

AS ARCHEOLOGIE SPERIMENTALI

TEMI · METODI · RICERCHE

Numero 2 - Anno 2021



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO

Archeologie Sperimentali.
Temi, Metodi, Ricerche.

II

2021

Direttore Scientifico

Vincent Serneels

Direttore Editoriale

Chiara Lebole

Comitato Editoriale

Chiara Lebole, Luca Bartoni, Valeria Cobianchi, Lara Comis, Giorgio Di Gangi, Yuri Godino, Marco Romeo Pitone.

Comitato Scientifico

Silvia Amicone, Lorenzo Appolonia, Andrea Augenti, Federico Barello, Riccardo Belcari, Rosa Boano, Enrico Borgogno Mondino, Mauro Paolo Buonincontri, Aurora Cagnana, Federico Cantini, Claudio Capelli, Maurizio Cattani, Fabio Cavulli, Lara Comis, Mauro Cortelazzo, Adele Coscarella, Annalisa Costa, Paola Croveri, Gianluca Cuniberti, Giorgio Di Gangi, Fulvio Fantino, Alessandro Fichera, Vanessa Forte, Francesca Garanzini, Enrico Giannichedda, Yuri Godino, Silvia Guideri, Chiara Lebole, Cristina Lemorini, Laura Longo, Nicolò Masturzo, Valeria Meirano, Alessandra Pecci, Marco Romeo Pitone, Francesco Rubat Borel, Marco Sannazzaro, Vincent Serneels, Fabrizio Sudano, Florian Téreygeol, Nicoletta Volante.

Archeologie Sperimentali. Temi, Metodi, Ricerche

Dipartimento di Studi Storici

Via S.Ottavio 20 – 10124 Torino

www.archeologiesperimentali.it

www.ojs.unito.it/index.php/archeologiesperimentali

redazione@archeologiesperimentali.it

Volume II, anno 2021

Tutti i contributi sono sottoposti a *peer review*

© Diritti riservati agli Autori e agli Editori (informazioni sul sito)
Torino, dicembre 2021
ISSN 2724-2501

In copertina: preparazione dei blocchi di arenaria impiegati nel cantiere di Guedelon, Francia - © Guédelon.
Elaborazione grafica *Studio Okapi*

Archeologie Sperimentali è una rivista scientifica digitale edita dall'Università di Torino e pubblicata con cadenza annuale. Nasce con l'intento di colmare il vuoto editoriale che caratterizza l'Archeologia Sperimentale italiana che, pur essendo riconosciuta come un valido strumento di conoscenza, non ha un luogo dedicato al dialogo tra l'archeologia, le scienze e la sperimentazione.

La rivista si rivolge alla comunità scientifica internazionale per accogliere contributi innovativi ed originali che approfondiscono la conoscenza delle culture antiche attraverso l'utilizzo dei metodi sperimentali. In particolare, l'attenzione è rivolta alle esperienze che operano nel campo dell'Archeologia Sperimentale, dell'Archeologia della Produzione, della Storia delle Tecnologie, dell'Artigianato Storico e dell'Esperienzialità.

L'obiettivo è quello di diffondere l'adozione di approcci pratici, sperimentali e multidisciplinari allo studio del dato archeologico, promuovendo la ripresa del dibattito sui significati e sui metodi dell'Archeologia Sperimentale e creando un luogo di incontro tra ricercatori che operano all'interno di questo ambito. *Archeologie Sperimentali* aderisce alla "Dichiarazione di Berlino" promuovendo la diffusione *online* gratuita dei dati e favorendo la comunicazione ed il dibattito scientifico; il progetto riconosce al lettore il diritto di accedere liberamente e gratuitamente ai risultati della ricerca scientifica.

È possibile pubblicare sia in inglese sia in italiano con l'obbligo di inserire un riassunto nella lingua non utilizzata nel contributo. La rivista *Archeologie Sperimentali* è connessa ai principali *repository* e *open libraries* internazionali. I contributi inviati al comitato redazionale sono valutati secondo il metodo della doppia *blind peer review*, avvalendosi di una rete internazionale di referenti specializzati.

Il dialogo tra studiosi è garantito, inoltre, dalle possibilità offerte dalla piattaforma informatica, grazie alla quale è possibile inserire *contenuti multimediali* allegati ai contributi; questa opportunità permette di integrare le informazioni con video e fotografie delle ricerche, consentendo, ad esempio, di presentare attività di scavo e di un laboratorio, fasi di protocollo sperimentale ed esperienze di artigianato e di etnoarcheologia.

Nota per gli Autori

Gli Autori possono proporre i loro contributi inviando il materiale a redazione@archeologiesperimentali.it

Indice dei contenuti

Editoriale

- L'Archeologia Sperimentale e il contributo delle Scienze Sociali. Una proposta filosofica per l'integrazione dei metodi e la disseminazione.....1**
L. Comis

Saggi

- Osservazioni preliminari sulla realizzazione sperimentale di un bulino di Ripabianca.....11**
A. Tomaselli, J. Conforti, M. Parisi
- Più di un semplice ciottolo: Un protocollo sperimentale per la comprensione del ruolo di strumenti macrolitici nella trasformazione delle risorse vegetali nel Paleolitico Superiore in Eurasia.....24**
G. Sorrentino, A. Lo Giudice, A. Re, A. Borghi, L. Longo
- Analisi multidisciplinari per la ricostruzione del processo produttivo delle ceramiche del castelliere di Guardamonte: proposte di metodo e risultati preliminari.....41**
G. Baratti, M. Sciortino
- Contributo allo studio dell'antica saldatura a colata di bronzo.....84**
M. Galeotti, A. Pacini
- Archeologia della produzione architettonica. Le regole dell'arte, il sisma e la prova sperimentale del tempo109**
I. Zamboni
- Guédelon: un chantier ouvert à l'archéologie expérimentale.....134**
N. Reveyron

Contributo allo studio dell'antica saldatura a colata di bronzo

Autori: Monica Galeotti*, Alessandro Pacini **

* Opificio delle Pietre Dure di Firenze
monica.galeotti@beniculturali.it

**Laboratorio Aliseda
ale.pacini@gmail.com

Abstract

Breve descrizione degli esperimenti di ricostruzione della saldatura dei grandi bronzi greci e romani dal VI sec. a.C. all'epoca romana fatti finora in Italia, Francia, Germania e Giappone. Prove sperimentali effettuate su piccoli provini in sabbia da fonderia e a cera persa. Prove sperimentali di saldatura a colata di bronzo saldante con sistema a cera persa su alcuni pezzi di panneggio di statuette in bronzo al piombo effettuate con materiali e tecniche di tipo antico. Le analisi SEM-EDX di campioni prelevati dai provini e dalla statuette hanno mostrato, in alcuni casi, l'avvenuta saldatura autogena col sistema della colata di bronzo saldante, sistema a cera persa.

Brief description of the experiments of the welding of Greek and Roman bronzes, dated from the VI sec. B.C. to Hellenism, in Italy, France, Germany and Japan. Experiment carried out on small proofs in casting sand and wax lost casting. Experiment of bronze welding with a wax lost system on some elements from a bronze drapery statuette with antique materials and techniques. The SEM-EDX analyzes of samples taken from the proofs and from statuette have shown, in some cases, the occur of the autogenous welding with the system of the welding bronze (lost wax system).

Parole chiave: ricostruzione, bronzo, saldatura, cera persa, antichità

1. Introduzione

È noto che la statuaria in bronzo greco-romana, dall'Arcaismo fino all'età Tardoantica, è stata fusa in parti separate che poi venivano saldate per ricomporre la scultura. Negli anni sempre più studi tecnologici, supportati da analisi chimiche e fisiche, hanno confermato la presenza di queste saldature nei bronzi antichi, tipicamente usate per collegare la testa e gli arti al busto, ma utilizzate anche per altre parti, a volte molto piccole, come il dito di un piede. Tra le fonti documentarie Filone di Bisanzio, erudito greco del III secolo a.C., ricorda la tecnica nel *Libellus de septem orbis spectaculis*: "gli artigiani prima modellano [le statue] nel loro insieme, poi, dopo averle tagliate nelle loro parti naturali: testa, busto, arti, fondono e assemblano le parti e infine erigono la statua [...]". Il passo è stato raccolto da Jochem Wolters in *Schriftquellen zur geschichte des wachsausschmelzverfahrens in orient und okzident*

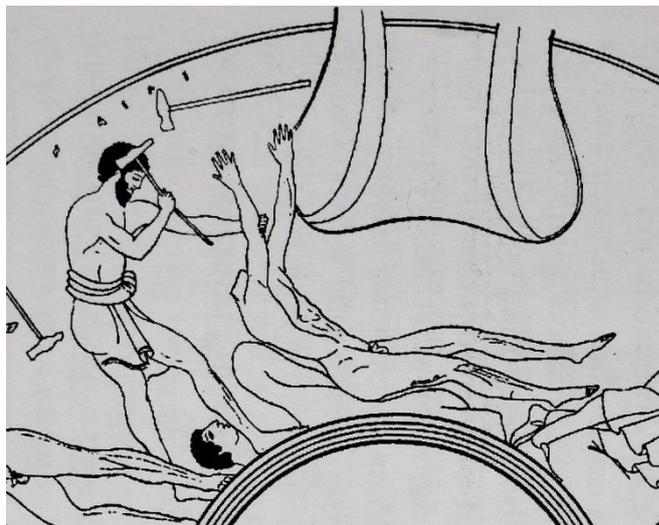


Figura 1: Kylix 'della fonderia', V secolo a.C., Altes Museum di Berlino (VIDALE 2002, p. 213).

