



# POLITECNICO DI TORINO

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

## Analisi metallurgica di canne di archibugio del XVII secolo

**Relatori:**

prof. Paolo MATTEIS  
prof. Giorgio SCAVINO

**Candidato:**

Riccardo SILVA

Luglio 2021



*Italia e Francia e tutte l'altre bande  
del mondo han poi la crudele arte appresa.  
Alcuno il bronzo in cave forme spande,  
che liquefatto ha la fornace accesa;  
bùgia altri il ferro; e chi picciol, chi grande  
il vaso forma, che più e meno pesa:  
e qual bombarda e qual nomina scoppio,  
qual semplice cannon, qual cannon doppio;  
qual sagra, qual falcon, qual colubrina  
sento nomar, come al suo autor più agrada;  
che 'l ferro spezza, e i marmi apre e ruina,  
e ovunque passa si fa dar la strada.  
Rendi, miser soldato, alla fucina  
per tutte l'arme c'hai, fin alla spada;  
e in spalla un scoppio o un arcobugio prendi;  
che senza, io so, non toccherai stipendi.*

— L. ARIOSTO, *Orlando furioso*



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Contesto storico di riferimento</b>	<b>3</b>
2.1	Il <i>canecchio</i> o forno alla bresciana . . . . .	3
2.2	La produzione di armi da fuoco . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Elementi di siderurgia antica</b>	<b>7</b>
3.1	Il minerale di ferro . . . . .	7
3.2	Preparazione del minerale . . . . .	8
3.3	Riduzione del minerale . . . . .	9
3.3.1	Metodo diretto . . . . .	9
3.3.2	Metodo indiretto . . . . .	12
3.4	Scorie, ganga e additivi . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Produzione delle canne bresciane</b>	<b>19</b>
4.1	La fucina o <i>fuoco grosso</i> . . . . .	19
4.2	La bollitura della canna nel <i>fogatello</i> . . . . .	20
4.3	<i>Trivellatore, drizzatore e vitonatore</i> . . . . .	21
4.4	<i>Molatore, fornitore e camuzzatore</i> . . . . .	22
<b>5</b>	<b>Analisi e prove sperimentali</b>	<b>25</b>
5.1	Reperto O109: canna di archibugio del XVII secolo . . . . .	25
5.2	Reperto O163: canna di trombone del XVII secolo . . . . .	26
5.3	Prelievo dei campioni . . . . .	27
5.4	Preparazione dei campioni . . . . .	28
5.5	Osservazione metallografica preliminare . . . . .	30
5.6	Prove di microdurezza . . . . .	30
5.7	Analisi chimica quantitativa . . . . .	32
5.8	Analisi chimica elementare delle inclusioni . . . . .	33
<b>6</b>	<b>Risultati: microstruttura, microdurezza e composizione chimica media</b>	<b>35</b>
6.1	Archibugio: vivo di volata . . . . .	35
6.1.1	Sezione trasversale . . . . .	35
6.1.2	Sezione longitudinale . . . . .	36
6.1.3	Microdurezza . . . . .	36
6.2	Archibugio: vite di culatta . . . . .	39
6.2.1	Sezione trasversale . . . . .	39
6.2.2	Sezione longitudinale . . . . .	42
6.2.3	Microdurezza . . . . .	44



## INDICE

---

6.2.4	Analisi chimica composizionale . . . . .	45
6.3	Trombone: vivo di volata . . . . .	45
6.3.1	Sezione trasversale . . . . .	45
6.3.2	Sezione longitudinale . . . . .	49
6.3.3	Microdurezza . . . . .	49
6.4	Trombone: culatta . . . . .	52
6.4.1	Sezione trasversale . . . . .	52
6.4.2	Sezione longitudinale . . . . .	52
6.4.3	Microdurezza . . . . .	52
6.4.4	Analisi chimica composizionale . . . . .	55
6.5	Trombone: raccordo . . . . .	58
6.5.1	Sezione longitudinale . . . . .	58
6.5.2	Microdurezza . . . . .	58
6.5.3	Analisi chimica composizionale . . . . .	59
<b>7</b>	<b>Risultati: composizione chimica delle inclusioni di scoria</b>	<b>61</b>
7.1	Composizione chimica della scoria . . . . .	62
<b>8</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>67</b>
8.1	Osservazioni sulla canna di archibugio (reperto O109) . . . . .	67
8.2	Osservazioni sulla canna di trombone (reperto O163) . . . . .	68
8.3	Future prospettive di ricerca . . . . .	68
	<b>Appendice A Glossario armi da fuoco</b>	<b>71</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>73</b>

## Elenco delle figure

2.1	Mappa della Val Trompia . . . . .	5
3.1	Minerali di ferro . . . . .	8
3.2	Forno a riduzione diretta . . . . .	11
3.3	Produzione diretta di acciaio . . . . .	12
3.4	Altoforno . . . . .	13
3.5	Produzione indiretta di acciaio . . . . .	14
3.6	Diagramma di fase FeO–SiO <sub>2</sub> . . . . .	15
4.1	Strategie di bollitura . . . . .	21
4.2	Distribuzione presunta delle inclusioni . . . . .	21
5.1	Reperto O109: canna di archibugio . . . . .	26
5.2	Reperto O163: canna di trombone . . . . .	27
5.3	Prelievo dei campioni S1, S1-L, S4, S4-L e SQ4 . . . . .	28
5.4	Prelievo dei campioni S3, S3-L, S6, S6-L, SQ6, S8-L e SQ8 . . . . .	29
5.5	Esempi di microstruttura . . . . .	31
5.6	Misurazioni di microdurezza Vickers . . . . .	32
5.7	Esempi di rilevamenti SEM-EDS . . . . .	34
6.1	Microstruttura campione S1 . . . . .	37
6.2	Microstruttura campione S1-L . . . . .	38
6.3	Cucitura campione S1 . . . . .	39
6.4	Misurazioni microdurezza S1 . . . . .	39
6.5	Scansione ad alta risoluzione campione S4 . . . . .	40
6.6	Stratificazione campione S4 . . . . .	41
6.7	Scansione e micrografia campione S4-L . . . . .	43
6.8	Cucitura campione S4 . . . . .	44
6.9	Misurazioni microdurezza S4 . . . . .	45
6.10	Cucitura campione S4-L . . . . .	46
6.11	Misurazioni microdurezza S4-L . . . . .	46
6.12	Analisi chimica campione SQ4 . . . . .	46
6.13	Microstruttura campione S3 . . . . .	50
6.14	Microstruttura campione S3-L . . . . .	51
6.15	Cucitura campione S3 . . . . .	51
6.16	Misurazioni microdurezza S3 . . . . .	51
6.17	Microstruttura campione S6 . . . . .	53
6.18	Microstruttura campione S6-L . . . . .	54
6.19	Cucitura campione S6 . . . . .	55



## ELENCO DELLE FIGURE

---

6.20	Misurazioni microdurezza S6 . . . . .	55
6.21	Analisi chimica campione SQ6 . . . . .	56
6.22	Microstruttura campione S8-L . . . . .	59
6.23	Cucitura campione S8-L . . . . .	59
6.24	Misurazioni microdurezza S8-L . . . . .	60
6.25	Misurazioni microdurezza S8-L . . . . .	60
7.1	Esame SEM-EDS di un'inclusione di scoria . . . . .	62
7.2	Analisi composizionale a due variabili delle inclusioni di scoria . . . . .	64
A.1	Elementi costitutivi di una canna di archibugio . . . . .	72

## Elenco delle tabelle

3.1	Minerali ferrosi . . . . .	8
3.2	Reazioni di riduzione del ferro al variare della qualità della vena . . . . .	17
3.3	Principali fonti di scoria . . . . .	17
4.1	Impianti, maestranze e processi tecnologici . . . . .	23
5.1	Catalogazione dei campioni . . . . .	29
6.1	Microdurezza misurata sul campione S1 . . . . .	36
6.2	Microdurezza misurata sui campioni S4 e S4-L . . . . .	44
6.3	Analisi composizionale campioni S4 e S4-L . . . . .	47
6.4	Microdurezza misurata sul campione S3 . . . . .	49
6.5	Microdurezza misurata sul campione S6 . . . . .	55
6.6	Analisi composizionale campione SQ6 . . . . .	56
6.7	Microdurezza misurata sul campione S8-L . . . . .	59
7.1	Analisi chimica globale delle scorie: reperto O109 . . . . .	65
7.2	Analisi chimica particolare della scoria: reperto O109 . . . . .	65
7.3	Analisi chimica globale delle scorie: reperto O163 . . . . .	66
7.4	Analisi chimica particolare della scoria: reperto O163 . . . . .	66



# 1 Introduzione

In queste pagine sono proposti i risultati delle analisi metallografiche condotte su due canne di archibugio del XVII secolo, nell'ambito di un più ampio progetto di caratterizzazione degli acciai antichi. Obiettivo principale dello studio è individuare all'interno del materiale elementi utili a ricostruire il processo produttivo di tali manufatti, in modo tale da fornire alle attuali conoscenze in materia – frutto della ricerca storica e del lavoro di collezionisti e appassionati – un contributo puramente ingegneristico, fondato sulle tradizionali tecniche di indagine adottate in campo metallurgico.

