

Graphic engine per il rupestre di Matera. Il rilievo fotogrammetrico del rupestre materano importato in un motore grafico: applicazioni e nuove frontiere della valorizzazione dei beni culturali

Simone Giosuè Madeo¹

¹ *Università degli Studi della Basilicata – Scuola di Specializzazione in Beni Archeologici di Matera*

1. Il contesto rupestre a Matera

Nell'ambito del Progetto CHORA – Laboratori di Archeologia in Basilicata, coordinato dalla Scuola di Specializzazione in Beni Archeologici di Matera, in partenariato con l'Università di Roma di Tor Vergata e l'École pratique des hautes études di Parigi, è prevista la redazione di un Atlante digitale del patrimonio rupestre materano, nella sua porzione urbana e in quella extraurbana (murgia Timone e Murgecchia). Nella realizzazione dell'Atlante, sono stati raccolti una serie di dati, provenienti in parte da archivi privati, come planimetrie e descrizioni delle unità rupestre. Nei secoli, benedettini e anacoreti orientali hanno contribuito allo sviluppo urbanistico della città, con la realizzazione di chiese, asceteri e cenobi ricavati all'interno del banco roccioso di calcare, presente su tutto il territorio materano, arricchendole mediante affreschi di pregevole fattura. Generalmente, le unità rupestri presentano tutti gli elementi canonici delle strutture religiose costruite in positivo; vi sono, infatti, abside, presbiterio, talvolta iconostasi, cappelle laterali e aula. Non sempre è stato possibile riconoscere e registrare questi elementi a causa delle modifiche effettuate nel tempo dai suoi abitanti. Nelle prime fasi di occupazione degli edifici sono presenti tracce riferibili a strutture di culto, mentre, in seguito, si registrano fasi abitative o dedicate al ricovero di animali da pascolo. Sono ben visibili le tracce dell'utilizzo degli ambienti come cave per ricavare blocchi di calcare, da impiegare nella realizzazione di strutture "in positivo", come nelle chiese che presentano un avancorpo realizzato con lo stesso materiale calcareo (Chiesa della Madonna di Monteverde, Chiesa di San Pietro in Barisano). Gli spazi liturgici e le rappresentazioni iconografiche, visibili all'interno delle strutture rupestri del materano, sono comuni sia al mondo greco-bizantino che a quello latino, sebbene talvolta negli impianti planimetrici si noti una commistione tra elementi architettonici orientali e decorazioni di stampo occidentale¹. Vi sono alcune differenze tra le chiese rupestri urbane e quelle realizzate nell'area extraurbana, determinate probabilmente da problemi di spazio e della natura stessa della pietra. Sintetizzando, vi sono alcuni elementi che permettono di inquadrare le chiese rupestri del materano, offrendone pertanto una visione più chiara. Dall'apertura principale, che presenta talvolta una struttura architettonica antistante alla cavità vera e propria, si accede ad un vestibolo, decorato mediante graffiti o affreschi, che precede uno spazio più raccolto con funzione di oratorio. Lateralmente si sviluppano le navate laterali, generalmente asimmetriche, con nicchie decorate con affreschi lungo le pareti laterali. Nella porzione centrale, il presbiterio, di forma ellissoidale, termina nella cavità absidale, la quale presenta talvolta le tracce della presenza di un altare ricavato all'interno del suo catino o nell'area antistante ad esso. Le variabili tra le strutture rupestri, nella fattispecie tra quelle ubicate nell'area della gravina e quelle urbane, sono da ricercare nel diverso numero delle navate, nel tipo di impianto planimetrico e nel rito. Quest'ultimo può essere dedotto, oltre dalle caratteristiche architettoniche, dagli affreschi, che testimoniano l'importanza della struttura religiosa nel tempo. Purtroppo gli affreschi rupestri sono stati oggetto di atti vandalici e di asportazione sistematica da parte di alcuni viaggiatori, che, a partire dal XIX sec., hanno dato vita a un redditizio mercato di contrabbando o alla collezione di souvenir da viaggio. Delle oltre 150 unità rupestri catalogate, sono stati effettuati rilievi si-

¹ Padula, Motta, Lionetti 1995, pp. 5 - 10.

stematici di 40 chiese, cenobi e asceteri rupestri, tra le più rappresentative e a maggior rischio, a causa dell'abbandono e dell'incuria².