(WOLTERS 2010, p. 68). Altra testimonianza, importante quanto celebre, è la raffigurazione di una bottega di

bronzisti sulla *kylix* detta appunto “della fonderia”, conservata presso l’Altes Museum di Berlino e datata al V secolo a.C. Un accurato studio delle scene della coppa è a cura di Massimo Vidale (VIDALE 2002, pp. 211-236) a cui rimando per approfondimenti. Personalmente mi preme evidenziare circa le scene della coppa due cose: la prima è l’interpretazione di Casson (VIDALE 2002, p. 230) riguardo l’operazione dell’artigiano barbuto che solleva un martello dal lungo manico come preparazione del collo della statua in previsione della saldatura della testa, che si trova ancora a terra, preparando lo spazio nella terra di fusione interna al busto. Condivido questa interpretazione. La seconda è il fatto che la statua acefala si trovi coricata su una massa di materia, argilla o quantomeno terra generica, che credo venga usata per mantenere in posizione stabile la scultura proprio in funzione dell’imminente saldatura della testa (fig. 1). Sono due notazioni sulla relazione tecnica che esiste tra la saldatura e la terra di fusione da una parte e il sistema di mantenimento in posizione delle parti da saldare dall’altra. Ulteriori suggerimenti su come si concepiva la saldatura dei grandi bronzi possono derivare dall’osservazione degli incastri usati per unire gli *akrolitha*, cioè quelle statue in pietra composte da parti separate in cui perni, tenoni e mortase, probabilmente rinforzati da collanti tipo resine e mastici, tenevano insieme il tutto. L’idea è quella di lavorare fin dall’inizio della scultura bronzea, per lo meno dalle fasi di formatura¹, su parti separate, per poi ricomporle grazie a incastri e saldature forti². Gli archeometallurghi hanno cominciato a discutere decenni fa sulla saldatura dei bronzi, ma per molto tempo la tecnica è rimasta avvolta da una nube di mistero abbastanza fitta; ciò che si sapeva era che si trattava di una saldatura autogena, ottenuta cioè senza apporto di leghe o metalli diversi da

quelli costituenti l’opera. In Italia, probabilmente per primo, Edilberto Formigli ha ipotizzato per questa particolare saldatura, detta “a colaggio”, due possibili sistemi: riscaldamento delle parti da saldare e colata della lega saldante nell’interstizio lungo la linea di contatto dei pezzi da unire, eventualmente con la presenza di ‘vaschette’³ oppure scorrimento di lega saldante lungo l’interstizio fino all’ottenimento della saldatura (tecnica che Formigli definisce impropriamente “puddellaggio”) (FORMIGLI 1984, p. 130). Nel primo caso le parti da unire sono riscaldate con brace, nel secondo dallo scorrimento della lega saldante. Tra i primi studi con analisi relative a questa tecnica, ricordo il contributo di Ulrich Zwicker presentato nel 1991 al seminario di Murlo dedicato ai grandi bronzi. Zwicker mostrò la sezione lucida di un campione proveniente da un frammento di bronzo trovato a Olimpia, da ricondurre probabilmente all’officina di Fidia, prelevato sul punto di saldatura. Non vi era differenza di composizione tra la lega saldante e il resto, si trattava quindi di una saldatura autogena, definita *fusion welding*; si evidenziò anche una perfetta compenetrazione tra saldante e getti e il fatto che la lega si fosse raffreddata molto lentamente. L’autore, anche in base a varie prove sperimentali da lui condotte di *fusion welding*, affermò che per ottenere la saldatura fosse necessario scaldare i pezzi almeno a 800° C prima di colare la lega saldante e che questi si dovessero trovare in ambiente riducente e inglobati in un supporto ceramico (ZWICKER 1993, pp. 140-144). Nel 1993 e nel 1995 altri due seminari a Murlo furono dedicati ai grandi bronzi; Formigli approfondì la questione con un esperimento di saldatura di un piede, a grandezza naturale, alla relativa gamba e con uno studio specifico pubblicato nel 1999 in *I grandi bronzi antichi* (pp. 83-91).

¹L’insieme delle operazioni che producono lo stampo di un modello. In bronzistica lo stampo è normalmente in gesso. Resti di stampi sono stati trovati in Italia nel sito dell’antica Baia (Napoli) la cui officina fu attiva tra l’epoca di Augusto e il II secolo (GASPARRI 1989, pp. 96-101), ma stampi in gesso provengono da diverse località del mondo antico, uno studio approfondito a tal proposito è quello di M. GRAWEHR, pubblicato nel 2010.

²Per saldatura forte s’intende sia una saldatura autogena, cioè l’unione di parti metalliche effettuata solo per mezzo del calore, sia una brasatura forte, cioè l’unione di parti metalliche per mezzo di una lega saldante, in genere a base di argento o rame, il cui punto di fusione sia superiore a circa 600°C. Testimonianza antica della saldatura forte è un passo di Cassio (Cassio Dione?) che si trova citato nella traduzione di Blaise de Vigenère della descrizione di Callistrato di alcune statue antiche, nota 112, pagina 251 dell’*Éditions La Bibliothèque* del 2010: “Ferruminatio per eadem materiam facit confusionem: plumbatura vero non idem efficit” cioè: “la saldatura forte provoca un fusione reciproca per mezzo della stessa materia: invero la saldatura a piombo (tenera) non produce lo stesso effetto” (trad. A. Pacini).

³La giunzione di parti di sculture in bronzo nota come saldatura a ‘vaschette’ è una variante della saldatura autogena conosciuta in Grecia dalla fine dell’età arcaica e messa a punto almeno dal secondo quarto del V secolo a.C. Le vaschette sono incavi ovaloidi ricavati sulla superficie delle parti di bronzo da saldare, metà su una parte e metà sull’altra, in modo che il metallo saldante li riempia e possano fungere da elemento di rinforzo della saldatura stessa.

L'esperimento non ebbe esito positivo probabilmente perché non si riuscì a portare i pezzi alla giusta temperatura e soprattutto perché si tentò una colata a cielo aperto, gettando il bronzo saldante direttamente negli incavi predisposti lungo la linea di giunzione tra il piede e la gamba. Nel 2011 è il gruppo di studio dei francesi del Louvre, tra cui l'analista Benoît Mille, che riprova la saldatura autogena con colata di bronzo (definita *flow fusion welding*), anch'essi a partire dalle osservazioni sui bronzi originali, i quali mostravano spesso vaschette all'esterno e corrispondenti cordoli in rilievo all'interno. I loro esperimenti, effettuati su un piccolo provino e con tecnologia moderna, hanno prodotto soltanto una parziale saldatura. Il lavoro è stato pubblicato in A. AZÉMA *et alii* 2011 (pp. 71-80). Mille aveva già scritto su questo argomento nel 2007, definendo le saldature presenti su un cavallo bronzeo gallo romano *soudure au bronze liquide* (MILLE 2007, pp. 88-99). Nel 2014 Frank Willer e Ronny Meijers pubblicarono uno studio generale sui bronzi antichi in cui ipotizzarono il rivestimento con terra di fusione delle sezioni da saldare in modo da poter far scorrere il bronzo saldante negli incavi predisposti fino all'ottenimento della saldatura, senza l'impiego del sistema a cera persa (WILLER, MEIJERS 2014, p. 175). Sono i giapponesi guidati da Koichi Hada (Università Cristiana Internazionale di Tokyo) e da Takashi Matsumoto (Istituto Arti di Musashino) che per primi hanno effettuato ricostruzioni sperimentali della saldatura al bronzo liquido su modelli simili a quelli antichi completando con successo gli esperimenti dalla modellazione delle parti della scultura (copie dei bronzi di Riace) fino alle saldature delle stesse. I risultati di questo importante lavoro sono stati presentati al convegno *I bronzi di Riace e la bronzistica del V secolo a.C.*, tenutosi a Messina e Reggio Calabria il 25 e 26 ottobre 2018 (C. MALACRINO, D. CASTRIZIO (a cura di), *I Bronzi di Riace - studi e ricerche*, Reggio Calabria, 2020). Hada e Matsumoto hanno ipotizzato tre tipi di tecniche per la saldatura a vaschette; hanno provato con ottimi risultati l'alimentazione della forma con un solo canale/imbuto di colata (cioè non hanno usato canali di alimentazione, ma soltanto uno o due canali di sfiato attaccati alla parte bassa del modello); hanno dimostrato la necessità di usare la tecnica a cera persa per le saldature; hanno messo a punto un sistema di tamponamento delle fuoriuscite del bronzo saldante per bloccare la colata al momento giusto, cioè appena ottenuta la saldatura. Restiamo in attesa dei risultati delle analisi su campioni

delle loro saldature, sezioni lucide, analisi al SEM e quant'altro dimostri anche microscopicamente ciò che appare riuscito dalla documentazione fotografica presentata al convegno.