I reperti provengono dall'ampia collezione di armi d'epoca conservate presso il Museo delle Armi "Luigi Marzoli" di Brescia e sono state scelte in quanto esemplari rappresentativi di un determinato contesto storico-culturale: la fiorente produzione armiera delle valli bresciane – in particolare della Val Trompia – nel periodo in cui essa raggiunge il suo apice, tra i primi decenni del XVI e la seconda metà del XVII secolo. Più precisamente, i manufatti in esame appartengono a quella specifica categoria di canne definite dagli oplologi *lazzarine*, dal nome del capostipite della dinastia di armaioli che rese celebri questi prodotti in tutta Europa: Lazzarino Cominazzo. Si tratta di oggetti di lusso, destinati ad un ruolo di primo piano nel nascente mercato delle armi civili, sui quali è fiorita abbondante la letteratura per collezionisti, meno ricca quella storiografica, quasi del tutto assente quella metallurgica. Data la necessità di condurre analisi di natura altamente invasiva – tali da compromettere irreversibilmente l'integrità dei reperti –, un secondo criterio di selezione è rappresentato dal valore museale degli stessi. La Soprintendenza ai Beni Archeologici è infatti disposta a concedere l'autorizzazione a procedere solo per quei manufatti che non presentino carattere di unicità o che siano ritenuti sacrificabili ai fini della ricerca scientifica, in quanto poco idonei ad essere esposti. Nonostante l'ottimo stato di conservazione, le canne in esame hanno ottenuto tale licenza in virtù della presenza di piccoli difetti e dell'abbondante disponibilità di reperti analoghi nelle collezioni del museo.

L'analisi si è svolta presso i laboratori del Politecnico di Torino, dove ha avuto luogo l'osservazione al microscopio ottico (OM) dei campioni metallici prelevati nelle sezioni dei manufatti ritenute più significative. In particolare, si è scelto di orientare l'indagine verso quegli elementi che meglio di altri forniscono un indizio circa la storia metallurgica del manufatto e che permettono di formulare ipotesi ragionevolmente affidabili circa le tecnologie e i processi produttivi adottati. Un primo esame consiste quindi nell'individuare la morfologia e la distribuzione delle inclusioni di scoria all'interno della matrice metallica: queste sono relativamente abbondanti nei reperti antichi e, oltre a testimoniare il livello delle competenze metallurgiche dell'epoca in ambito fusorio, conservano le tracce delle lavorazioni meccaniche a cui è stato sottoposto il metallo. L'analisi chimica delle inclusioni è stata invece affidata a un più sofisticato sistema di spettrometria a dispersione di energia installato a bordo di un microscopio elettronico a scansione (SEM-EDS). A seguito di un attacco della superficie dei campioni con soluzioni acide, vengono poi analizzate le componenti metallografiche che costituiscono la microstruttura interna della canna. Dallo studio della dimensione e della forma dei grani, così come della presenza di determinate costituenti microstrutturali, emergono infatti preziose informazioni relative alle



deformazioni plastiche e agli eventuali trattamenti termici subiti dal materiale. L'analisi composizionale degli elementi chimici presenti in lega – basata sulla spettrometria a emissione ottica (OEM) – consente inoltre di determinare il tenore di carbonio e degli eventuali altri elementi alliganti, quali manganese, fosforo e zolfo. A corredo dell'osservazione metallografica sono infine proposte alcune misure di micro-durezza realizzate con penetratore Vickers, volte a stimare le proprietà meccaniche della matrice metallica e delle inclusioni di scoria in essa contenute.

Questo lavoro di ricerca ha richiesto un approccio fortemente multidisciplinare, capace di coniugare le moderne competenze ingegneristiche e metallurgiche con un'analisi critica delle fonti storiografiche. Un approccio giustificato dalla convinzione – tanto più forte se si pensa all'immenso patrimonio storico e artistico italiano, fondamentale risorsa economica e culturale del paese – che la distinzione tra le discipline definite umanistiche e quelle scientifiche possa configurarsi non come contrapposizione di saperi incapaci di dialogare l'uno con l'altro, ma come crocevia di declinazioni complementari di una medesima ricerca della conoscenza.

## 2 Contesto storico di riferimento

### 2.1 Il *canecchio* o forno alla bresciana

Lo sfruttamento delle risorse minerarie e la produzione di manufatti in ferro sono attività documentate nelle valli bresciane e bergamasche, in particolar modo nella Val Trompia, fin dal tardo medioevo – epoca a cui risalgono i primi interventi normativi in materia<sup>1</sup> – ma è possibile supporre che la vocazione siderurgica delle comunità locali affondi le proprie radici in tempi ben più remoti. Nel favorire lo sviluppo della metallurgia del ferro un ruolo di primo piano è riservato alle peculiarità geologiche e ambientali del territorio triumplino, poco adatto all'agricoltura ma particolarmente ricco di tre risorse fondamentali nell'economia delle società pre-industriali: giacimenti di minerale, legname in abbondanza e disponibilità d'acqua. Se le miniere dell'alta valle custodiscono le vene metallifere, dai fitti boschi che coprono i pendii alpini proviene infatti il legname utilizzato come combustibile nei forni e nelle fucine, mentre le acque del fiume Mella forniscono la forza motrice necessaria all'azionamento dei magli, dei mantici e di altri macchinari da officina. Tra le più antiche testimonianze materiali connesse alla metallurgia del ferro in quest'area vi sono oggetti di uso civile, quali chiodi, coltelli e attrezzi per l'agricoltura, ma anche spade, armature, punte di freccia e dardi da balestra [1].

L'età medievale rappresenta per la siderurgia bresciana e bergamasca un periodo di importanti innovazioni tecnologiche, segnatamente in ambito fusorio: è in questi secoli che nasce il cosiddetto *canecchio*, tra i primi forni in Europa per la produzione di ferro metallico secondo un processo di riduzione indiretta del minerale. Grazie all'innalzamento dei camini delle fornaci e all'introduzione di più efficienti sistemi di ventilazione forzata, i mastri ferrai delle valli alpine meridionali riescono infatti a raggiungere temperature di forno sufficienti a fondere completamente il ferro: il *canecchio* bresciano produce quindi un blumo ghisa metallica che, a differenza di quanto avviene all'interno delle fornaci a riduzione diretta, costituisce il prodotto primario del processo, non più uno scarto o un prodotto collaterale. Quello che gli storici della metallurgia definiscono acciaio bresciano altro non è che una lega ferro-carbonio di composizione estremamente eterogenea, prodotta per decarburazione della ghisa secondo una tecnica analoga a quella già sperimentata in Svezia e in Germania nel XIII secolo [2].

