

Indagini geologiche e geofisiche per la conservazione della tomba affrescata di Bayt Ras (Giordania)

Geological and geophysical investigations for the conservation of the painted tomb of Bayt Ras (Jordan)

DELMONACO Giuseppe, PUZZILLI Luca Maria, TRAVERSA Francesco

RIASSUNTO - Il presente lavoro riporta i risultati di uno studio geologico-tecnico e geofisico condotto a supporto degli interventi di restauro conservativo dell'ipogeo romano di Bayt Ras (Giordania), rinvenuto accidentalmente nel 2016. La struttura, risalente al II sec. d.C., riccamente affrescata ed ancora in discreto stato di conservazione, presenta tuttavia numerose fratture rinvenute lungo il settore est, in corrispondenza dell'originale porta di accesso, che hanno provocato il distacco dell'intonaco nella volta e la perdita di una parte degli affreschi. Le indagini geofisiche hanno anche permesso di analizzare ed identificare una serie di anomalie riconducibili a potenziali ulteriori strutture sepolte, collocate nell'intorno della struttura. Gli studi geologico-tecnici sono stati finalizzati alla ricostruzione delle caratteristiche litologiche, strutturali e geomeccaniche del materiale lapideo nel quale l'ipogeo è stato ricavato e ad una analisi preliminare sulle condizioni di stabilità.

PAROLE CHIAVE: cavità sotterranea, geofisica, georadar, geologia applicata, archeologia, restauro, Giordania

ABSTRACT - The paper reports the main results of an engineering geological and geophysical investigation carried out in support of urgent restoration and conservation works of the Roman Tomb of Bayt Ras (Jordan), recently discovered in 2016. The 2nd c. AD hypogeum, ornately painted and in a general good state of conservation, presents in the eastern side, close to the original access door, numerous discontinuities that have caused the detachment and loss of parts of the paintings. The geophysical investigation carried out around the area of the hypogeum have also detected a set of anomalies that can be associated to potential underground structures. Engineering geological analyses have reconstructed the lithological, structural and geomechanical characteristics of the limestone forming the hypogeum as well as a preliminary assessment of the stability conditions of the structure.

KEY WORDS: underground cavity, geophysics, ground-penetrating radar, engineering geology, archaeology, restoration, Jordan

1. - INTRODUZIONE

Il presente lavoro descrive le metodologie, gli obiettivi ed i risultati di investigazioni geologiche, geotecniche e geofisiche condotte da ISPRA a supporto del Dipartimento delle Antichità della Giordania e finalizzate al restauro, conservazione e valorizzazione della tomba affrescata di Bayt Ras (Giordania).

Bayt Ras è situata nel nord della Giordania, nell'estrema periferia nord di Irbid a circa 100 km a nord di Amman (Fig. 1a). Bayt Ras corrisponde all'antica Capitolias, una delle Decapoli fondate nel periodo ellenistico ed annesse all'Impero Romano in epoca traiana nel 106 d.C. (PLINIO IL VECCHIO, 74). Ad oggi, sono ancora visibili a Bayt Ras il teatro romano ed alcune rovine ad esso adiacenti; la forte ur-

banizzazione degli ultimi 30 anni ha di fatto ricoperto molte tracce dell'antica Capitolias (il basolato lungo gli antichi tracciati stradali, tombe, cisterne, ecc.) che però ritornano accidentalmente alla luce in occasione di scavi effettuati per la costruzione di nuovi abitati ed altre opere di urbanizzazione. Nel novembre 2016, durante uno scavo stradale, è stata rinvenuta una struttura ipogea formata da due stanze sepolcrali, attribuita al periodo di fondazione della città (inizi II sec. d.C.), riccamente affrescata ed ancora in discreto stato di conservazione (Fig. 2). La struttura ipogea si trova a poca distanza da un'altra tomba, scoperta nel 1972 ed attualmente chiusa al pubblico. L'ipogeo, scavato all'interno di una roccia calcarea ed orientato in corrispondenza dei punti cardinali, è costituito da tre settori distinti (Fig. 1c). La camera principale (I), delle dimensioni di 6,7x5,7

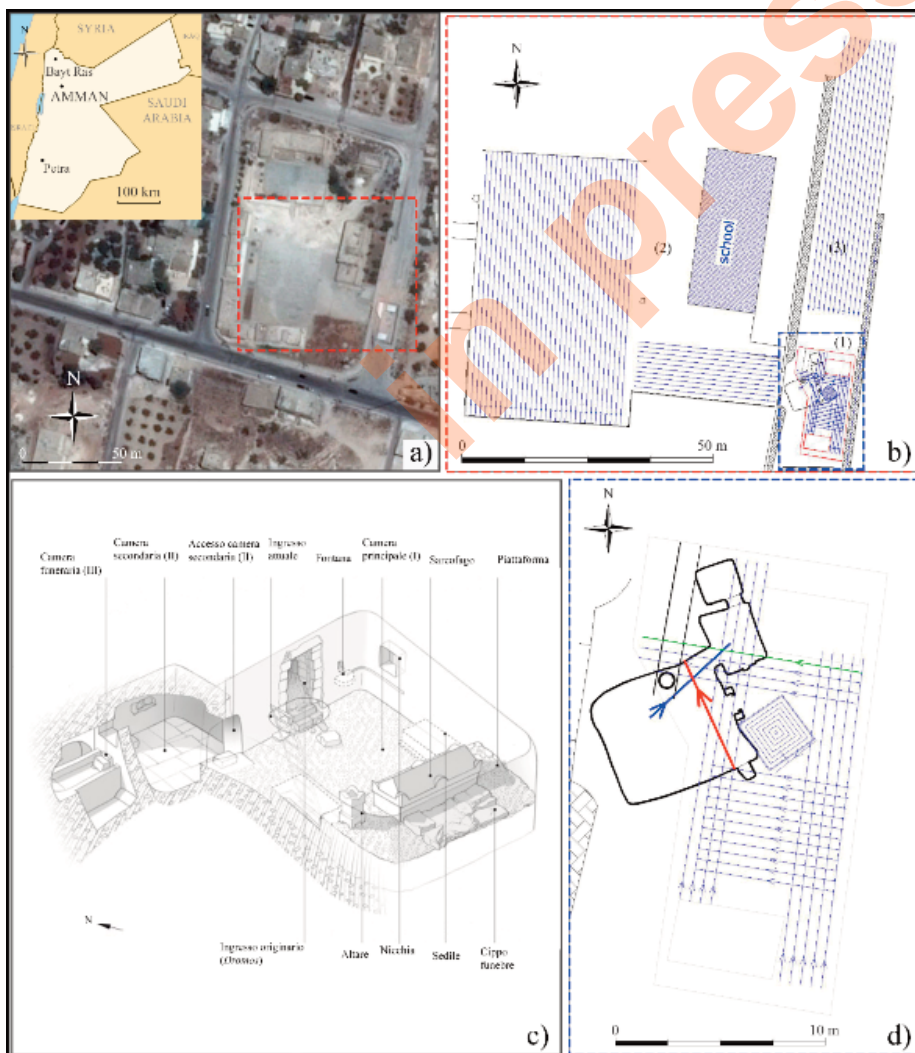


Fig.1 - (a) Ubicazione di Bayt Ras (Giordania); (b) settori investigati con indagini GPR; (c) ricostruzione isometrica dell'ipogeo (fonte: IFPO); (d) planimetria dell'area dell'ipogeo; le linee blu e rossa indicano investigazioni GPR all'interno della struttura.

