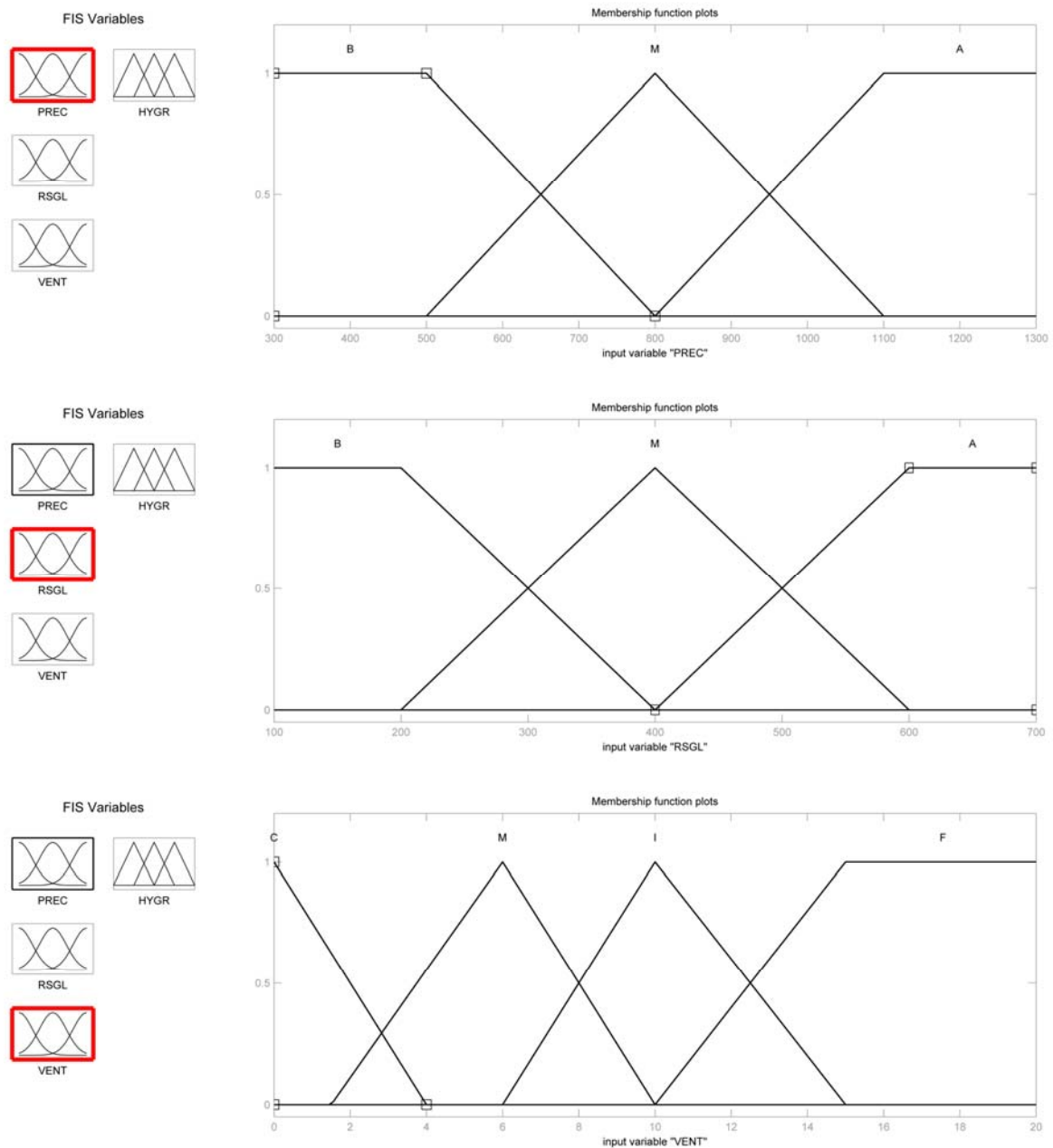


Figura 4.75 - Membership functions di PREC (mm pioggia cumulata; 300-1300 mm/anno), RSGL (100-700 MJ/m<sup>2</sup>) e di VENT (intensità: calma/moderata/intermedia/forte, secondo le indicazioni del SAR SARDEGNA [2006] 0-20 m/s).

Tabella 4.9 – Esempi di regole IF/THEN per la valutazione di HYGR.

IF PREC is	AND IF VENT is	AND IF RSGL is	THEN HYGR is
...	...	...	...
B	-	-	B
M	M	B	M
M	M	A	B
M	I	B	M
M	I	M	B
M	I	A	B
A	C	B	A
A	C	M	A
A	F	A	M
...	...	...	...

#### 4.4.2 – GennaMaria – Villanovaforru

Lo schema delle variabili riportato in figura 4.28 del paragrafo II-4.2, può essere esplicitato per il sito in questione secondo la figura 4.76. L'attenzione è focalizzata sugli effetti della gelifrazione, della dissoluzione e sui componenti di usura 'ambientale' ed 'antropica'.

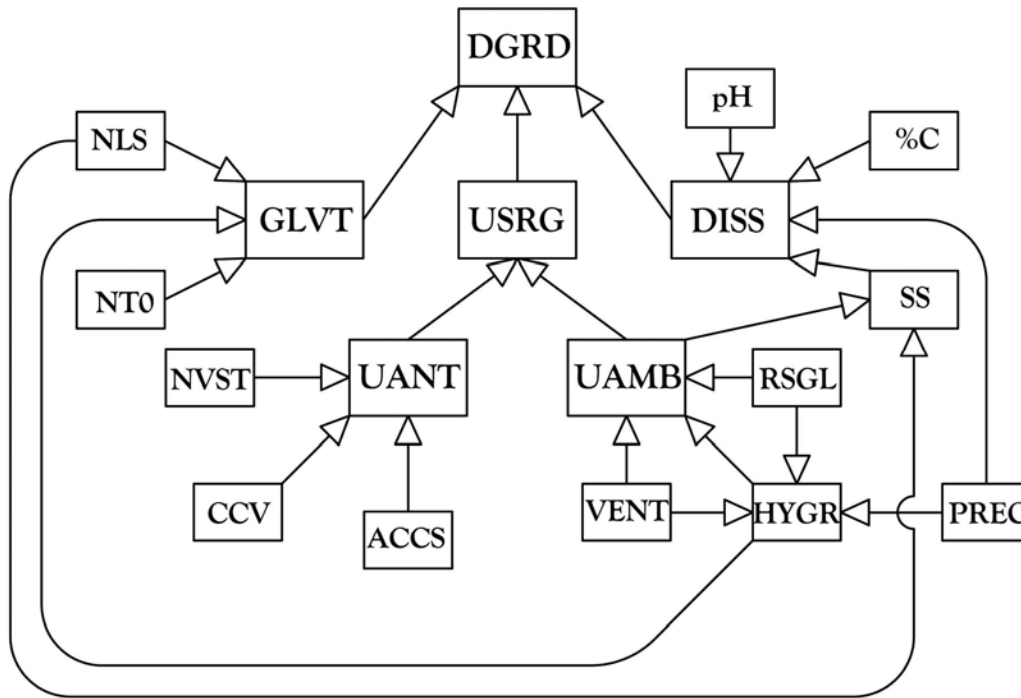


Figura 4.76 – Schema delle variabili che influenzano la cinetica di degrado DGRD per il sito archeologico di GennaMaria.

La KB per la valutazione di DGRD è, in sostanza, quella mostrata in tabella 4.2, paragrafo II-4.2.

Per la gelività GLVT si rimanda a quanto illustrato in II-4.1.1 e ai commenti in Appendice. Il termine rappresentativo della 'porosità' in questo caso andrebbe sostituito con una misura del numero delle lesioni presenti nella roccia (prevalentemente piani di discontinuità dovuti alla sedimentazione) NLS, piuttosto che impiegare espressioni derivanti dalla porosimetria 'alla MIP'.

In questo contesto USRG è funzione di UANT e UAMB (figura 4.77 e tabella 4.10).

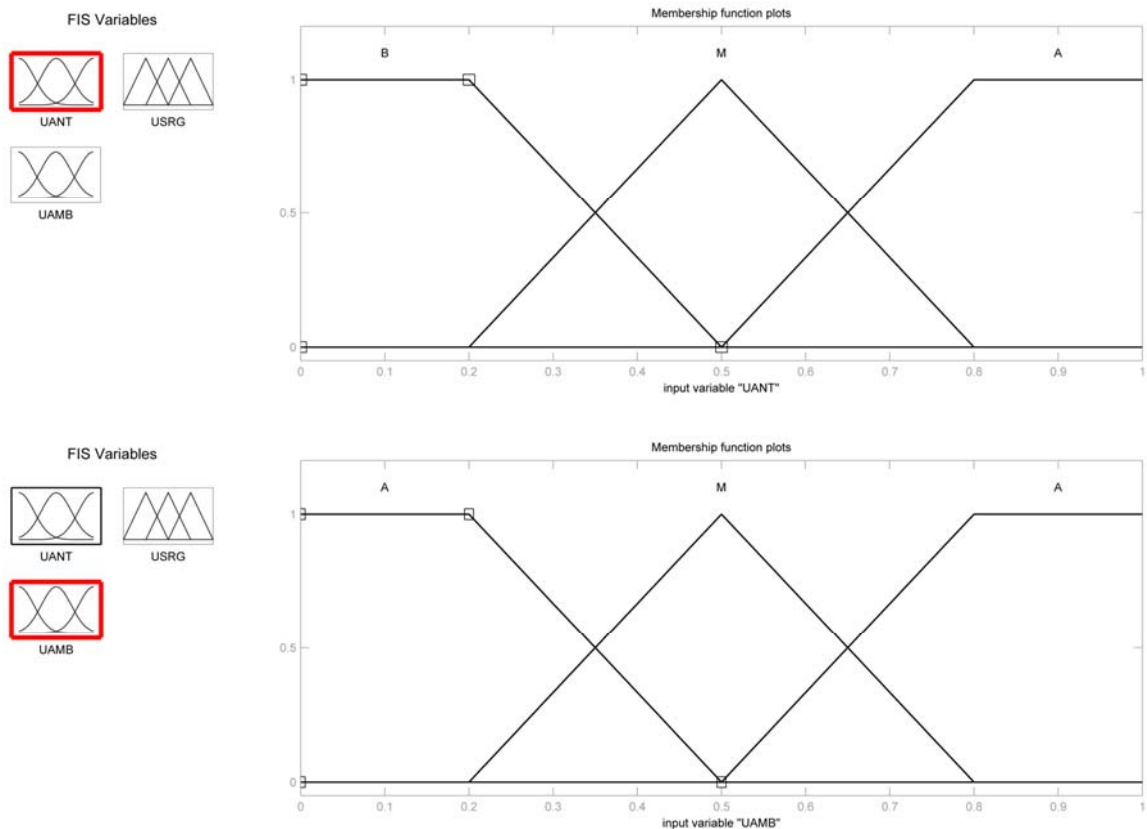


Figura 4. 77 – Membership functions delle variabili UANT e UAMB concorrenti a USRG.

Tabella 4.10 – Esempi di regole IF/THEN per la valutazione di USRG.

IF UANT is	AND IF UAMB is	THEN USRG is
...	...	...
B	B	MB
M	B	B
B	M	M
M	M	A
A	M	MA
M	A	MA
...	...	...

La dissoluzione della fase calcitica, largamente presente nelle rocce in opera a GennaMaria (espressa ad esempio come % di solubile nel trattamento con soluzione idrocloridrica diluita: %C), è funzione dell'acidità delle precipitazioni (pH), della loro entità PREC, e della superficie del solido esposta SS (figura 4.78 e tabella 4.11).

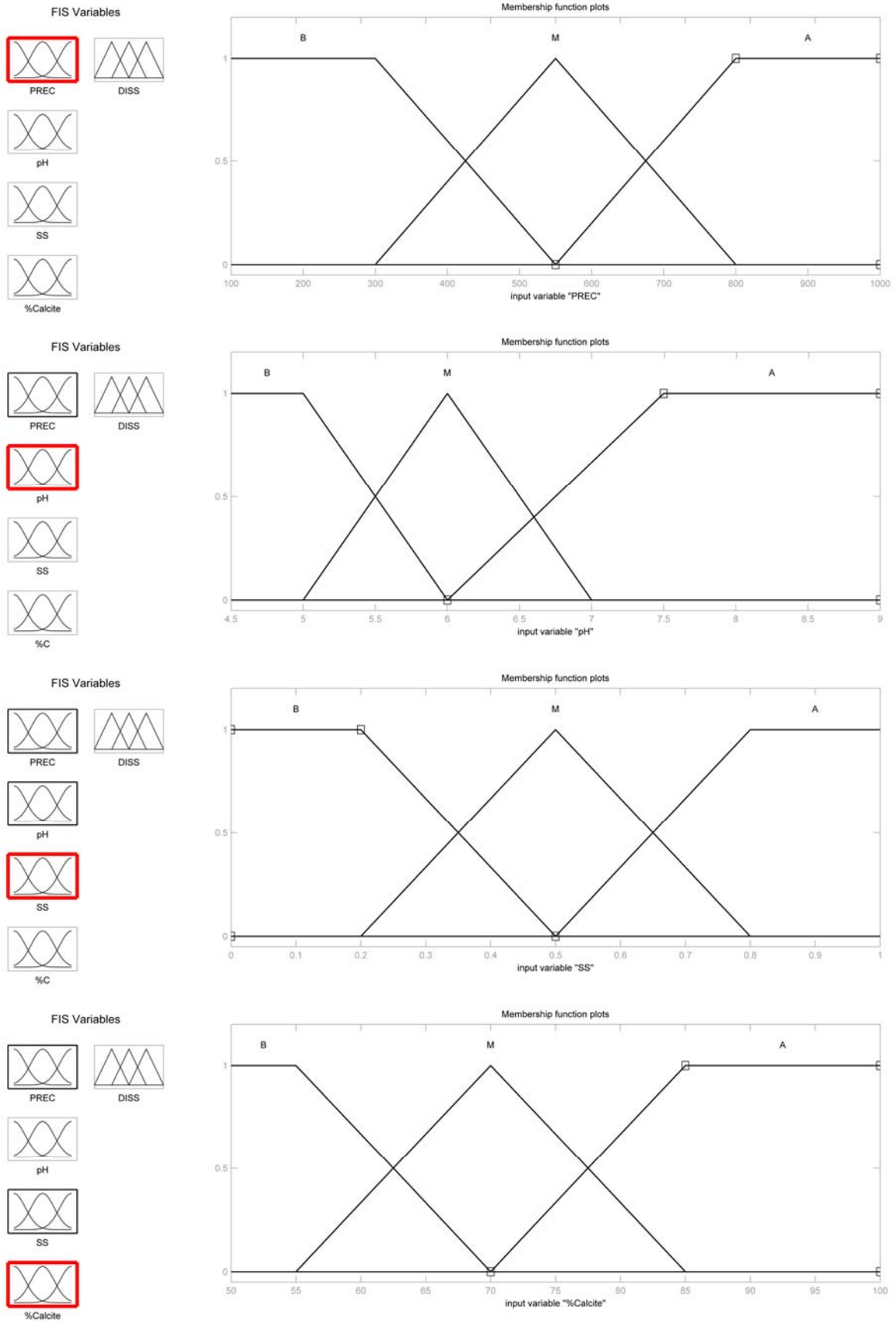


Figura 4. 78 - Membership functions delle variabili PREC (100-1000 mm/anno), pH, SS e %C, concorrenti a DISS.

Tabella 4.11 – Esempi di regole IF/THEN per la valutazione di DISS.

IF PREC is	AND IF pH is	AND IF SS is	AND IF %C is	THEN DISS is
...	...	...	...	...
B	M	B	B	MB
B	M	B	M	MB
B	M	B	A	B
M	M	M	B	M
M	M	M	M	A
M	M	M	A	A
A	M	A	B	A
A	M	A	M	MA
A	M	A	A	MA
...	...	...	...	...

La superficie specifica SS è funzione di NLS e UAMB, le cui membership functions sono riportate in figura 4.79.

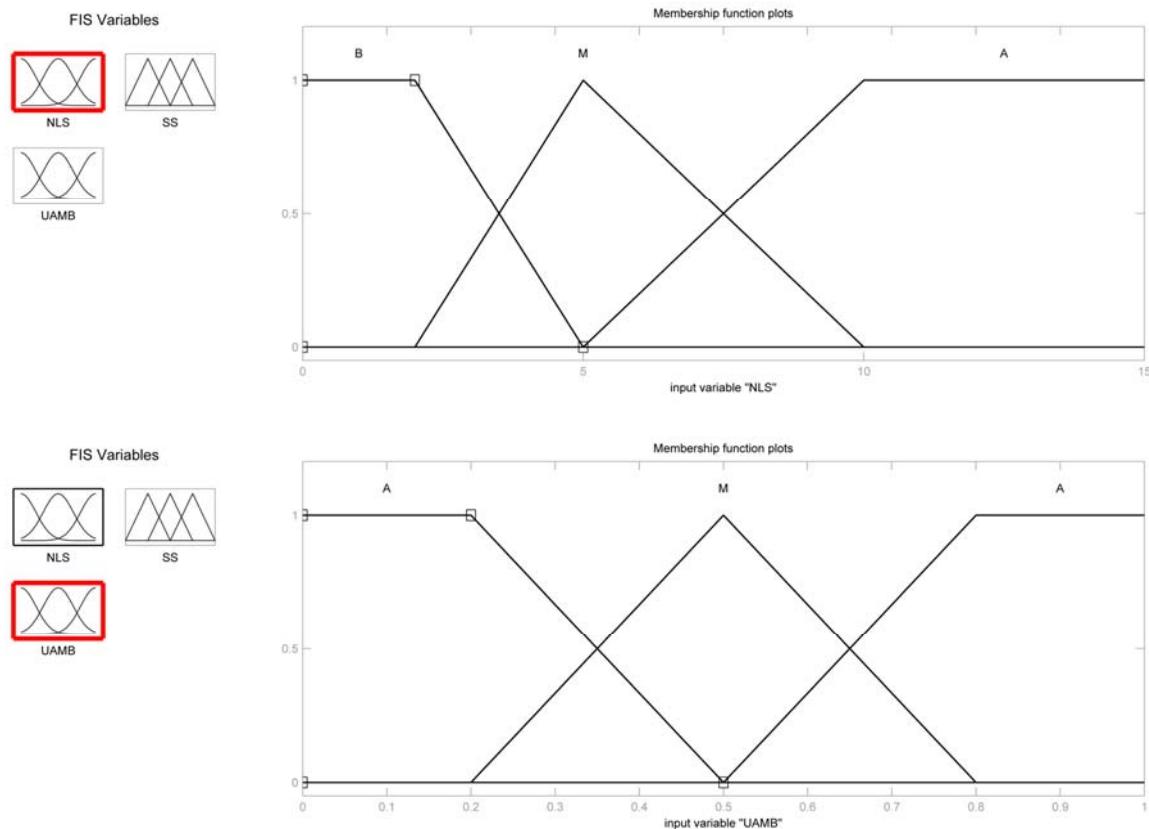


Figura 4.79 – Membership functions delle variabili NLS (n° lesioni/10 cm) e UAMB per la valutazione di SS.

Tabella 4.12 – Esempi di regole IF/THEN per la valutazione di SS.

