

MeshLab e Blender: software open source in supporto allo studio e alla ricostruzione virtuale della policromia antica

Eliana Siotto, Marco Callieri, Matteo Dellepiane, Roberto Scopigno

In the last decade the ancient colour of Greek and Roman architecture and artworks has been the focus of multidisciplinary studies. Besides the international conferences and scientific publications, we are witnessing the development of experimental archaeology. This leads to hypothetical reconstructions of the original colours on both digital three-dimensional models, produced with 3D scanning systems, and physical replicas of objects. The virtual reconstructions of the original polychromy contend with numerous problems such as the limited knowledge of the methods and techniques of colour application on Greek and Roman artworks, and the technical limitations of the painting tools.

This paper proposes our experience with the reconstruction of the ancient polychromy of the Roman sarcophagus dedicated to *Ulpia Domnina* (Museo Nazionale Romano – Terme di Diocleziano in Rome, inv. no. 125891) through the use of open source digital technologies. Documenting a polychrome sarcophagus using the potential of three-dimensional technology means to extend the research beyond the cataloguing, and to have the opportunity to study technical details which are often not observable during direct visual inspection. Moreover, the state of colours and artwork degradation can be monitored along the time. In this paper, we explored the use of digital technologies mainly using open source digital systems, to understand if they can help the knowledge and hypothetical reconstruction of the ancient colour supported by the results of scientific and documentary studies. In particular, MeshLab (an open source mesh processing tool) was used to better understand the styles and techniques used to apply the colour on the *Ulpia Domnina's* sarcophagus, and to create its virtual reconstruction; while Blender (an open source modelling and rendering tool) was used to render the different layers of paint and display their final effect.

The polychrome reconstruction of the left part of the sarcophagus was implemented using the paint tool of MeshLab, on the base of a set of sampled RGB (Red, Green, Blue) coordinates identified in the small polychrome traces that we have digitally sampled by means of calibrated digital macro-photography. We worked with per-vertex encoding, using MeshLab to apply the colour on the geometry. Therefore, in order to achieve high-quality results for the digital repainting phase, we needed to paint directly on the high-resolution 3D model.

We have seen that MeshLab offers a basic but flexible paint interface; colours can be defined as RGB or HSV (Hue, Saturation, Value) coordinates, and chosen colours can be stored in a personal palette. The only missing feature in the current release is the direct support of overlapping layers, which conversely characterize the polychrome technique identified on the *Ulpia Domnina's* sarcophagus.

MeshLab supports interactive visualization; however, this real-time exploration, useful as it may be to visualize the small geometric details, cannot provide a photo-realistic visualization of the model. By design, MeshLab is a mesh processing system and not a full-feature rendering tool. Effects like soft shadows cast, sub-surface scattering (important for the marble surface) and a configurable lighting management are not available. For this reasons, we adopted Blender (or, rather, a combination of MeshLab and Blender) to achieve a more sophisticated visual





Figura 1 – Sarcofago di *Ulpia Domnina*, Museo Nazionale Romano alle Terme di Diocleziano in Roma (inv. 125891).

presentation of the colour reconstruction. Specifically the combination of the two open-source software has been tested on a selected area of the *Ulpia Domnina's* sarcophagus that presents an interesting layering of colours: the Cupid on the left end of the front of the sarcophagus. Their combination (necessary to overcome some of their intrinsic limitations) proved to be able to produce realistic results.

1. Il caso di studio: il sarcofago di *Ulpia Domnina*

Il sarcofago scelto come caso di studio, come si legge nell'iscrizione integra in latino, fu dedicato da quattro liberti e dalle loro mogli alla matrona defunta *Ulpia Domnina* ed è esposto nel Chiostro di Michelangelo del Museo Nazionale Romano alle Terme di Diocleziano a Roma, inv. 125891 (Figura 1).

Esso è realizzato in marmo proconnesio (VAN KEUREN *et al.* 2010, 160) ed è datato in letteratura tra la fine del II e l'inizio del III secolo d.C. (FELLETTI MAJ 1953, 237-238; DAYAN *et al.* 1981, 86-88).