2. Esperimenti

Alcuni anni fa avevo tentato un esperimento di saldatura per colata di bronzo saldante di due piccole piastre (cm 5x3x0,5) di bronzo (Cu 90%; Sn 10%, percentuali in peso) in cui avevo scavato a scalpello una vaschetta ovale per metà su una piastra e per metà sull'altra per una profondità di circa 2 mm. Per tenerle accostate in posizione, ricavando al contempo il canale destinato allo scorrimento del bronzo saldante, avevo deciso di usare una sabbia da fonderia moderna e le staffe di legno sovrapponibili. Una volta predisposto nella sabbia il cono di colata e il canale di uscita della saldatura, chiuse le staffe e sistemate in posizione inclinata, ho colato il bronzo dello stesso tipo delle piastre portato a fusione in fornello elettrico alla temperatura di 1100° C circa. La colata si è interrotta quasi subito, dato che il bronzo fuso aveva trovato la sabbia e le piastre da saldare fredde. Non ero riuscito nemmeno a riempire completamente la vaschetta, mentre la saldatura si era limitata a un piccolissimo punto negli angoli dei provini interessati dall'uscita della saldatura (*figg.* da 2 a 6). Ho eseguito il secondo tentativo agli inizi del 2020, recuperando i provini con la vaschetta e preparandone altri due che simulassero la sovrapposizione delle pieghe di un pannello: uno superiore incurvato e uno inferiore piatto. In questi ultimi la saldatura avrebbe dovuto passare attraverso i fori di 10 mm di diametro che vi avevo fatto al centro, unendoli uno sopra all'altro, e ho chiamato questa variante di saldatura a colata di bronzo 'passante'. Anche questa volta il bronzo usato era 90/10, ma la tecnica scelta era quella a cera persa. Infatti, con la cera d'api ho realizzato la vaschetta, i coni e i canali di colata e il canaletto di uscita del bronzo saldante. Nel caso dei provini sovrapposti il canale di colata attraversava i fori e si collegava al canaletto d'uscita posto al di sotto del provino inferiore piatto (*figg.* 7-8-9). Ho rivestito le coppie di provini con del luto di tipo antico (sabbia e argilla pliocenica con uguale volume di sterco di cavallo setacciato); una volta asciugate bene all'aria, le forme sono state cotte in forno elettrico facendo salire gradualmente la temperatura fino a 800° C. Contemporaneamente avevo messo a fondere il bronzo

il quale, non appena raggiunta la temperatura di 1100° C, è stato gettato nelle forme estratte dal forno e sistemate su un letto di sabbia. Durante questo spostamento la perdita di calore è stata minima. Una volta rotto il rivestimento ceramico, i provini sono apparsi ben congiunti, ho deciso quindi di segarli a metà in modo da ricavare le sezioni dei punti di saldatura. Levigati e lucidati i piani di queste sezioni mi è parso a occhio che la saldatura fosse riuscita (figg. 10-13). A questo punto dovevo provare la saldatura su pezzi di bronzo confrontabili con quelli di una statua antica, anche se di dimensioni ridotte. Il seminario del 13 settembre 2020 presso il mio laboratorio a Montepulciano era dedicato a questa sperimentazione, per la quale ho scelto una statuette di Venere alta 80 cm su cui ho realizzato una forma tassellata in gesso e ricavato da quella una copia in cera (o meglio in miscela cera d'api/colofonia, più elastica e resistente) riuscendo a ottenere spessori di soli 4 mm (fig. 14). Da questa ho tagliato quattro sezioni di panneggio dalla parte frontale centrale, cercando di seguire le linee del modellato. È in questa fase di lavorazione che mi sono reso conto della necessaria continuità tecnica tra la formatura in gesso e la forma delle sezioni di cera destinate a essere saldate tra loro. Infatti, è bene che le linee di sezionatura della scultura scelte in origine rimangano le stesse durante tutte le fasi di lavorazione fino alla fine, evitando tagli supplementari o aggiunte di materiale che complicherebbero il lavoro di assemblaggio e prolungherebbero quello di finitura dei getti. Per la fusione delle sezioni in cera ho provato il sistema semplice e diretto già usato dai giapponesi, pur nutrendo molti dubbi sulla possibilità di riempire forme larghe, piatte e sottili attraverso un solo punto d'ingresso del metallo, anche se non mancava un canale di sfiato nella parte inferiore delle forme. Il rivestimento delle cere è stato lo stesso di quello dei provini, ma questa volta avevo dovuto costruire un apposito forno, alimentato a legna, del tipo a tiraggio verticale (fig. 15). Dopo il riscaldamento iniziale delle forme con semplice fuoco di legna per l'eliminazione della cera (fig. 16), la cottura delle stesse è proseguita nella fornace, dove la

temperatura è stata controllata con un pirometro analogico fino al raggiungimento di 700° C circa. Il bronzo questa volta era composto da Cu 80%; Sn 10%; Pb 10%; una lega simile a quella di molti bronzi romani, relativamente più facile da fondere e lavorare. Per la sua fusione ho usato mantici in pelle, una fornacetta simile a quelle 'a cestone' e un crogiolo in argilla e grafite (fig. 17). Come per i piccoli provini, le forme sono state estratte dal forno nel momento in cui il bronzo nel crogiolo era completamente fuso e sono state sistemate, ancora molto calde, al centro di contenitori, riempiendo lo spazio intorno a esse con sabbia per tenerle in posizione e rallentare il raffreddamento. Sono rimasto sorpreso dal fatto che i getti fossero risultati completi, con superfici abbastanza lisce e con i dettagli del modellato ben definiti. Nell'entusiasmo non ho rispettato i necessari tempi di raffreddamento e da un elemento del panneggio si è staccato un pezzetto, fratturato a caldo sotto i colpi del martello (fig. 18). Ho approfittato del danno per fare una prova preliminare di saldatura a colata di bronzo liquido ricomponendo la frattura con la cera, mettendo l'imbuto di colata all'inizio della frattura e il canaletto di uscita alla fine (fig. 19). Poi ho proceduto con i soliti passaggi della fusione a cera persa, ma non ho cotto la forma fino al rosso ciliegia (cioè tra i 700 e gli 800° C), mi sono invece limitato a riscaldarla con un cannello a gas quel tanto che serviva per sciogliere ed eliminare la cera, dopodiché ho gettato il bronzo (stessa lega), sempre alla temperatura di 1100° C. Non sono riuscito ad ottenere la saldatura, ma soltanto un 'getto a incastro' ⁴, capace solo di tenere insieme i pezzi separati (fig. 20). I quattro elementi in bronzo del panneggio scelti per la sperimentazione sono stati levigati con rocce naturali abrasive strofinate con acqua (arenarie a granulometria sempre più fine e infine con pomice) fino all'ottenimento di una superficie liscia e uniforme. Ho poi collegato i singoli pezzi tra loro con la cera d'api, usando il sistema 'passante', quello a vaschetta e un'altra variante, che avevo notato sulla statua del *Pugile a riposo* del Museo Nazionale Romano e che ho chiamato saldatura a colata di bronzo 'a nastro' ⁵. Indurita completamente la cera risulta abbastanza

⁴Anche 'ricolata' o 'rigetto', meno esattamente 'rifusione'. Si tratta di un getto secondario effettuato a ridosso dell'oggetto precedentemente realizzato in fusione. Può essere o no dello stesso metallo/lega. Il getto secondario serve per correggere difetti, come l'integrazione di parti mancanti o lacune, oppure per unire parti dell'oggetto, in questo caso potendosi avvalere anche di sistemi di aggancio o incastro di vario tipo.