IF NLS is	AND IF UAMB is	THEN SS is
B	B	B
B	M	B
B	A	M
M	B	M
M	M	A
M	A	A
A	B	M
A	M	A
A	A	A

UANT è funzione di NSVT, CCV e ACCS, fuzzificate in figura 4.80.

NVST è un dato numerico ben esprimibile con un numero fuzzy. La consapevolezza culturale dei visitatori CCV può essere agevolmente stimata; è evidente che una scolaresca avrà un voto ben diverso da quello attribuibile ai partecipanti ad un congresso archeologico in visita al sito. L'accessibilità ACCS è legata al tracciato dei percorsi ed alla loro sorveglianza.

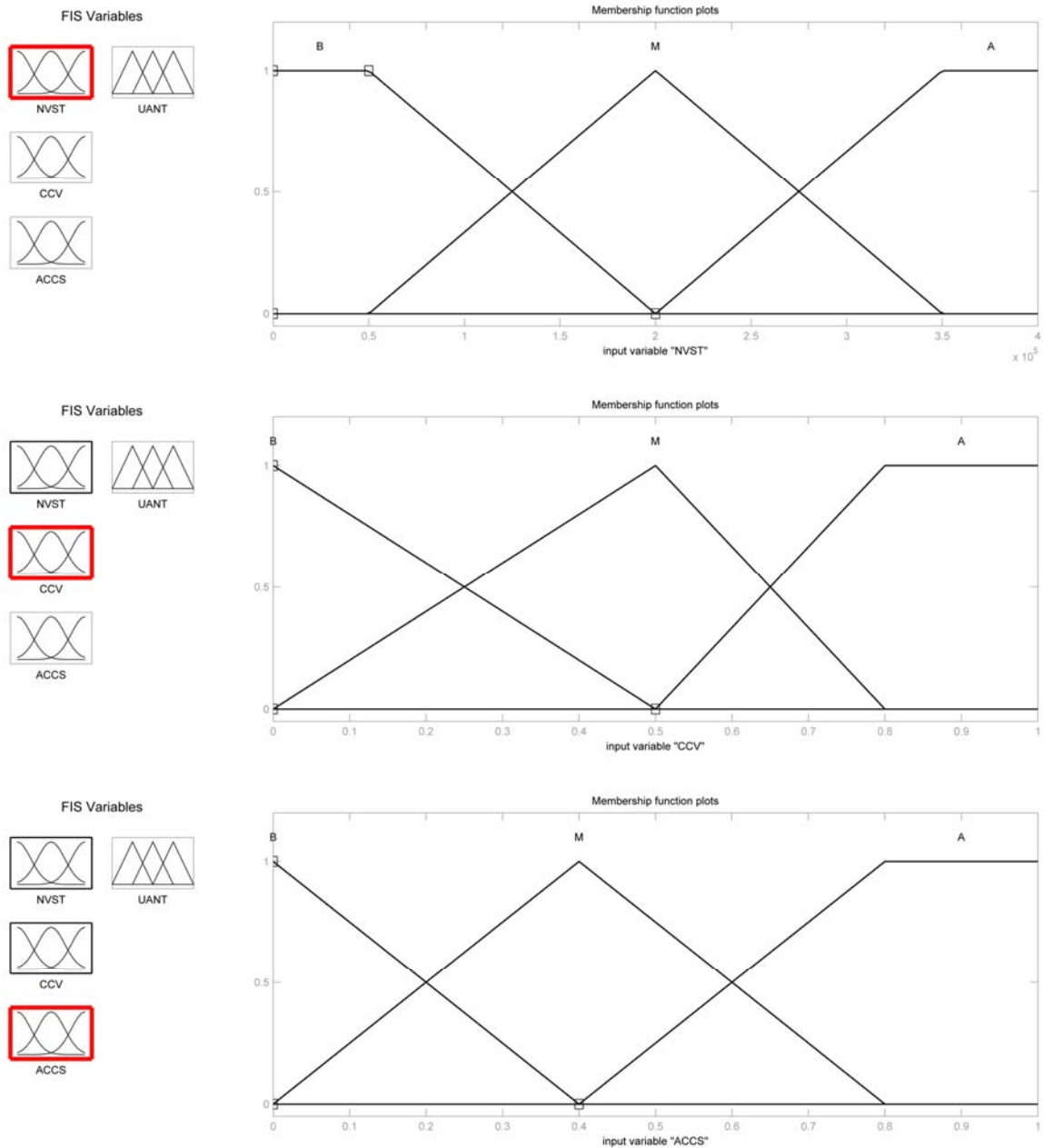


Figura 4. 80 - Membership functions delle variabili NVST (0-40000 visitatori/anno), CCV e ACCS concorrenti a UANT.

Alcune regole della KB per la valutazione di UANT sono mostrate in tabella 4.13.



Tabella 4.13 – Esempi di regole IF/THEN per la valutazione di UANT.

IF NVST is	AND IF CCV is	AND IF ACCS is	THEN UANT is
...	...	...	...
B	B	B	B
M	B	M	A
A	B	A	A
B	M	B	B
M	M	M	M
A	M	A	A
-	A	-	B
...	...	...	...

UAMB è funzione delle caratteristiche del sito attraverso le variabili VENT, RSGL e HYGR, fuzzificate come mostrato in figura 4.81.

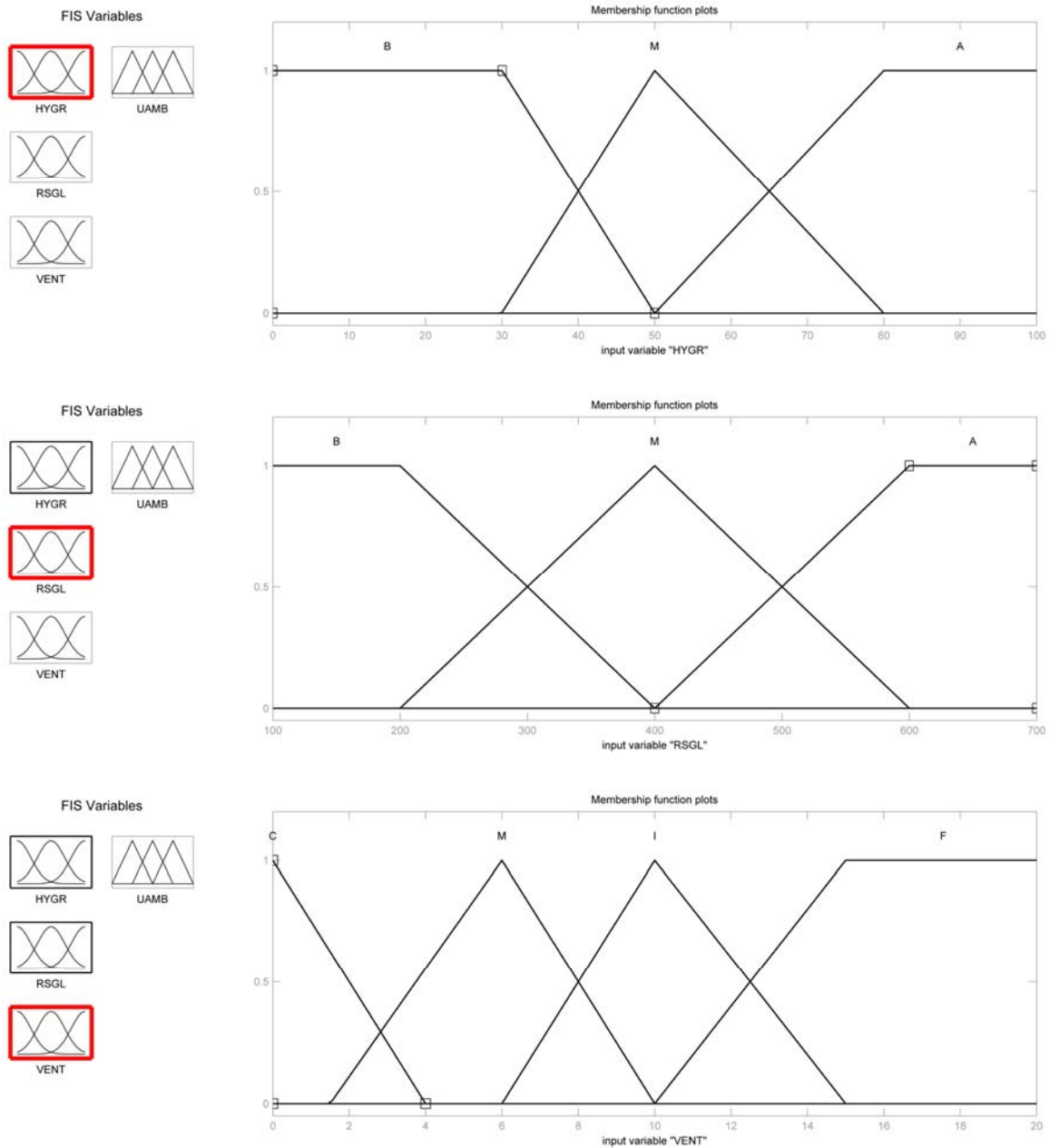


Figura 4. 81 - Membership functions delle variabili HYGR (0-100%), RSGL (100-700 MJ/m<sup>2</sup>) e VENT (0-20 m/s), concorrenti a UAMB.

Alcune regole per la valutazione di UAMB sono riportate in tabella 4.14.

Tabella 4.14 – Esempi di regole IF/THEN per la valutazione di UAMB.

IF HYGR is	AND IF RSGI is	AND IF VENT is	THEN UAMB is
...	...	...	...
B	B	M	B
B	M	M	B
B	A	M	M
M	B	I	B
M	M	I	M
M	A	I	A
M	B	F	M
M	M	F	A
M	A	F	A
...	...	...	...

Per la valutazione della variabile HYGR si rimanda alle considerazioni espresse nel paragrafo II.4.4.1.



#### 4.4.3 – Is Paras – Isili

Come è stato estesamente illustrato nel paragrafo II-4.3.3, il nuraghe Is Paras mantiene, a distanza di tre millenni dalla sua edificazione una eccezionale integrità strutturale; questo rende ora necessario considerare due ambienti distinti ma connessi, uno interno ed uno esterno. Quindi la FCM subisce una maggiore articolazione come riportato in figura 4.82.

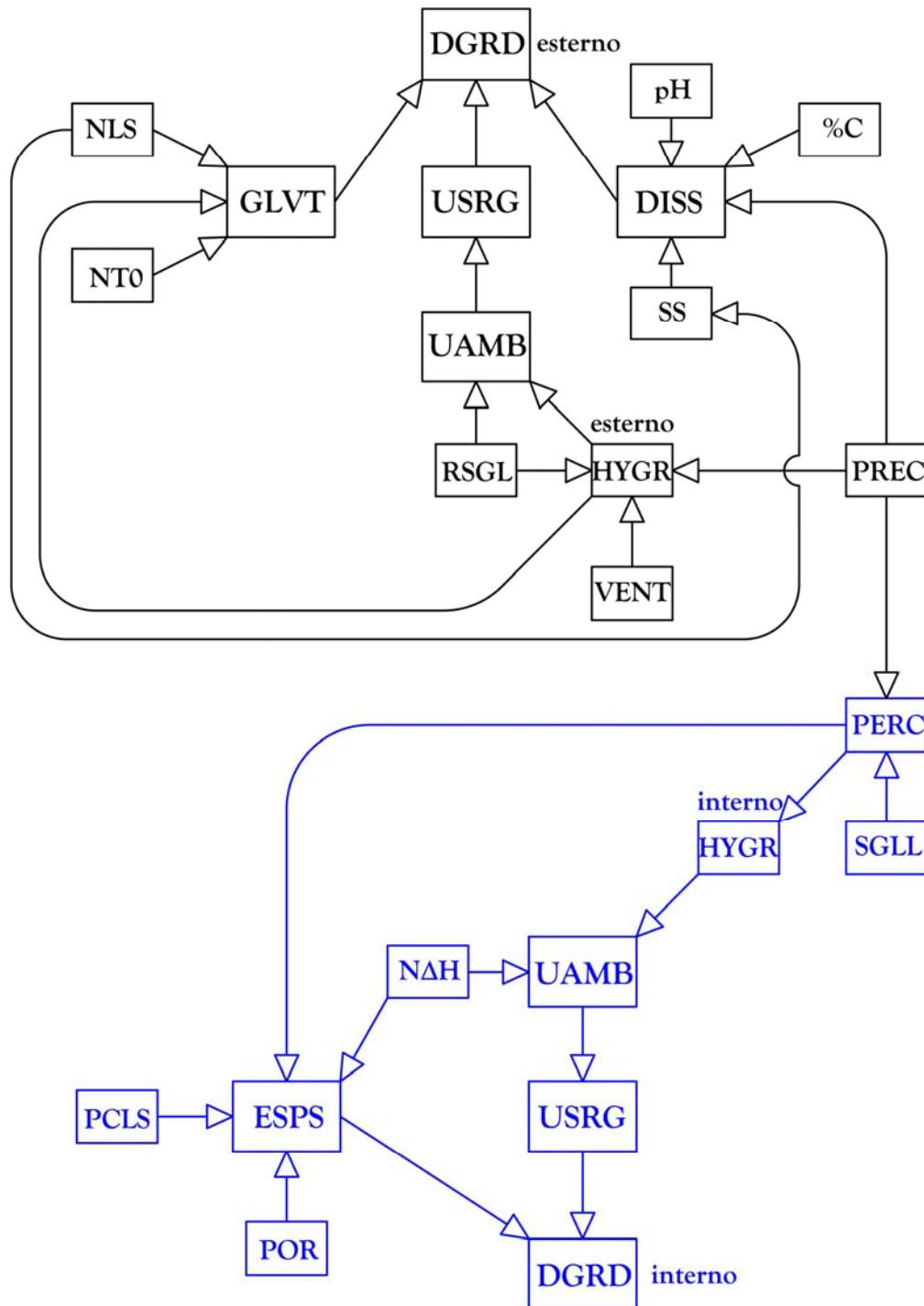


Figura 4.82 - Schema delle variabili che influenzano la cinetica di degrado DGRD per il sito archeologico di Is Paras.

Lo schema 'esterno' ricalca quanto precedentemente descritto nei paragrafi II-4.4.1 e 4.4.2. Rispetto al caso precedente nella valutazione di UAMB si è trascurata la variabile VENT, essendo ora la componente marnosa dei conci limitata agli strati terminali decisamente meno estesi e meno esposti rispetto a quanto riscontrato a GennaMaria.

La massa muraria rende VENT, RSGL e NT0 pressoché ininfluenti all'interno della tholos. Analogamente la dissoluzione dell'azione chimica nella parte interna è da considerarsi ininfluente in quanto l'eventuale acidità dell'acqua sarà già stata neutralizzata nel passaggio attraverso la massa muraria calcarea.

L'elemento di collegamento tra ambiente esterno e interno è costituito dalla relazione tra PREC e PERC, percolazione dell'acqua attraverso la massa muraria verso la parte interna della tholos. In figura 4.83 è mostrata la fuzzificazione della variabile PERC.

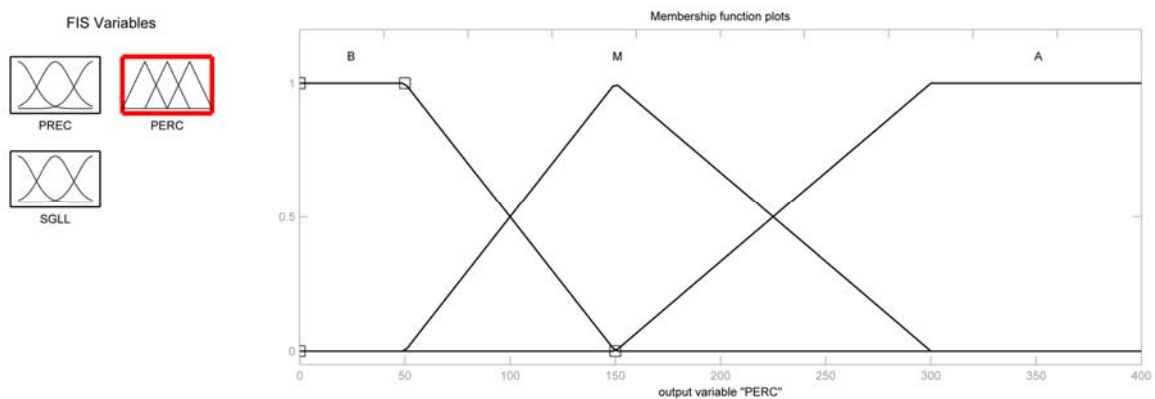


Figura 4.83 - Membership functions di PERC (0-400 mm/anno).

La variabile SGLL esprime le condizioni di accessibilità all'acqua delle strutture interne e dipende essenzialmente dagli interventi attuati o in progetto; tale variabile linguistica sarà fuzzificata (vedi figura 4.84) in modo che più alto è il suo valore e minore sarà l'accesso dell'acqua all'interno PERC. In tabella 4.15 sono mostrate alcune regole IF/THEN per la valutazione di PERC.

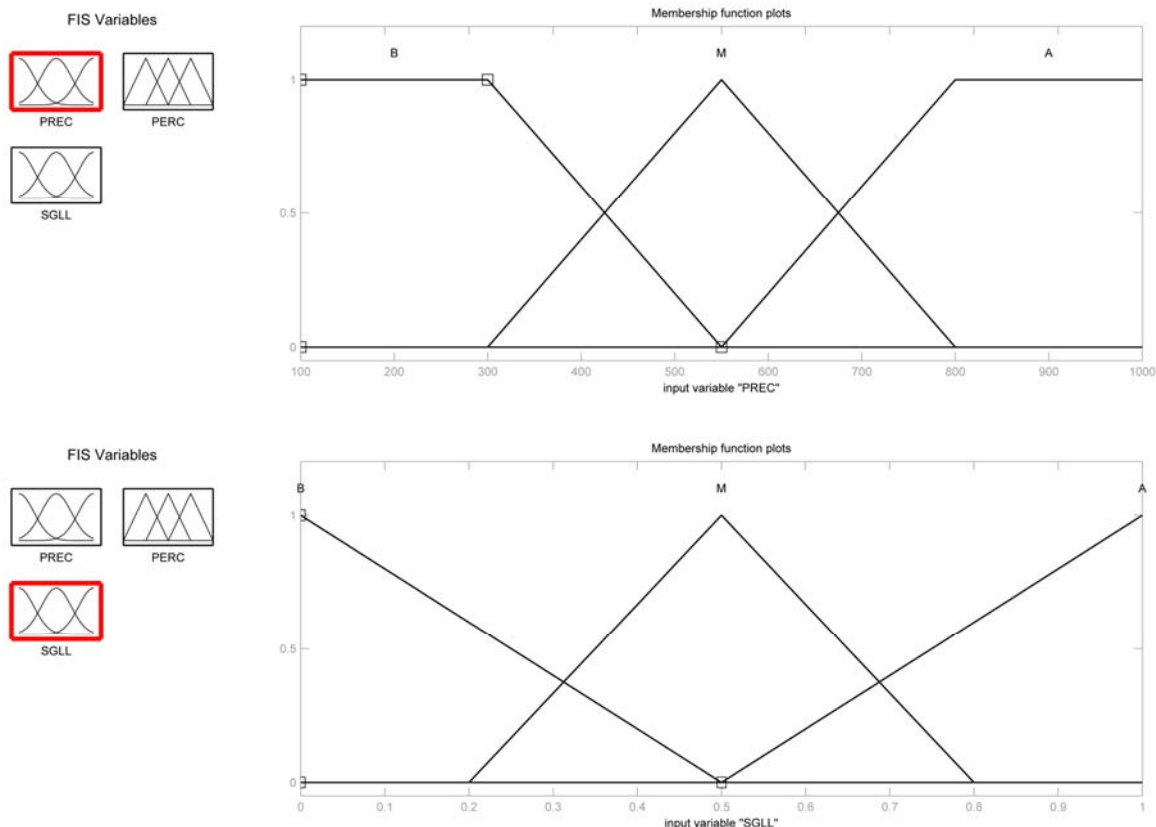


Figura 4.84 - Membership functions di PREC, SGLL.