2. Realizzazione di un modello tridimensionale da rilievo fotogrammetrico

Le unità rupestri prese in esame sono state oggetto di rilievo fotogrammetrico, con l'ausilio di strumentazione per rilievo fotografico diretto, attraverso una serie di scatti effettuati con una macchina fotografica Reflex Canon a 18 megapixel, con processore DIGIC 5 e lunghezza focale tra i 18 e i 55 mm, con obiettivo EFS con ulteriore lunghezza focale fino a 135 mm e stabilizzatore di immagine. Gli scatti sono stati effettuati con strisciate fotografiche costanti, senza tralasciare nessuna porzione dell'edificio rilevato. Negli ambienti più bui, come ad esempio nelle chiese rupestri urbane che non godono di una buona illuminazione naturale, sono stati utilizzati alcuni faretto per ottenere quanta più luce diffusa possibile, evitando proiezioni di ombre che avrebbero potuto alterare la foto-modellazione. In modalità manuale, tenendo costante il tempo di esposizione dell'obiettivo, si è proceduto agli scatti fotografici, tenendo zoom e focus fissi, effettuando riprese orizzontali. Le fotografie ottenute, in formato ad alta definizione (della grandezza di circa 9 megabyte per fotografia), sono state inserite all'interno di un software di elaborazione fotogrammetrica. In questa sede si descriveranno brevemente gli accorgimenti e le modalità con i quali sono stati ottenuti risultati ottimali nell'inserimento del modello tridimensionale in un motore grafico, come nel caso dell'*Unreal Engine 4*³.

I set fotografici ottenuti sono stati processati in serie, generando come primo risultato l'allineamento delle fotografie in base ai punti di riconoscimento tra ciascuna immagine⁴. Nel raggiungimento dell'obiettivo prefissato, ovvero la realizzazione di modelli tridimensionali facilmente gestibili (della grandezza massima di 20 megabyte ciascuno) sono state impostate delle limitazioni nell'individuazione dei punti chiave durante la procedura di *Align*. Un minimo di 4.000 punti e un massimo di 6.000 punti hanno permesso di ottenere una copertura completa dell'edificio rupestre, senza generare ridondanze. Successivamente, nella costruzione della "nuvola di punti", si è preferito impostare i parametri di *Deep filtering su Aggressive*⁵. La creazione di una "nuvola di punti" presuppone un calcolatore in grado di processare centinaia di foto, generando per ciascuna foto dei punti di contatto con quella immediatamente precedente o successiva nello spazio. È una procedura consequenziale all'*Align* e su quest'ultima si basa la corretta individuazione dei punti condivisi. Il parametro *Aggressive*, pertanto, permette una selezione dei punti più profonda, efficace soprattutto per la realizzazione di un modello tridimensionale navigabile in ogni sua angolazione, e la creazione di una maglia di mesh fitta e senza punti non modellati. Nella terza fase di foto-modellazione, si generano le mesh, sfruttando la "nuvola di punti" precedentemente creata. La dimensione in megabyte del modello tridimensionale è determinata dal numero di mesh generate: per tale motivo si è scelto, per facilitare la gestione del dato tridimensionale nell'ambiente virtuale, di non andare oltre alle 200.000 *mesh* per ciascuna unità rupestre elaborata. Talvolta si preferisce avere un modello particolarmente dettagliato, con la realizzazione di 1.500.000 *mesh*, che possono essere utili nell'elaborazione di planimetrie, sezioni e orto-fotopiani⁶. Quest'ultimi non compromettono la potenza di calcolo del computer, in quanto si tratterebbe esclusivamente di immagini da visualizzare, che possono raggiungere nei loro formati più complessi, le centinaia di megabyte, senza occupare una grande quantità di RAM e CPU, in maniera costante. Al contrario, nella visualizzazione e interazione in ambiente virtuale, al calcolatore vengono sottoposti una serie di calcoli derivanti da componenti accessorie, come ad esempio la gestione delle luci, delle collisioni con il modello tridimensionale che, nel caso in cui l'oggetto virtuale presenti un grande numero di

² Rizzi 2015.

³ Valide alternative all'*Unreal Engine 4* sono *Cryengine*, *Unity* e *Godot Engine*, tutte disponibili gratuitamente.