⁵La variante a nastro funziona come le vaschette, ma si presenta come un unico spazio stretto (molto approssimativamente intorno a un centimetro) e lungo, simile appunto a un nastro, che corre lungo tutta la linea di contatto tra i due pezzi da saldare. Anch'esso prevede uno scasso nello spessore del bronzo e anch'esso presenta sulla superficie interna della scultura un corrispondente cordolo irregolare sovente



Figura 22: Colata del bronzo saldante.

resistente e funge da collante; per pezzi non troppo grandi le integrazioni di cera sono sufficienti a permetterne la manipolazione e la movimentazione, ma in caso di pezzi più grandi sarà certamente necessario un sistema di sostegno delle parti in bronzo. Sulle applicazioni in cera ho attaccato i coni di colata e i canaletti di uscita nei punti che ritenevo più adatti, poi ho iniziato a rivestire la cera e parte del bronzo degli elementi della statua con il luto di tipo antico (fig. 21). La cottura della 'composizione' è avvenuta all'interno di un semplice contenitore realizzato con blocchi di tufo sovrapposti, inizialmente mettendo brace sotto di essa, poi riempiendo tutto con tronchetti di legno di pino. Ho notato quasi subito che il calore sviluppatosi era eccessivo, costringendomi a togliere un po' di legna, in compenso la cera era stata eliminata del tutto e la cottura del luto era completa. La stessa lega di bronzo usata per i pezzi di pannello è stata versata nei quattro imbuti di colata: in due casi il bronzo saldante è scorso molto bene, uscendo regolarmente dal canaletto predisposto allo scopo, ed è stato raccolto in un crogiolo fissato a un manico (fig. 22), in altri due il rivestimento refrattario si era leggermente crepato a seguito di una grave deformazione di tutta la composizione dovuta a una flessione sul fuoco delle barre di ferro che avevo messo a sostegno, delle quali avevo sopravvalutato la resistenza, causando la fuoriuscita del bronzo saldante

attraverso le crepe prodottesi nel luto. Dopo il raffreddamento e l'eliminazione della terra di fusione mi sono accorto che le parti del pannello di bronzo che non erano state rivestite di luto e che si trovavano esposte a maggior calore erano parzialmente fuse (fig. 23) ma, almeno in un caso, sembrava che la saldatura fosse riuscita. Per averne la certezza ho sezionato la saldatura che pareva buona, quella della saldatura passante del punto A, e un'altra meno buona, quella della saldatura passante del punto B (fig. 24). I due campioni, insieme a quelli realizzati nelle prove preliminari, sono stati sottoposti ad indagini di microscopia ottica ed elettronica.

3. Indagini microscopiche

Ad affiancare le osservazioni autoptiche riguardo all'esito degli esperimenti di saldatura, sono state effettuate osservazioni di dettaglio delle aree di giunzione mediante stereomicroscopia e microscopia elettronica a scansione (SEM), nonché analisi elementali con microsonda X⁶. Per queste osservazioni, i provini sono stati tagliati lungo una sezione passante per la giunzione che si voleva osservare e successivamente lucidati con carte abrasive con granulometria fino a 1200 mesh e a seguire con paste diamantate con granulometria fino a 3 micron. Sulla faccia superiore del provino costituito dalle due lastre saldate con il metodo della vaschetta (fig. 13 a destra), l'area di apporto del metallo saldante è a tratti visibile come una striscia di larghezza di 0,4-0,5 mm (fig. 25). A delimitare il cordolo di giunzione, si osserva una sequenza di pori e vuoti allungati. In prossimità dell'inizio della vaschetta, si può notare una biforcazione che dovrebbe corrispondere allo scasso effettuato sulle due lastre da unire. L'ingrandimento al microscopio elettronico (fig. 26) mostra il dettaglio della biforcazione con la sutura fra il metallo della lastrina e quello della vaschetta appena osservabile sul lato destro, difficile da identificare sul lato sinistro. Con ingrandimenti ancora maggiori (fig. 27) la continuità fra i due metalli appare evidente, pur essendo presenti numerosi tratti vuoti e piccole cricche disposte perpendicolarmente alla sutura, dovuti probabilmente a fenomeni di ritiro in fase di

a sezione subtriangolare. Il cordolo è visibile in figura 12, serve per facilitare lo scorrimento del bronzo saldante lungo la linea interessata dalla saldatura.

⁶Le indagini al SEM sono state effettuate impiegando un Microscopio EVO[®] MA 25 Zeiss. I provini sono stati analizzati con detector a elettroni retrodiffusi (BSE) e secondari (SE). L'analisi degli elementi è stata eseguita con sonda EDS X-MAX 80 mm² della Oxford in forma puntuale (spot) e su aree utilizzando il sistema AZTEC[®] della Oxford.

raffreddamento⁷. La struttura dendritica della lega delle lastre appare, nelle zone vicino alla giunzione che quindi hanno risentito dell'apporto del calore del metallo fuso, molto alterata ma pur sempre presente. A una visione laterale, il provino mostra la forma delle due vaschette, profonde meno di due millimetri (*fig. 28*). Il contorno delle vaschette è a tratti sottolineato da una non perfetta aderenza fra lega colata nello scasso e lega delle lastre, con una separazione di circa 5 μm in cui si annidano ossidi e solfuri di rame e qualche residuo dei componenti del mantello (*fig. 29*). Una situazione molto diversa si riscontra alla giunzione dei due provini che simulano la sovrapposizione delle pieghe di un pannello con colata a bronzo 'passante' (*figg. 12 e 13 a sinistra*): in questo caso l'osservazione allo stereomicroscopio evidenzia la marcata linea di separazione fra i due pezzi e la colata 'passante' fraposta, con vuoti e discontinuità materiche fra i vari elementi (*fig. 30*). Passando da campioni di dimensioni ridotte a elementi più grandi e di forma più articolata, ovvero le sezioni di pannello della statua di Venere realizzati con la lega Cu-Sn-Pb, l'osservazione a livello microscopico degli esiti della sperimentazione ha dato risultati molto interessanti. Infatti, il campione relativo alla saldatura passante sezionato nel punto A (*fig. 24*) osservato al microscopio elettronico (*fig. 31*) mostra in aree distanti dalla giunzione una struttura dendritica di dimensioni variabili ma comunque molto regolare, che interessa sia i pezzi da connettere che la colata secondaria. Gli spazi interdendritici sono occupati dalla fase eutectoide ($\alpha+\delta$) e da globuli di piombo, non solubile nelle fasi binarie Cu-Sn. Lungo i bracci delle dendriti si vanno ad accumulare anche le impurezze, sostanzialmente zinco e ferro, sotto forma di ossidi e solfuri. L'esame mostra una linea di giunzione fra gli elementi del pannello e la lega saldante (*fig. 32*) con alcune zone di continuità che si alternano a tratti in cui i due metalli sono separati da uno spazio vuoto, forse dovuto a un effetto di ritiro in fase di solidificazione (*fig. 33*). Come si può vedere dalle immagini, la maggiore parte del tratto di giunzione è caratterizzata da una sorta di solco in cui si è accumulato il piombo, insieme con le impurezze altofondenti, ovvero tutti quei componenti estranei alla lega rame-stagno. Si può osservare anche che in corrispondenza della linea di giunzione, e in particolare dove l'interconnessione fra i due metalli

sembra sia avvenuta in maniera più forte e continua, la struttura dendritica della lega del pannello è molto più disordinata o è del tutto scomparsa a favore di una crescita di cristalli poligonali e le particelle di piombo hanno dimensioni e ordinamento molto più irregolari. Il metallo apportato con la saldatura è invece caratterizzato da dendriti che in genere vicino alla linea di connessione sono molto più fini rispetto a quelle sviluppatesi lontano dalla saldatura, come è da aspettarsi in seguito a un raffreddamento rapido. Le aree sui due lati della linea di giunzione sono caratterizzate da un accumulo di porosità e di piccole mancanze.

4. Osservazioni conclusive

Sebbene la saldatura delle sezioni della statuetta sia riuscita solo parzialmente, l'esperimento ha permesso di valutare diversi aspetti di questa particolare tecnica di lavorazione della bronzistica antica. In primis l'opportunità di sezionare la scultura considerando bene quelle che saranno le saldature, non solo per quanto riguarda la scelta delle parti anatomiche, abbastanza scontata, ma anche per la scelta di un sistema di assemblaggio delle parti piuttosto di un altro. In secondo luogo, il posizionamento e i metodi di stabilizzazione e armatura delle parti da saldare valutando la possibilità di usare masse plastiche (come, per esempio, l'argilla) su cui poggiare i pezzi, fasce, fili, barre di metallo (il più probabile sembra il ferro) per legare e assemblare le parti e anche vere e proprie strutture di carpenteria per sorreggere e tenere in posizione gli elementi. Tutto ciò è fondamentale per i grandi bronzi e deve ancora essere sperimentato. Un altro aspetto molto importante è il metodo di cottura delle forme che contengono le saldature. Darei per certo l'utilizzo del sistema a cera persa, che rispetto alla colata diretta del bronzo saldante negli incavi predisposti è indiscutibilmente molto più efficace; infatti, il bronzo saldante, sostituendo le parti di cera, ricompono e integra alla perfezione il modellato durante il processo stesso della saldatura. La cera inoltre funziona da disossidante perché, bruciando, crea un ambiente riducente all'interno della terra refrattaria, cosa di non poca importanza ai fini di una saldatura autogena con leghe che contengono in gran parte rame, un metallo facilmente ossidabile e difficilmente disossidabile.