Il sarcofago fu occasionalmente rinvenuto nel 1953 a Roma in via Lidia n. 8 non *in situ*, ma «entro un troncone di muro moderno, che andò demolito» (FELLETTI MAJ 1953, 236). Dal punto di vista tipologico e iconografico, fa parte della produzione seriale di sarcofagi con Vittorie clipeofore ed Eroti funerari (DAYAN *et al.* 1981, 86-88; KOCH and SICHTERMANN 1982). La sua straordinarietà è data dalla peculiare conservazione della policromia originale e dalla tecnica di applicazione del colore (SIOTTO 2013, 213-215). In particolare, si osserva che si conservano prevalentemente tracce di colore rosso e azzurro, applicate a larghe pennellate e facendo attenzione ai dettagli del volto e delle piume brevi e remiganti delle Vittorie e degli Eroti. Le analisi in microscopia ottica petrografica hanno indicato che le tracce di azzurro sono costituite da granuli di blu egiziano commisto a granuli di nero d'ossa applicati direttamente sul marmo, mentre il rosso è un'ocra applicata al di sopra di una preparazione fine a base di gesso, pozzolana rossa e calce (SIOTTO 2013, 216-227; SIOTTO *et al.* 2015; SIOTTO *et al.* 2015A). Dall'unione delle informazioni archeologiche, storico-bibliografiche e delle analisi scientifiche (macro-fotografia, *imaging* multispettrale, spettroscopia Raman e, soprattutto, microscopia ottica petrografica) si è dedotto che questo sarcofago fu colorato in due momenti diversi dell'antichità. La colorazione originale (che vede il colore applicato direttamente sulla superficie del marmo) fu eseguita nel terzo quarto del II secolo (160-180 d.C.), quando il sarcofago fu realizzato, mentre la seconda (caratterizzata dal colore applicato al di sopra di uno strato di preparazione fine a base di gesso, pozzolana rossa e calce) risalirebbe alla metà del III secolo d.C., quando lo specchio epigrafico della *tabula* dedicatoria fu ribassato per realizzare la dedica a *Ulpia Domnina* (SIOTTO 2013, 228-229; SIOTTO *et al.* 2015A; SIOTTO *in press*). In questa seconda fase, anche l'interno del sarcofago fu rivestito da una malta sempre a base di



gesso, pozzolana rossa e calce, ma più grossolana rispetto a quella usata sul rilievo del sarcofago come strato di preparazione alle diverse tonalità di rosso (SIOTTO 2013, 223-227; SIOTTO *et al.* 2015). Le evidenze sembrano indicare che anche al di sopra di questa malta fu applicato del rosso ocra ma per convalidare tale dato, che rappresenterebbe una novità nella storia dei sarcofagi romani in marmo, stiamo approfondendo le indagini (SIOTTO in press).

2. Metodologia e sperimentazione

La scelta del sarcofago proposto come oggetto di studio è il risultato di un'attenta valutazione che ha tenuto conto di diversi requisiti quali, ad esempio, l'abbondante presenza e, se pure lacunosa, buona conservazione dei colori più rappresentativi o il tipo di tecnica pittorica utilizzata o, ancora, le caratteristiche del rilievo che, essendo non molto alto, ha facilitato un'acquisizione completa e accurata della geometria. Non meno importante è stato il celere permesso a procedere con lo studio (SIOTTO 2013, 211-212).

L'acquisizione dei dati geometrici è stata eseguita con uno scanner laser a triangolazione (Konica Minolta Vivid 910), conseguentemente alla valutazione sia delle dimensioni e del materiale (marmo proconnesio) del sarcofago, sia della risoluzione finale del modello 3D necessaria a realizzare la ricostruzione policroma di metà del III secolo d.C., cioè dopo la ridipintura dovuta al riuso del sarcofago per la sepoltura di *Ulpia Domina* (SIOTTO 2013, 230-235; SIOTTO *et al.* 2015; SIOTTO in press; per la *pipeline* 3D si veda CALLIERI *et al.* 2011). Successivamente, i dati acquisiti sono stati elaborati utilizzando MeshLab (CIGNONI *et al.* 2008), un sistema *open source* per il processamento dei dati sviluppato dal Visual Computing Lab ISTI-CNR di Pisa (<http://meshlab.sourceforge.net/>); e, al fine di ottenere un modello 3D ad alta risoluzione (19 milioni di triangoli) e fotorealistico, si è seguita la metodologia standard di scansione 3D (SIOTTO 2013, 236-241; SIOTTO *et al.* 2015; per la *pipeline* 3D del colore si veda CALLIERI *et al.* in press).