⁴ Sullo sviluppo delle tecniche di fotogrammetria si rimanda a T. Luhmann, *Close Range Photogrammetry. Principles, Methods and Applications*, Caithness 2006.

⁵ Putzolu, Vicenzutto 2013, pp. 355 -370, per un esempio di applicazione fotogrammetrica su scavo archeologico.

⁶ Si veda M. Di Lieto, D. Della Mora, *Attività di rilievo fotogrammetrico stereoscopico nell'area dell'anaktoron*, in M. Osanna, V. Capozzoli (a cura di), "Lo spazio del potere II – Nuove ricerche nell'area dell'anaktoron di Torre di Satriano, Atti del terzo e quarto convegno di studi su Torre di Satriano", 2010, pp. 167 – 175, per un esempio di rilievo fotogrammetrico e topografico di un sito archeologico.

mesh, risulterebbe sottoporre a sforzo i componenti *hardware* del computer, monopolizzandone di fatto la potenza di calcolo e generando non rari crash del programma. Pertanto, nella realizzazione di ambienti virtuali dinamici, si è preferito “fare economia” in ciascuna fase realizzativa. Nella quarta e ultima fase legata alla foto-modellazione, è stata applicata la *texture*, ovvero l’immagine da applicare a tutta la superficie dell’oggetto tridimensionale. Anche qui, l’immagine ottenuta è stata rielaborata per alleggerirne quanto più possibile il carico di calcolo, mediante il ridimensionamento per mezzo di *software* di fotoritocco. Dal *software* di foto-modellazione è stato esportato un modello tridimensionale, generato nel formato *.obj*, particolarmente comune e versatile (fig. 1). Con esso sono stati generati anche i due file ausiliari, nei formati *.mtl* e *.jpg*. Il primo contenente al suo interno le informazioni relative alla libreria di materiali, come il comportamento di un determinato oggetto a un fascio luminoso, mentre il secondo è l’immagine *texture* (fig. 2).