- (a) Location of Bayt Ras (Jordan); (b) sectors surveyed with GPR; (c) isometric reconstruction of the hypogeum (source: IFPO); (d) plan of the area of the hypogeum; the blue and red lines correspond to GPR survey inside the structure.

m ed un'altezza di circa 3,5 m dal pavimento in lastre calcaree originario, presenta pareti e soffitto riccamente affrescati con dipinti mitologici, immagini e 65 iscrizioni in lettere greche che richiamano alla fase

di costruzione dell'antica Capitolias. All'interno della camera principale, nel lato occidentale, è collocato un sarcofago in basalto, al di sopra di una piattaforma in muratura e decorato con due teste di leone

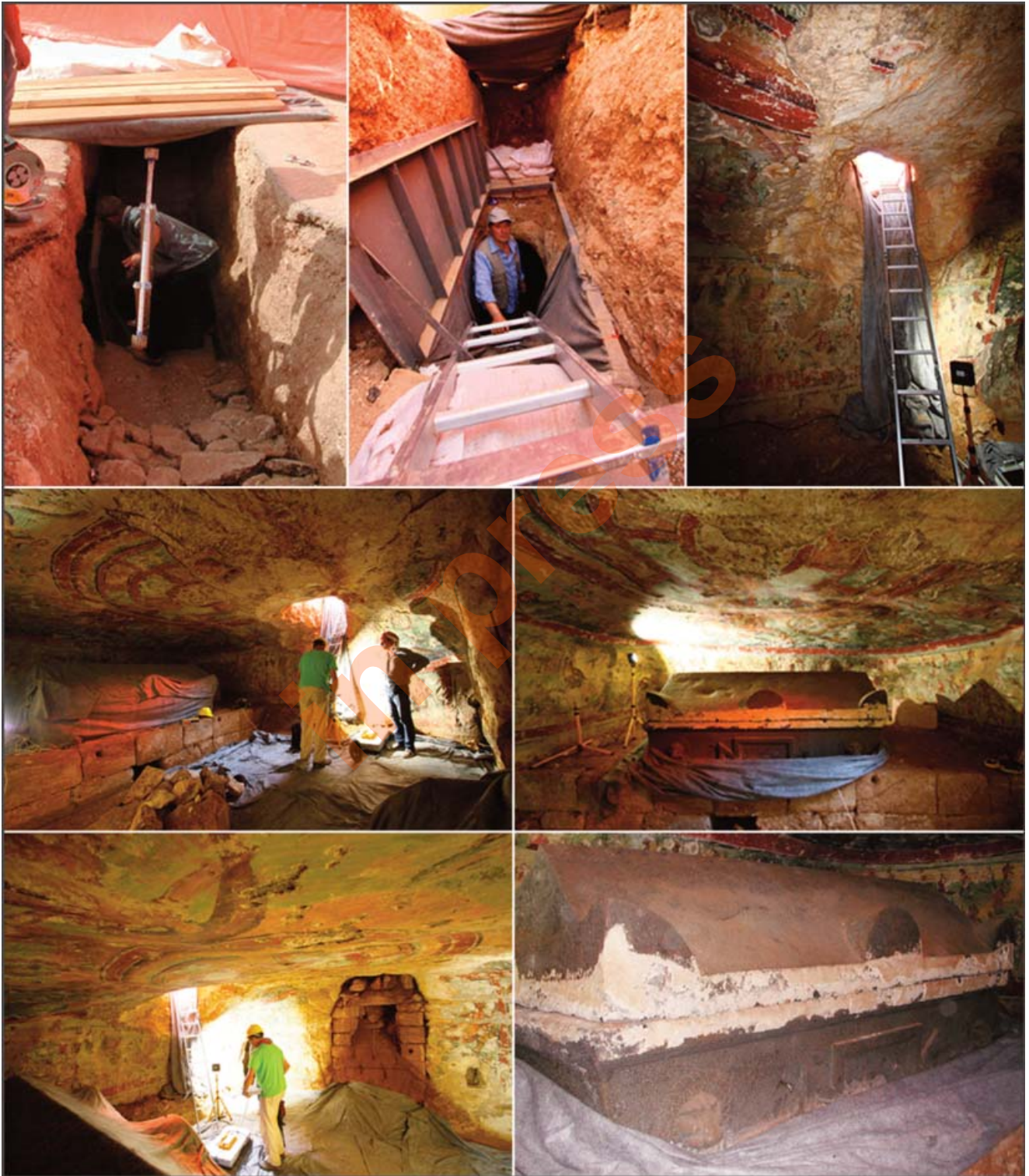


Fig. 2 - Accesso temporaneo e vista dell'interno dell'ipogeo di Bayt Ras; sono visibili il sarcofago in basalto e gli affreschi nelle pareti e nella volta della struttura.
- Temporary entrance and view of the hypogeum of Bayt Ras; the basalt sarcophagus, and frescoes in the walls and ceiling are well visible.

ed una tabula ansata che riporta il nome del proprietario della tomba. All'interno del sarcofago sono stati rinvenuti ossa umane appartenenti a 10 individui. Una stretta apertura nell'angolo NE della camera principale conduce ad una stanza rettangolare più piccola (II), con un soffitto ribassato e pareti rivestite di intonaco bianco. La parete posta a nord di questa seconda stanza presenta un'apertura che conduce ad uno ambiente funerario (III). Lo stipite è costituito da muratura grezza mentre l'architrave è stato ricavato intagliando un blocco di roccia calcarea più grande. All'interno della camera funerarie sono stati rinvenuti resti ossei di altri 14 individui ed altri oggetti ornamentali.

La camera principale dell'ipogeo presenta numerose fratture rinvenute lungo il settore est, in corrispondenza dell'originale porta di accesso, che hanno provocato il distacco dell'intonaco nella volta e la perdita di una parte degli affreschi.

2. - INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOTECNICO

L'ipogeo è ubicato nel cuore dell'antica Capitolias ($32^{\circ}35'52,90''N$; $35^{\circ}51'40,45''E$), in un'area oggetto di recente sviluppo urbanistico. L'entrata dell'ipogeo si trova ad un'altitudine di circa 600 m s.l.m. (Fig. 1b, 1d) in corrispondenza di un tratto stradale con pendenza di circa 10° , orientato N-S ed immergente a S.

Da un punto di vista geologico (BENDER, 1974; MOH'D, 2000) l'area in studio è caratterizzata da estesi affioramenti del membro superiore della Formazione Calcarea-Selciferi di Umm Rijam (Eocene) costituita da calcari gessosi massivi alternati da sottili livelli di calcari, talora nummulitici, e livelli e concrezioni di selce nella parte superiore (Fig. 3a, 3b). Lo spessore della formazione è di circa 45 m.

Nell'area di Bayt Ras l'assetto della formazione segue un sistema anticlinale-sinclinale con direzione NNE-SSW, direzione dell'immersione di 150° - 330° ed inclinazione degli strati di 10° - 15° . Il tetto della formazione calcarea è generalmente sormontato da banchi decimetrici di Terra Rossa, considerato quale prodotto di alterazione dei sottostanti livelli calcarei

(BRONGER & BRUHN-LOBIN, 2003) o di sabbie eoliche dell'Olocene inferiore provenienti dal Sahara e dal Sinai (YAALON & GANOR, 1979; YAALON 1997).

La ricostruzione geologica e stratigrafica dell'area dell'ipogeo è stata condotta attraverso l'analisi visuale delle litologie affioranti lungo il condotto di entrata e all'interno della stessa struttura (Fig. 3c, 3d, 3e).

L'area della tomba è caratterizzata dalla seguente stratigrafia:

0 ÷ -0,80 m: sottofondo stradale costituito da ciottoli calcarei, con diametro prevalente da 2 a 3 cm, immersi in una matrice sabbioso siltosa rossastra;

-0,80 m ÷ -1,40 m: paleosuolo (terra rossa) composto da ciottoli calcarei, con diametro prevalente da 1 a 2 cm, immersi in una matrice siltoso-argillosa;

-1,40 m ÷ -5,00 m: calcare gessoso di colore bianco-rosaceo di buona consistenza con un livello fortemente alterato di ca. 20 cm, al tetto della formazione.