Per l'attività di riproposizione del colore antico sul modello 3D era necessario avere dei valori di riferimento dei colori, così si è misurata la riflettanza spettrale delle evidenze più indicative di colore rosso, azzurro e bianco-rosato della preparazione con uno spettrofotometro. Purtroppo i risultati ottenuti non sono stati del tutto soddisfacenti sia perché lo spot dello strumento a nostra disposizione era troppo grande rispetto alle piccole tracce di colore da misurare, sia perché la superficie del rilievo non permetteva una perfetta aderenza dello strumento alle micro-aree da misurare (SIOTTO 2013, 243-249; per l'analisi colorimetrica si veda BERNS 2000, 44-54; OLEARI 2008, 139-224). Si è così deciso di acquisire delle immagini calibrate ad alta risoluzione di queste evidenze policrome di riferimento e di calcolare le coordinate cromatiche in spazio RGB (SIOTTO 2013, 250-253; per lo spazio RGB si veda OLEARI 2008, 154-159).

2.1. Colorazione del modello con MeshLab

Determinate le coordinate RGB dei diversi colori, si è creata una palette di colori corrispondenti nel plug-in di *Paint* di MeshLab (Figura 2) e si è proceduto con l'attività di colorazione del modello 3D (SIOTTO 2013, 258-261; SIOTTO *et al.* 2015). Dalla valutazione delle coordinate di colore in spazio RGB è emerso che tutti i colori sono caratterizzati da due valori cromatici di base, eccetto la preparazione, il fondo e la linea di contorno delle figure che ne hanno solo uno. In particolare, i risultati di questa ricerca hanno rivelato che: il colore rosso utilizzato per i listelli del sarcofago ha gli stessi valori di quello utilizzato per le ali, le cornucopie, le rocce e per le lettere incise dell'iscrizione; i valori cromatici dell'azzurro sono gli stessi in tutte le aree campionate del sarcofago; il colore della pelle è lo stesso per le Vittorie e gli Eroti, anche se quello degli Eroti sembrerebbe leggermente più scuro di quello delle Vittorie. Entrambe le figure hanno i capelli castani e le labbra di colore rosso scuro tendente al marrone. Gli occhi hanno le pupille e le iridi di colore grigio scuro (nero-blu), mentre il contorno interno dell'occhio è delineato con una



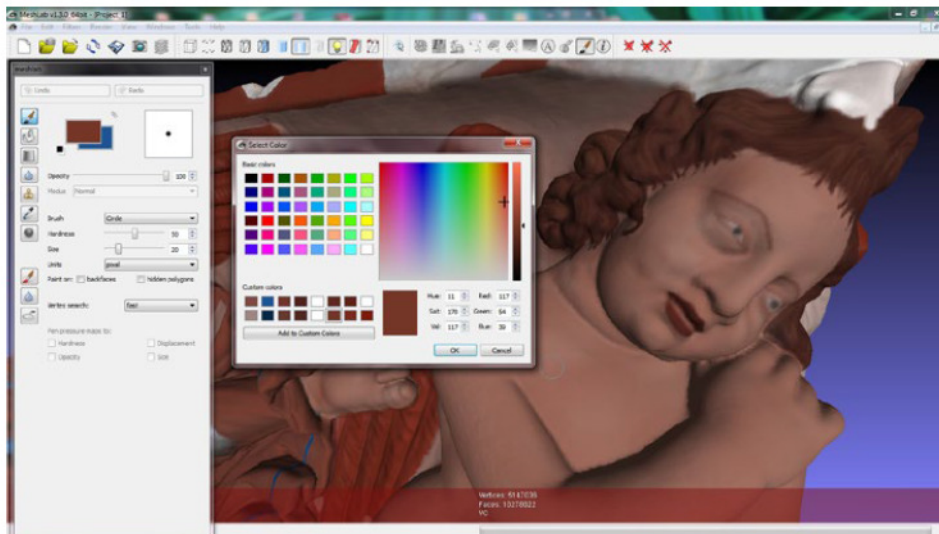


Figura 2 – Interfaccia dello strumento di Paint di MeshLab.