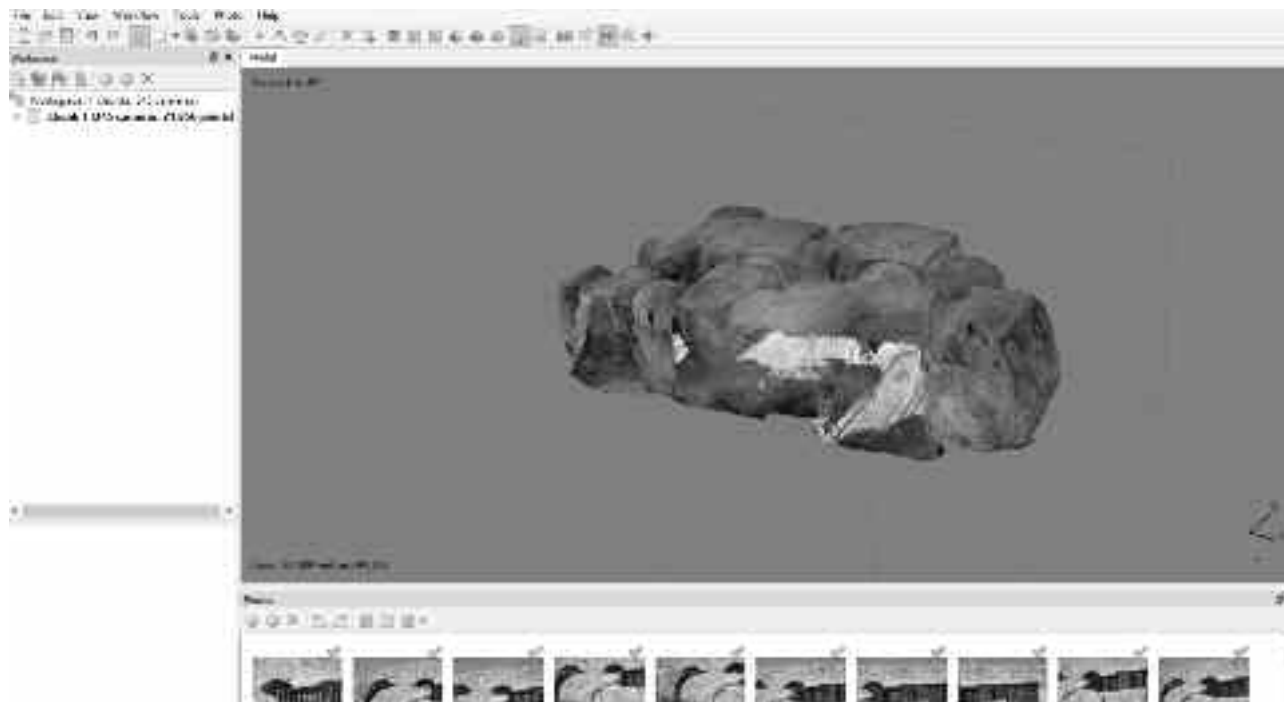


Figura 1. Modello tridimensionale ottenuto da rilievo fotogrammetrico



Figura 2. Applicazione della texture fotografica

3. Inserimento del modello tridimensionale all'interno di un motore grafico (Unreal Engine 4)

Attraverso un *software* di modellazione tridimensionale, come Cinema 4D, è stato possibile controllare la coerenza del modello tridimensionale generato, applicandone pertanto la *texture* e la libreria materiali, non ancora compilata.

L'oggetto importato è stato riposizionato secondo il nuovo sistema di coordinate del *software* di modellazione tridimensionale, per poi procedere al controllo di tutta la superficie e all'applicazione della *texture*. Cinema 4D permette di gestire le porzioni dell'oggetto applicando caratteristiche in base al materiale scelto. Ad esempio, per le aree rocciose, in cui sono visibili i blocchi di calcare utilizzati per la realizzazione dell'edificio rupestre, è stato scelto un materiale consono, come la pietra. Mentre, per le pareti affrescate si è preferito utilizzare un materiale personalizzato, cosicché fossero ben visibili i colori e le caratteristiche della decorazione anche in ambiente virtuale. Un ultimo test, prima di importare il risultato all'interno del motore grafico, è rappresentato dal comportamento dell'oggetto nei confronti delle fonti luminose virtuali: in questo caso vengono visualizzate le incoerenze delle ombre e le conseguenti proiezioni (fig. 3).