Gli strati calcarei, rilevati nelle camere laterali dell'ipogeo, mostrano una giacitura sub-orizzontale con immersione di circa 10° a NNW.

L'analisi geostrutturale e geomeccanica è stata realizzata attraverso la ricostruzione dei principali parametri che caratterizzano le discontinuità (es. orientamento, resistenza meccanica, spaziatura, apertura, persistenza, forme di degrado, riempimento, condizioni idrauliche) secondo i metodi proposti da PHILLIPS (1971), PRIEST (1985), PRIEST & HUDSON (1976, 1981), HUDSON & PRIEST (1979, 1983) e ISRM (1978a, 1981). L'analisi è stata condotta oltre che all'interno dell'ipogeo anche in corrispondenza di affioramenti della Formazione di Umm Rijam in due aree ad esso contigue (complesso scolastico e Teatro Romano) sia per ricavare un quadro più ampio su orientamento e caratteristica delle discontinuità sia per verificare eventuali differenze tra l'assetto geostrutturale dei calcari affioranti nell'area con quello presente all'interno dell'ipogeo. Le condizioni generali geostrutturali della formazione sono condizionati dall'assetto tettonico regionale che nell'area in esame presenta due orientamenti prevalenti delle linee di faglia e dei giunti principali (NNE-SSW e SSE-NNW) determinati dalla formazione ed evolu-

zione della faglia trasforme del Mar Morto e dal sistema di pieghe dell'Arco Siriano (GARFUNKEL, 1981; ATALLAH, 1992; ABED, 2000; DIABAT & MASRI, 2005; AL-TAWALBEH *et alii*, 2017).

A scala locale, l'effetto delle pieghe negli assi delle anticlinali e sinclinali, evidenti, ad esempio, nell'area del Teatro Romano, unitamente alla presenza di superfici di rottura secondarie ha generato ulteriori famiglie di discontinuità all'interno degli ammassi calcarei favorite anche dal comportamento fragile,

dal punto di vista meccanico, dei calcari.

Nei tre siti sopra menzionati sono state realizzate linee di scansione per la caratterizzazione geostrutturale e geomeccanica della formazione di Umm Rijam; sono state individuate ed analizzate 62 discontinuità di cui 24 rilevate all'interno dell'ipogeo.

I dati di orientazione delle discontinuità sono stati elaborati con il software DIPS® ver. 7 e proiettati su un reticolo di Wulff (equiangolare, emisfero inferiore) (Fig. 4d).



Fig. 3 - Affioramento della Formazione calcareo-gessosa di Umm Rijam all'interno del Teatro Romano (a), nell'area del complesso scolastico (b) ed in corrispondenza dell'ipogeo (c), (d), (e). Viene riportata in (c) una sezione schematica della stratigrafia rilevata nell'area dell'ipogeo.
- Outcropping of the Umm Rijam limestone-chalky Formation inside the Roman Theatre (a), in the school building area (b) and in the hypogeum (c), (d), (e). The image (c) reports a stratigraphic sketch of the terrains surveyed in the area of the hypogeum.

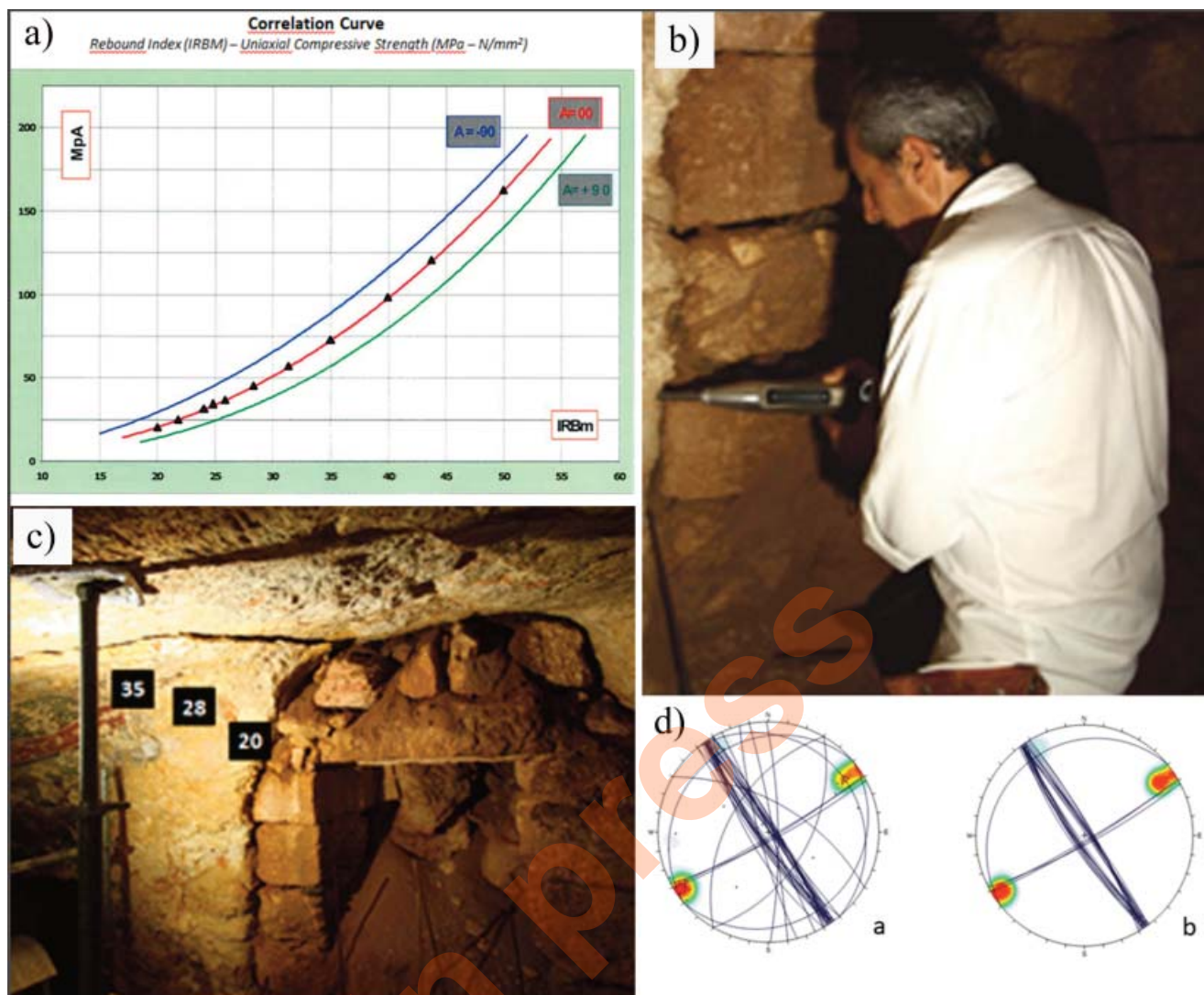


Fig. 4 - Indagini geostrutturali e geotecniche condotte all'interno dell'ipogeo di Bayt Ras: (a) valori di resistenza a compressione uniaxiale (UCS) dei calcari della Formazione di Umm Rijamm; (b) prove con martello di Schmidt; (c) valori di UCS ottenuti nella parete est della camera principale dell'ipogeo; (d-a) orientamento delle fratture, riportate su reticolo di Wulff, rilevate nelle tre aree di investigazione e (d-b) all'interno dell'ipogeo.

- *Geostructural and geotechnical investigations carried out inside the hypogeum of Bayt Ras: (a) uniaxial compression strength (UCS) of Umm Rijamm Formation limestone rock; (b) Schmidt-hammer test; (c) UCS values assessed in the E wall of the main chamber of the hypogeum; (d-a) orientation of discontinuities, represented with Wulff stereonet, surveyed in the three areas of investigation and (d-b) inside the hypogeum.*

Gli orientamenti principali dei sistemi di discontinuità rappresentati da giunti e, secondariamente, da piani di stratificazione presentano una direzione prevalente NW-SE ($330\div 340^\circ$) con angoli di inclinazione molto elevati ($80^\circ\div 90^\circ$) ed una direzione secondaria ortogonale con orientamento NE-SW, in accordo con l'orientamento predominante dei sistemi strutturali principali della regione.