⁷Per una discussione dettagliata sulle modifiche della lega osservate al microscopio ottico ed elettronico a seguito dell'apporto di calore e metallo mediante getti secondari per saldatura si veda A. AzÉMA 2013.

Abbiamo visto che per elementi non troppo grandi conviene rivestire tutto di luto, anche le parti che non sono interessate dalle saldature, in modo da proteggere le superfici esposte alla fiamma. Ma in caso di grandi elementi bronzei sarebbe conveniente? Sto valutando la possibilità di costruire un vero e proprio fornello di cottura delle forme delle saldature direttamente sulla statua, sarà questa la prossima sperimentazione in questo campo. È importante anche saper valutare precisamente la temperatura di riscaldamento delle parti di bronzo da unire che, per poter ottenere una buona saldatura, ritengo debba essere almeno al colore rosso scuro, compresa cioè tra i 600 e i 700° C. Va sperimentato meglio il sistema di riscaldamento delle forme, per il quale ritengo preferibile un apporto di calore graduale e diffuso, evitando di esporre i pezzi a fiamme troppo aggressive; a questo proposito non si può fare a meno di valutare la qualità, la quantità, la forma e la disposizione del combustibile. È bene anche che il bronzo saldante sia portato a una temperatura più alta di quella di *liquidus* in modo da facilitarne la compenetrazione con quello degli elementi della statua. Ultima osservazione: per eseguire questo tipo di saldatura è necessario lavorare in squadra: una o due persone si occupano di eseguire i getti, mentre almeno un'altra persona deve poter recuperare il bronzo saldante o comunque chiudere i canaletti di uscita dello stesso al momento opportuno.

5. Considerazioni sul metodo

Il lavoro, che si è concluso durante il seminario di Montepulciano, non può essere definito propriamente archeologia sperimentale dato che si è trattato di tentativi generici, seppur fatti con sistemi e materiali più possibile coerenti con quelli del periodo dei grandi bronzi antichi⁸. La loro esecuzione non ha seguito particolari protocolli, se non i dati archeologici che avevo raccolto a proposito, la mia esperienza e il buon senso. In ogni caso è stata mia cura cercare di documentare al meglio tutti i passaggi, annotando e fotografando via via le cose usate e le azioni intraprese.

⁸ Gli unici elementi moderni sono stati il crogiolo, in impasto di argilla e grafite, e la retina metallica che avevo messo sotto alle forme di fusione (ho fatto io le leghe in percentuali in peso partendo da metalli puri al 99,9% certificati dalla ditta Ekisson di Arezzo). Avevo preparato un crogiolo di tipo antico con terra refrattaria naturale, ma essendosi leggermente incrinato durante l'essiccazione non ho voluto rischiare di impiegarlo per la fusione. A questo proposito è doveroso osservare che l'utilizzo di materiali moderni, anche nei casi in cui si è convinti che non possano influenzare i risultati dell'esperimento, è sempre e comunque da evitare. Nel caso del mio esperimento, per esempio, la rete metallica usata come supporto per le parti da saldare, seppur isolata dalla terra refrattaria, era zincata e una parte dello zinco è finita nelle zone di saldatura, compromettendo eventuali futuri confronti.

Certamente condizionati dalla disponibilità di risorse economiche e di tempo, quei tentativi hanno comunque avuto per me grande importanza, chiarendomi in modo inequivocabile alcune dinamiche fondamentali della saldatura a colata di bronzo saldante, tra le quali è emersa la questione di come tenere insieme i pezzi durante tutte le fasi operative. Si è trattato di una prova generale finalizzata all'affinamento della tecnica e all'ampliamento della conoscenza delle caratteristiche dei materiali. Solo la conoscenza diretta del procedimento artigianale permette infatti di affinare quella intuizione e sensibilità che non saranno mai misurabili, nè perfettamente riproducibili. È la conoscenza della metallurgia del passato (nell'accezione più vasta possibile, non escludendo approfondimenti che vanno dalla fisica alla linguistica) che supporta la pratica di laboratorio. Nel mio caso lo scopo è riuscire a lavorare come era stato fatto in passato, realizzando così una continuità, non solo tecnica, con le espressioni artistiche oggi scomparse.

Bibliografia

cura di), *Antiche officine del bronzo*, Atti del seminario di Murlo, 26-31 luglio 1991, Siena, pp. 137-152.

AZÉMA A., B. MILLE B., ECHEGUT P., DE SOUSA MENESES D. 2011, *An experimental study of the welding techniques used on large Greek and Roman bronze statues*, in "Historical Metallurgy", vol. 45, part 2, pp. 71-80.

AZEMA A. 2013, *Les techniques de soudage de la grande statuaire antique en bronze: étude des paramètres thermiques et chimiques contrôlant le soudage par fusion au bronze liquide. Matériaux*. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.

BLAISE DE VIGENERE, *La description de Callistrate de quelques statues antiques tant de marbre comme de bronze (1602)*, Parigi, 2010.

FORMIGLI E. 1984, *La tecnica di costruzione delle statue di Riace*, in "Bollettino d'arte", serie 3, vol. 1, pp. 107-142.

FORMIGLI E. (a cura di) 1999, *I grandi bronzi antichi - le fonderie e le tecniche di lavorazione dall'età arcaica al Rinascimento*, Atti dei seminari di studi ed esperimenti (Murlo, 24-30 luglio 1993 e 1-7 luglio 1995), Siena.

GASPARRI C. 1989, *Una officina di copisti in età medio-imperiale*, in "The greek renaissance in the roman empire: papers from the tenth British Museum classical colloquium", bulletin Supplement, 55, pp. 96-101.

GRAWEHR M. 2010, *Petra - ez Zantur IV*, Magonza sul Reno.

MILLE B. 2007, *Etude technique du cheval de bronze de Neuvy*, in *Le cheval et la danseuse, à la redécouverte du trésor de Neuvy*, Paris, pp. 88-99.

RISSE E., SAUNDERS D. 2015, *The bronze Apollo and Diana from Pompeii*, in "Antike Kunst", 58, pp. 78-96.

VIDALE M. 2002, *L'idea di un lavoro lieve: il lavoro artigianale nelle immagini della ceramica greca tra VI e IV secolo a.C.*, Padova.

WILLER F., MEIJERS R. 2014, *Hightech trifft antike*, in "Gebrochener Glanz", pp. 167-179.

ZWICKER U. 1993, *Investigation on Antique Techniques for Joining and Repairing of Bronzecastings*, in FORMIGLI E. (a



Figura 2: Impressione del provino nella sabbia da fonderia.



Figura 3: Staffe pronte per il getto.



Figura 4: Il getto sembra aver saldato i provini.



Figura 5: Ma si tratta solo di un aggancio meccanico.



Figura 6: C'è stata solo una minima saldatura in un piccolo punto.



Figura 7: Prova di saldatura a vaschetta.



Figura 8: Prova di saldatura passante tra due provini sovrapposti.



Figura 9: Applicazione della cera d'api: coni e canali di colata.



Figura 10: Rivestimento con luto di tipo antico.



Figura 11: Getto del bronzo saldante nelle forme calde.



Figura 12: Risultato del getto.



Figura 13: Le sezioni dei provini sembrano dimostrare l'avvenuta saldatura.



Figura 14: Parte frontale di una statuette in cera ricavata da stampi in gesso per le prove di saldatura.



Figura 15: Fornace a tiraggio verticale in fase di accensione.



Figura 16: Le sezioni della statuetta rivestite di luto dopo la cottura nella fornace.



Figura 17: Fusione del bronzo saldante.



Figura 18: Una sezione della statuetta dopo il getto. La frattura è dovuta a sollecitazione meccanica a caldo.



Figura 19: Prova di saldatura per riparare la frattura.



Figura 20: Il bronzo saldante ha solo agganciato le parti.



Figura 21: Preparazione di quattro sezioni della statuetta in vista delle saldature per assemblarle.



Figura 23: Parziale fusione di una delle sezioni della statuetta.