Tabella 4.15 - Esempi di regole IF/THEN per la valutazione di PERC.

IF PREC is	AND IF SGLL is	THEN PERC is
...	...	...
M	B	A
M	M	M
M	A	B
A	B	A
A	M	A
A	A	M
...	...	...

Gli effetti di degrado dovuti all'espansione (considerati in maniera esplicita nel caso del gesso ESPS ed in maniera implicita nel caso delle argille), congiunti a fenomeni di rigonfiamento ed indebolimento della stessa matrice dovuta alla presenza di acqua, sono legati alla frequenza delle variazioni igrometriche, espressa introducendo la variabile linguistica  $N\Delta H$ ; questa può essere espressa numericamente ad esempio in relazione al numero di giorni piovosi per anno considerando eventi di media durata.

Per la fuzzificazione di ESPS si può fare riferimento alla figura 4.30 del paragrafo 4.2.

La fuzzificazione delle variabili concorrenti alla valutazione di ESPS (PERC, PCLS, POR e  $N\Delta H$ ) è mostrata in figura 4.85.

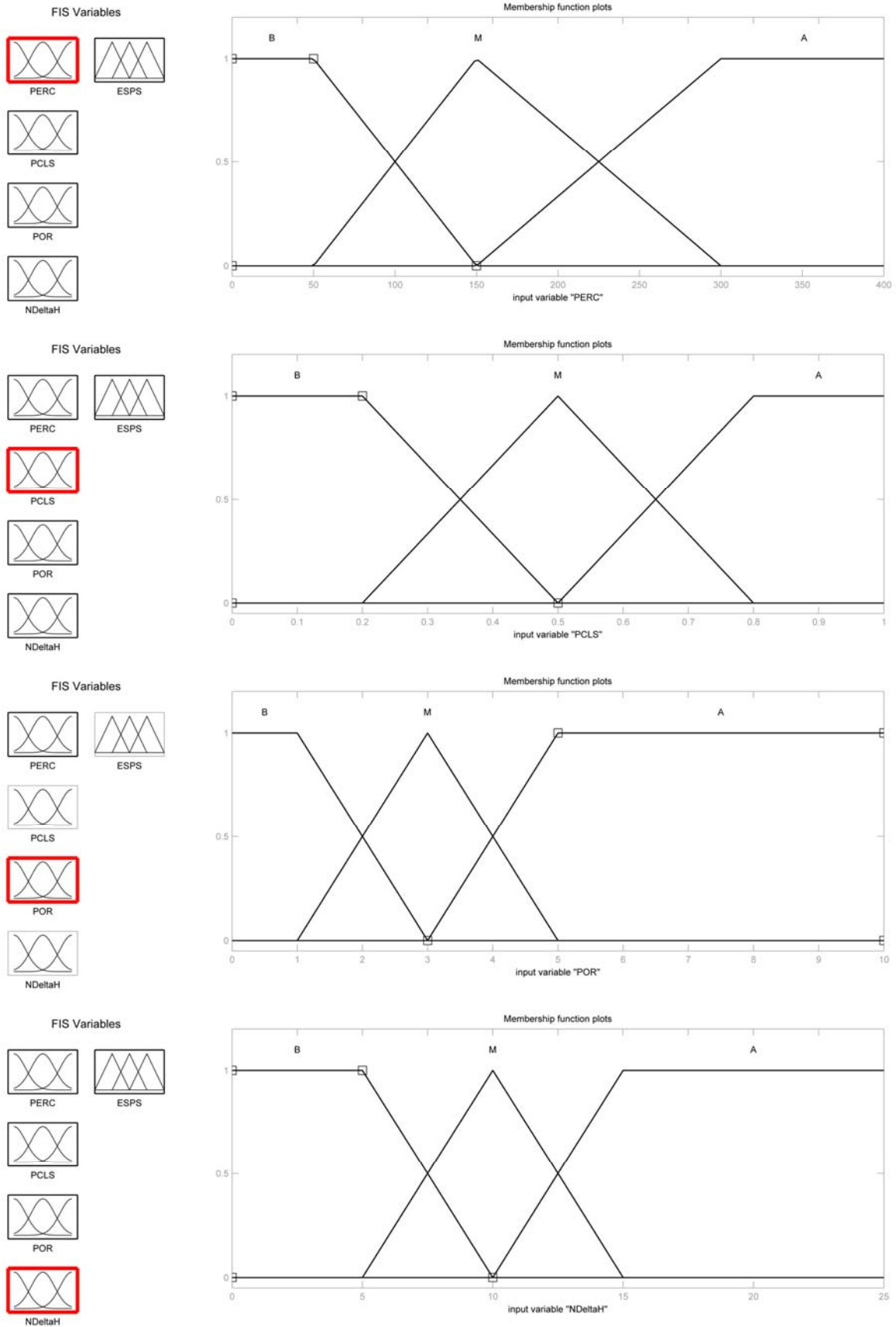


Figura 4.85 - Membership functions di PERC (0-400 mm/anno), PCLS (0-1), POR (0-10  $\mu\text{m}$ ) e  $\Delta\text{H}$  (0-25).



POR rappresenta il valore di raggio prevalente della distribuzione della porosità MIP.

La determinazione sperimentale della permeabilità del calcestruzzo (PCLS), intesa secondo Darcy è notoriamente molto difficile da attuarsi essendo necessario ricorrere ad altissime pressioni e lunghi tempi di contatto. In mancanza di studi specifici si possono utilizzare delle stime derivanti da misure dello spessore di penetrazione dell'acqua del tipo della ISO 7031 oppure potrebbe utilizzarsi la frazione di porosità MIP di raggio  $> 1 \mu\text{m}$  o ancora direttamente una misura dell'assorbimento d'acqua, test conducibile anche su materiali in opera.

$N\Delta H$  rappresenta la stima delle escursioni termoigrometriche che caratterizzano l'ambiente interno della tholos (la cristallizzazione di un sale avviene anche in ambienti interni come nel caso della deposizione di carbonato di calcio nelle grotte interessate da percolazione di acque). Il fenomeno ha un aspetto 'storico' (le aperture e le chiusure della sommità della tholos si sono alternate nel passato per varie ragioni) e attualmente è legato alla circolazione dell'aria, per quanto limitata, dovuta alle aperture dell'ingresso e della scala.

In tabella 4.16 sono mostrate alcune regole per la valutazione di ESPS.

Tabella 4.16 – Esempi di regole IF/THEN per la valutazione di ESPS.

IF PERC is	AND IF PCLS is	AND IF POR is	AND IF $N\Delta H$ is	THEN ESPS is
...	...	...	...	...
M	M	M	B	M
M	M	M	M	A
M	M	M	A	MA
M	M	A	B	B
M	M	A	M	M
M	M	A	A	M
...	...	...	...	...



## 5 – IL RUOLO DELL'INGEGNERIA DEI MATERIALI NELLE PROCEDURE DECISIONALI RIGUARDANTI LA SELEZIONE DEI PROGETTI CONSERVATIVI

### 5.1 – GENERALITÀ: L'INGEGNERIA DEI MATERIALI ED IL CONTESTO CULTURALE-PAESAGGISTICO-ECONOMICO

È evidente che un progetto conservativo su un sito archeologico ha gli aspetti manageriali di un intervento strategico. I caratteri di questo sono infatti la varietà dei fattori da considerare (tecnici, culturali, paesaggistici, economici, sociali, ecc.) e la complessità di ciascuno di essi, compresi quelli strettamente tecnici concernenti le strutture ed i materiali in opera, e le proiezioni di queste azioni in un futuro sul quale le previsioni sono intrinsecamente incerte (eventi bellici, cambiamenti climatici o culturali, cinetica dei fenomeni chimico-fisico-biologici).

La selezione di un progetto conservativo è quindi un fatto ben più che strettamente tecnico. Il turismo rappresenta il 7% (in US\$) dell'export mondiale di beni e servizi, collocandosi al quarto posto dopo i settori dei prodotti chimici, delle automobili e dei combustibili [WORLD TOURISM 2006]. Il fenomeno tende ora ad estendersi su scala globale, coinvolgendo sempre più aree, alcune di antichissima e straordinaria civilizzazione quali, ad esempio, la Cina ed il subcontinente indiano. La tabella 5.1 riporta alcuni dati riguardanti le dieci nazioni che nell'anno 2005 hanno registrato la maggiore presenza turistica [WORLD TOURISM 2006]. Si consideri che il numero di siti inseriti nella lista 'World Heritage Properties' dell'UNESCO è ancora largamente sbilanciato a favore delle nazioni europee, per ragioni puramente organizzative [UNESCO 2006]. Indicativo del probabile riorientamento futuro dei flussi turistici è certamente il fatto che nel 2004 la Cina ha superato l'Italia come numero di visitatori: 41 vs 37 M.

Tabella 5.1 - Le dieci nazioni col maggior numero di visitatori nell'anno 2005.

Nazione	Presenze, M	Introito, G US\$	n°siti W.H.P. UNESCO
Francia	76.0	42.3	30
Spagna	55.6	47.9	39
USA	49.4	81.7	20
Cina	46.8	29.3	33
<b>Italia</b>	<b>36.5</b>	<b>35.4</b>	<b>41</b>
Regno Unito	30.0	30.4	33
Messico	21.9	30.0	26
Germania	21.5	29.2	32
Turchia	20.3	18.2	9
Austria	20.0	15.5	8

La presenza dei siti archeologici è riconosciuta come una delle componenti essenziali dell'offerta turistica e comunque quale una forte leva per promuoverne lo sviluppo. I siti archeologici, la cui estensione spazia da poche centinaia di metri quadrati a decine di ettari, si presentano generalmente come un insieme di resti di costruzioni (ruineri) e di impianti urbanistici, monumentali o templari. I più antichi, ad esempio Gerico in Palestina, Çatalhüyük in Turchia o Mohejno-Daro in Pakistan, risalgono a diverse migliaia di anni fa, mentre i più

recenti, ad esempio Angkor-Borei in Cambogia o Machu Picchu in Perù, risalgono ‘solo’ ad alcuni secoli fa.

Condizione essenziale per la fruizione dei siti archeologici è naturalmente la loro Conservazione. Secondo la Carta del Restauro di Cracovia:

*“Conservation is the complex of attitudes of a community that contributes to making the heritage and its monuments endure. Conservation is achieved with reference to the significance of the entity, with its associated values”*

*“Restoration is an operational directed on a heritage property, aiming at the conservation of its authenticity and its appropriation by the community”*

*“Project of restoration: the project, resulting from the choice of conservation policies, is the process through which conservation of the built heritage and landscape is carried out”.*

*[International Conference on Conservation 2000]*

Il processo di degrado dei siti inizia o subisce una accelerazione nel momento del loro abbandono, in seguito ad azioni naturali quali terremoti, alluvioni, frane, modificazioni climatiche o in seguito ad azioni umane, generalmente di carattere bellico o politico/iconoclastico. Successivamente, l’azione dell’ambiente o ancora quella antropica quale lo spoglio dei materiali da costruzione da riutilizzare altrove, sviluppano ed approfondiscono i processi alterativi di natura chimica, fisica e biologica e di progressivo seppellimento a causa dell’accumulo dei materiali di crollo e di apporto eolico e alluvionale. Le stesse operazioni di scavo archeologico, soprattutto se, come ancora nella generalità dei casi, condotte senza una preliminare programmazione del futuro conservativo, hanno effetti traumatici sulla stabilità delle strutture e dei materiali. Dopo l’asportazione dei reperti mobili e la loro musealizzazione generalmente lontano dal loro contesto di rinvenimento, i siti sono quindi abbandonati senza più la ‘protezione’ del seppellimento agli eventi alterativi climatici ed antropici compromettendo una risorsa culturale ed economica potenzialmente di grande valore per i territori e le comunità locali.

Per la conservazione di un sito archeologico allo stato di rudere, si pongono generalmente differenti possibilità di intervento, che si traducono in altrettanti progetti ed il Decisore è chiamato a stabilire una gerarchia tra essi. In altri casi il problema del Decisore potrebbe essere quello di stabilire un criterio mediante il quale distribuire al meglio le risorse disponibili tra i vari siti archeologici di un territorio, oppure verificare l’impatto di un moderno utilizzo sulla conservazione.

Queste operazioni sono ordinariamente condotte da archeologi e architetti, particolarmente da quelli addetti alla gestione conservativa del patrimonio pubblico, dopo (ma spesso ‘prima di’) avere acquisito (nella misura in cui le risorse disponibili lo consentono) dati ed elementi specifici, riguardo ad esempio alle caratteristiche di durevolezza dei materiali, di stabilità delle strutture, degli effetti dell’inquinamento, dell’azione biologica, ecc. Talvolta, però, non è chiaro all’opinione pubblica, alle comunità locali direttamente coinvolte ed agli studiosi quali siano i fattori considerati e che peso è stato ad essi attribuito dal Decisore.

In questo capitolo si mostra come le scelte decisionali possano essere inquadrare in una procedura formale che consideri in maniera esplicita tutti i termini della complessa materia. Ciò consentirebbe di migliorare la qualità del processo decisionale, garantirne la maggiore trasparenza, facilitarne il controllo pubblico, fornire il contesto per il continuo aggiornamento dei dati e quindi per le future correzioni ed integrazioni (nessun progetto è per sempre!).

L'adozione di una procedura formalmente definita come supporto al processo decisionale ed al controllo dei risultati [RIBEIRO 1996; ARCHER & GHASEMZADEH 1999; GHASEMZADEH & ARCHER 2000; SHIM, WARKENTIN, COURTNEY, POWER, SHARDA, CARLSONN 2002; XIROGIANNIS, STEFANOU, GLYKAS 2004; YEH & DENG 2004] ha il vantaggio di operare su una lista di criteri espliciti ed ai quali è possibile assegnare un valore numerico, che può in alcuni casi mantenere un carattere soggettivo, derivante dall'esperienza, o frutto del compromesso dovuto ad una contrattazione tra più soggetti, ma comunque non sarebbe mai arbitrario e soprattutto non potrebbe essere mantenuto occulto. In particolare, è anzitutto necessario definire un parametro che consenta di definire una gerarchia (rating) tra i vari interventi possibili (projects), in modo da procedere alla distribuzione delle risorse finanziarie disponibili per una data area amministrativa/territoriale in un dato intervallo di tempo. Questo parametro deve comprendere quattro fattori: la 'durevolezza/conservazione' dei materiali e delle strutture, la possibilità dello 'sviluppo culturale', la 'conservazione del paesaggio' e la 'convenienza economica'.



## 5.2 – SVILUPPO DELLA PROCEDURA DI RATING DEI PROGETTI CONSERVATIVI

Lo scopo del singolo project è quello di modificare in senso favorevole alla conservazione o alla pratica di un utilizzo moderno che non comprometta la conservazione, la condizione/configurazione (o ‘stato’) del sito archeologico. In generale sono definibili 5 differenti stati, a loro volta variamente articolabili, come riportato a titolo di esempio in tabella 5.2.

Tabella 5.2 – ‘Stati’ dei siti archeologici.

<b>SEPOLTO (A)</b>	
Sepolto, senza vincoli nell’uso del suolo	A1
Sepolto, con vincoli nell’uso del suolo	A2
Sepolto...ecc...	A...
<b>SCAVATO (B)</b>	
Scavato, abbandonato	B1
Scavato + controllo della vegetazione e della frequentazione antropica	B2
Scavato + anastilosi e consolidamento strutturale	B3
Scavato + consolidamento chimico dei materiali	B4
Scavato + idrofugazione chimica dei materiali	B5
Scavato...ecc...	B...
<b>COPERTO (C)</b>	
Copertura con tettoia orizzontale aperta sulle pareti	C1
Protezione con barriere verticali, alberatura ecc.	C2
Coperture a contatto prossimo delle strutture	C3
Copertura integrale dell’area, senza controllo del microclima	C4
Copertura integrale dell’area, con controllo del microclima	C5
Copertura...ecc...	C...
<b>REINTERRATO (D)</b>	
Reinterro generico	D1
Reinterro progettato	D2
Reinterro + copertura	D3
Reinterro...ecc...	D...
<b>MESSO IN SICUREZZA (E)</b>	
Operazioni di messa in sicurezza per frane, alluvioni, terremoti, per l’azione del mare, ecc...	E...
<b>SOGGETTO AD UTILIZZO MODERNO (F)</b>	
Installazioni (piloni, impianti elettrici e di illuminazione, audio, sedili, parcheggi, stages ecc.), in combinazione con qualsiasi altro stato precedentemente definito	F...

La scelta del miglior tipo di intervento sul particolare sito deve considerare i 4 fattori fondamentali elencati e articolati nella tabella 5.3.

Tabella 5.3 – Fattori concorrenti alla valutazione dei progetti conservativi.

<b>DURABILITÀ (O CONSERVAZIONE) DEI MATERIALI E DELLE STRUTTURE</b>	<b><math>\delta</math></b>
Caratteristiche dei materiali in opera	
Caratteristiche delle strutture del sito, compresa la sicurezza statica	
Caratteristiche dell'ambiente	
<b>SVILUPPO CULTURALE</b>	<b><math>\chi</math></b>
Peculiarità ed unicità del sito	
Valore simbolico attribuito dalla comunità	
Possibilità di sviluppo della conoscenza	
<b>CONSERVAZIONE DEL PAESAGGIO</b>	<b><math>\pi</math></b>
Valore attribuito al paesaggio del quale il sito è parte	
Entità della modifica effettuata con l'intervento proposto	
Reversibilità della modifica	
<b>CONVENIENZA ECONOMICA</b>	<b><math>\varepsilon</math></b>
Costo di modifica dello stato (progettazione e realizzazione)	
Costo di mantenimento ed esercizio dello stato	
Ritorno economico degli investimenti	
Costo della infrastrutturazione del sito, compresa la 'messa in sicurezza'	

Può essere opportuno assegnare un 'peso' a ciascuno dei fattori  $i$ -esimi ( $w_i$ ; tale che  $\sum w_i = 1$ ), in modo da amplificare il fattore esplicitamente assunto come guida dell'intervento, ed eseguire un'analisi della sensitività di tali pesi (o robustezza della scelta del project ottimale rispetto alla variazione dei pesi). I diversi projects  $j$  avranno in generale un differente vantaggio globale che tiene conto congiuntamente di  $\delta$  (durabilità), di  $\chi$  (sviluppo culturale), di  $\pi$  (conservazione del paesaggio) e di  $\varepsilon$  (convenienza economica), secondo i rispettivi pesi  $w_i$ . Definendo un 'punteggio complessivo'  $P_j$  secondo la relazione:

$$P_j = (w_\delta \cdot \delta_j) + (w_\chi \cdot \chi_j) + (w_\pi \cdot \pi_j) + (w_\varepsilon \cdot \varepsilon_j)$$

e calcolandolo per tutti gli  $j$ -esimi projects è possibile realizzare una scala gerarchica tra questi.