La spaziatura delle discontinuità è generalmente bassa ($10\div 20$ cm). La persistenza delle discontinuità dipende dalla loro tipologia: i piani di strato sono

molto persistenti (>20 m) mentre i giunti presentano una bassa persistenza (<1 m). L'apertura delle discontinuità varia da stretta a poco aperta ($1\div 2,5$ mm). La rugosità dei piani di discontinuità è variabile, da liscia a poco rugosa con valori di JRC (*Joint Roughness Coefficient*) compresi tra 6 e 10. In generale, le discontinuità aperte sono riempite con terra rossastra limo-sabbiosa. La maggior parte delle discontinuità rilevate all'esterno presentano un basso grado di alterazione. Le discontinuità all'interno dell'ipogeo, al contrario, sono caratterizzate dalla presenza

di patine argillose biancastre determinate dal processo di decalcificazione dei carbonati legato all'elevata umidità dell'ambiente sotterraneo.

I valori della resistenza alla compressione uniaxiale (UCS) sono stati stimati con prove non distruttive attraverso l'uso di martello di Schmidt, modello L per roccia (MILLER, 1965; DEERE & MILLER, 1966; SACHPAZIS, 1990; KATZ *et alii*, 2000), secondo gli standard internazionali (ISRM, 1978b; ASTM, 2001). La correlazione tra UCS (N/mm²) e l'indice di rimbalzo IRBm è ricavata da una curva di calibrazione determinata sperimentalmente dal produttore dello strumento secondo la funzione $UCS = a \cdot IRBmb$, dove a e b sono i coefficienti di calibrazione derivati da prove di laboratorio distruttive effettuate su campioni di roccia. Per ogni zona di indagine è stata effettuata una serie di 10 prove di rimbalzo successive, in punti con distanza minima di 50 mm. I punti di indagine sono stati scelti anche sulla base della qualità apparente della roccia, considerando in via prioritaria, le parti alterate o fratturate dei litotipi calcarei in modo da ottenere i più bassi valori di resistenza. Il valore di UCS per ciascun punto di analisi è stato calcolato come media dei valori di resistenza uniaxiale corrispondente ai valori di rimbalzo sperimentali calcolati in base all'angolo tra l'asse dello strumento e la direzione orizzontale.

L'analisi ha fornito valori di UCS molto differenti, a seconda dei siti indagati. I valori più bassi compresi nelle classi R1 (roccia molto debole) e R2 (roccia debole) secondo la classificazione ISRM (1978a) sono stati registrati all'interno dell'ipogeo, in corrispondenza della parete E ed attorno all'entrata originale della struttura (Fig. 4a, 4b, 4c); in questa parte della formazione calcarea si registra la presenza di una componente gessosa non secondaria. Nell'ipogeo, i valori di UCS sono compresi nell'intervallo 19÷24 MPa (classe R1) ed in corrispondenza del settore più fratturato della parete. Valori di UCS pari a 29÷35 MPa (classe R2) sono attribuibili all'ammasso calcareo alterato e valori di 57÷75 MPa (classe R3, roccia mediamente resistente) per i calcari compatti e poco alterati presenti nei settori meno fratturati dell'ipogeo. Valori molto più elevati compresi nell'intervallo 100÷175 MPa (classe R5, roccia molto resistente)

sono stati rilevati in corrispondenza di litotipi calcarei compatti e privi di componente gessosa della formazione di Umm Rijam, rilevati nei pressi del complesso scolastico e all'interno del teatro Romano. Tali valori, riportati graficamente in figura 4a, sono compatibili con quelli riportati in letteratura sulle caratteristiche fisico-meccaniche sulle formazioni calcaree più diffuse della Giordania, compresa la formazione di Umm Rijam (NAGHOJ *et alii*, 2010; DWEIRJ *et alii*, 2017).

L'ammasso roccioso è stato successivamente analizzato utilizzando le classificazioni RMR (*Rock Mass Rating*), *Q-system* e RMI (*Rock Mass index*).

La classificazione RMR (BIENIAWSKI, 1976; 1989) si basa sul calcolo di un indice (con valore da 0 a 100) che si ottiene dalla somma di sei indici parziali: (1) UCS, (2) RQD (*Rock Quality Designation*), (3) spazatura delle discontinuità, (4) condizioni delle discontinuità, (5) umidità/presenza di acqua, (6) orientamento delle discontinuità. Il valore totale, ottenuto dalla somma degli indici parziali, fornisce una classificazione dell'ammasso in 5 classi di qualità: molto scadente (≤ 20); scadente (21-40); debole (41-60); buona (61-80), molto buona (81-100).

Il *Q-system* (BARTON *et alii*, 1974), metodo empirico utilizzato per la valutazione dell'utilizzo e delle tipologie di interventi per il rinforzo e supporto di opere in sotterraneo, si definisce attraverso la seguente equazione:

$$Q = RQD/J_n \times J_r/J_a \times J_w/SRF$$

In cui: RQD = valore del parametro; J_n = coefficiente per il numero di sistemi di orientazione delle discontinuità; J_r = coefficiente per la rugosità delle superfici di discontinuità; J_a = coefficiente per l'alterazione delle superfici di discontinuità; J_w = coefficiente per le condizioni idrauliche; SRF = coefficiente per le condizioni di *stress* dell'ammasso roccioso.

La classificazione RMI (PALMSTRÖM, 2000; STILLE & PALMSTRÖM, 2003) è un parametro volumetrico che determina una valutazione della resistenza a compressione uniaxiale di un ammasso roccioso. Il valore di RMI si applica come dato di base per valu-

tare l'applicazione di opere di rinforzo in strutture sotterranee.

Per l'analisi della qualità dell'ammasso roccioso costituente l'ipogeo di Bayt Ras è stata utilizzata una tabella di calcolo (PALMSTRÖM, 2009) con i parametri di ingresso (tab. 1) per la valutazione dei valori di RMR, Q e RMI (tab. 2) sulla base delle caratteristiche

geostrutturali e geomeccaniche rilevate.

Il valore dell'indice RMR è pari a 52 e corrispondente alla classe 3 (roccia debole); tale valore è determinato essenzialmente ad un elevato numero di discontinuità presenti nella parete E dell'ipogeo ed a valori medio-bassi della compressione uniassiale.

Dall'indice RMR ottenuto, è possibile ricavare i

Tab. 1- Parametri di base utilizzati per l'analisi della qualità dell'ammasso roccioso calcareo affiorante all'interno dell'ipogeo di Bayt Ras.

- Input parameters for the analysis of the quality of the limestone rocks outcropping inside the hypogaeum of Bayt Ras.