linea rossa applicata al di sopra di una linea nera (nero-rosso). Tracce di bianco sono visibili nell'angolo interno degli occhi. L'unico rosso con tonalità differente (nero-arancio anziché nero-rosso) è riconoscibile sul bastone della fiaccola destra; questo potrebbe essere un residuo della cromia originale del terzo quarto del II secolo d.C., visibile anche in altri dettagli del rilievo (quali, ad esempio, le ghiande e le zone nascoste del nastro della ghirlanda) dove non si conserva più la ridipintura secondaria, applicata al di sopra di una preparazione fine in gesso, pozzolana rossa e calce nella metà del III secolo d.C. (SIOTTO 2013, 253-257; SIOTTO *et al.* 2015).

Una delle decisioni più difficili è stata quella di determinare il colore del fondo del sarcofago. Le esigue tracce di colore rosso applicato al di sopra di una preparazione fine a base di gesso, pozzolana rossa e calce discernibili in diversi punti del rilievo appartengono chiaramente alla ridipintura di metà III secolo d.C. (SIOTTO 2013, 254; SIOTTO *et al.* 2015).

Dopo un primo tentativo di colorazione di un modello geometrico semplificato (3 milioni di triangoli), a causa dell'accuratezza del dettaglio richiesta per dipingere alcune parti del rilievo (es. particolari del volto, lettere incise, etc.) si è deciso di dipingere direttamente sul modello 3D ad alta risoluzione. Ciò ha richiesto un tempo di lavoro più lungo, perché più la risoluzione è alta maggiore sono le risorse hardware richieste per la sua visualizzazione e manipolazione. Questa scelta ha comportato la necessità di dividere il modello 3D del sarcofago in dieci parti di differenti dimensioni (dai 2 ai 4 milioni di triangoli) e di procedere con una colorazione separata dei diversi pezzi (Figura 3). Dopo che il colore di ogni porzione è stato trasferito sulla metà del sarcofago interessata dalla ricostruzione policroma, in alcuni casi, al fine di avere il risultato visibile in Figura 4, è stato necessario armonizzare il colore lungo i bordi dei pezzi uniti (SIOTTO 2013, 258-261).

Il *Paint* tool di MeshLab consente di definire i colori in coordinate sia RGB che HSV (Hue, Saturation and Value) e di gestire allo stesso tempo due caratteristiche del colore: il livello di ombra e la percentuale di opacità. Il *Paint* tool di MeshLab si è dimostrato uno strumento facilmente utilizzabile e molto flessibile; esso però a causa della sua natura (software per il processamento dati) non è sufficientemente adeguato per rappresentare una struttura a strati. Il rendering in MeshLab, ossia l'immagine finale a partire dalla geometria e dal colore del sarcofago, usa un



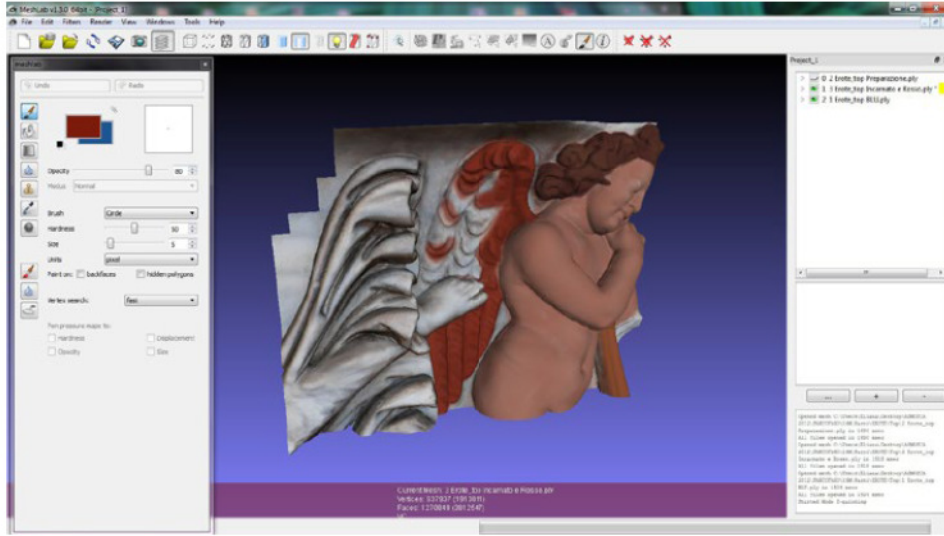


Figura 3 – Porzione del modello geometrico 3D ad alta risoluzione dipinta separatamente.