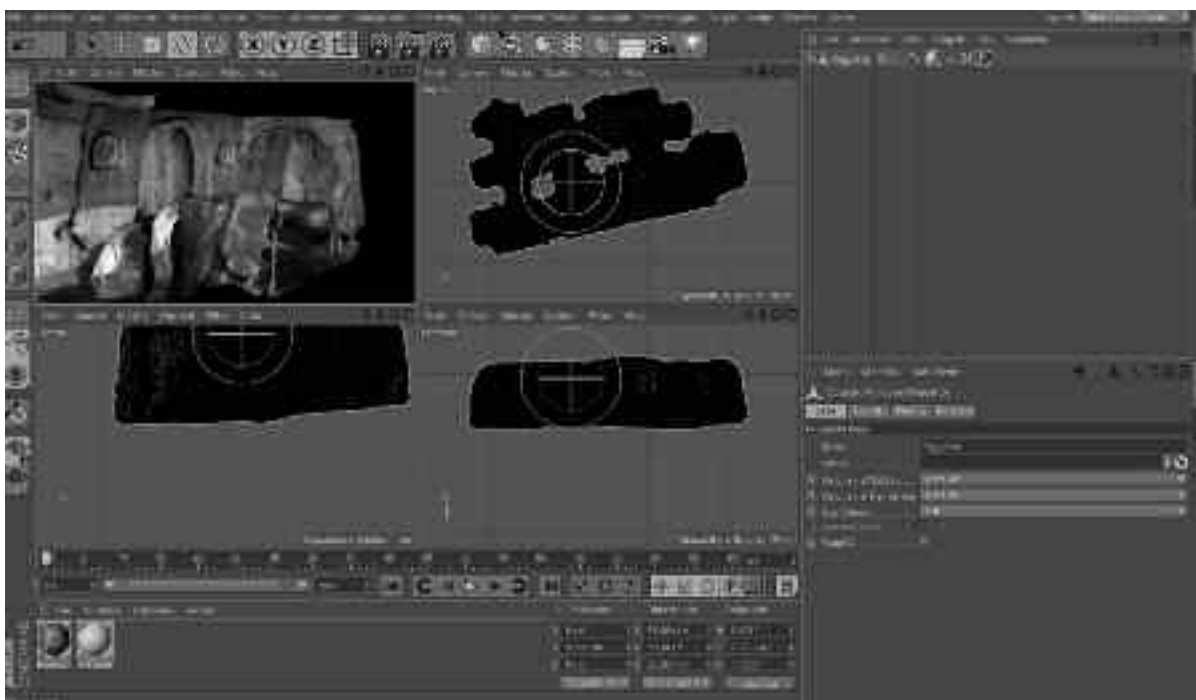


Figura 3. Import del modello fotogrammetrico in Cinema 4D

I motori grafici (*engine* in inglese) rappresentano il nucleo di ogni applicazione con grafica in tempo reale. In essi sono racchiuse una serie di funzionalità, come il motore di rendering, il motore di collisione, la gestione del sonoro, delle animazioni e dell'intelligenza artificiale. Essi permettono di inserire un oggetto all'interno di un ambiente virtuale in cui è possibile intervenire attraverso alcuni parametri di controllo, come la gestione dell'illuminazione e l'interazione con il modello tridimensionale importato⁷. Esistono numerosi motori grafici disponibili sul mercato, alcuni dei quali "dedicati", ovvero non accessibili all'utenza, altri invece aperti all'utilizzo. L'*Unreal Engine 4* rappresenta uno tra i motori grafici aperti al pubblico meglio supportati dalla casa produttrice, grazie all'implementazione costante di aggiornamenti e alla sua versatilità in campo videoludico e museale. Esso permette, inoltre, di gestire ogni tipo di parametro, personalizzando l'interfaccia e garantendo un'esperienza virtuale quanto più immersiva possibile, grazie all'apertura verso le nuove tecnologie, come i visori di realtà virtuale, nativamente implementati all'interno del software. L'inserimento di modelli tridimensionali ricavati da foto-modellazione, misurabili grazie all'inserimento durante il rilievo fotogrammetrico di riferimenti metrici, ha permesso di ottenere applicativi estremamente

⁷ Numerosi sono gli esempi esteri di interazione tra realtà virtuale e modello tridimensionale fotogrammetrico. Si veda ad esempio F. Codina, A. Martín, G. Prado, *La recerca arqueològica al conjunt ibèric d'Ullastret en els darrens anys* (1995-2010), 2012, pp. 63 - 99, per la ricostruzione virtuale di un sito archeologico e la conseguente fruizione in realtà virtuale.

interessanti, non tanto per la visita virtuale, quanto per lo studio e l'osservazione prolungata, anche laddove non sia più possibile, di contesti rupestri con il proprio apparato architettonico e decorativo⁸.

Dopo aver importato il modello tridimensionale all'interno del motore grafico si procede alla configurazione dell'oggetto e alla sua interazione con l'ambiente virtuale. Vengono applicate la *texture* e la libreria dei materiali, precedentemente editati come descritto mediante *software* di modellazione tridimensionale, per poi procedere a un ulteriore controllo di coerenza dell'oggetto su tutta la sua superficie. Un parametro fondamentale per il corretto funzionamento dell'ambiente virtuale è quello relativo alle "collisioni": ogni oggetto deve possedere, per ciascuna sua superficie, uno spessore fisico impenetrabile (fig. 4).