Parametri di base		Valori di base e valutazione			
		RMR 1989	Q 1993	RMI 2008	
Dati struttura sotterranea	Larghezza (m)	Larghezza = 6	Larghezza = 6	Dt = 6	
	Altezza (m)	Altezza = 3.5	Altezza = 3.5	Wt = 3.5	
A. Ammasso roccioso	A1 Resistenza alla compressione roccia integra	A1 = 4	-	sc = 35 MPa	
B. Grado di fratturazione	B1 Rock Quality Designation (RQD)	A2 = 13	RQD = 70	-	
	B2 Volume blocchi	-	-	Vb = 8.8 m ³	
	B3 Spaziatura discontinuità	A3 = 10	-	-	
C. Andamento delle discontinuità	C1 Fattore di forma dei blocchi	-	-	b = 27	
	C2 Numero dei sistemi di discontinuità	-	J _n = 12	N _j = 0.85	
	C3 Orientamento delle discontinuità	al tetto	B = -5	-	Co = 1.5
in parete		-	-	Co = 1	
D. Caratteristiche delle discontinuità	D1 Rugosità dei	rugosità	J _r = 1.25	js = 1.25	
	D2 Ondulazione dei			-	jw = 1
	D3 Alterazione dei giunti	degrado	A4e = 3	Ja = 2	jA = 2
		riempimento	A4d = 6		
	D4 Persistenza delle discontinuità	A4a = 4	-	jL = 1.5	
D5 Apertura delle discontinuità	A4b = 4	-	-		
E. Incastro	E Compattezza dell'ammasso roccioso	-	-	IL = 1	
F. Presenza di acqua	F Deflusso idrico	A5 = 10	Jw = 1	GW = 1	
G. Stati tensionali	G1 Livello di stress	-	SRF = 1	SL = 1	
	G2 rapporto di stress / terreno	-		Cg = -	
H. Zone di debolezza	H1 Tipo di zona di debolezza	-		-	-
	H2 Spessore o profondità della zona	-	-	Tz = -	
	H3 Orientazione della zona	al tetto	-	-	Co = -
in parete		-	-	Co = -	

Tab. 2 - Risultati dell'analisi sulla qualità dell'ammasso roccioso calcareo affiorante all'interno dell'ipogeo di Bayt Ras.
- Results of the analysis of the quality of the limestone rocks outcropping inside the hypogeum of Bayt Ras.

				RMR	Q	RMi
Continuità dell'ammasso in sotterraneo				-	-	Continua/massiva
Interconnessione della struttura dell'ammasso roccioso						Struttura solida
Qualità dell'ammasso roccioso (resistenza, scm)				-	-	scm » RMi = Elevata
Qualità dell'ammasso roccioso (in relazione alla stabilità)	al tetto	RMR = 52	Q = 3.64583	Gc = 15.3		
		Debole	Scadente	Buona		
	in parete	RMR = 52	Q _{wall} =	G _{wall} = 76.6		
Condizione dei blocchi (in relazione all'instabilità)	al tetto	-	-	Sr = 5.1		
				Favorevole		
	in parete	-	-	Sr _{wall} = 2.0		
				Molto favorevole		
Zone di debolezza strutturale				-		
Sforzi/tensioni dell'ammasso roccioso				-	Livello medio di stress	
	Stress potenziale					Minore
Limitazioni						

parametri di resistenza dell'ammasso attraverso le seguenti relazioni empiriche (BIENIAWKI, 1976):

$$c = 5 \cdot \text{RMR} \text{ (kPa)} = \mathbf{260 \text{ kPa}}$$

$$f = 5 + \text{RMR}/2 = \mathbf{31^\circ}$$

$$E_d \text{ (GPa)} = 2 \cdot \text{RMR} - 100 = \mathbf{4 \text{ GPa}}$$

Il valore dell'indice Q, valutato per la volta dell'ipogeo, è pari a **3,64**, corrispondente ad una qualità scadente dell'ammasso. Per tale valore e considerando un'altezza pari a 3,5 m della tomba, viene suggerito un consolidamento dell'ammasso roccioso da effettuarsi con chiodature sistematiche (Fig. 5a), soprattutto in caso di ulteriori operazioni di scavo all'esterno dell'ipogeo.

Il valore ottenuto di RMi è pari a **15.3** (elevato). L'indice RMi è stato calcolato sulla base dei valori di Sr (*Size ratio*) e Gc (*Ground condition factor*). Il rapporto dimensionale Sr, dipendente dall'altezza dell'ipogeo (Dt), dal diametro tipico dei blocchi (Db), dall'orientamento dei principali sistemi di discontinuità (Co) e dal numero dei sistemi di discontinuità (Nj) è stato calcolato pari a 5,1. Il valore di Gc, dipendente dalle condizioni di *stress* di un blocco fratturato e dalle condizioni idrauliche, è stato valutato pari a 15,3.

Sulla base dei valori summenzionati, anche l'analisi tramite valutazione dell'RMi suggerisce un rinforzo dell'ipogeo con chiodature per il miglioramento delle condizioni geomeccaniche dell'ammasso roccioso (Fig. 5b).

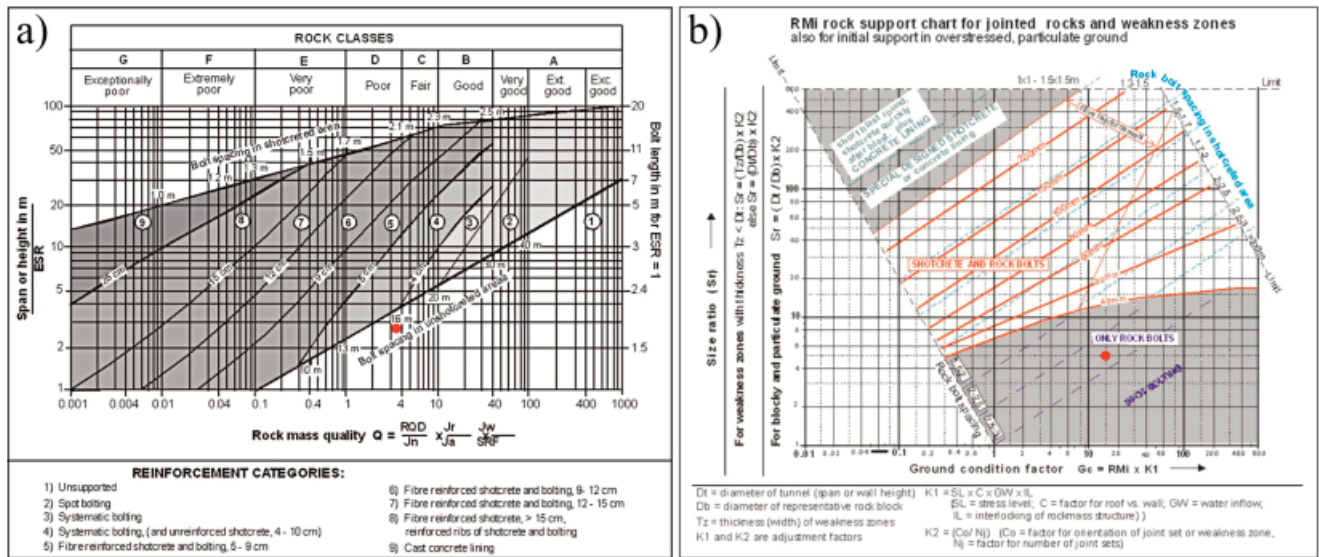


Fig. 5 - Diagrammi per la valutazione della qualità di ammassi rocciosi: (a) Q-System e (b) RMI. I punti rossi riportano i risultati delle analisi effettuate sui litotipi calcarei affioranti all'interno dell'ipogeo di Bayt Ras.

- Charts for the assessment of rock mass quality: (a) Q-System and (b) RMI. The red points correspond to the results of the analysis implemented on the limestone rocks outcropping inside the hypogaeum of Bayt Ras.