Figura 4 – Ricostruzione virtuale della pittura secondaria (ca. metà III secolo d.C.) del sarcofago di *Ulpia Domnina*.



Figura 5 – Rendering in MeshLab.



modello semplice di tipo Lambertiano, dove la luce viaggia da una sorgente luminosa al manufatto artistico che la riflette in tutte le direzioni (componente diffusa), come visibile in Figura 5. Questa “illuminazione diretta” presenta però alcune limitazioni quando si devono rappresentare materiali complessi. In MeshLab è possibile cambiare gli shader che riproducono il comportamento fisico del materiale che compone l’oggetto cui sono applicati, ma ciò è ancora limitato a un singolo shader per tutto il sarcofago, mentre in questa sperimentazione è stato necessario simulare il marmo e una serie di strati di colore. MeshLab, infatti, essendo un software per il processamento in press dati, non supporta una struttura basata su più livelli. Questo significa che non permette di documentare e visualizzare i vari strati di preparazione e colore che caratterizzano il nostro caso di studio. La ricostruzione policroma riproposta (Figura 4) mostra, infatti, l’aspetto finale del sarcofago e non quello della sua struttura stratificata (SIOTTO *et al.* 2015B).

Tuttavia, l’attività di sperimentazione sul modello 3D ad alta risoluzione con il plug-in di *Paint* di MeshLab si è rivelato un valido ausilio per la conoscenza e la comprensione di alcune problematiche del colore antico quale, ad esempio, le differenti tecniche di stesura e di applicazione del colore. Il risultato finale, ossia un’ipotesi ricostruttiva di come poteva apparire il sarcofago policromo dedicato a *Ulpia Domnina* alla metà del III secolo d.C. (Figura 4), è dunque il frutto dell’integrazione dei risultati delle analisi scientifiche, delle osservazioni visive e dei dati archeologici e storico-bibliografici (SIOTTO 2013, 264-266; SIOTTO *et al.* 2015).

2.2. Rendering fotorealistico usando Blender

Realizzato il modello policromo in MeshLab, al fine di avere un rendering più realistico si è ricorsi all’uso di un altro software open source, Blender (o, meglio, a una combinazione di MeshLab e Blender). Blender è nato per la modellazione, l’animazione e il rendering 3D (<http://www.blender.org/>). Dall’attività di test è emerso che pur non avendo una funzione semi-automatica atta a gestire “materiali multistrati”, permette di farlo manualmente combinando i diversi nodi di shader, che riproducono il comportamento fisico del materiale dell’oggetto (marmo o colore) cui sono applicati. L’idea era di rappresentare i vari strati di preparazione e di colore con degli shader (uno shader per ogni pigmento e/o miscela di pigmenti che corrispondono ai diversi colori) e con una “maschera” per dettagliare dove un pigmento è presente (SIOTTO *et al.* 2015B). Questa sperimentazione è stata eseguita sulla figura dell’Erote funerario sull’estremità sinistra della fronte del sarcofago (Figura 1). I differenti strati di colore (1. blu egiziano e nero d’ossa, 2. preparazione, 3. rosso-ali, rosso-incarnato e rosso-capelli) sono stati realizzati sulla porzione scelta del modello 3D ad alta risoluzione in MeshLab come se fossero degli strati distinti e, quindi, sono stati salvati in file differenti. Sempre in MeshLab si è creato per ogni strato di colore (o preparazione) una “maschera”, che descrive dove il colore è presente e dove no; questa è stata poi importata in Blender (Figura 6). Per lavorare in Blender in modo ottimale è stato necessario parametrizzare il modello 3D; si è dunque testato, su un’area di 500k di triangoli, sia lo strumento di parametrizzazione interno di Blender che quello di MeshLab, con risultati simili (SIOTTO *et al.* 2015). Partendo da queste mesh dipinte, si sono proiettate le informazioni di colore sulla texture e si sono attribuiti i differenti materiali ai rispettivi “oggetti”. Quest’attribuzione del materiale agli “oggetti” è iniziata (nell’interfaccia grafo “nodo-materiale” di Blender) con l’assegnazione di uno shader base per simulare il marmo, al quale sono susseguiti una cascata di “nodi” con gli shader che simulano gli altri strati pittorici che caratterizzano la policromina del sarcofago dedicato a Ulpia Domnina. Il grafo “nodo - materiale” finale, visibile in Figura 7, è dunque una sequenza di nodi, ciascuno guidato dalla “maschera” (SIOTTO *et al.* 2015B).