Figura 24: Le saldature uniscono due sezioni della statuetta in due differenti punti (A e B).

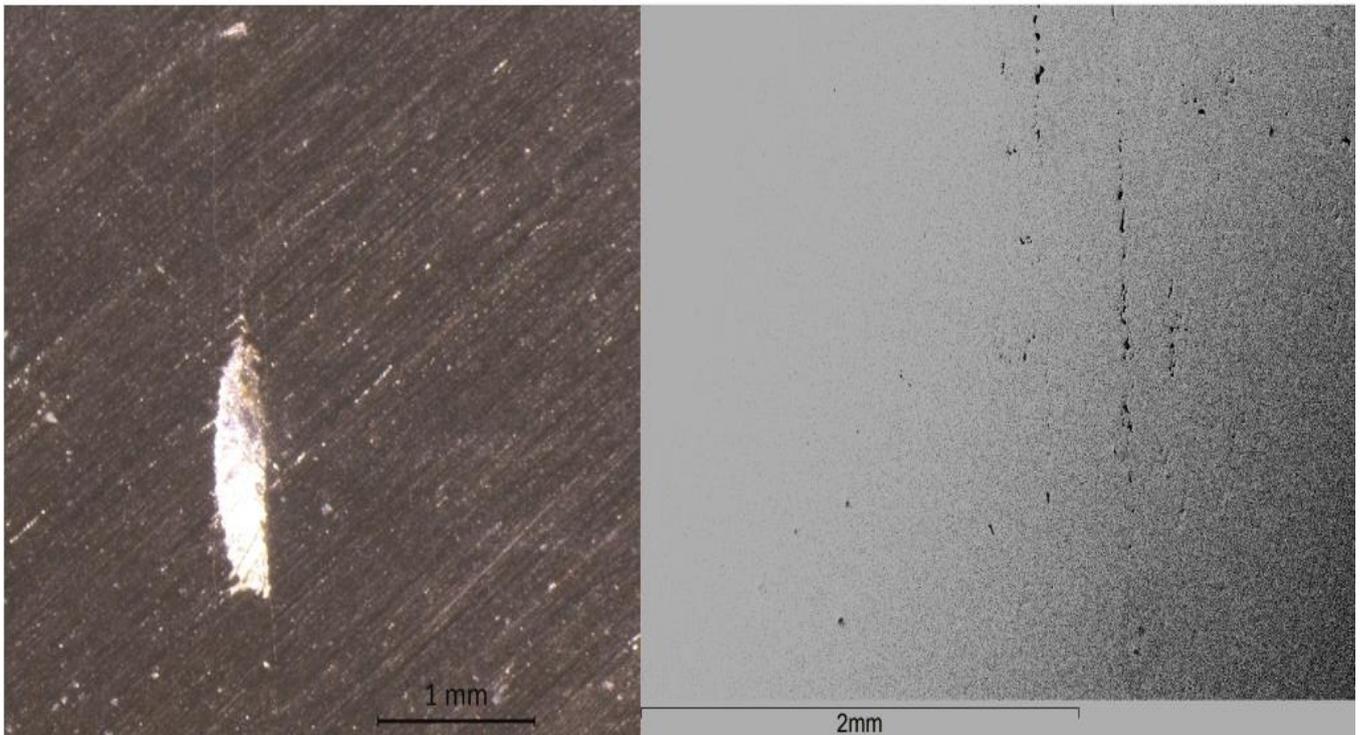


Figura 25: Provino piatto di fig.13, ripresa dall'alto, immagine allo stereomicroscopio (a sinistra) e al microscopio elettronico (a destra) (immagine in BSE): cordolo di giunzione fra le due lastre.

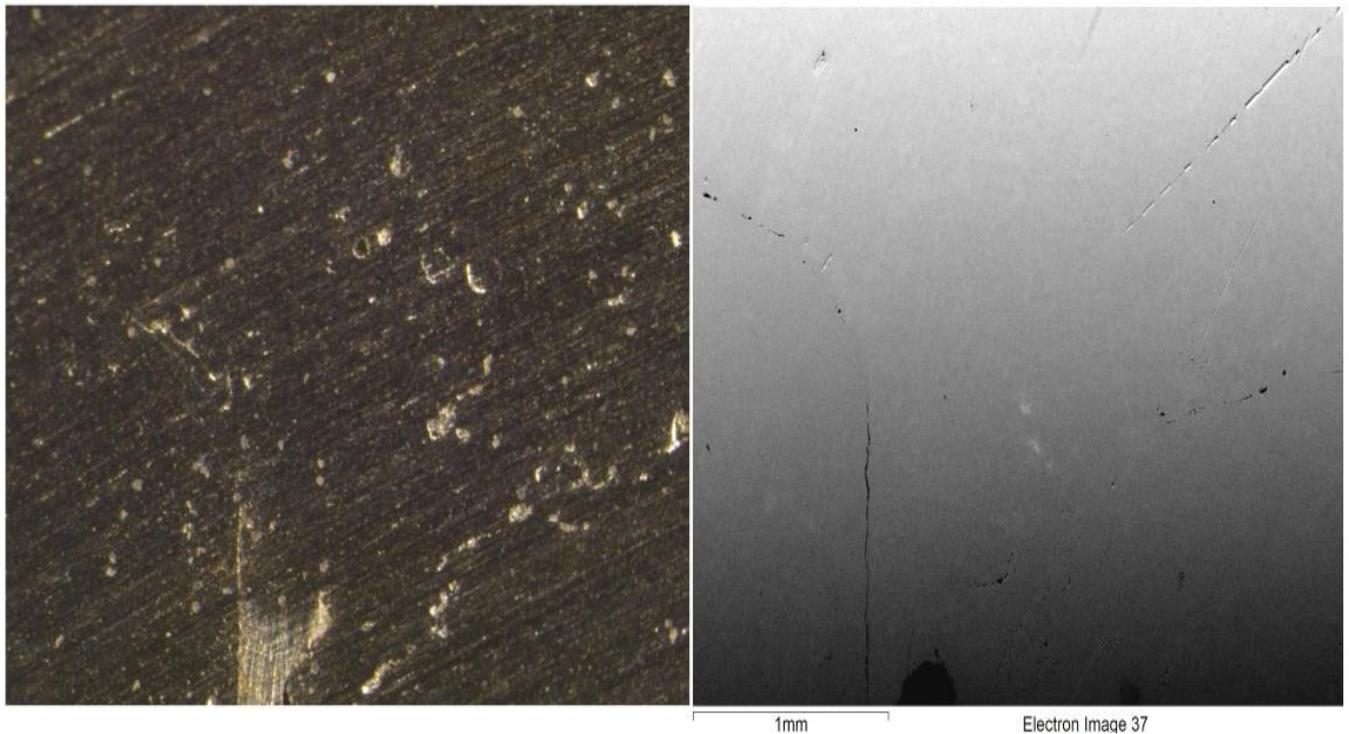


Figura 26: Provino piatto di fig.13, ripresa dall'alto, immagine allo stereomicroscopio (a sinistra) e al microscopio elettronico (a destra) (immagine in BSE): inizio della vaschetta.