La superiorità tecnologica dei forni bresciani attira ben presto gli interessi delle principali signorie della penisola, che a partire dal XV secolo intraprendono una massiccia campagna di ammodernamento degli impianti fusori locali. Attratte dalla promessa di lauti compensi e migliori condizioni di vita, le maestranze bresciane e bergamasche sono incaricate della costruzione – ma anche e soprattutto della gestione in attività – di nuovi forni definiti “alla bresciana” su tutto il territorio italiano, dalla Garfagnana agli Stati Pontifici, dall'Ossola alla Sicilia. Il successo di questo tipo di impianti va cercato in parte alla maggiore produttività, propria dei sistemi

---

<sup>1</sup>La prima testimonianza scritta circa la regolamentazione delle risorse minerarie in Val Trompia risale al 1341, in occasione della stesura dello *Statuto* del comune di Bovegno. Questo documento, che sancisce il diritto di ciascun cittadino a sfruttare sostanzialmente senza limitazione alcuna i giacimenti locali, verrà poi ripreso ed ampliato dal più recente *Statuto della Valtrompia* del 1576 [1].



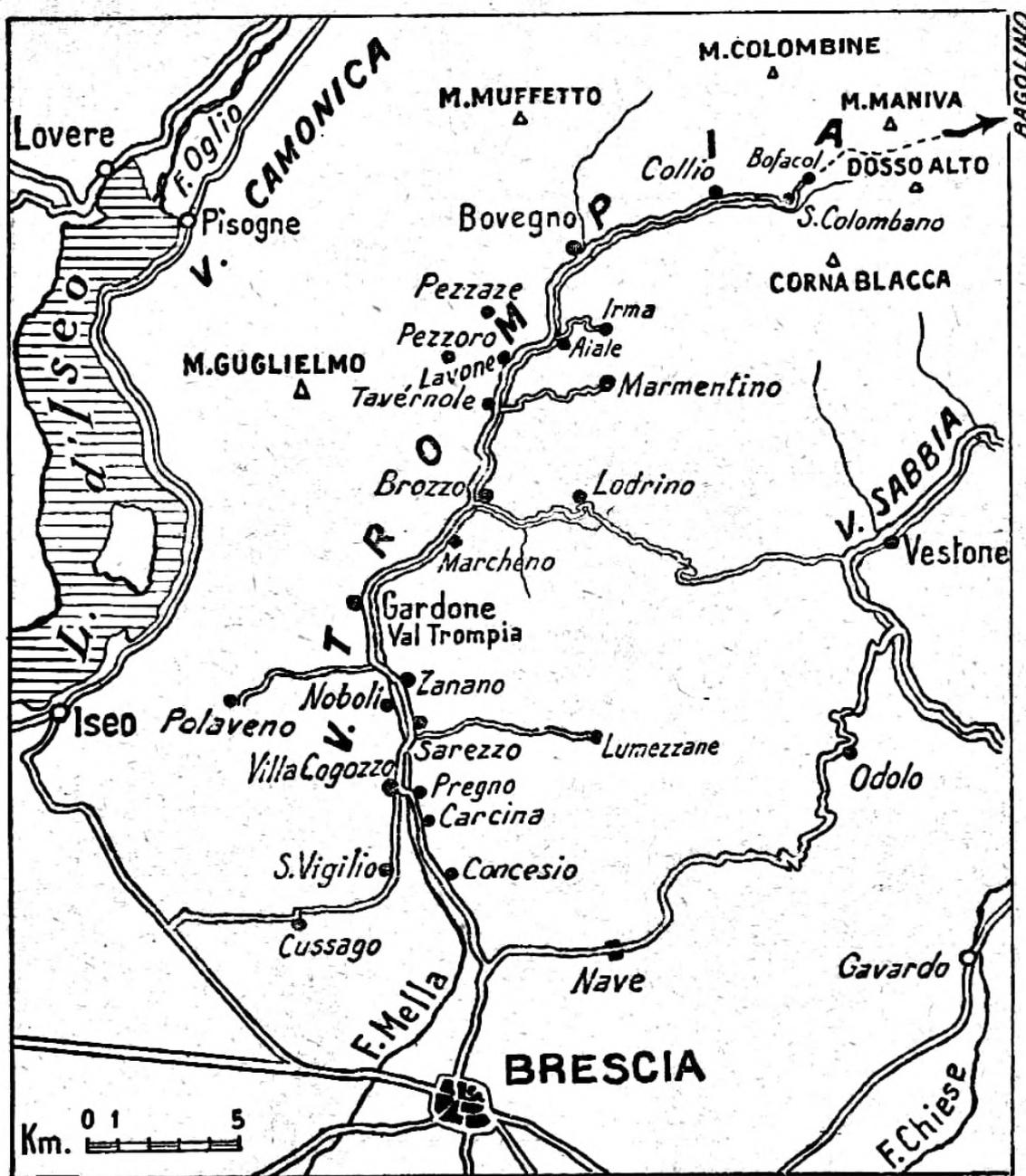
a colata continua (ovvero che non necessitano di spegnere il forno tra una colata e la successiva), e in parte alla possibilità di processare vene considerate di difficile riduzione in quanto ricche di minerale altofondente [3]. Unica eccezione all'interno del panorama storico-geografico di riferimento è rappresentato dalla Repubblica di Genova, che continuerà a fondere il minerale dell'Isola d'Elba in fornaci a riduzione diretta fino all'avvento dell'età industriale. Ma nel resto d'Italia, così come nel resto del continente europeo, la conversione delle ferriere medievali in altiforni è un processo graduale e irreversibile [4].

## 2.2 La produzione di armi da fuoco

Se in età medievale la siderurgia bresciana si distingue per la qualità del semilavorato grezzo, vale a dire dell'acciaio d'altoforno prodotto per decarburazione della ghisa, i secoli XV - XVII fanno di queste valli il più importante distretto armiero della penisola e uno dei centri di eccellenza in Europa nella produzione di armi da fuoco. Quando, nel 1433, le autorità cittadine consegnano l'intero territorio bresciano alla custodia della Repubblica di Venezia, la Val Trompia è già nota per la fabbricazione di archibugi e bombarde da galera, tanto da diventare nell'arco di pochi decenni l'interlocutore privilegiato dell'Arsenale della Serenissima.

Ma il vero punto di svolta nella specializzazione dell'economia locale si ha nel corso della seconda metà del XVI secolo, quando il ferro si sostituisce al bronzo nella produzione delle artiglierie e i numerosi conflitti tra le potenze europee vedono per la prima volta imporsi su vasta scala l'impiego delle armi da fuoco portatili. In questo nuovo contesto, la produzione armiera bresciana assume le fattezze di un vero e proprio distretto proto-industriale: al centro del sistema si afferma il comune di Gardone, che detiene il monopolio assoluto nella produzione delle canne, mentre i comuni limitrofi fungono da satelliti, specializzandosi nella produzione dei meccanismi di accensione, delle munizioni e degli elementi accessori. La filiera, che dalle miniere dell'alta valle si sviluppa quasi interamente lungo il percorso del fiume Mella, si conclude dentro le mura della città di Brescia, dove il prodotto viene decorato e immesso sul mercato [5].

Come i loro antenati medievali erano chiamati a emigrare per esportare le competenze metallurgiche negli altri stati della penisola, così anche i maestri armaioli rinascimentali – in particolar modo i maestri di canne gardonesi – sono oggetto delle mire geopolitiche dei signori italiani: nonostante i ripetuti tentativi delle autorità venete di trattenerne entro i propri confini quello che oggi definiremmo il *know-how* tecnologico strategico, sono ampiamente documentati casi di espatrio clandestino verso le potenze confinanti. Questo fenomeno, unito ai numerosi tentativi di riproduzione e contraffazione messi in atto da altri produttori europei, mette in luce quanto le canne bresciane siano un prodotto ricercato già nel XV secolo e costituisca indirettamente un indicatore della superiore qualità costruttiva di tali manufatti [6].



**Figura 2.1:** Riproduzione d'epoca di una carta fisica della Val Trompia. Nella parte settentrionale della valle, in corrispondenza delle sorgenti del fiume Mella, giacciono i comuni di Collio, Bovegno e Pezzaze, che custodiscono le miniere e i forni di arrostitimento del minerale. Scendendo verso sud si incontrano le località sede dei principali forni fusori e delle attività legate alla lavorazione del ferro grezzo: Tavernole, Gardone, Marcheno e Lumezzane. Nell'estremo meridionale della valle la città di Brescia, nella quale confluisce la produzione metallurgica delle valli Trompia, Camonica e Sabbia.