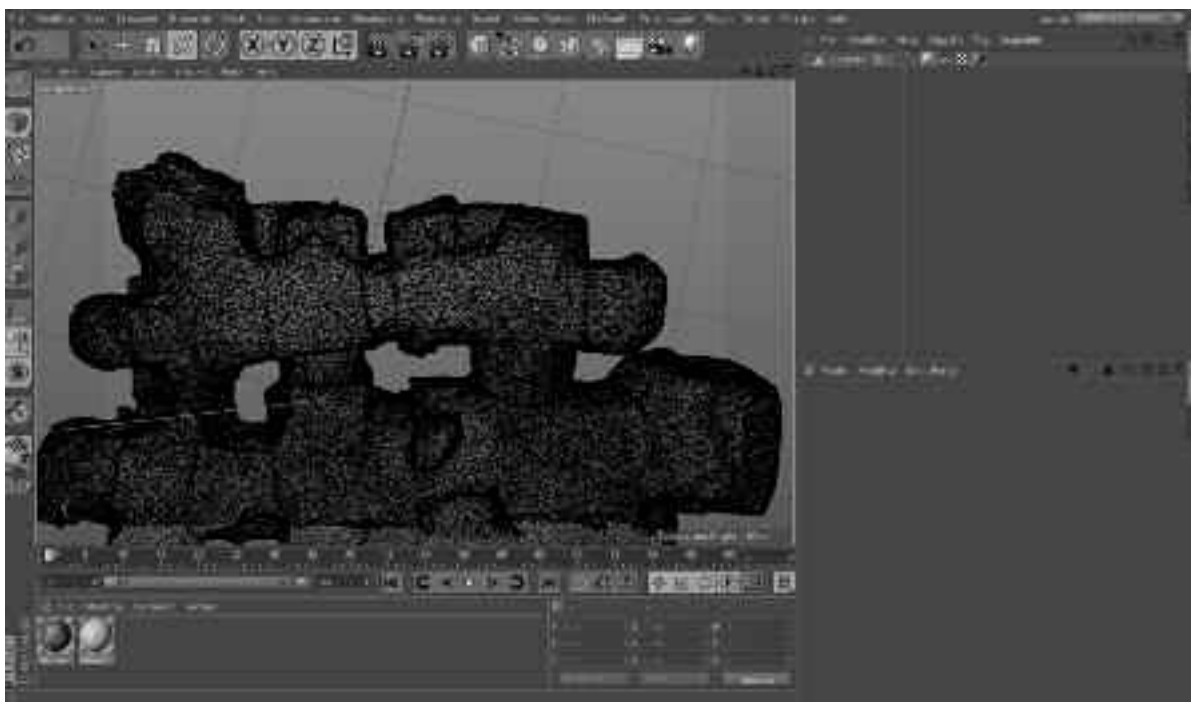


Figura 4. Il reticolo di mesh dell'oggetto tridimensionale, su cui impostare il sistema di collisione

Si tratta di una "maglia", agli occhi dell'utente invisibile, che abbraccia l'oggetto, dandone fisicità in base a una sottile estrusione che si ottiene compilando un parametro nella sezione dedicata agli oggetti presenti nell'ambiente digitale. Le collisioni influiscono non solo sul movimento dell'utente, ma anche sulla gestione di altri sistemi particellari, come le luci (diffuse e dirette) e i liquidi. Successivamente vengono impostate e programmate le luci, iniziando da quella solare, diffusa, anche per gli ambienti chiusi, per poi procedere con quelle secondarie per gli interni. La programmazione procede con l'inserimento dell'attore virtuale, ovvero l'avatar con il quale l'utente potrà muoversi all'interno della realtà virtuale. Vi sono una serie di modalità di fruizione dell'ambiente virtuale mediante, ad esempio, visori di realtà virtuale, che permettono all'utente di avere un approccio più naturale e immediato, oppure attraverso mouse e tastiera. L'insieme del grado di interazione, della schermata per la fruizione e delle impostazioni con le quali l'avatar può muovere i suoi passi all'interno dell'ambiente virtuale, viene definito HUB. L'HUB viene programmato a priori, attraverso una serie di parametri denominati "preset". I preset gestiscono ogni singolo elemento di interazione, come la visualizzazione del proprio avatar, i movimenti permessi e la velocità con la quale possono essere effettuati. Rappresenta una delle caratteristiche principali nella fruizione dell'ambiente virtuale creato. La soluzione più adatta, nel caso dell'insediamento rupestre di Matera, è stata quella di generare ambienti chiusi, anche nel caso di unità rupestri che avessero un'apertura verso l'esterno ben visibile, per mezzo di sistemi di collisioni che permettessero visite solo all'interno del perimetro dell'edificio interessato (fig. 5).

⁸ Le applicazioni di nuove tecnologie digitali all'archeologia hanno suscitato un certo interesse, permettendo la nascita di riviste scientifiche dedicate: *Archeologia e Calcolatori*, attiva dal 1990.

⁹ Forte 1996.