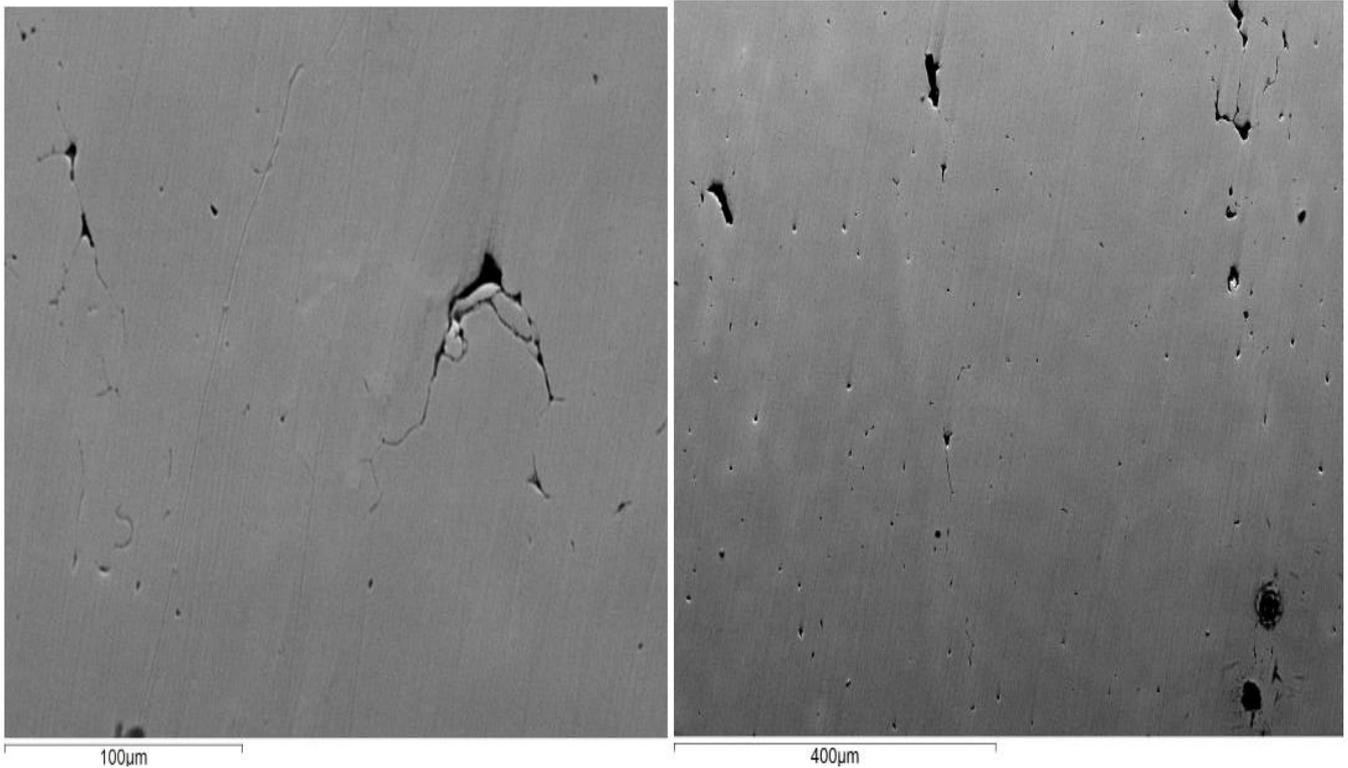


Figura 27: Provino piatto di fig.13, ripresa dall'alto, ingrandimenti di dettagli al microscopio elettronico in BSE: inizio della vaschetta (a sinistra) e cordolo di giunzione (a destra).

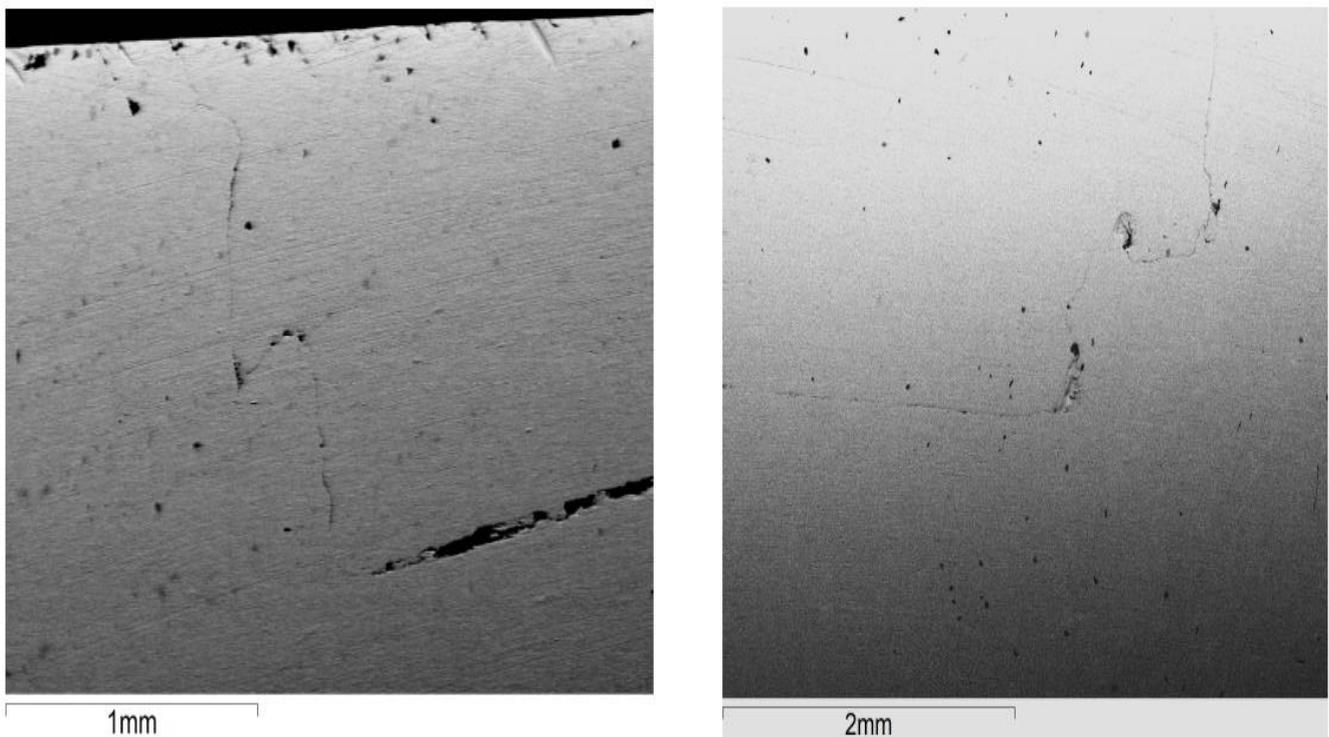


Figura 28: Provino piatto di fig.13, ripresa di taglio, immagini al microscopio elettronico in BSE: profilo dello scasso della vaschetta, a destra e a sinistra della giunzione.

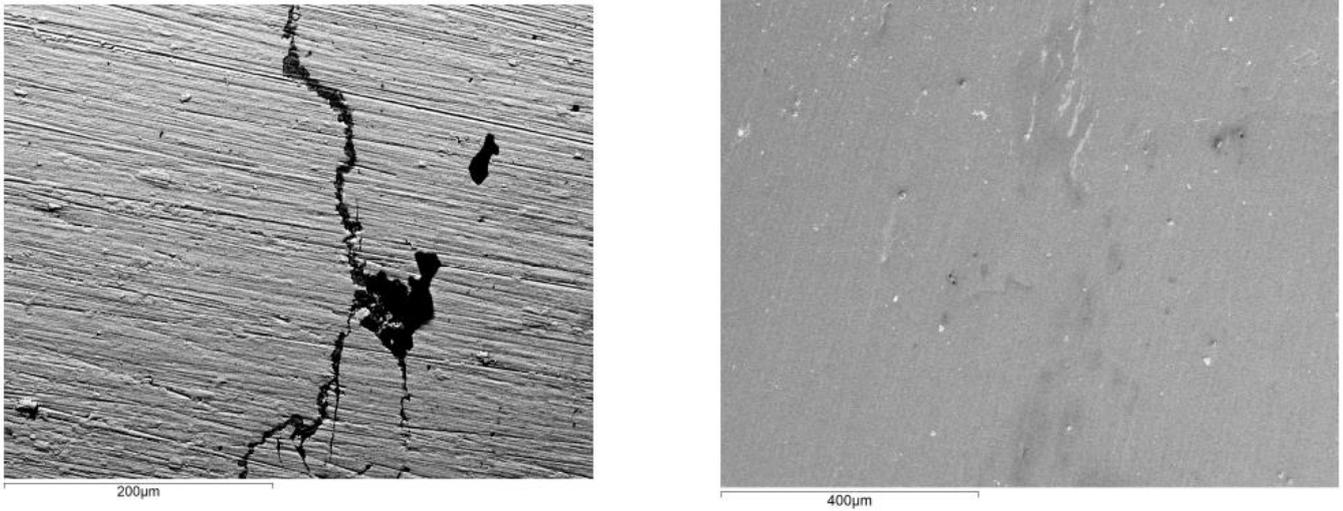


Figura 29: Provino piatto di fig.13, ripresa di taglio, immagini di dettaglio al microscopio elettronico: profilo dello scasso delle vaschette, a destra (immagine in BSE) e a sinistra della giunzione (immagine in SE).