Ogni fattore deriva da una serie di contributi, e a ciascuno di questi può essere assegnato un 'punteggio' o 'voto', opportunamente sotto forma di numeri fuzzy. La scelta di questo metodo è resa pressoché obbligata sia dalla necessità di avere una comune 'unità di misura' di fattori e contributi di natura intrinsecamente diversa sia dal fatto che nessun voto potrà, in generale, essere espresso in termini rigidi ma deve essere accompagnato da una stima della confidenza che l'Expert ha in esso. Il sistema del punteggio può essere organizzato in modo che i valori alti caratterizzino situazioni assunte con connotazione 'positiva'.

Per ogni fattore occorre individuare quelli che sono i termini influenti/componenti e darne una valutazione assegnando un punteggio o voto fuzzy. L'individuazione dei termini è basata su un complesso di conoscenze sostanzialmente condivise tra gli operatori del settore. Ad esempio, in una particolare situazione, si riconosceranno che sul fattore 'durabilità'  $\delta$  agiranno delle azioni e quindi dei contributi dovuti al succedersi di cicli termici intorno alla temperatura di congelamento dell'acqua (gelività) e/o al succedersi di cicli termoigrometrici che portano alla



cristallizzazione di sali e/o all'azione dissolvante delle acque, eventualmente inquinate e/o alla frequentazione antropica e/o alla colonizzazione lichenica, ecc. A ciascuna di queste azioni andrà assegnato un voto fuzzy che costituirà la stima del suo contributo specifico; la somma di questi voti andrà a costituire la valutazione quantitativa del fattore.

Ogni voto deriva quindi da uno studio specifico. È ragionevolmente prevedibile che il numero di termini da considerare per ciascuno dei fattori sia limitato ad un massimo di quattro o cinque; per tener conto delle eventuali differenze tra un fattore e l'altro si adotterà una procedura di normalizzazione, ad esempio moltiplicando la somma risultante per il rapporto tra il numero dei contributi.

Per la definizione, le operazioni e l'ordering dei numeri fuzzy utilizzati in questa trattazione si faccia riferimento al capitolo I-5.

Si utilizzeranno come voti i numeri fuzzy (trapezoidali e triangolari) nell'insieme  $\{1, 2, \dots, 10\}$  [VIGNOLA 2003]. In pratica il valutatore/esperto assegna un voto, ad esempio 6 con  $\mu(6) = 1$  ad uno dei termini che gli sono sottoposti, ma in riconoscimento del carattere sfumato delle conoscenze, deve anche valutare un contributo per i voti adiacenti, ad esempio 7 potrebbe ancora avere  $\mu(7) = 1$  mentre 5 e 8 potrebbero avere  $\mu(5 \text{ e } 8) = 0.5$ , e tutti gli altri  $\mu(1, 2, 3, 4, 9 \text{ e } 10) = 0$  [ATZENI, SANNA, SPANU 2006 E].

La valutazione che eventualmente più esperti possono dare dello stesso termine, ciascuno come voto e grado di appartenenza del voto, può quindi essere calcolata con una formula di media aritmetica, attivando una procedura ciclica di progressivi aggiustamenti/compromessi tra le  $n$  stime, nota in letteratura come fuzzy Delphi [KAUFMANN & GUPTA 1988; ANDERSON, SWEENEY, WILLIAMS 1998]. Tale procedura consiste essenzialmente in 3 fasi:

- Ognuno degli  $n$  esperti, in maniera indipendente, fornisce il suo giudizio per ciascuno dei termini in valutazione, sotto forma di numero fuzzy; alla fine di tale step si avranno  $n$  numeri fuzzy  $\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n$ ;
- Si calcola il valore medio e la differenza del voto assegnato rispetto alla media per ciascuno dei termini considerati. Tali risultati vengono poi rinviati agli esperti per un riesame;
- Ogni esperto presenta quindi una nuova valutazione in base alle informazioni avute; si ripete la fase 2 fino a che le medie calcolate sono 'sufficientemente vicine' tra loro (eventualmente il Decisore può definire una distanza  $d$  tra i numeri fuzzy tale che il ciclo si interrompa, ad esempio per  $d \leq 0.2$ );

Avendo a disposizione tutti i voti con i rispettivi gradi di appartenenza è necessario quindi effettuare la loro aggregazione per ottenere voto e grado di appartenenza del fattore, per ognuno dei progetti in valutazione. L'operazione può essere quella di somma ed eventualmente ogni fattore può essere 'pesato' moltiplicandolo per un numero fuzzy compreso tra 0 e 1, qualora il Decisore intendesse affermare che i fattori non debbano 'pesare' in eguale misura; ad esempio il fattore materiali e strutture potrebbe essere quello assunto a priori come predominante sull'intera procedura. Viene quindi stabilita una gerarchia tra i progetti in esame e la scelta del Decisore dovrebbe ricadere su quello caratterizzato dal valore più alto della somma dei voti.

Una volta effettuata la selezione, e realizzato l'intervento, si può procedere, dopo un adeguato lasso di tempo e sulla base dell'esperienza acquisita, al riesame del rating, realizzando un bilancio della procedura adottata, aggiornandola e affinandola ulteriormente.

Applicheremo la procedura di valutazione dei progetti conservativi a due dei principali monumenti del sito di Nora-Pula: le Terme a Mare e l'Anfiteatro Romano (figura 5.1).



Figura 5.1 - Nora-Pula: localizzazione delle Terme a Mare (in rosso) e dell'Anfiteatro Romano (in blu).

Il sito archeologico di Nora-Pula è localizzato su una piccola penisola della Sardegna meridionale. L'età del primo insediamento umano nell'area è sconosciuto, ma alcune tracce di costruito risalgono perlomeno alla fine del I millennio a.C. (locale civiltà Nuragica) [WEBSTER 1996]. Il sito è stato un importante centro urbano per oltre 1000 anni, dall'VIII secolo a.C. (civiltà Punica-Cartaginese e successivamente, formalmente dal 238 a.C., Romana) [TRONCHETTI 1984; BARRECA 1986; TRONCHETTI 1986]. La fine della città avviene progressivamente nel corso del VII-VIII secolo d.C., a causa della sua indifendibilità dalle azioni aggressive provenienti dal mare, nel quadro del generale declino dell'Impero Romano.

Il sito è interessato da indagini archeologiche sistematiche da circa 50 anni [PESCE 1972; TRONCHETTI 1986]. Nel 1952, quando si è avviato lo scavo archeologico l'area era coltivata a grano ed emergevano solo alcuni filari sommitali di un anfiteatro, i resti di un acquedotto e quelli di un grande edificio termale. L'antica area portuale è attualmente coperta dal mare in conseguenza dell'abbassamento della linea di costa ed una vasta superficie urbana, vincolata come area militare, attende di essere sottoposta a scavo.

Dal punto di vista conservazionistico, l'ambiente è evidentemente fortemente caratterizzato dalla presenza del mare e quindi dall'apporto continuo di sali nella microstruttura porosa dei materiali. La temperatura media dell'area è di 17°C; in particolare la media invernale è superiore a 10°C. Le precipitazioni sono comprese tra 500 e 700 mm/anno. I venti prevalenti sono da nord-ovest. La vicinanza, 10 km a nord, di una delle principali raffinerie di petrolio del Mar Mediterraneo, in esercizio dal 1965 e che negli ultimi tempi lavora circa 15 milioni di

tonnellate/anno di greggio, non è risultato avere significativa influenza sulla conservazione dei materiali (assenza di anomalie riguardo a solfatazione e ad acidità delle acque meteoriche).

Nora ha un carattere speciale rispetto ai casi precedentemente trattati. La sua estensione, la sua notorietà, la sua posizione sul mare in una delle coste più turisticamente valorizzate dell'isola, i recenti grossi finanziamenti attribuiti (9 milioni €), le ricorrenti polemiche connesse all'utilizzo 'moderno' dell'Anfiteatro ne fanno un sito ideale per sperimentare nuove procedure.



### 5.3 – APPLICAZIONE DELLA PROCEDURA ALLE TERME A MARE DI NORA-PULA

L'edificio termale ora noto con la dizione 'a mare' (38°59'03" N, 9°00'52" E) nel sito archeologico di Nora (figura 5.2) è stato realizzato nel II secolo d.C. Il crollo delle volte, avvenuto in concomitanza di un incendio, è datato tra il VII e l'VIII secolo. Successivamente il rudere venne depredata dei materiali riutilizzabili (marmi, mattoni, ecc.) e risultò progressivamente sempre più esposto all'azione diretta del mare sul lato ovest, a seguito della subsidenza dell'area.



Figura 5.2 – Viste dei ruderi delle Terme a Mare, Nora-Pula.

Per quanto fortemente ruderizzato presenta un impianto ed alcune parti (prae-furnium, sospensurae, vasche, resti di intonaci) molto interessanti (figura 5.3).

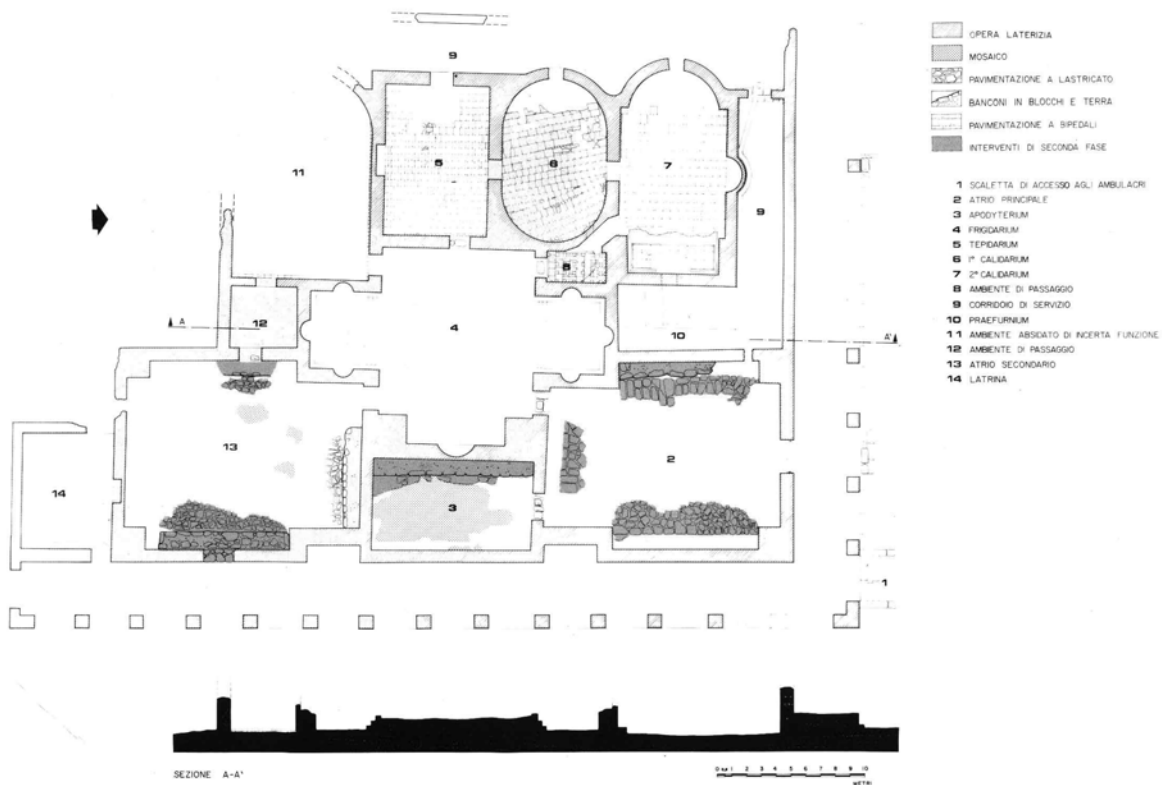


Figura 5.3 – Pianta delle Terme a Mare, Nora-Pula [TRONCHETTI 1986].

Circa trenta anni fa, completato lo scavo dell'edificio, venne realizzato un rudimentale frangiflutti utilizzando parte degli stessi blocchi di crollo e venne applicata una 'verniciatura' delle strutture a fini protettivi, con materiali dei quali non è stata possibile definire la natura sulla base della documentazione esistente. Dodici anni fa venne condotta una caratterizzazione dei materiali in opera (opus testaceum, opus caementicium, massetti in cocciopesto, residui di intonaci a calce o a gesso) ed una valutazione complessiva dello stato di conservazione e della cinetica del degrado (per confronto tra fotografie prese nel corso degli anni) [ATZENI, MASSIDDA, SANNA 1996; ATZENI, MASSIDDA, SANNA 1997]. Per quanto riguarda la stima degli interventi conservativi del passato si constatava che della 'verniciatura' non restavano che rari brandelli polimerici mentre il frangiflutti manteneva la sua efficacia per impedire che le onde continuassero la demolizione del rudere.

Supponiamo che, utilizzando come banca dati il complesso delle acquisizioni disponibili sul rudere e sul suo ambiente, si decida di sottoporre a valutazione 5 progetti conservativi [AMENDOLEA 1995; RANELLUCCI 1996; MELUCCO VACCARO 2000] (tabella 5.4) che prevedano:

- B2/3: controllo della frequentazione antropica e della vegetazione e interventi di anastilosi con impiego di leganti a base di calci;
- E: costituzione di una moderna barriera frangiflutti a tetrapodi;
- C2: realizzazione di barriere verticali vegetali in funzione antiaerosol;
- C1: realizzazione di un sistema di tettoie trasparenti a copertura delle parti sommitali delle strutture;
- D2: reinterro progettato, compresa una protezione 'a mare'.

Procediamo quindi, a titolo esemplificativo, all'espressione dei termini e dei fattori tramite voti fuzzy. Il fattore materiali e strutture deriva dal concorso dei termini dilavamento per azione delle acque meteoriche, cristallizzazione di sali di origine marina (vedi figura 5.4), crescita di vegetazione infestante, azione meccanica delle onde e frequentazione turistica, ciascuno espresso come voto/numero fuzzy. Andrà quindi valutata la somma di questi termini per ciascuno dei progetti. La tabella 5.4 e la figura 5.5 riportano i dati e le elaborazioni relative al fattore materiali e strutture.



Figura 5.4 - Manifestazione dei termini 'dilavamento' e 'salinità' sui materiali in opera (a sinistra opus caementicium, a destra opus testaceum).

Tabella 5.4 – Voti fuzzy per i vari termini del fattore ‘durevolezza dei materiali e delle strutture’  $\delta$ .

Progetto	Dilavamento	Cristallizz. salina	Vegetazione	Usura antropica	Azione onde	SOMMA
B2/3	1, 2, 2, 3	1, 2, 3, 4	6, 7, 8, 9	7, 8, 8, 10	1, 2, 3, 4	16, 21, 24, 30
E	2, 3, 3, 4	1, 2, 3, 4	2, 3, 4, 5	1, 2, 3, 4	8, 9, 9, 10	14, 19, 22, 27
C2	2, 3, 3, 4	4, 5, 5, 6	2, 3, 4, 5	2, 3, 4, 5	2, 3, 3, 5	12, 17, 19, 25
C1	7, 8, 9, 10	3, 4, 5, 6	1, 2, 3, 4	6, 7, 7, 8	2, 3, 4, 4	19, 24, 28, 32
D2	8, 9, 9, 10	8, 9, 9, 10	8, 9, 9, 10	8, 9, 9, 10	7, 8, 9, 10	39, 44, 45, 50



Figura 5.5 – Rappresentazione grafica dei diversi termini che contribuiscono al fattore materiali e strutture  $\delta$  e della loro somma per il progetto D.

Dal (solo) punto di vista del fattore materiali e strutture il progetto D2 (reinterro progettato) risulterebbe quindi la soluzione nettamente migliore. Le implicazioni di questa ‘soluzione tecnica’ sono evidentemente del tutto incompatibili con le aspettative della comunità locale.

Quindi, prendiamo ora in considerazione anche gli altri fattori: paesaggio, sviluppo culturale, economia. Il valore paesaggistico del sito è certamente notevolissimo trattandosi di un ampio centro urbano inserito in un contesto di lagune, spiagge, entroterra boscoso. Termini per la valutazione dei progetti sono quindi l’incidenza dei loro impianti, la stagionalità e la reversibilità delle modificazioni apportate, ecc.

Il fattore definito sviluppo culturale prevede termini concernenti l’impatto dei progetti in valutazione riguardo alla accessibilità del rudere e delle aree contigue per l’avanzamento delle ricerche e la salvaguardia del contenuto documentale del sottosuolo (la città è fortemente stratificata), la compatibilità dei nuovi materiali e delle nuove strutture con le manifestazioni originarie della cultura materiale e con l’immagine affermata del sito, ecc.

Il fattore economico considera termini quali i costi di studio e di progettazione, di realizzazione e di gestione, il ritorno economico conseguente alla nuova sistemazione.

La tabella 5.5 riporta i valori assunti dai fattori in questo esempio, mentre la figura 5.6 illustra graficamente la loro somma per i diversi progetti (a parità di ‘peso’ dei fattori), o rating.

Tabella 5.5 – Esempio di voti fuzzy per tutti i fattori e i progetti in analisi.