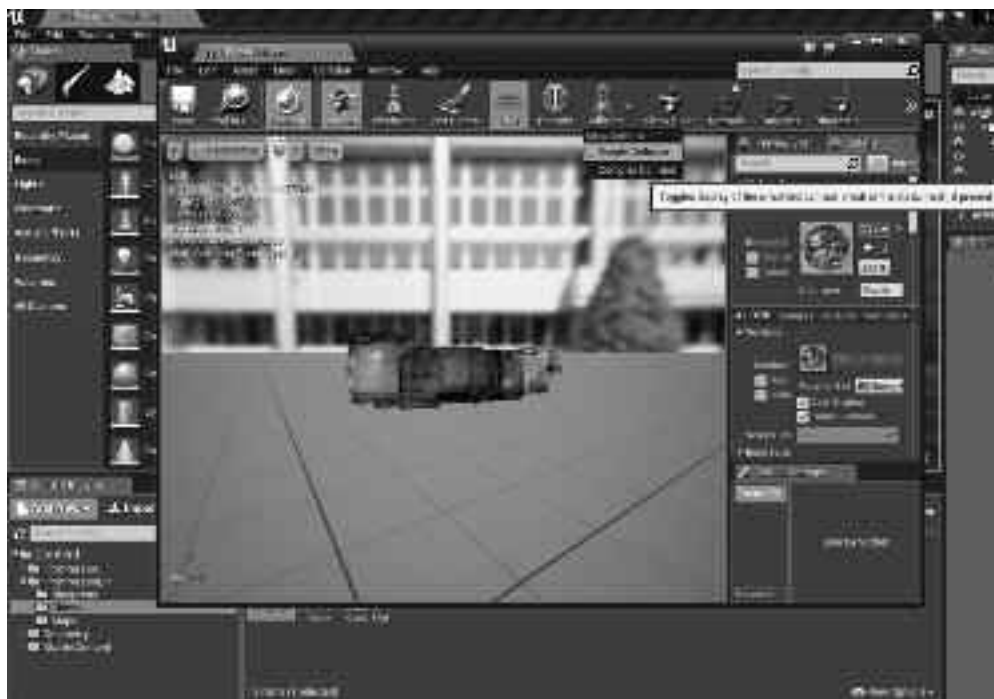


Figura 5. Gestione dei preset disponibili. L'interazione dell'oggetto con l'ambiente virtuale circostante viene definito dalle impostazioni presenti in questa schermata, come il comportamento con le fonti luminose e le collisioni

Successivamente è stato impostato un HUB quanto più snello e intuitivo possibile, senza interfacce complesse, che permettesse lo scatto di fotogrammi nel caso in cui l'utente avesse voluto soffermarsi su un particolare dell'ambiente virtuale circostante. I movimenti consentiti sono stati quelli di spostamento lungo l'asse direzionale canonico (avanti, indietro, destra e sinistra), con l'aggiunta della possibilità di effettuare il salto, così da permettere il raggiungimento di porzioni in alto, così da ricreare un ambiente virtuale verosimile, quanto più vicino all'esperienza reale. È stato inoltre realizzato un HUB accessorio, che permetta il movimento lungo tutti gli assi disponibili, sacrificando la simulazione di una visita reale per la libertà di spostamento all'infuori del piano di calpestio (fig. 6). Le applicazioni di questa tecnologia digitale, coadiuvata dall'utilizzo dei nuovi prodotti offerti dal mercato, come i visori di realtà virtuale, permettono di sviluppare una serie di soluzioni e strumenti per la fruizione e la valorizzazione del patrimonio culturale. Nel caso delle unità rupestri del materano è stato possibile, attraverso l'inserimento dei modelli tridimensionali ottenuti da *software* di foto-modellazione, rendere i rilievi misurabili, verificandone l'affidabilità con il *software* MeshLab che permette questo genere di interrogazione spaziale. L'*Unreal Engine 4* ha reso possibile la realizzazione di sopralluoghi virtuali presso gli insediamenti rupestri materani, rendendone possibile lo studio e l'analisi di ciascun aspetto, anche in remoto. Ad esempio, è stato possibile analizzare e studiare i graffiti raffiguranti croci ricavate nei pilastri delle chiese, scattando fotografie virtuali, misurazioni e ipotizzando relazioni con quelli realizzati negli altri edifici religiosi vicini. Un'altra analisi efficace è stata quella relativa allo studio sull'ubicazione degli affreschi e sull'uso del colore utilizzato, rendendo possibili osservazioni stilistiche sulla realizzazione delle decorazioni pittoriche e sul possibile rito (orientale o latino) officiato all'interno dell'edificio sotto esame.