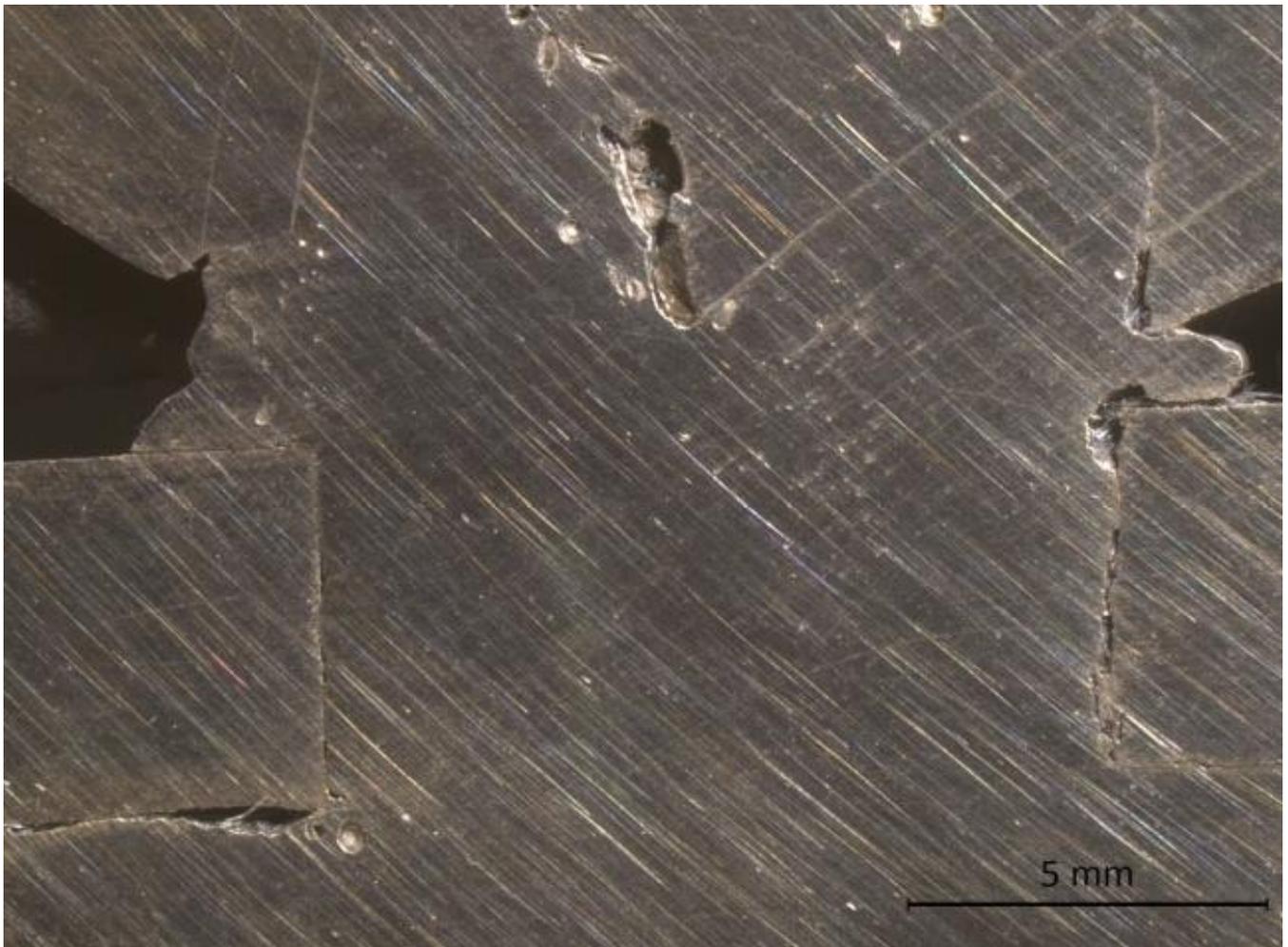


Figura 30: Provino curvo di fig.13, vista di taglio, immagine allo stereomicroscopio.

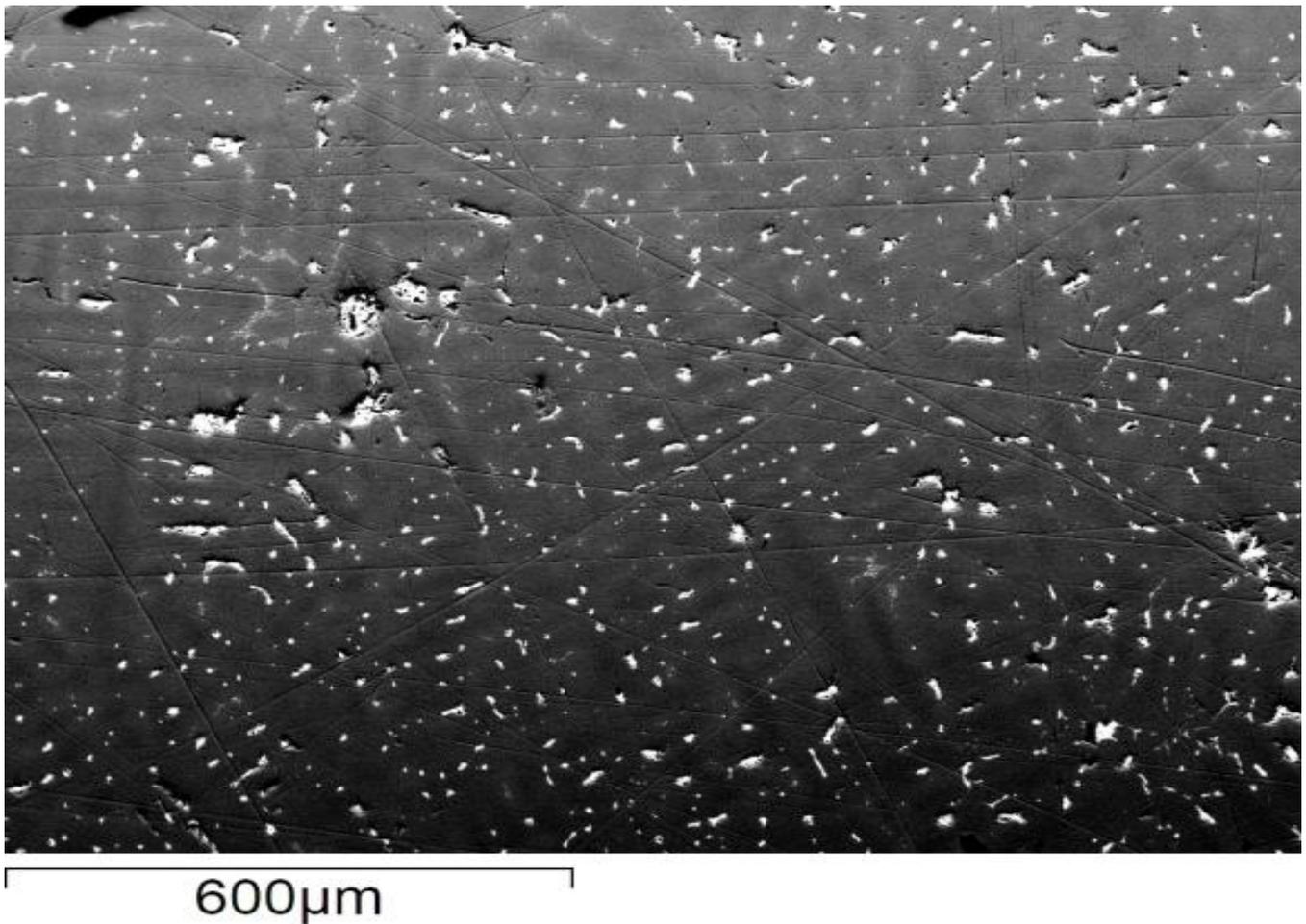


Figura 31: Provino di saldatura passante di fig. 24, immagine al SEM in BSE della lega degli elementi di pannello lontano dalla giunzione A.

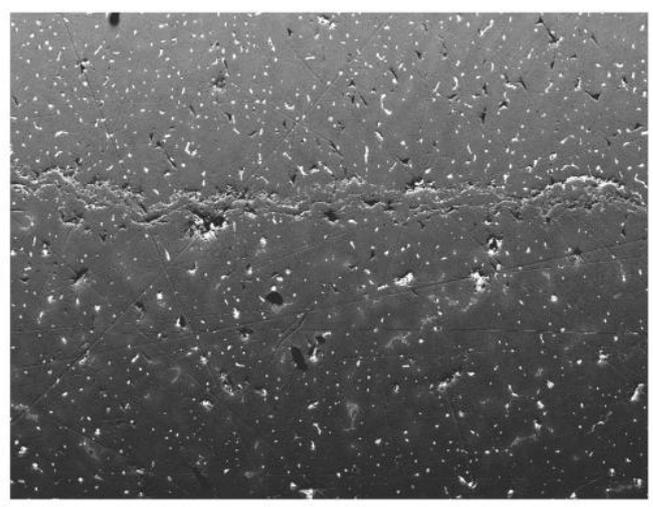


Figura 32: Provino di saldatura passante A di fig. 24, immagini al SEM in BSE. Nell'immagine di sinistra il metallo dell'elemento di pannello è in alto e quello della saldatura è in basso, nell'immagine di destra il metallo di saldatura è nella parte alta, mentre quello del pannello è in basso.



Figura 33: Provino di saldatura passante A di fig. 24, immagine al SEM in BSE