Progetto	$\delta$	$\chi$	$\pi$	$\epsilon$	SOMMA
B2/3	16, 21, 24, 30	39, 42, 46, 50	38, 43, 47, 49	36, 40, 43, 47	129, 146, 160, 176
E	14, 19, 22, 27	42, 46, 48, 50	27, 32, 35, 40	28, 33, 37, 42	111, 130, 142, 159
C2	12, 17, 19, 25	30, 35, 39, 43	40, 45, 45, 48	31, 36, 39, 45	113, 133, 142, 161
C1	19, 24, 28, 32	35, 41, 45, 48	25, 30, 35, 38	25, 31, 34, 40	104, 126, 142, 158
D2	39, 44, 45, 50	41, 45, 48, 50	21, 26, 30, 32	20, 25, 28, 33	121, 140, 151, 165

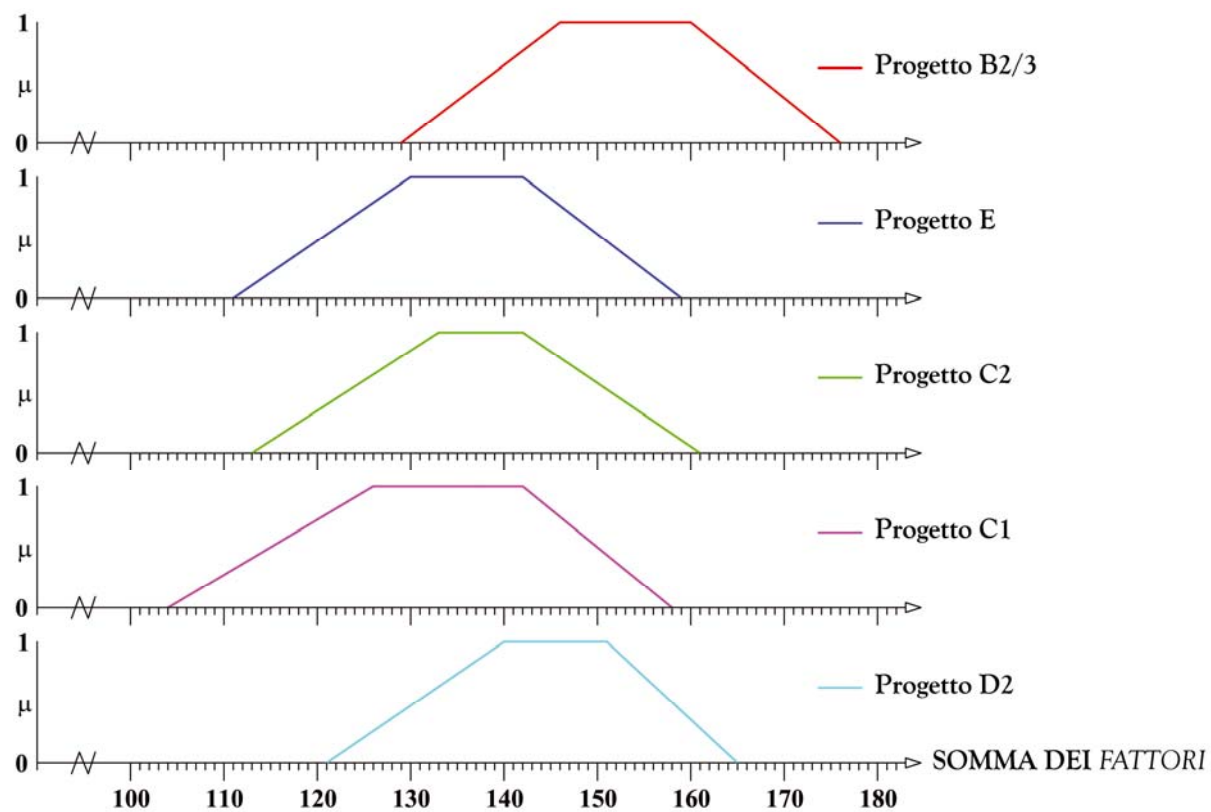


Figura 5.6 - Rappresentazione grafica della gerarchia (rating) tra diversi progetti.

In termini 'intuizionistici' (paragrafo I-5.3.) il progetto conservativo B2/3 è da considerarsi il 'migliore' tra quelli in analisi, ma anche D2 è assumibile come una valida opzione.



#### 5.4 – APPLICAZIONE DELLA PROCEDURA ALL’ANFITEATRO ROMANO DI NORA-PULA

Una seconda applicazione della procedura discussa nel paragrafo precedente riguarderà ora la selezione di un portfolio di progetti di conservazione e/o valorizzazione dell’Anfiteatro Romano (38°59’04” N, 9°00’58” E).

Si tratta di una delle più complete ed importanti strutture del sito, regolarmente utilizzata per spettacoli durante la stagione estiva nel corso degli ultimi venti anni (300-350 spettatori per evento), e quindi la differenza di problematica rispetto al caso precedentemente trattato è proprio l’utilizzo moderno e la sua incidenza sulla conservazione di un monumento. Negli ultimi anni aspre polemiche hanno coinvolto gli organizzatori degli spettacoli, i progettisti, l’Amministrazione Regionale, la comunità locale, la Soprintendenza Archeologica.

Come mostrato nella figura 5.7, è una struttura monumentale con diametro di circa 40 metri situato al centro della zona pubblica della città Romana, a meno di cento metri dal bagnasciuga.

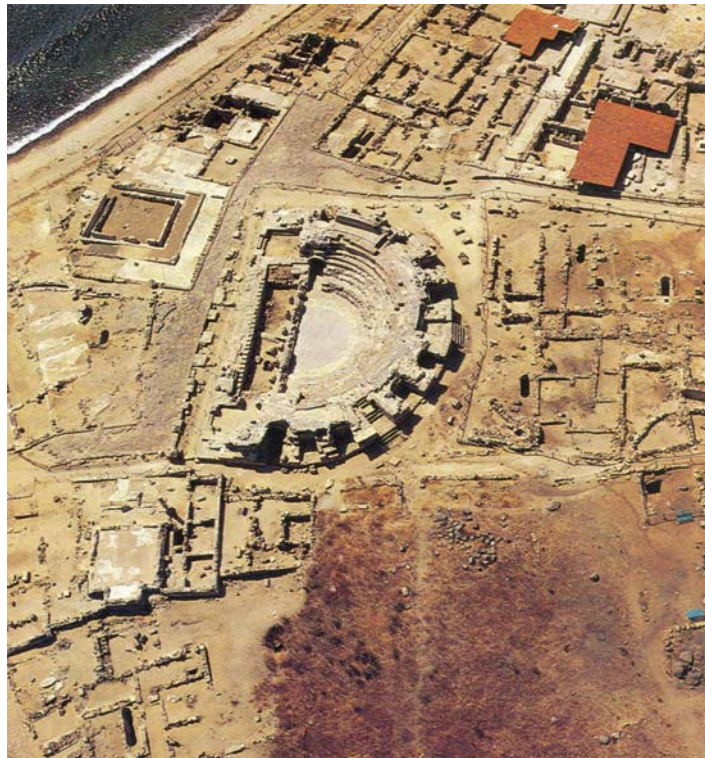


Figura 5.7 – L’Anfiteatro Romano di Nora-Pula.

La comunità locale è fortemente interessata alla valorizzazione turistica e alla riutilizzazione del monumento, ma questo non può assolutamente prescindere dalla sua rigorosa conservazione.

La lista dei projects selezionati per la valutazione è la seguente:

- Bx: limitati interventi di consolidamento statico e di ricostruzione con impiego di materiali inorganici naturali compatibili; controllo stagionale delle erbe infestanti; percorso

controllato per la frequentazione turistica con divieto di accesso alla *cavea* (la gradinata sulla quale sedevano gli spettatori) ed all'*orchestra* (lo spazio lastricato semicircolare in cui in origine erano collocati i sedili riservati alle autorità ma che ultimamente veniva utilizzato come *scena*);

- Cx: copertura con tettoia orizzontale (antidilavamento) e installazione di barriere verticali (antiaerosol marino), mantenimento delle condizioni di buona ventilazione; percorso controllato per la frequentazione turistica con divieto di accesso alla *cavea* ed all'*orchestra*;
- B4/5: consolidamento/idrofugazione dei materiali tramite impregnazione della struttura porosa con sostanze chimiche;
- Bx/Fx: (dopo un intervento come Bx) per un riutilizzo teatrale moderno, copertura temporanea dell'*orchestra* sulla quale graveranno gli spettatori, installazione della *scena* su palco esterno al teatro; in aggiunta le installazioni temporanee elettriche, audio, di illuminazione, igieniche e di sicurezza; sorveglianza della frequentazione;
- Bx/Fy: (dopo un intervento come Bx) per un riutilizzo teatrale moderno, installazione di una sub-gradinata in legno e metallo sulla *cavea*, a distanza dalla gradinata originaria, supportata su basamenti provvisori nell'area contigua al monumento; installazione della *scena* su palco esterno al teatro; in aggiunta come Bx/Fx.

Lo stato di alterazione della *cavea* è particolarmente accentuato; solo negli ordini più bassi, quelli seppelliti per primi, si riscontra che i blocchi di roccia lavica autobrecciata di natura andesitica che li costituiscono mantengono ancora un profilo sufficientemente definito. Nella gran parte dei corsi superiori invece i blocchi andesitici sono intensamente fratturati ed interessati a distacchi consistenti e dove sono del tutto assenti è scoperto il basamento di carico, realizzato in *opus caementicium* (un calcestruzzo ante litteram con calce come legante) che appare interessato ad una profonda polverizzazione (figura 5.8). I materiali costituenti i mosaici dell'*orchestra* e quelli delle strutture retrostanti la *cavea*, realizzate in *opus testaceum* (opera muraria in mattoni di terracotta legati con malta di calce) e conci litici di diversa natura appaiono meno critici rispetto agli anzidetti e pertanto le loro caratteristiche non sono state ritenute determinanti sulla scelta. La caratterizzazione dei materiali e la valutazione della loro stabilità nell'ambiente è stata effettuata tramite indagini di laboratorio pubblicate in [ATZENI, MASSIDA, SANNA, TRONCHETTI 1996].



Figura 5.8 – Lo stato di conservazione dell’Anfiteatro Romano di Nora-Pula.

Come osservato precedentemente, il paesaggio del sito è certamente uno dei valori principali da valutare e tutelare.

Qualunque intervento deve comunque considerare due aspetti essenziali per il futuro sviluppo culturale: dato lo stratificarsi dell’insediamento nei secoli è estremamente probabile che il sottosuolo sia caratterizzato dai resti di insediamenti progressivamente più antichi, la cui conservazione e leggibilità sarebbe compromessa dalla realizzazione di installazioni invasive permanentemente fondate nel sottosuolo. Inoltre bisogna riconoscere che la microstruttura dei materiali è parte integrante del loro essere Beni Culturali e non dovrebbe quindi venire alterata aggiungendovi materiali moderni in modo irreversibile.

Il fattore economico prevede di considerare i costi per la progettazione e la conduzione dei projects e per la gestione delle soluzioni adottate e gli introiti derivanti dalla frequentazione turistica, sia generale che specificatamente legata alla attività teatrale.

Le tabelle 5.6-5.9 riportano il complesso dei dati costituenti la base per la valutazione dei projects.

Tabella 5.6 – Fattore della ‘durabilità dei materiali e delle strutture’  $\delta$ .

	Bx	Cx	B4/5	Bx/Fx	Bx/Fy
<b>Cristallizzazione salina</b>	1, 2, 3	3, 5, 7	4, 5, 7	1, 2, 3	1, 2, 3
<b>Dilavamento</b>	1, 2, 3	7, 8, 9	6, 7, 8	1, 2, 3	1, 2, 3
<b>Sviluppo di vegetazione</b>	4, 6, 7	4, 6, 7	6, 7, 8	5, 6, 7	4, 5, 6
<b>Usura antropica e abrasione</b>	3, 4, 5	4, 5, 6	6, 7, 9	2, 3, 4	2, 3, 4

Tabella 5.7 – Fattore dello ‘sviluppo culturale’  $\chi$ .

	Bx	Cx	B4/5	Bx/Fx	Bx/Fy
Conservazione del valore culturale	6, 7, 8	9, 9, 10	1, 2, 3	5, 6, 7	6, 7, 8
Reversibilità dell'intervento	2, 3, 5	9, 9, 10	1, 1, 2	2, 3, 5	2, 3, 5
Accessibilità per lo studio	7, 8, 9	7, 8, 9	7, 8, 9	6, 7, 8	6, 7, 8
Rispetto del suolo archeologico	8, 9, 10	5, 7, 8	7, 8, 9	7, 8, 9	8, 8, 9

Tabella 5.8 – Fattore della ‘conservazione del paesaggio’  $\pi$ .

	Bx	Cx	B4/5	Bx/Fx	Bx/Fy
Valore attuale	9, 10, 10	9, 10, 10	9, 10, 10	9, 10, 10	9, 10, 10
Entità della modifica	7, 8, 9	3, 4, 5	8, 9, 10	5, 6, 7	6, 7, 8
Reversibilità delle strutture	5, 6, 7	6, 7, 8	1, 2, 3	4, 5, 6	3, 4, 5
Stagionalità delle strutture	2, 3, 4	6, 7, 8	8, 9, 10	2, 3, 4	2, 2, 3

Tabella 5.9 – Fattore della ‘convenienza economia’  $\varepsilon$ .

	Bx	Cx	B4/5	Bx/Fx	Bx/Fy
Costi di progetto	6, 7, 8	6, 7, 8	4, 5, 6	4, 5, 6	3, 4, 5
Costi di esecuzione	4, 6, 7	5, 6, 7	3, 4, 5	3, 4, 5	2, 3, 4
Costi di manutenzione	6, 7, 8	6, 7, 8	7, 8, 9	5, 6, 7	5, 6, 7
Ritorno economico	4, 5, 6	4, 5, 6	4, 5, 6	7, 8, 9	7, 8, 9

La tabella 5.10 riporta la matrice dei voti. La matrice dei pesi si assume unitaria.

Tabella 5.10 – Somma dei fattori.

	Bx	Cx	B4/5	Bx/Fx	Bx/Fy
$\delta$	9, 14, 18	18, 24, 29	22, 26, 32	9, 13, 17	8, 12, 16
$\chi$	23, 27, 32	30, 33, 37	16, 19, 23	20, 24, 29	22, 25, 30
$\pi$	23, 27, 30	24, 28, 31	26, 30, 33	20, 24, 27	20, 23, 26
$\varepsilon$	20, 25, 29	21, 25, 29	18, 22, 26	19, 23, 27	17, 21, 25

La valutazione per ciascuno dei progetti è ottenuta sommando i voti dei differenti fattori; il risultato è: Bx = (75, 93, 109), Cx = (93, 110, 126), B4/5 = (82, 97, 114), Bx/Fx = (68, 84, 100) e Bx/Fy = (67, 81, 97).

Applicando il metodo ‘intuitivo’ la gerarchia dei progetti è: Cx (B4/5  $\approx$  Bx) (Bx/Fx  $\approx$  Bx/Fy).

Questo risultato è anche confermato sia dall’approccio di ADAMO [1980] (assumendo  $\alpha$ -cut = 0.5 si ha Bx = 101, Cx = 117, B4/5 = 104, Bx/Fx = 92 e Bx/Fy = 89), sia considerando il metodo delle distanze di TRAN & DUCKSTEIN [2002] (posti M=130 e m=65: per la distanza da

M si ha  $Cx (29) < B4/5 (46) < Bx (53) < Bx/Fx (65) < Bx/Fy (69)$  mentre per la distanza da m si ha  $Cx (64) > B4/5 (47) > Bx (40) > Bx/Fx (27) > Bx/Fy (24)$ .

Il risultato è stato ottenuto assumendo che tutti i termini e tutti i fattori abbiano lo stesso peso. L'introduzione di pesi diversi implica l'esplicita accentuazione riconosciuta ad un fattore; ad esempio l'aspetto conservativo del progetto di fronte ad un sito unico e di interesse universale può deliberatamente far passare in secondo piano l'impatto paesaggistico o l'incidenza economica della realizzazione.

Gli studi presentati in questo capitolo sono stati oggetto di una comunicazione al «IV Congresso Nazionale AIAr. Archeometria Scienza e Beni Culturali» e sono in stampa negli Atti [ATZENI, SANNA, SPANU 2007], di un articolo pubblicato sulla rivista «Archeologia e Calcolatori» [ATZENI, SANNA, SPANU 2006 E] e di una nota accettata per la presentazione al «Conservation Science 2007», che si terrà a Milano nel Maggio 2007 [ATZENI, PIA, SANNA, SPANU 2007].



## CONCLUSIONI

Il '900 è stato caratterizzato dalla progressiva **matematizzazione della conoscenza**. Tale fenomeno si è ulteriormente accentuato nell'ultimo decennio, per la necessità di gestire (acquisire, trasmettere, elaborare, condividere) la conoscenza in tutte le sue forme per via informatica. Riguardo alla 'novità' del fenomeno, per quanto oggi possa sembrare paradossale, non bisogna dimenticare che anche importanti settori della Ingegneria sono stati matematizzati appena da cento anni; ad esempio, è il Regio Decreto 10 gennaio 1907 che ha introdotto l'obbligo dei calcoli statici e quindi della verifica dello stato tensionale delle nuove costruzioni.

Ma il processo di matematizzazione di diverse scienze nel corso dell'ultimo secolo, dall'economia alla psicologia e persino dalla medicina all'archeologia, non è caratterizzato esclusivamente dalla semplice applicazione della matematica 'ordinaria' ma è sempre stato uno stimolo per lo **sviluppo di nuovi aspetti della stessa matematica**; uno di questi è quello derivante dalla **Fuzzy Logic**. Le equazioni differenziali, seppure lo sviluppo prodigioso delle procedure di calcolo numerico su computer e l'evoluzione di questi ultimi ne abbia dilatato l'operatività, continuano a stare strette a certi **domini particolarmente complessi della realtà**.

Questa Tesi è nata da esigenze molto concrete quali le insufficienze riscontrate a livello interpretativo, modellistico e operativo nell'ambito delle **applicazioni della Ingegneria dei Materiali al settore dei Beni Culturali**. Non era certo il suo scopo quello di discutere 'in astratto' aspetti di logica, di filosofia o di metodologia della scienza e neppure quello di adottare a priori un nuovo paradigma, per fede o per moda. Perciò la ricerca qui presentata ha mantenuto da un lato un **consistente approccio sperimentale** finalizzato all'acquisizione secondo procedure sostanzialmente standard della caratterizzazione di numerose classi di materiali in opera nei siti archeologici, ma d'altro canto ha voluto anche **proporre un contesto teorico**, certamente originale in questo campo, nel quale interpretare ed utilizzare i dati.

Non tutte le applicazioni si sono potute realizzare in modo completamente esaustivo. È quasi un assioma delle applicazioni commerciali ben riuscite che le rules siano 'poche' ma che vengano poi messe a punto tramite una sperimentazione diretta che richiede mesi o persino anni. Questo non poteva evidentemente essere fatto nell'ambito di questa Tesi, e non ne era lo scopo dichiarato. Le applicazioni alla **modellazione reologica**, alla **correlazione della resistenza a compressione** ed alla **gelività dei materiali porosi** o caratterizzati dalla presenza di una rete di lesioni ed infine alla **valutazione dei progetti conservativi** dei siti archeologici, considerando congiuntamente gli aspetti 'materiali' e quelli paesaggistici, economici, ecc., sono definite in modo pressoché completo. La **modellazione della durabilità alla scala del sito archeologico** è certamente meno compiuta nei suoi sviluppi operativi ma sono state comunque fornite le Knowledge Base dei nodi critici.

Contrariamente a quanto sostenuto da alcuni, particolarmente negli anni immediatamente successivi alle prime formalizzazioni della fuzzy logic e delle sue iniziali applicazioni, questo approccio non è né permissivo, né semplice, né più approssimato di quelli tradizionali. La ricerca qui presentata mostra che il motivo del suo utilizzo è da ricercare, molto semplicemente, in una maggiore efficienza rispetto ad altre scelte metodologiche e nel fatto che talvolta esso sia l'unico approccio praticabile per realizzare la matematizzazione di fenomeni complessi coinvolgenti contemporaneamente termini scientifici, tecnici, economici e 'umanistici'.

La logica e la matematica fuzzy e le loro applicazioni si possono oramai considerare ‘scienza ordinaria’. Sono decine le riviste scientifiche che ne trattano, talune in modo esclusivo, e le associazioni accademiche e professionali internazionali dedicate (in Europa la EUSFLAT, European Society for Fuzzy Logic and Technology). Come può constatare chiunque si affidi all’autofocus delle fotocamere o ai più avanzati dispositivi frenanti delle autovetture, il ‘fuzzy’ è capace di prendere le decisioni giuste. La metodologia è inappuntabile. Non ci sono ostacoli concettuali alla sua estensione in qualsiasi settore dell’Ingegneria, purché ci siano abbastanza conoscenze/dati per realizzare (da parte di Experts o per autoapprendimento in associazione a Neural Networks) le Knowledge Base. Le difficoltà nella gestione dei dati sui materiali facenti parte dei Beni Culturali sono legate alla natura stessa dei dati, tipicamente ‘da case history’, spesso numerosi ma a volte inutili o banali, falsamente precisi, pressoché inutilizzabili in progettazione, raramente inquadrati e inquadrabili in un contesto teorico generalizzante.



## RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano la dott.ssa Rosetta Porcu (DIGITA-Dipartimento di Geingegneria e Tecnologie Ambientali dell'Università degli Studi di Cagliari) e il dott. Michele Agus (CNR-Istituto di Geologia Ambientale e Geingegneria di Cagliari) per la conduzione delle determinazioni XRD, il sig. Ubaldo Badas (Museo e Parco Archeologico di GennaMaria), l'arch. Gabriele Manca (progetto e direzione lavori Is Paras-Isili), il dott. Alessandro Usai e il sig. Ginetto Bacco (Soprintendenza Archeologica per le province di Cagliari e Oristano) per Su Monte-Sorradile.

...last but not least... un sincero ringraziamento al prof. Ulrico Sanna e al mio 'mentore', l'ing. Cirillo Atzeni.



## BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. 1919, «Transactions of the Faraday Society» Vol. 14, pp.1-69.
- ADAMO J.M. 1980, *Fuzzy decision trees*, «Fuzzy Sets and Systems» Vol. 4 Issue 3, pp. 207-219.
- AKKURT S., TAYFUR G., CAN S. 2004, *Fuzzy logic model for the prediction of cement compressive strength*, «Cement and Concrete Research» Vol. 34 Issue 8, pp. 1429-1433.
- AL-HARTHI A.A., AL-AMRI R.M., SHEHATA W.M. 1999, *The porosity and engineering properties of vesicular basalt in Saudi Arabia*, «Engineering Geology» Vol. 54 Issues 3-4, pp. 313-320.
- AMENDOLEA B. (a cura di) 1995, *I Siti Archeologici. Un Problema di Musealizzazione all'Aperto*, Roma: Gruppo Editoriale Internazionale.
- ANDERSON D.R., SWEENEY D.J., WILLIAMS T.A. 1998, *Quantitative Methods for Business*, 7<sup>th</sup> ed., Ohio: International Thomson Publishing.
- ARCHER N.P., GHASEMZADEH F. 1999, *An integrated framework for project portfolio selection*, «International Journal of Project Management» Vol. 17 Issue 4, pp. 207-216.
- ASHURST J. 1989, *Practical Building Conservation. English Heritage Technical Handbook, vol. 3–Mortars, Plasters and Renders*, Aldeshot: Gowen Technied Press.
- ASTON B., HARRELL J.A., SHAW I. 2000, *Stone*, in NICHOLSON P.T. & SHAW I. (editors) «Ancient Egyptian materials and technology», Cambridge: Cambridge University Press, pp. 5-20.
- ATKINS A.P. 1986, *Chimica-Fisica*, Bologna: Zanichelli.
- ATZENI C., CABIDDU M.G., MASSIDDA L., SANNA U., SISTU G. 1994, *Degradation and conservation of sandstone and pyroclastic rocks used in the prehistoric complex GennaMaria*, «Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin» Venezia, pp. 533-540.
- ATZENI C., CABIDDU M.G., MASSIDDA L., SANNA U. 1995, *Evaluation of degradation and conservation of marlstone by means of water capillary absorption and frost test*, «Proceedings of the ICCROM International Colloquium on Methods of Evaluating Products for the Conservation of Porous Building Materials in Monuments» Roma, pp. 421-430.
- ATZENI C., CABIDDU M.G., MASSIDDA L., SANNA U. 1996, *The use of “stabilized hearth” in the conservation of megalithic monuments*, «Conservation and Management of Archaeological Sites» Vol. 1 Issue 3, pp. 161-168.
- ATZENI C., CHISSALÈ M., MASSIDDA L., SANNA U. 1997, *Alcune verifiche sperimentali della teoria di Everett in materiali a porosità “monodimensionale” o “distribuita”*, «Atti delle Giornate di Studio. Materiali e Tecniche per il Restauro» Cassino, pp. 1-9.
- ATZENI C., CINCOTTI A., DEMURTAS G., MASSIDDA L., SANNA U. 1997, *Rusting of Roman clamps and modern reinforcing bars in a marine archaeological site*, «Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin» Rodi, pp. 65-74.

- ATZENI C., FARCI A., FLORIS D., MELONI P. 2004, *Effect of aging on rheological properties of lime putty*, «Journal of the American Ceramic Society» Vol. 87 Issue 9, pp. 1764-1766.
- ATZENI C., FARCI A., FLORIS D., MASSIDDA L., MELONI P., SANNA U. 2003, *Verifica della reversibilità di stuccature utilizzate nella conservazione di strutture ciclopiche*, «Atti del Convegno Scienza e Beni Culturali. La Reversibilità nel Restauro» Bressanone, pp. 253-260.
- ATZENI C., MARCIALIS A., MASSIDDA L., SANNA U. 1992, *Microstruttura e durabilità. La scienza dei materiali in due casi emblematici di conservazione di costruzioni storiche*, «Atti del Congresso ASMI. Omaggio Scientifico a R. Turriziani» Roma, pp. 1.309-1.320.
- ATZENI C., MASSIDDA L., SANNA U. 1985 A, *Effect of rheological properties of cement pastes on workability of mortars*, «Cement, Concrete and Aggregates» Vol. 7 Issue 2, pp. 78-83.
- ATZENI C., MASSIDDA L., SANNA U. 1985 B, *Comparison between rheological models for portland cement pastes*, «Cement and Concrete Research» Vol. 15 Issue 3, pp. 511-519.
- ATZENI C., MASSIDDA L., SANNA U. 1986, *Model for the thixotropic behaviour of cement pastes*, «Industrial and Engineering Chemistry-PRD» Vol. 25 Issue 9, pp. 499-504.
- ATZENI C., MASSIDDA L., SANNA U. 1992, *Ruolo delle caratteristiche reologiche della pasta cementizia sul comportamento al flusso del calcestruzzo*, «L'Industria Italiana del Cemento» Vol. 62 Issue 4, pp. 278-282.
- ATZENI C., MASSIDDA L., SANNA U. 1996, *Magnesian limes. Experimental contribution to interpreting historical data*, «Science and Technology for Cultural Heritage» Vol. 5 Issue 2, pp. 29-36.
- ATZENI C., MASSIDDA L., SANNA U. 1997, *Roman bricks in a marine environment*, «Materials and Structures» Vol. 30 Issue 2, pp. 120-125.
- ATZENI C., MASSIDDA L., SANNA U., TRONCHETTI C. 1996, *Problemi di conservazione del rudere di un edificio termale romano-imperiale di Nora (Sardegna)*, «Atti del Convegno Scienza e Beni Culturali. Dal Sito Archeologico alla Archeologia del Costruito» Bressanone, pp. 165-175.
- ATZENI C., ORRÙ D., SANNA U., SPANU N. 2006, *Notes on the rheology of lime putties and related mortars*, «ZKG International» Vol. 59 Issue 7, pp. 81-87.
- ATZENI C., PIA G., SANNA U., SPANU N., *A fuzzy model for classifying mechanical properties of vesicular basalt used in prehistoric buildings*, «Materials Characterization», (in stampa).
- ATZENI C., PIA G., SANNA U., SPANU N. 2007, *A fuzzy number ranking for project selection in conservation and exploitation planning of archaeological sites*, «Proceedings of the International Congress on Conservation Science 2007» Milano, (in stampa).
- ATZENI C., SANNA U., SPANU N. 2006 A, *A rheological fuzzy model for lime plasticity and mortar consistency*, «Applied Rheology» Vol. 16 Issue 2, pp. 80-89.
- ATZENI C., SANNA U., SPANU N. 2006 B, *La matematica fuzzy: uno strumento per l'approccio olistico alla durabilità del calcestruzzo*, «L'Industria Italiana del Cemento» Vol. 76 Issue 6, pp. 616-625.
- ATZENI C., SANNA U., SPANU N. 2006 C, *Some mechanisms of microstructure weakening in high-porous calcareous stones*, «Materials and Structures» Vol. 39 Issue 5, pp. 525-531.

- ATZENI C., SANNA U., SPANU N. 2006 D, *Concrete rheology: a basic approach to fuzzy modeling*, «Proceedings of eight CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete. Supplementary Papers» Sorrento, pp. 303-315.
- ATZENI C., SANNA U., SPANU N. 2006 E, *Applicazioni della matematica fuzzy per la selezione dei progetti conservativi nei siti archeologici*, «Archeologia e Calcolatori» Vol. 17.
- ATZENI C., SANNA U., SPANU N. 2007, *Applicazioni della logica fuzzy nell'ambito della Conservazione dei Beni Culturali*, «Atti del IV Congresso Nazionale AIAR. Archeometria Scienza e Beni Culturali» Pisa, pp. 813-827.
- ATZENI E. 1992, *Il complesso nuragico "Genna Maria": un esempio emblematico di degrado*, «Atti del Convegno Scienza dei Materiali e Beni Culturali. Esperienze e Prospettive nel Restauro delle Costruzioni Nuragiche» Cagliari, pp. 160-167.
- ATZENI M., FARCI J. 1991, *Nuraghe Genna Maria, Opere di restauro, Progetto 1° lotto*.
- AUGUSTI V., PODESTÀ S., STAGNO G., TORRE A. 2004, *Caratteristiche meccaniche del calcestruzzo di edifici storici del primo Novecento*, «L'Industria Italiana del Cemento» Vol. 73 Issue 11, pp. 844-858.
- BACCO G., SANTONI V. 2001, *Il complesso culturale nuragico di Su Monte-Sorradile*, in «Guide e Studi della Soprintendenza Archeologica per le Province di Cagliari e Oristano. Il Nuraghe Losa di Abbasanta», Quartu S.Elena: Prestampa, pp. 74-82.
- BACKMAN A. 1953, *Fundamental plastic requirements in limes to be used for building purposes*, «Zement-Kalk-Gips» Vol. 6 Issue 2, pp. 37-42.
- BACKMAN A. 1954, *Method and apparatus for measuring softness qualities in lime*, «Zement-Kalk-Gips» Vol. 7 Issue 5, pp. 197-205.
- BALDI P., MARIOTTINI M., LAURENZI TABASSO M. 1983, *Relazione del sopralluogo effettuato al Nuraghe Genna Maria Villanovaforru (Ca) il 17.05.1983*, Roma: Ministero per i Beni Culturali e Ambientali, Istituto Centrale del Restauro.
- BANINI G.A., BEARMEN R.A. 1998, *Application of fuzzy cognitive maps to factors affecting slurry rheology*, «International Journal of Mineral Processing» Vol. 52 Issue 4, pp. 233-244.
- BARRECA F. 1986, *The Phoenician and Punic civilization in Sardinia*, in BALMUTH M.S. (editor) «Studies in Sardinian Archaeology II», Ann Arbor: The University of Michigan Press, pp. 144-170.
- BARROCCU G., CRESPELLANI T., LOI A. 1981, *Caratteristiche geologico-tecniche dei terreni dell'area urbana di Cagliari*, «Rivista Italiana di Geotecnica» Vol. 2, pp. 98-144.
- BAZANT Z.P., CHERN J.C., ROSENBERG A.M., GAIDIS J.M. 1988, *Mathematical model for freeze-thaw durability in concrete*, «Journal of American Ceramic Society» Vol. 71 Issue 9, pp. 776-783.
- BIENIAWSKI Z.T. 1989, *Engineering Rock Mass Classifications*, New York: Wiley & Sons Inc.
- BLACHERE J.R., YOUNG J.E. 1972, *The freezing point of water in porous glass*, «Journal of American Ceramic Society» Vol. 55 Issue 6, pp. 306-308.
- BLACHERE J.R., YOUNG J.E. 1974, *Failure of capillary theory of frost damage as applied to ceramics*, «Journal of American Ceramic Society» Vol. 57 Issue 5, pp. 212-216.

- BLACK M. 1937, *Vagueness: an exercise in logical analysis*, «Philosophy of Science» Vol. 4, pp. 427-455.
- BORGIOI L. 2002, *Polimeri di Sintesi per la Conservazione della Pietra*, Padova: Il Prato Casa Editrice.
- BOSELLINI A. 1991, *Introduzione allo Studio delle Rocce Carbonatiche*, Bologna: Zanichelli.
- BOYNTON R.S. 1980, *Chemistry and Tecnology of Lime and Limestone*, New York: Wiley & Sons Inc.
- BUCKLEY J.J., ESLAMI E. 2002, *An Introduction to Fuzzy Logic and Fuzzy Sets*, Heidelberg: Physica-Verlag.
- BURNS G. 1991, *Deterioration of our cultural heritage*, «Nature» 352, pp. 658-660.
- BUTENUTH G., FREY J.M.L., GOTTHARDT G.R., KASIG W. 1993, *The conversion rates of industrial limestone and quick lime reactions*, «ZKG International» Vol. 46 Issue 8, pp. E214-E218.
- CAMBONI G. 1990, *Nuraghi, grandi malati*, L'Unione Sarda, 18 dicembre 1990.
- CANEVA G., NUGARO M.P., SALVADORI O. (a cura di) 2005, *La Biologia Vegetale per i Beni Culturali, volume I: Biodeterioramento e Conservazione*, Firenze: Nardini Editore.
- CARTA DEL RESTAURO DI ATENE (CONFERENZA INTERNAZIONALE DI ATENE) 1931.
- CARTA ITALIANA DEL RESTAURO (CONSIGLIO SUPERIORE PER LE ANTICHITÀ E BELLE ARTI) 1931.
- CARTA DEL RESTAURO DI VENEZIA (CONGRESSO INTERNAZIONALE DEGLI ARCHITETTI E TECNICI DEI MONUMENTI) 1964.
- CARTA ITALIANA DEL RESTAURO (DEL MINISTERO DELLA PUBBLICA ISTRUZIONE) 1972.
- CARTA C.N.R. (CARTA 1987 DELLA CONSERVAZIONE E DEL RESTAURO DEGLI OGGETTI D'ARTE E DI CULTURA) 1987.
- CARTA GEOLOGICA D'ITALIA 1969 A, *Foglio 205-206, Capo Mannu-Macomer*.
- CARTA GEOLOGICA D'ITALIA 1969 B, *Foglio 218, Isili*.
- CARTA GEOLOGICA DELLA SARDEGNA (a cura di CARMIGNANI L.) 1996.
- «Ceramic Abstracts» 2004, Vol. 83 Issue 4, p. s-13.
- «Cement and Concrete Research» 2005, Vol. 35 Issue 12, pp. XXIV-XXVIII.
- CHATTERJI S., CHRISTENSEN P. 1979, *A mechanism of breakdown of limestone nodules in a freeze-thaw environment*, «Cement and Concrete Research» Vol. 9 Issue 6, pp. 741-746.
- CHATTERJI S. 1999 A, *Aspects of the freezing process in a porous material-water system. Part 1. Freezing and the properties of water and ice*, «Cement and Concrete Research» Vol. 29 Issue 4, pp. 627-630.
- CHATTERJI S. 1999 B, *Aspects of the freezing process in a porous material-water system. Part 2. Freezing and the properties of frozen porous materials*, «Cement and Concrete Research» Vol. 29 Issue 5, pp. 781-784.

- CHATTERJI S. 2000, *A discussion of the paper "Crystallization in pores" by G.W. Scherer*, «Cement and Concrete Research» Vol. 30 Issue 4, pp. 669-671.
- CHENG D.C.H., EVANS F. 1965, *Phenomenological characterization of the rheological behaviour of inelastic reversible thixotropic and antithixotropic fluids*, «British Journal of Applied Physics», Vol. 16 Issue 11, pp. 1599-1617.
- CNR-ICR NORMAL 4/80 1980, *Distribuzione del volume dei pori in funzione del loro diametro*.
- CNR-ICR NORMAL 10/82 1982, *Descrizione petrografica dei materiali lapidei naturali*.
- CNR-ICR NORMAL 14/83 1983, *Sezioni sottili e lucide di materiali lapidei: tecnica di allestimento*.
- CNR-ICR NORMAL 11/85 1985, *Assorbimento d'acqua per capillarità-coefficiente di assorbimento capillare*.
- CNR-ICR NORMAL 22/86 1986, *Misura della velocità di propagazione del suono*.
- CNR-ICR NORMAL 42/93 1993, *Criteri generali per l'applicazione delle prove non distruttive*.
- COCOZZA T., JACOBACCI A., NARDI R., SALVATORI I. 1974, *Schema stratigrafico-strutturale del Massiccio sardo-corso e minerogenesi della Sardegna*, «Memorie della Società Geologica Italiana» Vol. 13 Issue 2, pp. 85-186.
- COLLEPARDI M. 1992, *Durabilità del calcestruzzo: teoria, pratica e prescrizioni di Capitolato. Parte I: Cause di degrado di tipo chimico*, «L'Industria Italiana del Cemento» Vol. 74 Issue 11, pp. 707-726.
- COLLEPARDI M. 2000, *Durabilità del calcestruzzo*, «L'Industria Italiana del Cemento» Vol. 70 Issue 5, pp. 432-441.
- COLLEPARDI M. 2006, *Il Nuovo Calcestruzzo*, Quarta Edizione, Villorba: Editore Tintoretto.
- COPPOLA L. 2001, *Rheology and mix proportioning of self-compacting concretes*, «L'Industria Italiana del Cemento» Vol. 71 Issue 2, pp. 152-163.
- COPPOLA L., COLLEPARDI M. 1993, *Dissesto e restauro delle antiche murature a sacco: gradienti termici provocati da iniezioni di cemento*, «Atti del Convegno Scienza e Beni Culturali. I calcestruzzi antichi e moderni» Bressanone, pp. 329-335.
- COSSU T., SABA A. 2000, *Il Nuraghe "Is Paras"*, Isili: La Stella.
- COSTA U., MASSAZZA F. 1986, *Structure and properties of cement suspensions*, Atti del «8° Congresso Internacional de Química do Cimento» Rio de Janeiro, pp. 248-259.
- COX E. 2005, *Fuzzy modeling and genetic algorithms for data mining and exploration*, Amsterdam: Elsevier & MK.
- DARI A., PASCALI L. 2003, *La verifica di un calcestruzzo autocompattante*, «In Concreto» Vol. 9 Issue 5, pp. 63-71.
- DELLA MARMORA A. 1868, *Itinerario dell'Isola di Sardegna del conte Alberto Della Marmora tradotto e compendiato con note dal Canon. Giovanni Spano*, Cagliari: Tipografia Alagua.
- DEMIR F. 2005, *A new way of prediction elastic modulus of normal and high strength concrete-fuzzy logic*, «Cement and Concrete Research» Vol. 35 Issue 8, pp. 1531-1538.
- DUBOIS D., PRADE H. 2000, *Fundamentals of Fuzzy Sets*, Boston: Kluwer Academic Publishers.