3. - INDAGINI GEOFISICHE

L'uso di tecniche geofisiche non invasive e, in particolare, del GPR (*Ground Penetrating Radar*), costituiscono da alcuni decenni una pratica corrente per l'esplorazione del sottosuolo sia a fini di ricostruzione geologico-stratigrafica sia per scopi di investigazione archeologica (BEVAN & KENYON, 1975; VAUGAN, 1986; IMAI *et alii*, 1987; DAVIS & ANNAN, 1989; GOODMAN, 1994; NUZZO *et alii*, 2002; CONYERS, 2012; GOODMAN & PIRO, 2013). Il metodo GPR utilizza onde elettromagnetiche ad alta frequenza per ricerche di corpi sepolti o per definire la struttura interna di oggetti e materiali (geologici e non). Il metodo sfrutta il fenomeno della riflessione degli impulsi elettromagnetici immessi nel terreno (frequenze 50÷600 MHz per scopi geologici ed archeologici), rilevando le differenze delle proprietà dei diversi oggetti/materiali geologici investigati in funzione del tempo (profondità) e dello spazio (direzione del rilievo). I segnali ricevuti durante l'avanzamento rettilineo (x-dir) dello strumento in superficie vengono visualizzati a schermo PC in tempo reale come immagine 2D del sottosuolo (radargramma) dove in ascisse sono riportate le distanze percorse (in metri), sulle ordinate le misure dei tempi di arrivo delle onde riflesse (in ns-

nanosecondi). Essenziale risulta la scelta della frequenza centrale di banda (f) del sistema GPR da utilizzare in quanto essa determina, insieme alla natura del terreno, la profondità della penetrazione del segnale e la risoluzione dell'indagine; a parità di terreno, maggiore è la frequenza, migliore la risoluzione, ma per profondità limitate e viceversa. Le indagini radar sono state realizzate con un georadar bistatico MALA Geoscience con frequenza centrale di banda (f) pari a 250 MHz in grado di investigare i terreni per profondità di alcuni metri e con una risoluzione accettabile per gli scopi della ricerca ed in particolare:

- Investigare un'area relativamente ampia in un periodo di tempo limitato mediante profili singoli (analisi 2D) o secondo griglie di profili paralleli a distanza ravvicinata (analisi 2-D e 3-D);
- Contribuire alla definizione del modello di sottosuolo estendendo arealmente (profili 2-D) le osservazioni geologiche e geotecniche puntuali;
- Fornire dati di sottosuolo interpretati per individuare eventuali ulteriori strutture sotterranee di potenziale interesse archeologico.

Nell'area investigata (Fig. 1), sono stati realizzati 87 profili GPR, con lunghezza totale di circa 2.900 m, pari ad una superficie di circa 3.000 m². L'indagine è stata preceduta da un tentativo di calibrazione

della velocità delle onde EM nei terreni mediante l'acquisizione di un breve profilo radar al di sopra di un *target* (metallico) sepolto posto nel terreno a profondità nota (misurata pari a 0,94 m). Dalla semplice relazione di velocità $V = 2 S/T$ (il fattore 2 esprime il fatto che l'onda elettromagnetica viaggia due volte nello spazio che intercorre tra lo strumento e il riflettore sepolto) il valore di velocità dell'onda EM nel sottosuolo è stato stimato pari a 0,11 m/ns. Tale valore, considerato l'assetto litologico-stratigrafico locale piuttosto articolato, è stato preso come riferimento di massima per la configurazione dei parametri di rilievo radar lungo i profili GPR mentre la conversione tempi-profondità lungo le singole sezioni radar è stata realizzata, quando possibile, mediante *fitting* iperbolico (es. DAVIS & ANNAN, 1989; CONYERS, 2012). I dati radar sono stati acquisiti uti-

lizzando finestre temporali di lunghezza variabile tra 50ns a 90 ns, con frequenza di campionamento del segnale pari o superiore a $10f$ (8 *stack*/campione) e spaziatura tra le tracce radar lungo la direzione di rilievo pari a 0,05 m o 0,02 m lungo alcuni profili.

L'investigazione è stata effettuata in tre siti distinti (Fig. 1b): (1) area dell'ipogeo; (2) complesso scolastico ed (3) aree a nord ed est rispetto all'ubicazione dell'ipogeo.

Nell'area dell'ipogeo (Fig. 1d) i profili sono stati realizzati adattandone direzione e lunghezza alle reali condizioni del sito, in quanto alcune operazioni di cantiere avevano già comportato una sensibile riduzione delle aree utili. I dati radar sono stati elaborati in modalità 2-D e 3-D, viene mostrato (Fig. 6a), a titolo di esempio, il radargramma 2-D processato ed interpretato relativo ad una delle sezioni radar con-

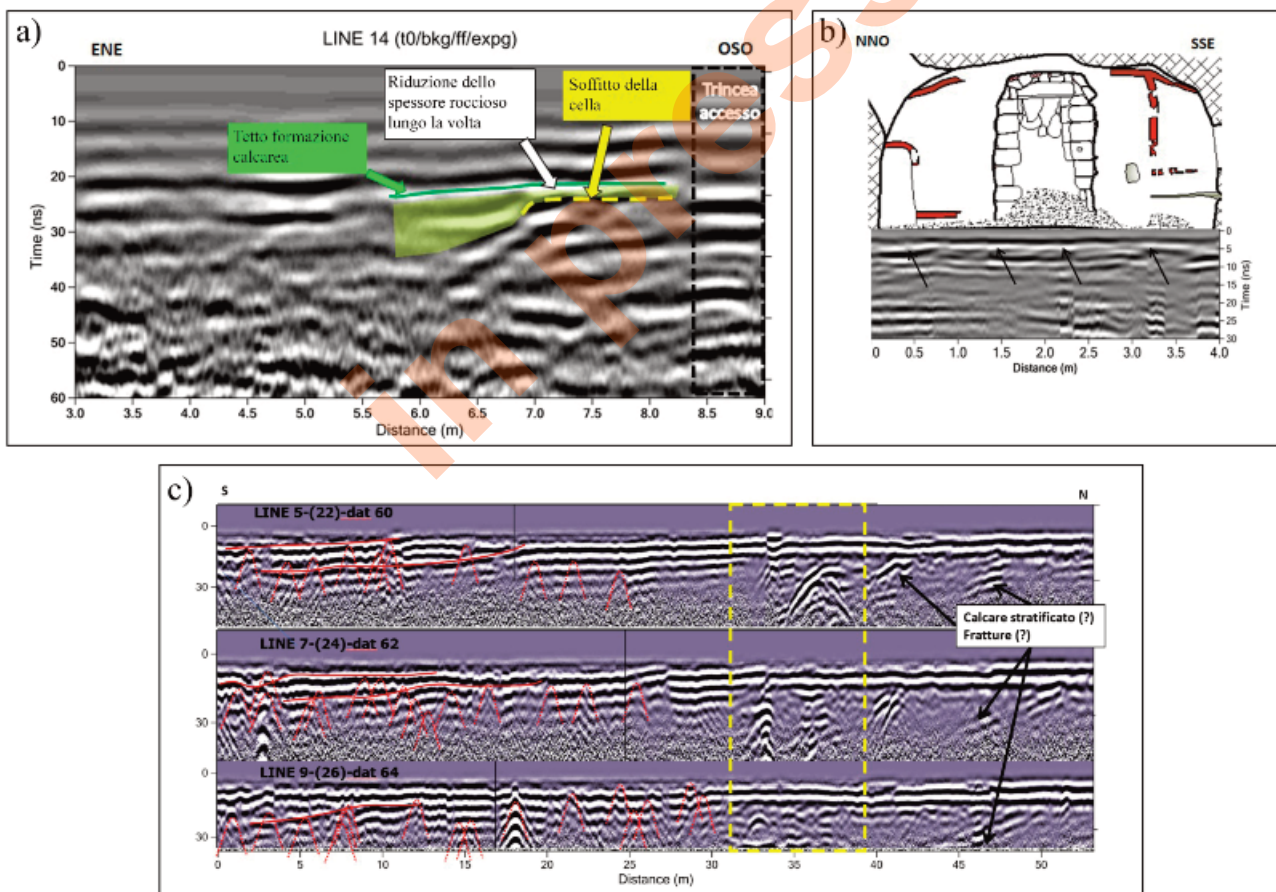


Fig. 6 - Esempi di radargrammi ottenuti dalle investigazioni GPR effettuate a Bayt Ras: (a) linea eseguita sopra l'ipogeo; (b) linea eseguita all'interno dell'ipogeo (le frecce nere indicano un riflettore associabile ad una pavimentazione, successivamente messa in luce dagli scavi archeologici); (c) linee realizzate all'interno del complesso scolastico con evidenza di anomalie (entro rettangolo giallo) potenzialmente associabili a cavità sotterranee.