## 3 Elementi di siderurgia antica

Questo capitolo è dedicato alle tecniche di produzione del ferro grezzo e dell'acciaio adottate in Europa prima dell'avvento della rivoluzione industriale. La trattazione ha volutamente un carattere generale, in quanto dettata dalla necessità di descrivere un panorama molto variegato sia in termini diacronici sia in termini geografici: l'obiettivo è quello di cogliere gli aspetti comuni alle differenti tecnologie siderurgiche impiegate dai popoli e dalle società occidentali, rinunciando alle specifiche sfaccettature di ciascun singolo caso.

Dopo un'introduzione alle differenti tipologie di minerale e alle loro proprietà chimico-fisiche, vengono analizzati i processi metallurgici impiegati nella riduzione della vena in ferro metallico. Particolare attenzione è destinata alle innovazioni tecnologiche che interessano il Medioevo e l'età moderna, alla qualità del materiale prodotto e al tenore di carbonio presente in lega. La parte conclusiva, infine, prende in esame il ruolo delle impurità – elementi estranei rispetto a quelli strettamente coinvolti nella reazione di riduzione – nella formazione della scoria, argomento che sarà trattato in modo più approfondito nei capitoli successivi.

### 3.1 Il minerale di ferro

Con un abbondanza relativa del 5 % in peso, il ferro è al secondo posto nella classifica degli elementi metallici più diffusi sulla crosta terrestre, immediatamente dopo l'alluminio – in assoluto il metallo più diffuso, pari all'8 % del totale. Ciò nonostante, sono relativamente poche le formazioni minerali che ne contengono una quantità sufficiente a rendere la sua estrazione economicamente sostenibile. Se si escludono le piccole quantità di ferro meteoritico giunte sul nostro pianeta da fonte extra-terrestre, infatti, in natura questo elemento difficilmente si trova in forma di metallo puro: a causa della sua elevata reattività esso si presenta nella maggior parte dei casi sotto forma di ossidi, idrossidi e carbonati. Fin dal I millennio a.C. l'uomo ha imparato a riconoscere e a fondere quei minerali che, a parità di consumo di combustibile, gli consentono di estrarre una maggiore quantità di materiale metallico: la tabella 3.1 illustra le principali famiglie di minerali ferrosi storicamente interessate dall'attività siderurgica, in ordine decrescente rispetto al quantitativo teorico di ferro in essi contenuto<sup>1</sup>.

Il minerale più sfruttato nell'antichità è senza dubbio l'ematite, un ossido ad alto contenuto di ferro riconoscibile dalla caratteristica colorazione nero-rossastra. Generalmente priva di manganese e di fosforo, l'ematite è piuttosto diffusa in natura e può accompagnarsi a limonite, ossidi di rame e altri conglomerati inorganici. A partire dall'età del ferro e durante tutta l'età antica, la principale fonte di minerale ferroso nel bacino del Mediterraneo sono i giacimenti di ematite dell'Isola d'Elba, rinomata per l'assenza di contaminanti e per la facilità di riduzione.

La siderite – anche nota come ferro spatico – è un carbonato a medio-basso contenuto di ferro, caratterizzato da una significativa presenza di manganese, che gli conferisce una colora-

---

<sup>1</sup>Il vocabolario italiano non possiede due termini differenti per distinguere il minerale di interesse metallurgico-estrattivo dal generico minerale, inteso come mera sostanza chimica. Al contrario, la lingua inglese rivela una maggiore ricchezza lessicale e definisce "ore" l'oggetto dell'attività mineraria, "mineral" la sostanza generica.

**Tabella 3.1:** Minerali ferrosi di interesse siderurgico

minerale	formula	specie chimica	max. contenuto di ferro*	colore
magnetite	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	ossido	72,36 %	nero
ematite	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	ossido	69,94 %	rosso-nero
goethite	$\text{FeOOH}$	idrossido	62,85 %	giallo-marrone
limonite	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	idrossido	59,80 %	giallo-marrone
siderite	$\text{FeCO}_3$	carbonato	48,20 %	marrone chiaro
pirite	$\text{FeS}_2$	solfato	46,55 %	ottone

\* contenuto teorico di ferro calcolato su base stechiometrica (percentuale in peso)



(a)



(b)

**Figura 3.1:** Minerali di ferro: (a) siderite spatica ( $\text{FeCO}_3$ ), presente in abbondanza nei giacimenti metalliferi di Collio, Bovegno e Pezzaze, nell'alta Valle Trompia (b) ematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) proveniente dalle miniere dell'isola d'Elba.

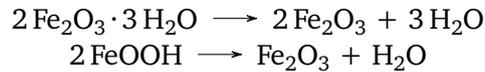
zione tendente al bruno chiaro. Nonostante la percentuale del ferro non superi mai il 50 % in peso, la quasi totale assenza di elementi nocivi quali fosforo e zolfo fanno di questo minerale un'ottima materia prima per le società pre-industriali, le cui limitate competenze metallurgiche non permettono un'efficace eliminazione dei contaminanti durante le operazioni di riduzione in forno. La siderite abbonda nei giacimenti delle Alpi Lombarde – incluse le miniere della Val Trompia –, della Stiria (Austria), del Siegerland (Germania) e dell'Inghilterra meridionale.

## 3.2 Preparazione del minerale

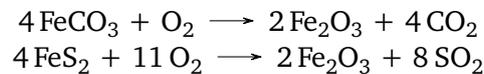
La trasformazione del minerale grezzo in ferro metallico è un processo articolato che richiede in primo luogo il lavaggio in acqua del materiale estratto e la sua frantumazione, in modo tale da separare il più possibile i composti ferrosi dalla roccia inerte – priva di interesse metallurgico e definita in gergo *gang*. Per ridurre il livello di umidità interna e favorire la decomposizione dei carbonati è poi necessario sottoporre il minerale ad arrostitura, operazione che consiste in un semplice riscaldamento su fuoco di legna alle temperature di 400-550 °C: questo non solo permette di eliminare l'acqua in eccesso, ma indebolendo la coesione dei minerali più duri



predispone il materiale a una maggiore azione riducente ad opera del monossido di carbonio nei successivi passaggi in fornace. Particolarmente esemplificative a tal proposito sono le reazioni di decomposizione della limonite e della goethite, che durante le operazioni di arrostitura sono trasformate in ossido di ferro (di più semplice riduzione) con rilascio di acqua allo stato di vapore.



Se il minerale di partenza è un carbonato, come nel caso della siderite, la conversione in ossido tramite arrostitura diventa inevitabile per poter avviare il processo di riduzione. Inoltre, quando la vena è contaminata da solfati o in presenza di importanti concentrazioni di pirite, come nel caso dei giacimenti elbani, l'arrostitura garantisce l'espulsione di buona parte dello zolfo, che viene liberato in atmosfera sotto forma di anidride solforosa [7][8].



Dal momento che le tecnologie dell'epoca non consentivano una perfetta separazione della ganga dal resto del minerale, questi residui inerti si trovano inglobati in misura copiosa all'interno di molti manufatti antichi sotto forma di scorie, ovvero inclusioni non metalliche, talvolta sufficientemente grandi da essere visibili ad occhio nudo – non fanno eccezione i reperti analizzati in questo documento, come sarà evidenziato nei capitoli successivi. Non sorprende dunque che esistano degli studi fondati interamente sul confronto della composizione chimica delle scorie con quella dei minerali grezzi, volti a ricondurre un determinato manufatto alla miniera o alla regione dalla quale proviene il materiale di cui esso è composto [9][10].

### 3.3 Riduzione del minerale

Il punto di contatto tra l'attività mineraria e quella siderurgica vera e propria è rappresentato dal processo di riduzione del minerale arrostito, che permette di trasformare il minerale ferroso in ferro metallico. La complessità di tale operazione, le cui origini risalgono al primo millennio a.C., ha fatto sì che storicamente si sviluppasse una grande varietà di tecniche e tecnologie differenti, ciascuna specifica di un determinato contesto storico, culturale e geografico.