- EINSTEIN A. 1921, *Geometrie und erfahrung*, «Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte» Vol. 1, pp. 123-130.
- ERLIN B., MATHER B. 2005, *A new process by which cyclic freezing can damage concrete—the Erlin/Mather effect a concept*, «Cement and Concrete Research» Vol. 35 Issue 7, pp. 1407-1411.
- EVERETT D.H. 1961, *The thermodynamics of frost damage to porous solids*, «Transactions of the Faraday Society» Vol. 57, pp. 1541-1550.
- FAGERLUND G. 1973, *Determination of pore-size distribution from freezing-point depression*, «Materials and Structures» Vol. 6 Issue 33, pp. 215-225.
- FINOL J., GUO Y.K., JING X.D. 2001, *A rule based fuzzy model for the prediction of petrophysical rock parameters*, «Journal of Petroleum Science and Engineering» Vol. 29 Issue 2, pp. 97-113.
- FITZNER B., SNETHLAGE R. 1982, *Über Zusammenhänge zwischen Salzkristallisationsdruck und Porenradienverteilung*, «GP News Letter» Vol. 3, pp. 13-24.
- GABRISOVÁ A., HAVLICA J., SAHU S. 1991, *Stability of calcium sulphoaluminate hydrates in water solutions with various pH values*, «Cement and Concrete Research» Vol. 21 Issue 6, pp. 1023-1027.
- GHASEMZADEH F., ARCHER N.P. 2000, *Project portfolio selection through decision support*, «Decision Support Systems» Vol. 29 Issue 1, pp. 73-88.
- GOKCEOGLU C. 2002, *A fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strength of the Ankara agglomerates from their petrographic composition*, «Engineering Geology» Vol. 66 Issues 1-2, pp. 39-51.
- GOKCEOGLU C., ZORLU K. 2004, *A fuzzy model to predict the uniaxial compressive strength and the modulus of elasticity of a problematic rock*, «Engineering Applications of Artificial Intelligence» Vol. 17 Issue 1, pp. 61-72.
- GUILLETTE O. 1995, *Bioreceptivity: a new concept for building ecology studies*, «The Science of the Total Environment» Vol. 167 Issues 1-3, pp. 215-220.
- GUILLETTE O., DREESEN R. 1995, *Laboratory chamber studies and petrographical analysis as bioreceptivity assessment tools of building materials*, «The Science of the Total Environment» Vol. 167 Issues 1-3, pp. 365-374.
- GUPTA M.M. 1977, *Fuzzy-ism, the first decade*, in GUPTA M.M., SARIDIS G.N., GAINES B.R. (editors) «Fuzzy Automata and Decision Processes», Amsterdam: Elsevier North-Holland Publishing Co., pp. 5-10.
- HAWKING S.W. 1988, *Dal big bang ai buchi neri. Breve storia del tempo*, Milano: Rizzoli.
- HOUSTON E.C., SMITH J.V. 1997, *Assessment of rock quality variability due to smectite alteration in basalt using X-ray diffraction analysis*, «Engineering Geology» Vol. 46 Issue 1, pp. 19-32.
- IDORN G.M. 2005, *Innovation in concrete research-review and perspective*, «Cement and Concrete Research» Vol. 35 Issue 1, pp. 3-10.
- INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONSERVATION 2000, *The Charter of Kraków 2000—Principles for Conservation and Restoration of Build Heritage*.



- KANDEL A. 1986, *Fuzzy Mathematical Techniques with Applications*, Reading: Addison-Wesley Publishing.
- KAPLAN A., SCHOTT H.F. 1951, *A calculus for empirical classes*, «Methodos» Vol. 3, pp.165-188.
- KARAKUS M., TUTMEZ B. 2006, *Fuzzy and multiple regression modelling for evaluation of intact rock strength based on point load, Schmidt hammer and sonic velocity*, «Rock Mechanics and Rock Engineering» Vol. 39 Issue 1, pp. 45-57.
- KARRAT L., PERRUCHOT A., MACAIRE J.J. 1998, *Weathering of a Quaternary glass-rich basalt in Bakrit, middle Atlas Mountains, Morocco. Comparison with a glass-poor basalt*, «Geodinamica Acta» Vol. 11 Issue 5, pp. 205-215.
- KAYABASI A., GOKCEOGLU C., ERCANOGLU M. 2003, *Estimating the deformation modulus of rock masses: a comparative study*, «International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences» Vol. 40 Issue 1, pp. 55-63.
- KAUFMANN A., GUPTA M.M. 1988, *Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science*, Amsterdam: Elsevier.
- KORRES M. 1994, *The restoration of the Parthenon*, in ECONOMAKIS R. (editor) «Acropolis Restoration–The CCAM Interventions», London: Academy Editions.
- KOSKO B. 1994, *Fuzzy Thinking*, London: Flamingo.
- KURANO M., YASUDA M., NAKAGAMI J., YOSHIDA Y. 2000, *Ordering on convex fuzzy sets–A brief survey and new results*, «Journal of the Operation Research Society of Japan» Vol. 43 Issue 1, pp. 138-148.
- LI J., KWAIK M. 2004, *Complex systems and multi-scale methodology*, «Chemical Engineering Science» Vol. 59 Issues 8-9, pp. 1611-1612.
- LI J., ZHANG J., GE W., LIU X. 2004, *Multi-scale methodology for complex systems*, «Chemical Engineering Science» Vol. 59 Issues 8-9, pp. 1687-1700.
- LILLIU G. 1988, *La Civiltà dei Sardi, dal Paleolitico all'Età dei Nuraghi*, Torino: Nuova ERI.
- LILLIU G. 1992, *L'architettura nuragica*, «Atti del Convegno Scienza dei Materiali e Beni Culturali. Esperienze e Prospettive nel Restauro delle Costruzioni Nuragiche» Cagliari, pp. 1-7.
- LUKASIEWICZ J. 1930, *Selected Works*, in «Studies in Logic and the Foundations of Mathematics» 1970, Amsterdam: Burkowski ed.
- MALLOUCHOU-TUFANO F. 2006, *Thirty years of anastilosis works on the Athenian Acropolis, 1975-2005*, «Conservation and Management of Archaeological Sites» Vol. 8 Issue 1, pp. 27-38.
- MAMDANI E.H. 1977, *Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis*, «IEEE Transactions on Computers» Vol. C-26 Issue 12, pp. 1182-1191.
- MATALA S. 1995, *Effects of carbonation on the pore structure of granulated blast furnace slag concrete*, PhD Thesis, Rep. 6, Helsinki University of Technology, Faculty of the Civil Engineering and Surveying Concrete Technology.
- MAURO M. 1997, *Linee Guida del Ministero dei LL.PP. sul Calcestruzzo Strutturale*, «L'Industria Italiana del Cemento» Vol. 67 Issue 5, pp. 398-416.
- MCGRAW-HILL 1996, *Dictionary of Scientific and Technical Terms*, New York: McGraw-Hill.

- MELUCCO VACCARO A. 1987, *Progetti di interventi su reperti ed aree archeologiche nel cagliaritano ed oristanese–VILLANOVAFORRU (CA)–nuraghe Genna Maria. Ipotesi di intervento conservativo*, Roma: Ministero per i Beni Culturali e Ambientali, Istituto Centrale del Restauro.
- MELUCCO VACCARO A. 1991, *Villanovaforru (Ca), nuraghe Genna Maria. Parere sul progetto di restauro*, Roma: rapporto al direttore ICR.
- MELUCCO VACCARO A. 2000, *Archeologia e Restauro*, Roma: Viella.
- MENGER K. 1951, *Ensembles flou set fonctions aléatoires*, «Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de Paris» Vol. 232, pp. 2001-2003.
- MÖLLER B., GRAF W., NGUYEN S.H. 2004, *Modeling the life cycle of a structure using fuzzy processes*, «Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering» Vol. 19 Issue 3, pp. 157-169.
- MOROPOLOU A., THEOULAKIS P. 1991, *Conditions causing destructive NaCl crystallization into the porous sandstone, building material of the medieval city of Rhodes*, «Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin» Ginevra, pp. 493-499.
- MOTTERSHEAD D.N., BAILY B., COLLIER P. INKPEN R.J. 2003, *Identification and quantification of weathering by plant roots*, «Building and Environment» Vol. 38 Issues 9-10, pp. 1235-1241.
- NEVILLE A., BROOKS J. 1993, *Concrete Tecnology*, London: Longman.
- NKINAMUBANZI P.-C., AİTCIN P.-C. 2004, *Cement and superplasticizer combinations: compatibility and robustness*, «Cement, Concrete and Aggregates» Vol. 26 Issue 2, pp. 102-109.
- N.T.C. D.M. 14/09/2005, *Gazzetta Ufficiale, Serie Generale n°222, 23/09/2005*.
- OHNEMUELLER W. 1967, *The test method for determining the workability of building limes in the new version of DIN 1060*, «Zement-Kalk-Gips» Vol. 20 Issue 10, pp. 435-438.
- OTTINO J.M. 2003, *Complex Systems*, «AIChE Journal» Vol. 49 Issue 2, pp. 292-299.
- PECORINI G., POMESANO-CERCHI A. 1969, *Ricerche geologiche e biostratigrafiche sul Campidano meridionale (Sardegna)*, «Memorie della Società Geologica Italiana» Vol. 8 Issue 4, pp. 421-451.
- PEDEFERRI P., BERTOLINI L. 1996, *La Corrosione nel Calcestruzzo e negli Ambienti Naturali*, Milano: McGraw-Hill Libri Italia.
- PEIRCE C.S. 1931, *Collected Paper*. Cambridge: Harvard University Press.
- PENTTALA V. 1999, *Strains and pressures induced by freezing mortars exposed in sodium chloride solutions*, «Concrete Science and Engineering» Vol. 1 Issue 1, pp. 2-14.
- PENTTALA V., AL-NESHAWY F. 2002, *Stress and strain state of concrete during freezing and thawing cycles*, «Cement and Concrete Research» Vol. 32 Issue 9, pp. 1407-1420.
- PESCE G. 1972, *Nora. Guida agli Scavi*, Cagliari: Fossataro Editore.
- PETTIJOHN F.J., POTTER P.E., SIEVER R. 1972, *Sand and Sandstone*, 2<sup>nd</sup> edition, New York: Springer-Verlag.
- PIA G. 2005, *La roccia basaltica nelle costruzioni nuragiche. Caratterizzazione microstrutturale e tecnologica & aspetti di Archeologia sperimentale*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Cagliari, rel. Prof. U. SANNA.

- PIA G., SANNA U., SPANU N. 2006 A, *Sviluppo di modelli di durabilità dei materiali tramite elementi di logica e di matematica fuzzy*, «Atti dell’VIII Convegno Nazionale AIMAT» Palermo.
- PIA G., SANNA U., SPANU N. 2006 B, *Una fuzzy Knowledge Base fondata sui dati di tre decenni di interventi e di studi sulla durabilità dei materiali del sito archeologico Genna Maria (Sardegna)*, «Atti dell’VIII Convegno Nazionale AIMAT» Palermo.
- PRICE C.A. 1996, *Stone Conservation. An Overview of Current Research*, Santa Monica: The Getty Conservation Institute.
- PUCINOTTI R. 2005, *Indagini non distruttive nella valutazione del degrado di elementi strutturali in cemento armato*, «L’Industria Italiana del Cemento» Vol. 75 Issue 6, pp. 446-459.
- RANELLUCCI S. 1996, *Strutture Protettive e Conservazione dei Siti Archeologici*, Pescara: Carsa Edizioni.
- RIBEIRO R.A. 1996, *Fuzzy multiple attribute decision making: a review and new preference elicitation techniques*, «Fuzzy Sets and Systems» Vol. 78 Issue 2, pp. 155-181.
- ROSSI MANARESI R., TUCCI A. 1989, *Pore structure and salt crystallization. “Salt decay” of Agrigento biocalcarenite and ‘case hardening’ in sandstone*, «Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin» Bari, pp. 97-100.
- ROUSSEL N. 2005, *Steady and transient behaviour of fresh cement pastes*, «Cement and Concrete Research» Vol. 35 Issue 9, pp. 1656-1664.
- RUAN D. (editor) 2000, *Fuzzy Systems and Soft Computing in Nuclear Engineering*, Heidelberg: Physica Verlag.
- RUSSELL B. 1923, *Vagueness*, «Australian Journal of Philosophy» Vol. 1, pp. 84-92.
- SANGALLI A. 2000, *L’Importanza di Essere Fuzzy. Matematica e Computer*, Torino: Bollati Boringhieri.
- SAR SARDEGNA 2006, [www.sar.sardegna.it](http://www.sar.sardegna.it).
- SCHERER G.W. 1999, *Crystallization in pores*, «Cement and Concrete Research» Vol. 29 Issue 8, pp. 1347-1358.
- SEQUI P. (a cura di) 2005, *Fondamenti di Chimica del Suolo*, Bologna: Patron Editore, pp. 176-206.
- SHIM J.P., WARKENTIN M., COURTNEY J.F., POWER D.J., SHARDA R., CARLSONN C. 2002, *Past, present, and future of decision support technology*, «Decision Support Systems» Vol. 33 Issue 2, pp. 111-126.
- SHULSON E.M. 1988, *Ice: mechanical properties*, in CAHN R.W. (editor) «Encyclopedia of Materials Science and Engineering. Supplementary volume 1», Oxford: Pergamon Press, pp. 229-238.
- SIGNORINI M.A. 1996, *L’Indice di Pericolosità: un contributo del botanico al controllo della vegetazione infestante nelle aree monumentali*, «Informatore Botanico Italiano» Vol. 28, pp. 7-14.
- SMUTS J.C. 1926, *Holism and Evolution*, London: Macmillan.

- SONMEZ H., GOKCEOGLU C., ULUSAY R. 2003, *An application of fuzzy sets to the Geological Strength Index (GSI) system used in rock engineering*, «Engineering Applications of Artificial Intelligence» Vol. 16 Issue 3, pp. 251-269.
- SPANO G. 1854, *Memorie sopra i Nuraghi della Sardegna*, Cagliari: Tipografia Nazionale.
- SPANO C., BARCA S., CASU L., MUNTONI A. 2002, *Ridefinizione biostratigrafia e geocronologica delle unità formazionali neogeniche della Sardegna centrale (Italia)*, «Rendiconti del Seminario della Facoltà di Scienze della Università degli Studi di Cagliari» Vol. 72 Issue 1, pp. 121-134.
- STANLEY-PRICE N.P., JOKILEHTO J. 2001, *The decision to shelter archaeological sites. Three case-studies from Sicily*, «Conservation and Management of Archaeological Sites» Vol. 5 Issue 1, pp. 19-34.
- TATTERSALL G.H. 1955, *The rheology of Portland cement paste*, «British Journal of Applied Physic» Vol. 6 Issue 5, pp. 165-167.
- TATTERSALL G.H., BANFILL P.F.G. 1983, *The Rheology of Fresh Concrete*, Boston: Pitman Advanced Publishing Program.
- TAYLOR A.F.W. 1977, *Cement Chemistry*, 2<sup>nd</sup> edition, London: Telford.
- TOULOUKIAN Y.S., JUDD W.R., ROY R.F. 1981, *Physical Properties of Rocks and Minerals*, New York: McGraw-Hill.
- TRAN L., DUCKSTEIN L. 2002, *Comparison of fuzzy numbers using a fuzzy distance measure*, «Fuzzy Sets and Systems» Vol. 130 Issue 3, pp. 331-341.
- TRONCHETTI C. 1984, *The Cities of Roman Sardinia*, in BALMUTH M.S. & ROWLAND R.J. (editors) «Studies in Sardinian Archaeology I», Ann Arbor: The University of Michigan Press, pp. 237-283.
- TRONCHETTI C. 1986, *Nora*, Sassari: Carlo Delfino Editore.
- TSIMAS S., RAIKOS K. 1995, *Lime, an irreplaceable mortar constituent*, «ZKG International» Vol. 48 Issue 6, pp. 350-356.
- TURRIZIANI P. 1974, *Leganti aerei*, Cagliari: Tipografia Trois.
- UGAS G.B. 1984, *Comunicazione al Soprintendente, Oggetto: VILLANOVAFORRU, Genna Maria, Cagliari*.
- UNESCO 2006, <http://whc.unesco.org/> .
- UNI 8635-11 1984, *Edilizia. Prove di prodotti per coperture discontinue. Determinazione della gelività con cicli alterni*
- UNI 8635-12 1984, *Edilizia. Prove di prodotti per coperture discontinue. Determinazione della gelività con porosimetro.*
- UNI 10859 2000, *Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali – Determinazione dell'assorbimento d'acqua per capillarità.*
- UNI 7087 2002, *Calcestruzzo – Determinazione della resistenza al degrado per cicli di gelo e disgelo.*
- UNI EN 206/1 2001, *Calcestruzzo. Specificazione, prestazioni, produzione e conformità.*
- UNI EN 459/1 2002, *Calci da costruzione – Definizioni, specifiche e criteri di conformità.*

- UNI EN 459/2 2002, *Calci da costruzione – Metodi di prova.*
- UNI 11040 2003, *Calcestruzzo autocompattante – Specifiche, caratteristiche e controlli.*
- UNI 11041 2003, *Determinazione dello spandimento e del tempo di spandimento.*
- UNI 11043 2003, *Determinazione dello scorrimento confinato mediante scatola a L.*
- UNI 11044 2003, *Determinazione dello scorrimento confinato mediante scatola a U.*
- UNI 11060 2003, *Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali – Determinazione della massa volumica e della percentuale di vuoti.*
- UZOMAKA O.J. 1974, *A concrete rheometer and its application to a rheological study of concrete mixes*, «Rheological Acta» Vol. 13 Issue 1, pp. 12-21.
- VAROUFAKIS G.J. 1992, *The iron clamps and dowels from the Parthenon and Erechthion*, «The Journal of the Historical Metallurgy Society» Vol. 26 Issue 1, pp. 1-18.
- VENKATASUBRAMANIAN V., POLITIS D.N., PATKAR P.R. 2006, *Entropy maximization as a holistic design principle for complex optimal networks*, «AIChE Journal» Vol. 52 Issue 3, pp. 1004-1009.
- VIGNOLA M. 2003, *Il Processo Decisionale Manageriale. Un'Applicazione del Sistema Esperto Fuzzy*, Milano: FrancoAngeli.
- VITRUVIO, *De Architectura, Libro Settimo*, a cura di GROSS P. 1997, Vol. II, Torino: Giulio Einaudi editore, pp. 1032-1033.
- VOXMAN W. 1998, *Some remarks on distances between fuzzy numbers*, «Fuzzy Sets and Systems» Vol. 100 Issues 1-3, pp. 353-365.
- WANG X., KERRE E.E. 2001, *Reasonable properties for the ordering of fuzzy quantities (I)*, «Fuzzy Sets and Systems» Vol. 118 Issue 3, pp. 375-385.
- WEBSTER G.S. 1996, *A Prehistory of Sardinia 2300-500 BC*, Sheffield: Sheffield Academy Press.
- WEIL H. 1940, *The ghost of modality*, «Philosophical essays in memory of Edmund Husserl», Cambridge: MA, pp. 278-303.
- WEI X., WANG C.Y., ZHOU Z.H. 2003, *Study on the fuzzy ranking of granite sawability*, «Journal of Materials Processing Technology» Vol. 139 Issues 1-3, pp. 277-280.
- WITTNEBEN U. 1980, *Investigations on the particle properties of suspended hydrated limes*, «Zement-Kalk-Gips» Vol. 33 Issue 10, pp. 526-534.
- WOLTER A., LUGER S., SCHAEFER G. 2004, *The kinetics of the hydration of quicklime*, «ZKG International» Vol. 57 Issue 8, pp. 60-68.
- WORLD TOURISM 2006, <http://www.world-tourism.org/>.
- XIROGIANNIS G., STEFANO J., GLYKAS M. 2004, *A fuzzy cognitive map approach to support urban design*, «Expert Systems with Applications» Vol. 26 Issue 2, pp. 257-268.
- YAMAKAWA T. 1989, *Stabilization of an Inverted Pendulum by a High-Speed Fuzzy Logic Controller Hardware System*, «Fuzzy Sets and Systems» Vol. 32 Issue 2, pp. 161-180.