- Examples of radargrams from GPR investigation in Bayt Ras: (a) survey line above the hypogeum; (b) survey line inside the hypogeum (the black arrows indicate possible presence of a stone floor which has been successively found by archaeologists); (c) survey lines inside the school complex with evidence of anomalies (inside the yellow rectangle) that can be potentially associated to underground cavities.

dotte al di sopra della tomba, in particolare della cella laterale per la quale le condizioni di stabilità della volta sono state effettuate anche sulla base dei risultati delle indagini indirette. Il radargramma processato e interpretato si riferisce all'acquisizione radar eseguita lungo la linea 14 (linea verde in Fig. 1d) di lunghezza complessiva $l = 9,5\text{m}$ circa. Il radargramma è stato ottenuto a seguito di *processing* in ambiente software GprViewer consistente in: a) correzione temporale all'effettivo tempo di emissione degli impulsi radar (t_0), b) rimozione delle frequenze indesiderate mediante filtro passabanda, c) rimozione del *background noise* d) recupero delle ampiezze di riflessione mediante applicazione di una funzione di guadagno di tipo esponenziale nel dominio del tempo (10 sottofinestre temporali).

In particolare, a partire da circa $2/3$ della sezione (progr. $x = 5,8\text{m}$, $t = 25\text{ ns}$) è presente un riflettore sub-orizzontale con ampiezza di riflessione marcata, interpretato come il top della formazione calcarea. La presenza della cella (vuoto con aria) viene identificata sul radargramma, anche se con bassa risoluzione, dalla inversione di polarità presente a partire dalla progressiva $x = 7,0$ circa. L'ampiezza di riflessione radar proveniente dal top della formazione calcarea in questi punti è piuttosto marcata, lo spessore massimo di roccia in corrispondenza della volta è stato stimato in 15 cm sulla base dei tempi di arrivo e delle velocità radar in rocce calcaree ($0,11 \div 0,13\text{ m/ns}$ DAVIS & ANNAN, 1989).

In figura 6b viene riportato il radargramma elaborato e relativo ad una delle due linee realizzate all'interno della camera principale (linea blu in Fig. 1d) prima della rimozione di uno spessore di detrito presente al di sopra del pavimento originale. La presenza di materiale detritico di fatto impediva l'osservazione diretta della pavimentazione e/o di possibili locali ipogei posti a profondità maggiori. I dati radar, elaborati ed interpretati, mostrano chiaramente la presenza di un riflettore orizzontale ($t = 5,0\text{ ns}$) continuo che suggerisce la presenza della pavimentazione della tomba al di sotto di un deposito di sedimenti di spessore stimato in $30\text{-}50\text{ cm}$, considerando una velocità delle onde EM in depositi misti pari a $0,12 \div 0,20\text{ m/ns}$. La pavimentazione lapidea

originaria è stata riportata alla luce grazie ad una ulteriore fase di scavo archeologico nel 2019, al di sotto di circa 50 cm di detriti sciolti.

Le indagini radar condotte all'interno del complesso scolastico sono state realizzate allo scopo di ottenere una conoscenza su basi geofisiche dei primi livelli di sottosuolo dell'area. Questo approccio, pur risultando efficace per la fase di *screening* preliminare dei primi metri di terreno (si è fatto uso di questi risultati per la progettazione preliminare di ulteriori indagini) presenta tuttavia un certo grado di incertezza per la fase interpretativa delle anomalie radar individuate lungo vari profili; ciò a causa della indisponibilità di indagini o dati pregressi di tipo geologico-stratigrafico e/o archeologico sui quali determinare precisi vincoli geofisici. In figura 6c, vengono riportati alcuni radargrammi esemplificativi, elaborati ed interpretati, acquisiti all'interno del complesso scolastico. Lungo questi profili, realizzati lungo linee parallele poste ad una distanza di 1 m , si osserva la presenza, entro i primi 30 metri , di un andamento dei segnali radar dominato dalla presenza di numerose iperboli di riflessione generate da singoli oggetti che interrompono la continuità di riflessioni radar lineari, blandamente irregolari ed inclinate verso Sud (linee rosse continue in Fig. 6c). Tra le progressive $30 \div 42\text{ m}$ sono state registrate delle riflessioni di notevole ampiezza poste in sostanziale continuità laterale tra le linee; proseguendo in direzione N, le anomalie di riflessione radar appaiono altrettanto nette, ma con andamento più uniforme e chiaramente inclinate verso S, tanto da poter essere attribuite preliminarmente a possibili stratificazioni o fratture in roccia a causa della prossimità di affioramenti di rocce calcaree al limite settentrionale dei profili. I vincoli geologico-stratigrafici non sono sufficienti per interpretare le linee nel loro complesso, infatti proprio per analogia con le modalità di realizzazione degli ipogei in quest'area, generalmente ricavati entro la porzione superiore e più consistente della formazione calcarea, l'attribuzione definitiva di queste anomalie a *target* archeologici passa necessariamente per la possibilità di determinare la posizione, in profondità e lateralmente lungo le linee radar, del contatto sepolto tra detrito

superficiale/calcaree sottostante. Questo contatto risulta attualmente nascosto dalle infrastrutture esterne della scuola e non viene risolto in maniera sufficientemente chiara dall'indagine radar.

4. - CONCLUSIONI

La recente scoperta dell'ipogeo affrescato di Bayt Ras ha costituito per le autorità governative della Giordania un'opportunità per mettere a disposizione del pubblico un bene culturale di straordinario valore archeologico e storico, ubicato in un'area peraltro ricca di presistenze archeologiche ma ancora poco conosciuta a livello internazionale. In considerazione delle precarie condizioni di stabilità strutturale di una parte dell'ipogeo e degli affreschi in esso contenuti, il Dipartimento delle Antichità della Giordania (DOA) ha avviato una fase di studio multidisciplinare, con uno specifico progetto di ricerca a cui hanno aderito diversi istituti che da tempo collaborano con il DOA nell'ambito della tutela, conservazione e restauro dei beni culturali in Giordania. Gli studi sono stati finalizzati ad acquisire le necessarie informazioni di tipo archeologico, storico-iconografico e geologico per la programmazione di interventi di messa in sicurezza e restauro conservativo, urgenti e a medio-lungo termine, propedeutici ad un futuro utilizzo a fini turistici dell'ipogeo.

La ricostruzione del modello di sottosuolo, obiettivo principale delle attività di ISPRA nell'ambito del progetto, è stata realizzata attraverso indagini geologico-tecniche e geofisiche condotte in due distinte fasi di indagine (2017 e 2019), secondo un approccio di analisi integrata. Le indagini geofisiche sono state effettuate nel 2017 nella zona circostante l'ipogeo ed in un'area ad esso adiacente in cui erano stati rinvenute, nel recente passato, strutture ipogee in roccia aventi caratteristiche simili a quella in studio. Le indagini radar condotte nell'area dell'ipogeo hanno permesso di ricostruire la continuità laterale del *dromos*, attualmente ricoperto di detrito e non esplorabile, individuando il potenziale livello di contatto tra la parte terminale del *dromos* ed i depositi costituenti l'attuale sottofondo stradale. Tale contatto rappre-

senterebbe il tratto di versante originario, attualmente posto al di sotto del livello stradale, da cui è stato impostato lo scavo dell'ipogeo. Le indagini radar condotte nel complesso scolastico, pur in assenza di indagini archeologiche e geologiche pregresse su cui calibrare i risultati geofisici, hanno fornito indizi sulla possibile presenza di *target* di interesse archeologico.