Una semplificazione molto efficace nello studio dei processi siderurgici è quella di ricondurre questa molteplicità di tecniche e di tecnologie a due distinti metodi di produzione del ferro grezzo, noti come metodo diretto e metodo indiretto. Nel primo caso, la riduzione del minerale in ferro metallico è realizzata all'interno di un'unica fornace e non prevede alcuna trasformazione intermedia: da qui l'aggettivo "diretto". Al contrario, il processo indiretto si articola in due momenti distinti: una prima fusione in forno trasforma il minerale in ghisa metallica, mentre un secondo impianto – il forno di raffinazione – produce ferro metallico per decarburazione della ghisa [11].

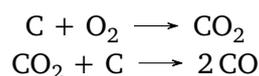
#### 3.3.1 Metodo diretto di riduzione del ferro

Il processo diretto per la produzione di ferro e acciaio si configura come una tecnologia più primitiva, che affonda le proprie radici in quella che la storiografia moderna definisce appunto età del ferro. In riferimento al continente europeo, le più antiche pratiche siderurgiche prevedono l'utilizzo di piccoli forni in argilla a tiraggio naturale, i bassi fuochi, capaci di estrarre ridotte quantità di metallo, nell'ordine della decina di chilogrammi. Con il progredire della tecnica, questi forni rudimentali evolvono da semplici cataste o buche nel terreno in fornaci più

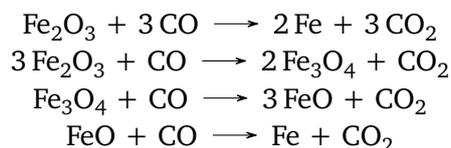


strutturate in pietra e materiale refrattario, in cui il tiraggio è assicurato da mantici prima azionati manualmente, poi messi in moto da meccanismi idraulici. Il periodo storico più denso di innovazione tecnologica in questo campo è forse il medioevo, durante il quale si assiste a una graduale trasformazione dei forni fusori, che in virtù di camini sempre più alti e di più efficaci sistemi di ventilazione riescono a raggiungere temperature più elevate e una migliore produttività – elementi fondamentali per la successiva transizione dal metodo diretto di produrre ferro a quello indiretto [12][13].

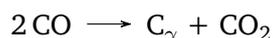
Nonostante le ferriere a riduzione diretta possano presentarsi anche molto differenti tra loro per forma e dimensioni, in funzione del contesto geografico e cronologico in cui si collocano, il processo tecnologico che sottende al loro funzionamento è sostanzialmente invariato. Ad accomunare questo tipo di impianti è infatti il medesimo limite operativo, vale a dire l'impossibilità di raggiungere al proprio interno una temperatura sufficiente a garantire la fusione del ferro (si assuma come riferimento la temperatura di fusione del ferro puro, pari a 1536 °C). Come rappresentato dalla figura 3.2, la conversione degli ossidi di ferro in ferro metallico si realizza attraverso una serie di reazioni chimiche di riduzione, attivate dalla combustione del carbone di legna. L'azione riducente è affidata principalmente al monossido di carbonio, che viene a formarsi dall'interazione ad alta temperatura tra il carbonio contenuto nel carbone e l'ossigeno, introdotto nel forno attraverso appositi canali noti come *tuyères*.



All'interno della torre di riduzione si sviluppano temperature crescenti a mano a mano che ci si avvicina alla base, che è sede della camera di combustione. Nei livelli più alti, dove le temperature non superano i 1000 °C, l'ematite – naturalmente estratta dai giacimenti o proveniente dall'arrostitura della siderite – è in misura minore trasformata in ferro metallico, mentre per la maggior parte è ridotta in magnetite e in ossidi più elementari, tipicamente wüstite (FeO).



Mentre si compiono queste reazioni, la massa di ferro misto a minerale residuo affonda lentamente fino a raggiungere i livelli più bassi del forno, dove le temperature possono raggiungere i 1200-1400 °C: qui gli ossidi non ancora ridotti reagiscono con il carbonio allo stato solido liberando CO, che sale lungo il camino e contribuisce al mantenimento di un'atmosfera riducente nei livelli superiori. Al di sopra dei 1000 °C inizia inoltre la reazione di carburazione del ferro metallico, che a questo punto è lecito definire acciaio.



(dove  $\text{C}_\gamma$  rappresenta il carbonio che entra in soluzione solida nell'austenite)

Al termine del processo di riduzione, dal fondo del basso fuoco viene estratta una massa spugnosa di ferro metallico definita *blumo* (talvolta *bluma*, al femminile)<sup>2</sup>. Questo è in genere caratterizzato da un basso tenore di carbonio – distribuito in modo estremamente disomogeneo e in proporzioni variabili indicativamente tra lo 0,02-0,8 % [2] – e da una buona malleabilità,

<sup>2</sup>dall'inglese *bloom*, letteralmente "fiore". Da questo termine derivano i sostantivi più comunemente utilizzati in ambito anglosassone per definire il basso fuoco e il processo di riduzione diretta del minerale, rispettivamente *bloomery* e *bloomery smelting process*.

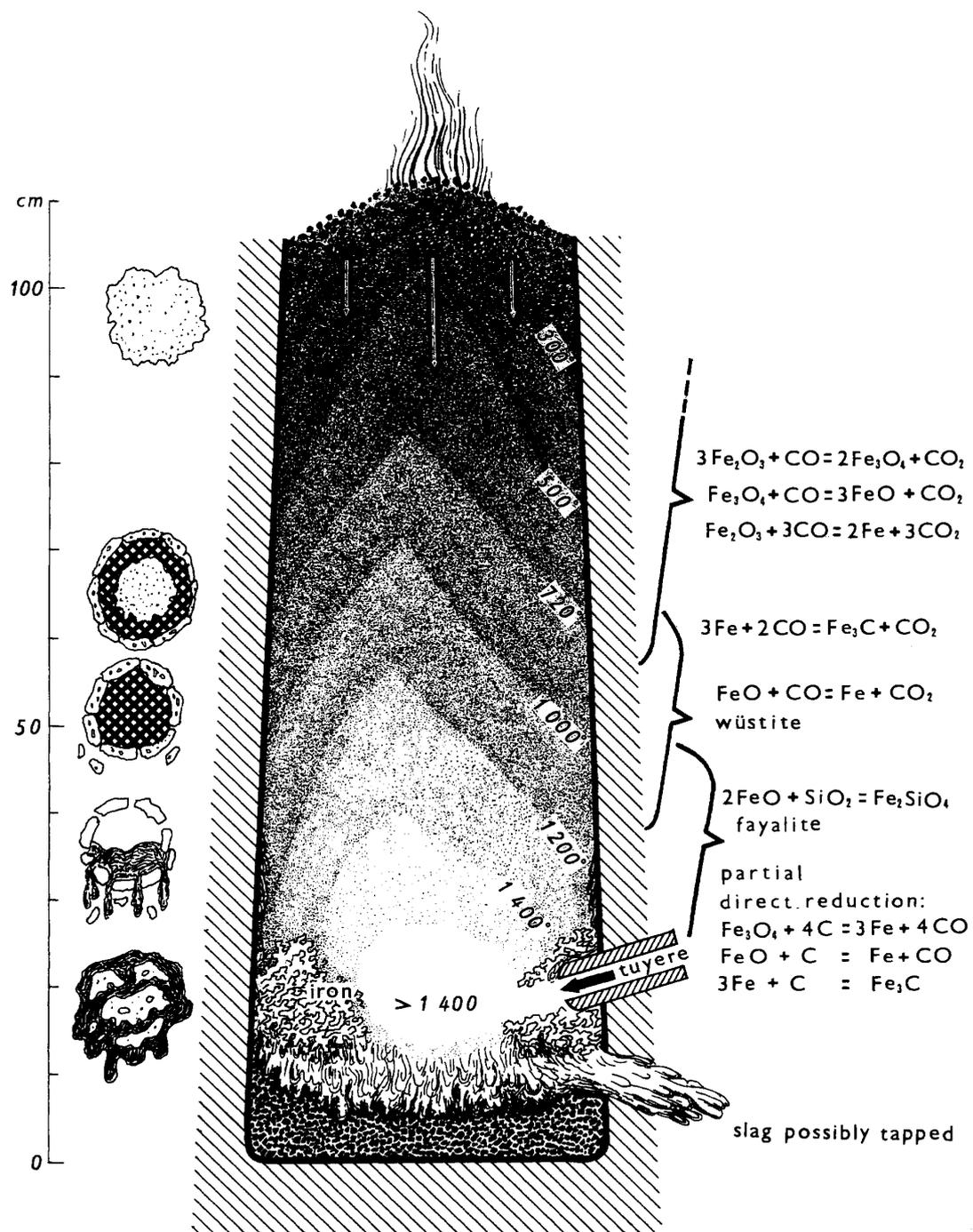
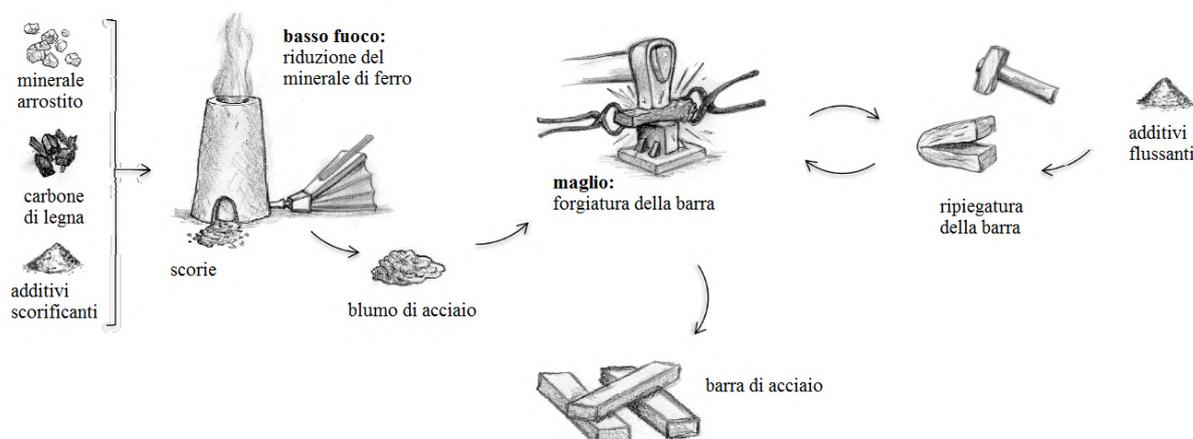