Dall’uso congiunto di MeshLab e Blender si è così riusciti ad avere uno shader “corretto”, che tiene conto della presenza di un certo pigmento o/e miscela di pigmenti (il valore della “maschera”) e della stratificazione pittorica (l’ordine nella sequenza dei “nodi”), come visibile





Figura 6 – Creazione di maschere per la sovrapposizione di più strati di colore: colore originale (sx), preparazione della maschera (centro); maschera di colore blu (dx).

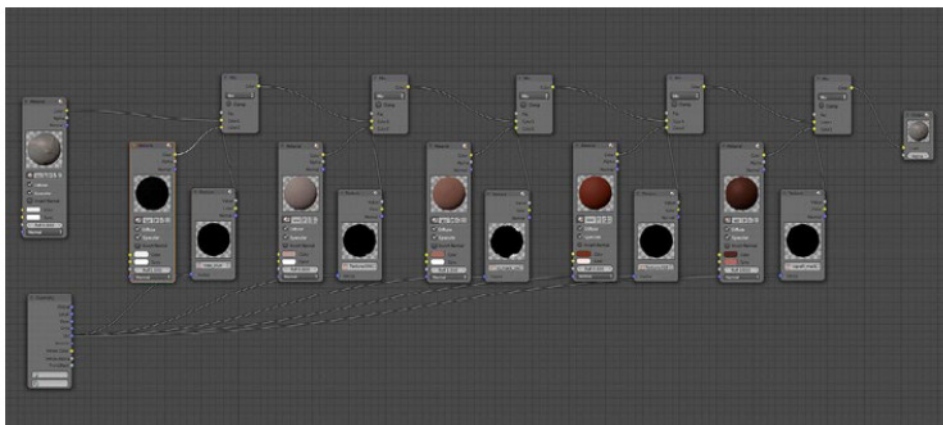


Figura 7 – Il grafo “nodo – materiale”, che assegna uno shader a ogni colore o a ogni livello diverso nella porzione scelta del sarcofago per l’attività di test.



Figura 8 – Test per creare una sovrapposizione di più strati di colore.



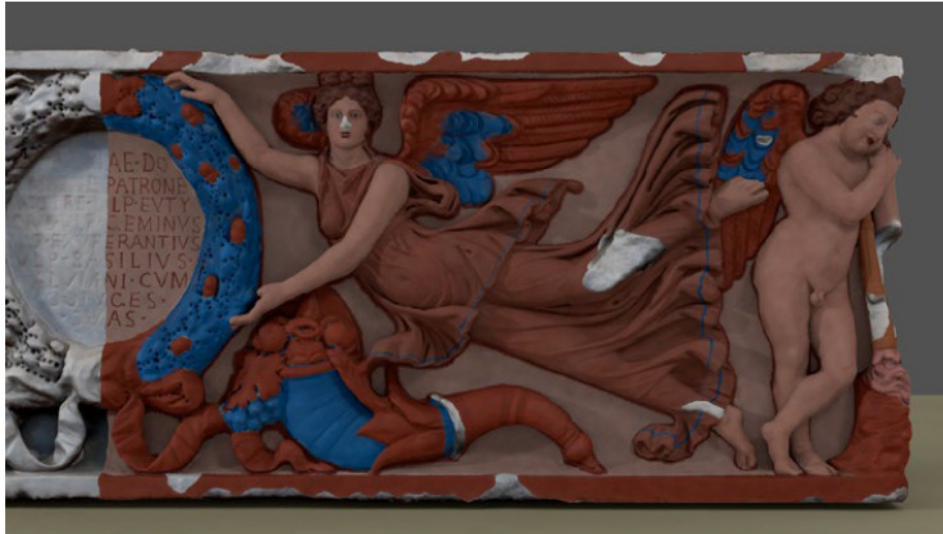


Figura 9 – Rendering in Blender (versione policroma in corso d'opera rispetto a quella di Fig. 5).