Figura 6. Generazione dell'HUB e impostazione della visuale

4. Conclusioni

L'incameramento del dato risulta essere privo di ogni tipo di interpretazione a posteriori: il modello tridimensionale, ottenuto dall'elaborazione fotogrammetrica, viene inserito quod est, senza nessun tipo di interpolazione o modifiche del suo contenuto originario, all'interno del motore grafico che ne applica le regole fisiche e grafiche necessarie all'esplorazione del luogo, senza inficiarne la percezione che si avrebbe nel visitare il luogo reale. Sotto questo punto di vista, si noti il reale potenziale della tecnica descritta, ovvero la possibilità di riprodurre l'esperienza interattiva di un luogo reale, conservandone i dati peculiari, come decorazione architettonica e pittorica, cristallizzando l'informazione e rendendo possibile il sopraluogo all'interno dell'ambiente, per visita turistica o per studio, anche laddove non sia più possibile a causa di cedimenti strutturali, atti vandalici e chiusura al pubblico. Rispetto al rilievo fotogrammetrico, il potenziale introdotto dall'inserimento del modello tridimensionale in un motore grafico è nella sua programmazione di fruizione del bene. Attraverso un HUB che permette di simulare il reale movimento all'interno dell'edificio, fornisce gli strumenti per lo studio e l'analisi delle componenti strutturali, come la possibilità di effettuare fotografie virtuali e misurazioni in tempo reale delle dimensioni, è possibile generare un archivio virtuale dei contesti rupestri materani, aperti perennemente al pubblico e agli studiosi, accrescendone l'appetibilità turistica e implementando nuove interfacce in base alle necessità di fruizione (fig. 7).

¹⁰ Sulla possibilità di visitare luoghi inaccessibili, per motivi di sicurezza e di incolumità del visitatore, per motivi didattici o di studio, si veda l'esperienza descritta in J. Rae, L. Edwards, *Virtual reality at the British Museum: What is the value of virtual reality environments for learning by children and young people, schools, and families?*, 2016.

¹¹ Sull'implementazione della realtà virtuale e le sue nuove applicazioni nel campo dei beni culturali, si veda C. Milk, *The Future of Virtual Reality (and why it's causing us to change our name)*, 2016.



Figura 7. Studio e analisi degli affreschi presenti nella Cripta di San - Matera, mediante navigazione in realtà virtuale

Riferimenti bibliografici

- Padula M., Motta C., Lionetti G., 1995, *Chiese e asceteri rupestri di Matera*, Matera.
- Rizzi M. P., *Chiese rupestri a Matera. Perle di bellezza e cultura*, Roma.
- Putzolu C., Vicenzutto D., 2013, *Il rilievo delle superfici tramite fotogrammetria 3D. Dal microscavo dei complessi tombali agli scavi in open area*, in Curci A., Fiorini A. (a cura di), "Documentare l'archeologia 3.0: fotogrammetria e laser scanner di nuova generazione. Dal rilievo archeologico alle soluzioni di realtà aumentata", Atti del workshop, *Archeologia e calcolatori* 24, pp. 355-370.
- Luhmann T., 2006, *Close Range Photogrammetry. Principles, Methods and Applications*, Caithness.
- Di Lieto M., Della Mora D., 2010, *Attività di rilievo fotogrammetrico stereoscopico nell'area dell'anaktonon*, in M. Osanna, V. Capozzoli (a cura di), "Lo spazio del potere II – Nuove ricerche nell'area dell'anaktonon di Torre di Satriano, Atti del terzo e quarto convegno di studi su Torre di Satriano", Tito, pp. 167-175.
- Codina F., Martin A., Prado G., 2012, *La ricerca arqueològica al conjunt ibèric d'Ullastret en els darrens anys (1995-2010)*.
- Forte M., 1996, *Archeologia: percorsi virtuali nelle civiltà scomparse*, Milano.
- Rae J., Edwards L., 2016, *Virtual reality at the British Museum: What is the value of virtual reality environments for learning by children and young people, schools, and families?*, MW2016: Museums and the Web 2016. Published January 28, 2016.
- Milk C., 2016, *The Future of Virtual Reality (and why it's causing us to change our name)*, pubblicato il 16 giugno 2016 in "<https://medium.com>".