Figura 3.2: Rappresentazione schematica del funzionamento di un forno fusorio per la riduzione diretta del minerale ferroso [8].



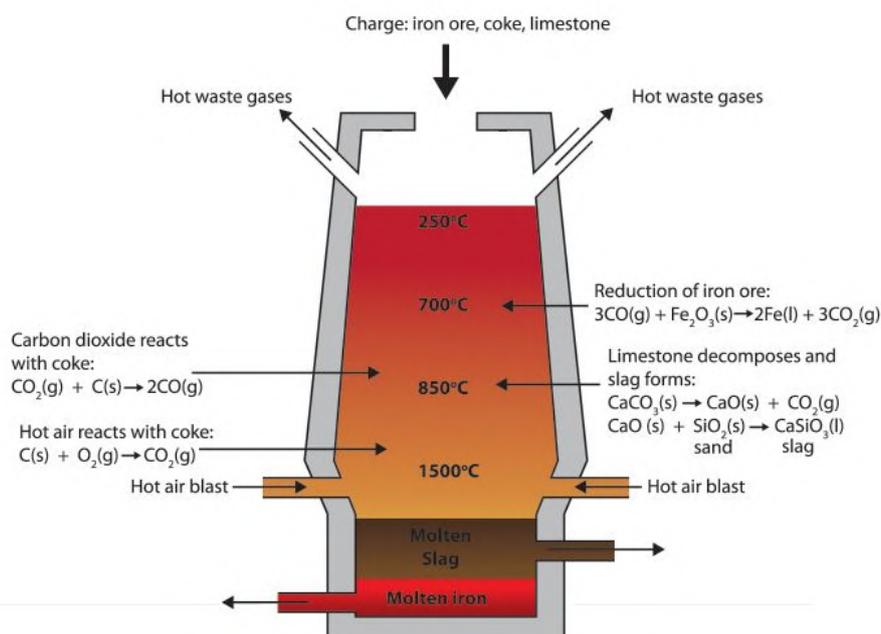
**Figura 3.3:** Schema funzionale del processo diretto per la produzione di semilavorati in acciaio. Rielaborazione di un'illustrazione di R. Pallaro [14].

cosa che lo rende particolarmente adatto alla formatura per deformazione plastica. Per ridurre la porosità interna e l'eterogeneità composizionale, il blumo è sottoposto a ripetuti cicli di martellatura a caldo e ripiegatura: operazioni fondamentali per eliminare la scoria e ottenere un semilavorato dalle proprietà meccaniche sufficientemente uniformi. Quando il tenore di carbonio richiesto è maggiore rispetto a quello generalmente introdotto in lega durante il processo di riduzione – è questo il caso degli acciai destinati alla fabbricazione di lame o attrezzature agricole –, il grezzo metallico viene sottoposto ad un ulteriore trattamento di carburazione. In un'apposita fornace, si ricopre il metallo con uno strato di carbone di legna e lo si porta ad una temperatura pari o superiore a 800 °C: favorita dall'elevata concentrazione di CO, la diffusione del carbonio all'interno del reticolo cristallino del ferro procede secondo una legge proporzionale alla radice quadrata del tempo di permanenza in forno.

Come si è già detto, il metodo diretto non prevede la fusione del ferro, che durante l'intero processo di riduzione si trova sempre allo stato solido. Tuttavia, considerando la scarsità dei mezzi dell'epoca nel controllare con precisione le evoluzioni termiche che si verificano all'interno del forno, è possibile che in particolari circostanze si raggiungano temperature locali prossime a quelle di liquefazione del metallo. Le tracce di ghisa rinvenute dagli archeologi in prossimità di alcuni basso fuochi medievali, che testimoniano l'avvenuta fusione di una parte della carica, devono dunque essere intese come prodotto accidentale dell'attività siderurgica: non solo non intenzionale, ma perfino poco gradito, a causa della scarsa lavorabilità del materiale.

### 3.3.2 Metodo indiretto di riduzione del ferro

L'evoluzione dei bassi fuochi medievali in altoforni – imponenti fornaci in pietra e materiale refrattario – segna il passaggio dal metodo diretto al metodo indiretto. Grazie a camini sempre più alti e a più efficaci sistemi di ventilazione, che per la prima volta sfruttano l'azione motrice dell'acqua di fiumi e canali, le temperature raggiunte da questi forni superano i 1500 °C, garantendo la completa fusione del ferro durante il processo di riduzione. Adottato in Cina a partire dal XIII secolo e diffuso – o riscoperto – in Europa sul finire del medioevo, il metodo indiretto di produrre acciaio rappresenta probabilmente la più importante innovazione tecnologica nel campo della siderurgia pre-industriale. Diversamente dal metodo diretto, questo processo di fabbricazione dell'acciaio si articola in due momenti distinti e consequenziali: una prima ridu-



**Figura 3.4:** Rappresentazione qualitativa del processo di riduzione in altoforno. Diversamente dal basso fuoco, questo tipo di impianto consente l'espulsione della scoria liquida per mezzo di un foro posto sopra al crogiolo.