in Figura 8. Si sono così ottenute una serie di immagini fotorealistiche in cui ogni materiale ha la sua ombreggiatura corretta (e non la semplice rappresentazione Lambertiana utilizzata nella maggior parte degli strumenti in tempo reale), e una configurazione di illuminazione che simula il posizionamento attuale del manufatto artistico (non conoscendo quello originario perché non rinvenuto *in situ*), come visibile nella Figura 9.

Anche per quanto riguarda Blender, quest'attività ha messo in luce che devono essere affrontati due punti importanti: la progettazione di shader fisicamente corretti per ogni colore e una migliore simulazione dell'interazione della luce tra i diversi strati pittorici.

Per quanto riguarda il primo punto, al momento gli shader per i diversi colori sono stati creati manualmente utilizzando il colore di base calcolato da immagini calibrate e grazie ad alcuni dati sulla natura dei pigmenti quali, ad esempio, la granulometria (e quindi la possibile brillantezza o densità del colore) emersi dai risultati delle analisi scientifiche. Al fine però di avere una migliore simulazione sarebbe opportuno misurare la BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) della colorazione (ricreabile quanto più fedelmente possibile utilizzando l'approccio dell'archeologia sperimentale) e rappresentarla con uno shader.

Per quanto riguarda invece la possibilità di avere una migliore simulazione dell'interazione della luce tra i diversi strati si è visto che, nella configurazione attuale, anche se è possibile ottenere strati semitrasparenti (ossia che mostrano parzialmente quello sottostante), ciò non è sufficiente a riprodurre i diversi modi in cui la luce interagisce con gli strati pittorici. Alcuni effetti della luce più complessi come, ad esempio, la dispersione sub-superficiale fra i diversi strati (*sub-surface scattering*) o l'effetto della diffrazione non si sono potuti simulare per mancanza di input di dati (SIOTTO *et al.* 2015B).

3. Conclusioni

In questo articolo abbiamo presentato alcuni dei risultati di un progetto multidisciplinare più ampio sulla ricostruzione virtuale della ridipintura antica di metà III secolo d.C. del sarcofago dedicato a *Ulpia Domnina*. L'obiettivo della sperimentazione era di individuare e definire una metodologia integrata dove gli strumenti open source di computer grafica non siano un fine ma un mezzo che, agendo da "legante" fra i risultati delle analisi scientifiche e le informazioni derivate da indagini archeologiche, storico-bibliografiche e archivistiche, permetta di ottenere una restituzione rigorosa e realistica dell'antica policromia. Al tal fine si è combinato l'uso di due software open source, MeshLab e Blender. Questa combinazione, resa necessaria per superare alcune limitazioni intrinseche ai due software, si è complessivamente dimostrata vincente poiché ha permesso di realizzare dei rendering approssimativamente vicini a quelli reali.

Ringraziamenti

Si ringraziano vivamente la Soprintendenza Speciale per i Beni Archeologici di Roma e la dr.ssa Rosanna Friggeri, direttrice del Museo Nazionale Romano alle Terme di Diocleziano in Roma per le autorizzazioni e la collaborazione. Quest'attività è stata parzialmente finanziata dal progetto Ar.Te.Sal.Va. (<http://artosalva.isti.cnr.it/>).

Autori

- Eliana Siotto: Scuola Normale Superiore di Pisa, Visual Computing Lab ISTI-CNR in Pisa (<http://vcg.isti.cnr.it/>).
- Marco Callieri: Visual Computing Lab ISTI-CNR in Pisa (<http://vcg.isti.cnr.it/>).
- Matteo Dellepiane: Visual Computing Lab ISTI-CNR in Pisa (<http://vcg.isti.cnr.it/>).
- Roberto Scopigno: Visual Computing Lab ISTI-CNR in Pisa (<http://vcg.isti.cnr.it/>).