L'applicazione di metodi speditivi per la classificazione degli ammassi rocciosi, oltre a consentire una stima della qualità geomeccanica dei materiali, ha suggerito la necessità di adottare degli interventi di consolidamento strutturale per il miglioramento delle condizioni di stabilità dell'ipogeo. Le analisi geologico-tecniche hanno messo in luce, in particolare, le scadenti caratteristiche geomeccaniche dei litotipi calcarei ed uno stato di precaria stabilità del settore E della camera principale dell'ipogeo, posta in corrispondenza dell'originale corridoio di ingresso della struttura (*dromos*).

A seguito dei risultati ottenuti, sono state fornite alle autorità locali una serie di raccomandazioni ed azioni urgenti da implementare nella successiva fase di messa in sicurezza dell'ipogeo, quali: i) l'installazione di una struttura temporanea di supporto per il rinforzo del settore E della camera principale; ii) installazione di un sistema di monitoraggio per il controllo delle deformazioni delle principali discontinuità presenti all'interno dell'ipogeo; iii) protezione dell'ingresso attuale dell'ipogeo dalle acque piovane attraverso un sistema di deviazione del flusso a monte dell'attuale area di cantiere; iv) implementazione di ulteriori indagini dirette ed indirette nei settori in cui sono stati individuati possibili *target* archeologici.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è parte del progetto di ricerca 'Bayt Ras Tomb' finanziato da USAID nel Programma SCHEP (Sustainable Cultural Heritage through Empowerment of local Community Project) attraverso un partenariato costituito dal Department of Antiquities of Jordan (DOA), American Centre for Oriental Research (ACOR), Istituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro (ISCR), Institut Français du Proche-Orient (IFPO), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) e ISPRA, Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia.

BIBLIOGRAFIA

- ABED A.M. (2000) - *Geology of Jordan*. 1st edition, Jordanian Geologists Association, Amman, Jordan.
- AL-TAWALBEH M., ATALLAH M. & AL TAMIMI M. (2017) - *Structural evolution of the area north of Ajloun Dome, Jordan*. Jordan Journal of Earth and Environmental Sciences, **8**(2), 55-60.
- ATALLAH M. (1992) - *On the structural pattern of the Dead Sea Transform and its related structures in Jordan*. Pure Sciences and Engineering, **1**, 127-143.
- ASTM (2001) - *Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method*. ASTM Stand. 04.09 (D 5873-00).
- BARTON N., LIEN R. & LUNDE J. (1974) - *Engineering classification of rock masses for the design of rock support*. Rock Mechanics **6**, 189-236.
- BENDER F. (1974) - *Geology of Jordan*. Gebrüder Bornträger, Berlin.
- BEVAN BW & KENYON J (1975) - *Ground penetrating radar for historical archaeology*. MASCA Newsletter **11**, 2-7.
- BIENIAWSKI Z.T. (1976) - *Rock mass Classification in Rock Engineering*. Proc. of the Symp. "Exploration of Rock Engineering", **1**, 97-106.
- BIENIAWSKI Z.T. (1989) - *Engineering rock mass classifications*. Wiley, New York.
- BRONGER A. & BRUHN-LOBIN N. (1997) - *Paleopedology of Terrae rossae - Rhodoxeralfs from Quaternary calcarenites in NW Morocco*. Catena **28**, 279-295.
- CONYERS L.B. (2012) - *Interpreting ground-penetrating radar for archaeology*. Left Coast Press, Walnut Creek, CA.
- DAVIS J.L. & ANNAN A.P. (1989) - *Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy*. Geophysical Prospecting, **37**, 531-551.
- DEERE D.U. & MILLER R.P. (1966) - *Engineering classification and index properties for intact rocks*. Tech Rep Air Force Weapons Lab, New Mexico, no AFNL-TR, 65-116.
- DIABAT A. & MASRI A. (2005) - *Orientation of the principal stresses along Zerqa-Ma'in Fault*. Mu'ta Lil-Buhuth wad Dirasat, **20**, 57-71.
- DWEIRJ M., FRAIGE F., ALNAWAFLEH H. & TITI A. (2017) - *Geotechnical characterization of Jordanian limestone*. Geomaterials, **7**, 1-12.
- GARFUNKEL Z. (1981) - *Internal structure of the Dead Sea Rift region since the Late-Cretaceous based on mesostructures*. Tectonics, **2**, 167-185.
- GOODMAN D. (1994) - *Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology*. Geophysics, **59**, 2, 224-232.
- GOODMAN P & PIRO S. (2013) - *GPR remote sensing in archaeology*, Geotechnologies and the Environment, Springer, **9**, New York.
- HUDSON J.A. & PRIEST S.D. (1979) - *Discontinuities and rock mass geometry*. Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstracts, **16**, 339-362.
- HUDSON J.A. & PRIEST S.D. (1983) - *Discontinuity frequency in rock masses*. Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstracts, **20**, 2, 73-89.
- IMAI T., SAKAYAMA T. & KANEMORI T. (1987) - *Use of ground-probing radar and resistivity surveys for archaeological investigations*. Geophysics, **52**, 2, 137-150.
- ISRM (1978a) - *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstracts, **15**, 319-368.
- ISRM (1978b) - *Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks*. Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstracts, **15**, 89-97.
- ISRM (1981) - *Basic geotechnical description of rock masses*. Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstracts, **18**, 85-110.
- KATZ O., RECHES Z. & ROEGIERS J.C. (2000) - *Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer*. Int J Rock Mech Min Sci, **37**, 723-72.
- MILLER R.P. (1965) - *Engineering classification and index properties for intact rock*. PhD thesis, University of Illinois.
- MOH'D B. (2000) - *The Geology of Irbid and ash-Shbuna ash-Shamalla (Waqqs)*. Geology Directorate Mapping Division Bulletin **46**, Amman.
- NAGHOJ N.M., YOUSSEF N.A.R. & MAAITAH O.N. (2010) - *Mechanical Properties of Natural Building Stone: Jordanian Building Limestone as an Example*, Jordan Journal of Earth and Environmental Sciences, **3**(1), 37-48.
- NUZZO L., LEUCCI G., NEGRI S., CARROZZO MT. & QUARTA T. (2002) - *Application of 3D visualization techniques in the analysis of GPR data for archaeology*. Annales of Geophysics, **45**, 2, 321-338.
- PALMSTRÖM A. (2000) - *Recent developments in rock support estimates by the RMi*. Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology, **6**(1) 1-19.
- PALMSTRÖM A. (2009) - *Combining the RMR, Q and RMi classification systems*. www.rockmass.net, 25p.
- PHILLIPS F.C. (1971) - *The use of stereographic projection in structural geology*. Edward Arnold, London, 3rd edition.
- PLINIO IL VECCHIO (74) - *Naturalis Historia*, V, XVI.
- PRIEST S.D. (1985) - *Hemispherical projection methods in rock mechanics*. George Allen and Unwin, 124 p.
- PRIEST S.D. & HUDSON J.A. (1976) - *Discontinuity spacings in rocks*. Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstracts, **13**, 135-148.
- PRIEST S.D. & HUDSON J.A. (1981) - *Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci and Geomech., **18**, 183-197.
- SACHPAZIS C.I. (1990) - *Correlating Schmidt hardness with compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks*. Bull. Int. Assoc. Eng. Geol., **42**, 75-84.
- STILLE H. & PALMSTRÖM A. (2003) - *Classification as a tool in rock engineering*. Tunnelling and Underground Space Technology, **18**, 331-345.
- VAUGHAN C.J. (1986) - *Ground penetrating radar surveys used in archaeological investigations*. Geophysics, **51**, 3, 595-604.
- YAALON D. (1997) - *Soils in the Mediterranean Region: What makes them different?* Catena **28**, 157-169.
- YAALON D. & GANOR E. (1979) - *East Mediterranean Trajectories of Dust-carrying storms from the Sabara and Sinai*. In: MORALES C. (ed.), Saharan Dust. Mobilization, Transport, Deposition. John Wiley & Sons, Chichester, 187-196.