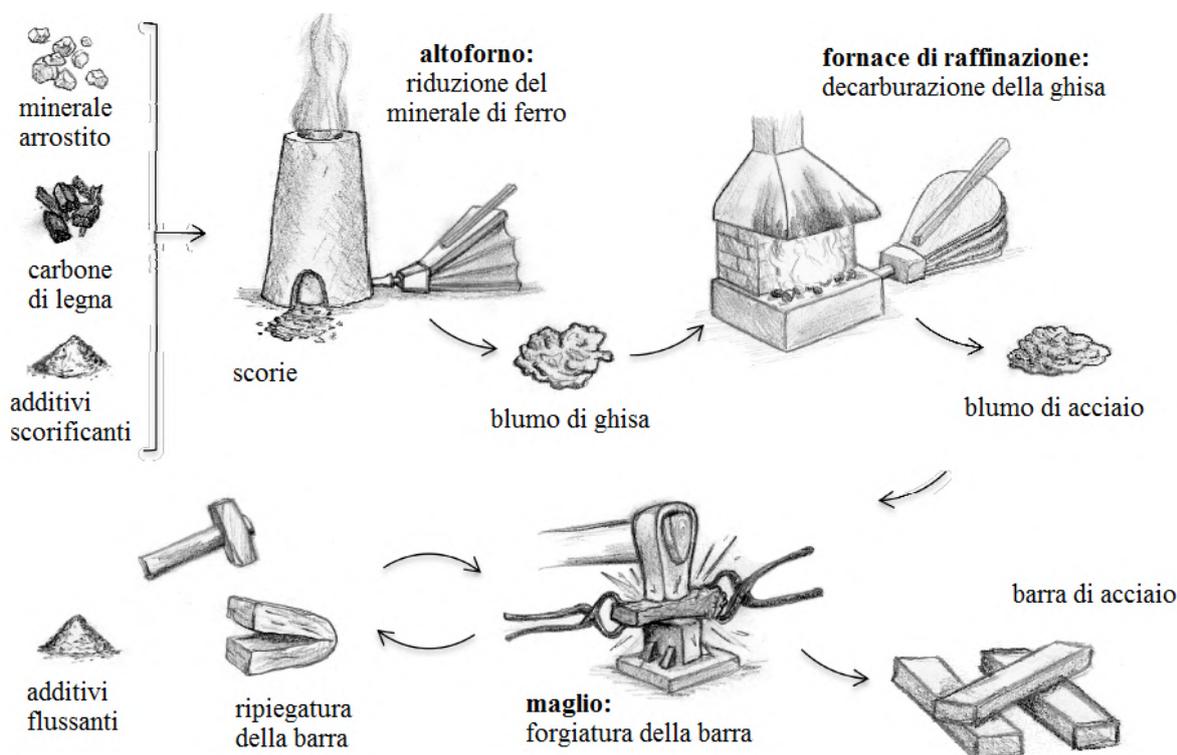
zione del minerale in ghisa metallica e una successiva affinazione della ghisa in acciaio o ferro dolce.

Secondo uno schema del tutto analogo a quello che si osserva all'interno dei bassi fuochi, il processo di riduzione del minerale è guidato dalla reazione degli ossidi di ferro con il monossido di carbonio, prodotto dalla combustione del carbone di legna: nella parte alta del forno l'atmosfera fortemente riducente – ovvero ricca di CO – degrada l'ematite e gli altri ossidi, mentre nei livelli più bassi il ferro metallico entra in contatto diretto con gli atomi di carbonio, al quale si lega formando FeC. La novità introdotta dall'altoforno consiste nel fatto che, una volta raggiunta la temperatura di fusione, il ferro liquefa e cola verso il fondo della fornace: questo comporta un significativo aumento della reattività del metallo, che è perciò in grado di assorbire una maggior quantità di carbonio. Il prodotto del forno fusorio è quindi una lega Fe–C ad elevato tenore di carbonio (3-4 %) che gli autori antichi designano come *ferrazzo* o *ferro crudo* [12].

Indipendentemente da come lo si voglia chiamare, quello che si raccoglie nel crogiolo alla base della fornace è sostanzialmente un blumo di ghisa, spesso di composizione poco omogenea e troppo fragile per essere lavorata per deformazione plastica. Per ottenere un acciaio più malleabile – o un ferro dolce – è necessario sottoporre la ghisa a uno o più trattamenti di decarburazione, noti come raffinazione. Dopo aver riscaldato il metallo fino a provocarne la fusione, lo si fa colare all'interno di un crogiolo: quando le gocce di ghisa entrano in contatto con l'aria, l'ossigeno sequestra alla lega il carbonio in eccesso, abbassandone la concentrazione.



Nonostante il processo di raffinazione porti inevitabilmente all'ossidazione di tutti gli altri elementi presenti in lega – con conseguente formazione di scoria –, il metodo indiretto consente di



**Figura 3.5:** Schema funzionale del processo indiretto per la produzione di semilavorati in acciaio. Rielaborazione di un'illustrazione di R. Pallaro [14].

ottenere un acciaio generalmente meno ricco di inclusioni non metalliche rispetto a quello ottenuto per via diretta. La scoria presenta inoltre un minore contenuto di ferro, grazie al sapiente utilizzo di agenti flussanti – spesso semplice sabbia silicea, ma anche calce viva e altri composti bassofondenti – come additivi al processo di fusione, che proteggono il metallo dall'ossidazione. Come per il blumo da riduzione diretta, anche il blumo da altoforno e fornace di affinazione deve essere lavorato a caldo al maglio: questa operazione di fucinatura permette di ottenere dei semilavorati più omogenei nella composizione e di rimuovere parte della scoria [2][11].

Nelle valli bresciane la presenza del metodo indiretto per la produzione del ferro è attestata già a partire dal XIII secolo, come dimostrano fonti coeve e ritrovamenti archeologici (a cui si fa riferimento nel cap. 2). La riduzione avviene introducendo dall'alto strati alternati di minerale e carbone di legna all'interno del *canecchio*, un forno a torretta a base rettangolare, alto circa 4-6 metri. Le temperature via via crescenti con l'avvicinarsi al fondo della fornace portano alla completa fusione del minerale, che si raccoglie nel tino, dove sono praticate due aperture: la prima, più in alto, consente ai pratici di estrarre la scoria; la seconda, alla base della struttura, permette la colata della ghisa [15].

### 3.4 Scorie, ganga e additivi

Le reazioni chimiche e i processi descritti finora, seppur fondamentali per comprendere i meccanismi che regolano la produzione di ferro metallico a partire dal minerale, devono essere considerati come una semplificazione di quanto realmente accade all'interno di una torre riduzione. La carica introdotta nella fornace – sia essa un basso fuoco o un altoforno – è infatti caratterizzata da una composizione ben più eterogenea rispetto alle specie chimiche citate nei

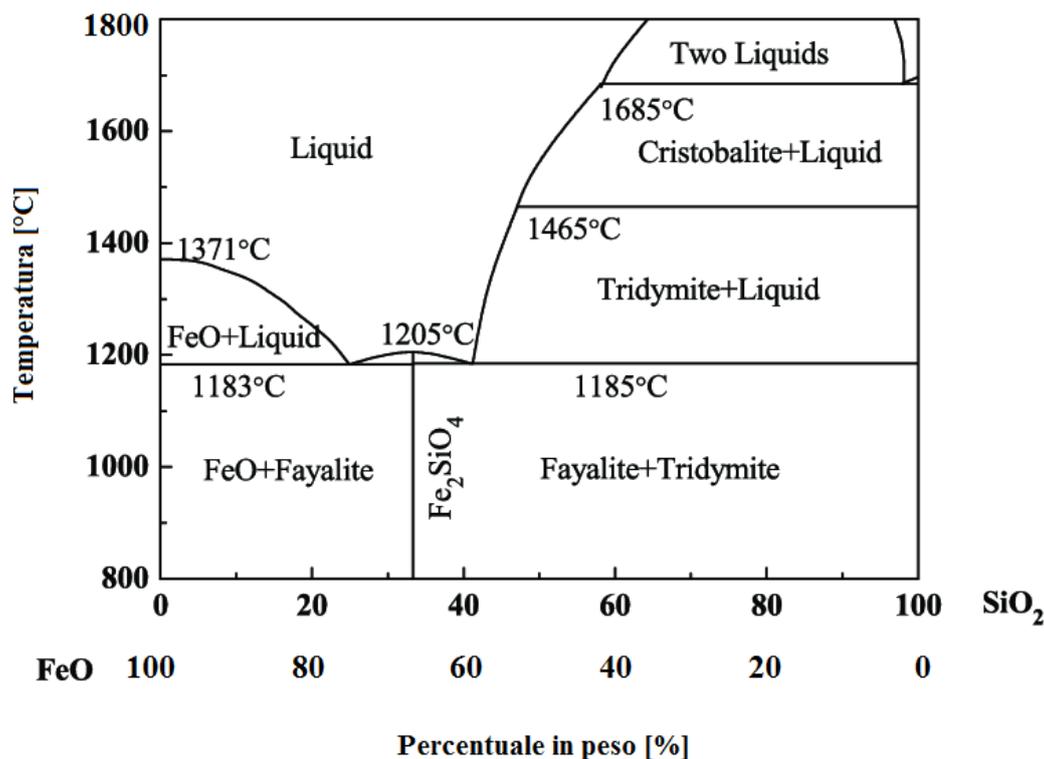


Figura 3.6: Diagramma di fase FeO–SiO<sub>2</sub>.

paragrafi precedenti, cosa che influenza non soltanto il comportamento del forno, ma anche la qualità del metallo prodotto.