- YEH C., DENG H. 2004, *A practical approach to fuzzy utilities comparison in fuzzy multicriteria analysis*, «International Journal of Approximate Reasoning» Vol. 35 Issue 2, pp. 179-194.
- YUZHUO Z. 1994, *Fuzzy theory of rock strength and its application*, «Journal of China Coal Society» Vol. 19, pp. 450-455.
- ZADEH L.A. 1962 *From circuit theory to system theory*, «Proceedings of Institution of Radio Engineers» 50, pp. 856-865.
- ZADEH L.A. 1965, *Fuzzy Sets*, «Information and Control» Vol. 8 Issue 3, pp. 338-353.
- ZADEH L.A. 1973, *Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes*, «IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics» 3, pp. 28-44.
- ZADEH L.A. 1975 A, *The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning I*, «Information Science», Vol. 8 Issue 3, pp. 199-249.
- ZADEH L.A. 1975 B, *The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning II*, «Information Science», Vol. 8 Issue 4, pp. 301-357.
- ZADEH L.A. 1975 C, *The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning III*, «Information Science», Vol. 9 Issue 1, pp. 43-80.
- ZUBER B., MARCHAND J. 2000, *Modeling the deterioration of hydrated cement systems exposed to frost action. Part 1: Description of the mathematical model*, «Cement and Concrete Research» Vol. 30 Issue 12, pp. 1929-1939.

## APPENDICE: Modello fisico-matematico della gelività di Zuber-Marchand [2000]

Il modello della gelività di ZUBER & MARCHAND [2000], di seguito ZM, presentato su “Cement and Concrete Research” (Special Issue «Symposium on Transport Properties and Microstructure of Cement-Based Systems, Boston 1999») è un ottimo esempio dell’approccio tradizionale a questo problema. Esso sarà pertanto criticamente illustrato in questa Appendice.

Il modello è articolato nei seguenti termini: cinetico (trasporto di materia), termodinamico (condizioni per la trasformazione liquido-solido) e meccanico (relazione sforzi-deformazioni). Il sistema di equazioni risultante dovrebbe consentire la valutazione della quantità di ghiaccio e delle conseguenti pressioni locali esercitate dalla gelificazione, in funzione della temperatura e del tempo.

Il sistema è considerato costituito da tre fasi: acqua liquida (l), ghiaccio (s) e scheletro (solido) del materiale (ss). Il fenomeno si svolge nel dominio della microporosità con i pori assunti cilindrici, ed in sostanza nell’ambito della metodica porosimetrica MIP. Vengono quindi trascurati i fenomeni di ‘incuneamento’ dovuti alla gelificazione delle parti esterne delle lesioni prossime all’ambiente meteorico, che giocano certamente un ruolo critico nei materiali litici (diaciasi) come può vedersi in figura 4.46 del paragrafo II-4.3.2, ma che sono significativi anche su materiali quali quelli cementizi, in particolare sui calcestruzzi, come indicato da CHATTERJI [2000].

L’aspetto cinetico del fenomeno, secondo ZM, comprende le due equazioni differenziali che esprimono il bilancio di massa del liquido e del solido, su un elemento infinitesimo di volume, essendo  $dm$  la massa di acqua che si trasforma da liquido a solido nel tempo  $dt$ :

La numerazione delle relazioni segue quella dell’articolo originario.

$$-\frac{1}{S_l \rho_l} \frac{1}{V} \frac{dm}{dt} = \frac{n}{\rho_l} \frac{d\rho_l}{dt} + \frac{n}{S_l} \frac{dS_l}{dt} + \frac{dn}{dt} + \frac{1}{S_l} \operatorname{div} \mathbf{j}_l + \frac{\mathbf{j}_l}{S_l \rho_l} \operatorname{grad} \rho_l \quad (6 \text{ ZM})$$

$$+\frac{1}{S_s \rho_s} \frac{1}{V} \frac{dm}{dt} = \frac{n}{\rho_s} \frac{d\rho_s}{dt} + \frac{n}{S_s} \frac{dS_s}{dt} + \frac{dn}{dt} \quad (8 \text{ ZM})$$

In queste equazioni  $n$  è la porosità totale del materiale (si noti che ZM assumono in generale che la porosità sia una funzione del tempo e quindi una variabile dello svolgersi del fenomeno di gelificazione);

$S_l$  e  $S_s$  sono le frazioni volumiche dei vuoti occupati rispettivamente dall’acqua liquida e dal ghiaccio ( $S_l + S_s = 1$ );

$\rho_l$  e  $\rho_s$  sono la densità del liquido e del ghiaccio; essendo  $\alpha$  il coefficiente di dilatazione termica (isobarico) e  $1/K$  la compressibilità (isotermica) l’andamento nel tempo delle densità è esprimibile con le relazioni:

$$\frac{1}{\rho_l} \frac{d\rho_l}{dt} = -\alpha_l \dot{T} + \frac{1}{K_l} \dot{p}_l \quad (39 \text{ ZM})$$

$$\frac{1}{\rho_s} \frac{d\rho_s}{dt} = -\alpha_s \dot{T} + \frac{1}{K_s} \dot{p}_s \quad (40 \text{ ZM})$$

essendo  $\dot{T}$  e  $\dot{p}$  le variazioni della temperatura e delle pressioni nel tempo. Nella realtà i valori di  $\dot{T}$  sono piuttosto bassi (tra 1.7 e 5°C/ora, in Svezia: dati da [CHATTERJI 1999 A, B]) mentre nelle simulazioni di laboratorio sono decisamente drastiche. ZM assumono (Tabella 1 ZM) per i coefficienti di dilatazione termica le relazioni:

$$\alpha_s(\theta) = 5.5 \left( 1 + \frac{\theta}{200} \right) 10^{-5} \quad \text{e} \quad \alpha_l(\theta) = (-9.2 + 2.07\theta) 10^{-5}$$

essendo  $\theta$  la temperatura espressa in gradi Celsius;

$$j_l \text{ è il flusso secondo Darcy, essendo } p_l \text{ la pressione del liquido:} \quad j_l = -\frac{D}{\eta_l} \text{grad } p_l \quad (4 \text{ ZM})$$

con  $\eta_l$  viscosità interstiziale dinamica e D permeabilità del mezzo poroso. Entrambi i termini sono facili da definirsi ma piuttosto problematici da determinare sperimentalmente, se non nei casi banali ma poco utili di microstrutture molto aperte.

L'**aspetto termodinamico** del modello ribadisce la nota assunzione che il processo interessa inizialmente i pori di maggiore dimensione  $r$  della superficie esterna e successivamente si propaga nella struttura del solido, interessando poi i pori di raggio più piccolo al calare di  $T$ .

Vengono richiamate le considerazioni termodinamiche che legano le dimensioni del raggio dei pori alla temperatura di solidificazione (formazione del ghiaccio), equazione 9 ZM, una forma peraltro analoga a quella di BLACHERE & YOUNG [1972].

La pressione esercitata dal ghiaccio sulle pareti di un poro di raggio  $r$  è dato dalla somma della pressione dell'acqua liquida  $p_l$  e della pressione capillare espressa dalla relazione:

$$\pi_s(r, t) = p_l(t) + \chi(r, t) \quad (23 \text{ ZM})$$

essendo:

$$\chi(r, t) = 2\gamma_{li}(t) \left( \frac{1}{R_{eq}(t)} - \frac{1}{r - \delta(t)} \right) \quad (24 \text{ ZM})$$

Quest'ultima espressione è simile alla relazione 'statica' derivata da EVERETT [1961] e utilizzata da numerosi ricercatori sia per interpretare fenomeni espansivi derivanti dalla formazione del ghiaccio, che dalla cristallizzazione salina [ROSSI MANARESI & TUCCI 1989; MOROPOLOU & THEOULAKIS 1991; ATZENI, CHISSALÈ, MASSIDDA, SANNA 1997].

La trattazione di ZM trascura il creep del ghiaccio sottoposto a pressione [BLACHERE & YOUNG 1974; SCHULSON 1988].



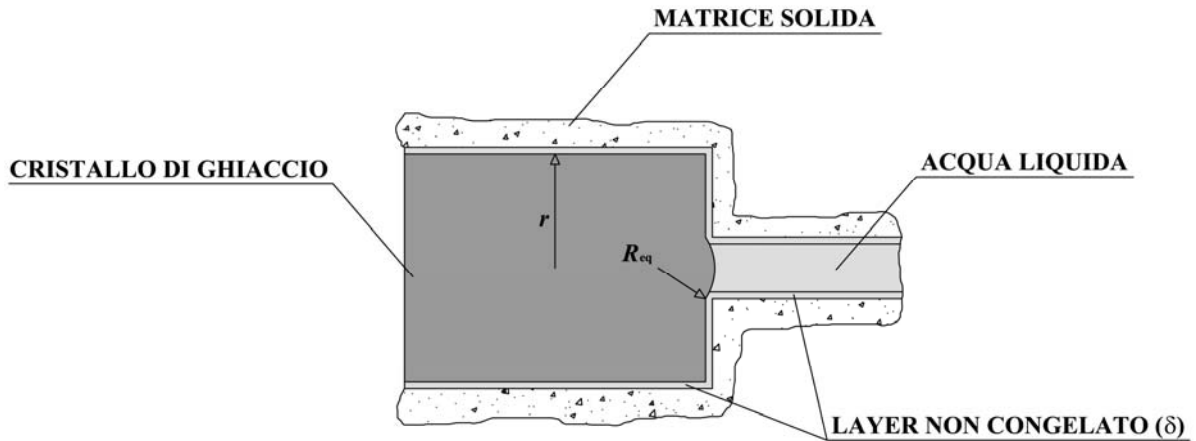


Figura 1 - Schematizzazione del processo di congelamento nella matrice porosa, rielaborazione da [ZUBER & MARCHAND 2000]; una rappresentazione analoga (senza il layer  $\delta$ ) si può trovare in [BLACHERE & YOUNG 1974].

Rispetto a quanto sviluppato da Everett, la 24 ZM ha l'ambizione di seguire il fenomeno nel tempo ed introduce una correzione sul valore del raggio di uno spessore  $\delta$ , per il quale è fornita l'equazione 11 ZM. L'interesse di questa novità è dubbia: già l'originario proponente FAGERLUND [1973] osservava che per temperature comprese tra 0 e  $-25^{\circ}\text{C}$  il valore di  $\delta$  era trascurabile. Inoltre i valori dei raggi sono definiti da misure porosimetriche che nel caso di materiali cementizi sono fatte generalmente con tecnica MIP o BET e l'imprecisione di queste misure rende francamente discutibile la necessità di introdurre questo tipo di correzione.

Il raggio di curvatura  $R_{eq}$  dell'interfaccia liquido-ghiaccio è responsabile della differenza di pressione tra le due fasi (capillarità); il raggio del poro  $R_{peq}$  all'interno del quale si propaga la gelificazione è dato da:

$$R_{eq}(T) = R_{peq}(T) - \delta(T) \quad (10 \text{ ZM})$$

e rappresenta un valore limite del raggio, associato ad un preciso valore di temperatura  $T$ : affinché il ghiaccio si propaghi su pori di raggio minore è necessario che la temperatura scenda al di sotto di  $T$ . Ancora una volta questa relazione è sostanzialmente quella proposta da EVERETT [1961] e da BLACHERE & YOUNG [1972]. Il modello ZM però distingue tra i valori di  $R_{peq}$  determinati per la fase di congelamento (gradiente di temperatura  $< 0$ ) e quella di fusione (gradiente di  $T > 0$ ), adottando per questi le espressioni fornite da MATALE [1995]:

$$\dot{T} < 0 \quad R_{peq} = 0.584 + 0.0052 \theta - \frac{63.46}{\theta} \quad (12 \text{ ZM})$$

$$\dot{T} > 0 \quad R_{peq} = 0.757 + 0.0074 \theta - \frac{33.45}{\theta} \quad (13 \text{ ZM})$$

Al trascorrere del tempo, con un dato gradiente di  $T$ , la formazione del ghiaccio interessa quindi pori di raggio sempre minore. Il volume  $V$  di ghiaccio formatosi in un intervallo di tempo  $dt$  corrisponde a quello compreso tra i pori (cilindrici)  $R_{peq}(t + dt)$  e  $R_{peq}(t)$ :

$$\Phi(t) = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} = \int_{R_{peq}(t)}^{R_{peq}(t+dt)} \frac{d\varphi}{dr} \left(1 - \frac{\delta}{r}\right)^2 dr = \rho_s \frac{1}{V} \frac{dm}{dt} \quad (\text{elaborazione 17, 18, 19 ZM})$$

essendo  $\varphi(r) = \int_r^\infty \frac{d\varphi}{dr} dr$  la distribuzione dimensionale dei vuoti. (14 ZM)

Il processo di formazione del ghiaccio può indurre differenze locali (nello spazio) e transitorie (nel tempo) nello stato tensionale del materiale.

Si ponga  $p^*$  la pressione media esercitata dai cristalli di ghiaccio e dal liquido, quindi  $p^*$  può essere assunta come la media pesata su tutte le classi dimensionali dei pori (ad ogni raggio  $r_k$  è quindi associato un volume  $v_k$  ed una pressione  $p_k$ ):

$$p^* = \sum_k p_k \frac{v_k}{V_p} \quad (25 \text{ ZM})$$

Questa assunzione è stata fatta anche da FITZNER & SNETHLAGE [1982] ed è stata utilizzata congiuntamente al semplice criterio di rottura **pressione > resistenza di trazione**. Anche BAZANT, CHERN, ROSENBERG, GAIDIS [1988] utilizzano questo criterio sottolineando però che la resistenza a trazione del materiale tende progressivamente ad abbassarsi per la somma dei danneggiamenti introdotti nella struttura al succedersi dei cicli gelo-disgelo.

Combinando le equazioni opportune si ottiene:

$$p^* = p_l + \frac{1}{n} \int_{R_{peq}(t)}^\infty \chi(r,t) \frac{d\varphi}{dr} dr . \quad (28 \text{ ZM})$$

A questo punto ZM, rinunciando alla loro assunzione iniziale che la porosità  $n$  sia una funzione del tempo, derivano la relazione:

$$\dot{p}^* = \dot{p}_l + \frac{1}{n} \int_{R_{peq}(t)}^\infty \dot{\chi}(r,t) \frac{d\varphi}{dr} dr \quad (29 \text{ ZM})$$

Ora che è stata definita l'espressione della pressione nella matrice porosa, ZM considerano l'**aspetto meccanico** del problema, definendo la relazione tra sforzi e deformazioni dalla quale infine si potrebbero derivare le condizioni per la rottura del materiale; peraltro non è chiaro quale criterio di rottura venga proposto e neppure è chiaro se prendano in considerazione l'effetto della concentrazione degli sforzi nei punti apicali della microstruttura porosa [SCHERER 1999].

ZM assumono che lo stato tensionale del materiale derivi dal contributo della fase fluida presente nel materiale e da quello dello scheletro. Quindi la relazione tra il tensore elastico  $\sigma_{ss}$  (dello scheletro), quello totale  $\sigma$  (del solido poroso) e la pressione media  $p^*$  è dato dalla relazione:

$$\sigma = \sigma_{ss} - b p^* \mathbf{U} \quad (31 \text{ ZM})$$

$\mathbf{U}$  è il tensore unitario:

il segno meno deriva dal fatto che tradizionalmente si riserva il segno + alle sollecitazioni di compressione;

$b$  è il coefficiente di Biot, dato dalla relazione:

$$b = 1 - \frac{K}{K_{ss}} \quad (32 \text{ ZM})$$

Essendo  $K$  e  $K_{ss}$  rispettivamente i moduli del solido poroso (drenato) e quello dello scheletro; la determinazione di quest'ultimo presenta evidentemente una notevole difficoltà pratica. In assenza di una determinazione sperimentale ZM propongono di valutare  $K$  e  $K_{ss}$  con le relazioni:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (50 \text{ ZM})$$

$$K_{ss} = \frac{K}{(1-n)^3} \quad (51 \text{ ZM})$$

$E$  è il modulo elastico longitudinale,  $K$  è il modulo elastico volumico ( $1/K$  è la compressibilità volumica). ZM assumono questi valori non dipendenti dalla temperatura  $T$ .

Per quanto quindi concerne le deformazioni il corrispondente tensore  $\boldsymbol{\varepsilon}$ , riferito al materiale poroso nella sua globalità, viene considerato somma dei termini elastico, termico e di un eventuale componente irreversibile:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^t + \boldsymbol{\varepsilon}^{ir} \quad (34 \text{ ZM})$$

Per deformazioni infinitesime esiste un legame tra le velocità  $\mathbf{u}$  delle particelle dello scheletro e la velocità di deformazione  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ :

$$\text{div } \mathbf{u} = \text{tr} \left( \frac{d\boldsymbol{\varepsilon}}{dt} \right) \quad (35 \text{ ZM})$$

L'equazione costitutiva dello scheletro, quindi la variazione della sua densità nel tempo, è funzione della temperatura, della pressione e dello stato tensionale, secondo la 42 ZM.

Infine, secondo ZM, la velocità di formazione del ghiaccio e del conseguente stato tensionale sono la soluzione del sistema:

$$\begin{cases} \beta \dot{p}_1 = \text{div} \left( \frac{D}{\eta_1} \text{grad } p_1 \right) + S \\ \text{div } \boldsymbol{\sigma} = 0 \end{cases} \quad (45 \text{ 46 ZM})$$

che derivano dalla sostituzione dei termini delle equazioni sino ad ora viste, con:

$$\beta = \frac{nS_l}{K_l} + \frac{nS_i}{K_i} + \frac{b-n}{K_s} \quad (47 \text{ ZM})$$

$$S = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_l}\right) \Phi(t) + \bar{\alpha} \dot{T} - \frac{b-n}{K_{ss}} \dot{X} - \frac{nS_s}{K_s} \dot{k} - b \operatorname{div} \mathbf{u} + \frac{D}{\eta_l \rho_l} \operatorname{grad} \eta_l \operatorname{grad} \rho_l \quad (48 \text{ ZM})$$

$$\bar{\alpha} = nS_l \alpha_l + nS_s \alpha_s + (b-n) \alpha_{ss} \quad (49 \text{ ZM})$$

In conclusione ZM sottolineano che la natura intricata del sistema di equazioni deriva dalla loro scelta di tenere congiuntamente in conto la risposta meccanica del solido e il fenomeno di trasporto del liquido entro la microstruttura porosa. La soluzione del sistema può essere attuata solo per via numerica, ad esempio utilizzando il metodo agli elementi finiti; tuttavia questa parte della ricerca e quindi il confronto tra le predizioni del modello ed i dati sperimentali sono stati rimandati ad una successiva pubblicazione. Finora tali risultati non sono ancora stati pubblicati.