Oltre agli ossidi di ferro e al carbone, che senza dubbio costituiscono la parte più consistente della carica, la sostanza che si trova con maggior frequenza coinvolta nei processi di riduzione è l'ossido di silicio (SiO<sub>2</sub>), seguito da ossido di calcio (CaO) e ossido di magnesio (MgO). Le ragioni di questa abbondanza risiedono prevalentemente nel fatto che i giacimenti di minerale sono spesso formati da concrezioni miste di ossidi/idrossidi/carbonati di ferro e materiale inerte a matrice silicea, tendenzialmente quarzo e roccia calcarea: la percentuale in peso degli ossidi di ferro rispetto alla massa totale estratta è tutt'oggi utilizzata come parametro indicativo della qualità della vena, tanto è vero che in gergo si parla di *low*, *medium* e *high grade ore* in riferimento al contenuto effettivo di metallo ottenibile da un determinato deposito minerario. Come si può notare dalla tabella 3.2, la quantità di ferro metallico ottenuto dal processo di riduzione dipende strettamente dalla purezza della vena, vale a dire dal peso che gli ossidi ferrosi occupano nel minerale rispetto al peso occupato dalla ganga: un minerale ricco di ferro darà origine a un'apprezzabile quantità di metallo, cosa che difficilmente si potrà ottenere da un minerale che ne contiene piccole percentuali [7].

In presenza di elevate concentrazioni di ossido di ferro, la silice tende a formare un composto basso-fondente noto come *fayalite* (2 FeO · SiO<sub>2</sub>), che ha un ruolo benefico durante il processo di riduzione del minerale. Quando il forno raggiunge una temperatura compresa tra i 1200-1400 °C, infatti, i silicati fondono, dando origine ad un bagno protettivo che preserva il ferro metallico – altamente reattivo – dall'ossidazione. Questa massa fluida, che prende il nome di scoria, permette inoltre di raccogliere le impurità e i contaminanti normalmente presenti nella ganga o nelle ceneri di fusione, migliorando la qualità composizionale del blumo. Altrettanto

benefica nell'economia del processo fusorio è la presenza di Ca e Mg, derivanti per lo più dal carbone di legna. In condizioni fortemente riducenti – e quindi povere di ossidi di ferro – questi elementi si combinano con il Si formando in genere fasi vetrose, che favoriscono la fluidità della scoria. Inoltre, grazie alla loro propensione a formare solfuri stabili, Ca e Mg contribuiscono a ridurre la concentrazione di S nel metallo. Tanto nel basso fuoco quanto nell'altoforno, la maggior parte della scoria viene espulsa dalla fornace quando ancora si trova allo stato liquido, generalmente per mezzo di un foro o di un'apertura applicata in prossimità della base dell'impianto fusorio. Tuttavia, malgrado le successive operazioni di fucinatura contribuiscano a separare il blumo dalla scoria residua, questa non può essere eliminata del tutto: una parte di essa rimane intrappolata all'interno del metallo, dove solidifica dando luogo alle cosiddette inclusioni non metalliche.

A dispetto delle proprietà benefiche sopra descritte, la formazione e l'eliminazione della scoria comportano inevitabilmente un'ingente perdita di ferro rispetto al contenuto del minerale di partenza. Se si osserva la composizione chimica della fayalite, infatti, risulta evidente che l'ossido di ferro FeO (più precisamente wüstite) rappresenti oltre il 65 % del peso complessivo: nell'ipotesi in cui la scoria sia interamente costituita da fayalite pura, per ogni chilogrammo di scoria eliminata si perdono circa 550 g di ferro. Il diagramma di fase proposto nella fig. 3.6 mostra come la quantità di Fe inglobato nella scoria risulti ancora più consistente quando ci si avvicina alla composizione eutettica FeO–Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, nel qual caso alla perdita associata alla fayalite si aggiunge quella associata alla wüstite. Per ridurre lo spreco di ferro – e quindi incrementare la produttività specifica del forno – è possibile aggiungere alla carica sali e minerali ad alto contenuto di manganese, che tende ad entrare nella fayalite in sostituzione degli atomi di Fe: in questo modo il Mn verrà eliminato con la scoria, mentre una maggiore percentuale di Fe potrà essere ridotta allo stato metallico [16].

Esiste infine un discreto numero di altri elementi che a vario titolo possono contaminare il processo fusorio, generalmente presenti sotto forma di ossidi. Questi derivano in primo luogo dalla composizione stessa del minerale grezzo, ma anche dagli additivi impiegati come flussanti, dall'erosione delle pareti del forno e persino dal carbone di legna utilizzato come combustibile. Degni di nota sono l'allumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), gli ossidi di sodio (Na<sub>2</sub>O) e di potassio (K<sub>2</sub>O), insieme a tracce più o meno consistenti di composti a base di zolfo e fosforo.

Le modalità di formazione della scoria possono essere anche molto diverse tra loro, in particolare se si prende come criterio discriminante la tecnologia di riduzione adottata. Nel processo diretto, per esempio, dove la reazione di riduzione avviene allo stato solido, la scoria si insinua all'interno delle porosità del blumo, rimanendovi intrappolata. Nell'altoforno, al contrario, la scoria liquida galleggia sopra alla ghisa, liquida anch'essa: è quindi molto più semplice separare l'una dall'altra e ottenere un blumo di ghisa a basso contenuto di scoria. La presenza di inclusioni non metalliche all'interno di acciai prodotti secondo il metodo indiretto ha infatti origine durante il processo di affinazione, in cui si assiste alla formazione di nuova scoria. Le temperature raggiunte da questa fornace, sufficienti a fondere la ghisa, non consentono di mantenere il ferro allo stato liquido: la solidificazione del ferro procede contestualmente alla decarburazione della ghisa, il che rende complesso separare la scoria dal resto del metallo. In definitiva, si può affermare per materiali prodotti attraverso il metodo diretto la maggior parte delle scorie provenga dal bassofoorno, mentre per materiali prodotti secondo il metodo indiretto le scorie siano da attribuire in gran parte dalla fornace di affinazione.

**Tabella 3.2:** Reazioni di riduzione del minerale di ferro al variare della qualità della vena. [7]

ore grade	minerale grezzo		reazione chimica di riduzione	Fe metallico prodotto	
	Fe [%]	SiO <sub>2</sub> [%]		su Fe [%]	su minerale [%]
<i>low</i>	56,0	20,0	$3 \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2 \text{SiO}_2 + 3 \text{CO} \rightarrow 2 (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{SiO}_4) + 3 \text{CO}_2$	-	-
<i>low</i>	57,0	17,6	$7 \text{Fe}_2\text{O}_3 + 4 \text{SiO}_2 + 9 \text{CO} \rightarrow 2 \text{Fe} + 4 (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{SiO}_4) + 9 \text{CO}_2$	14,2	8,2
<i>medium</i>	58,9	15,8	$2 \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + 3 \text{CO} \rightarrow \text{Fe} + (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{SiO}_4) + 3 \text{CO}_2$	25,0	14,7
<i>medium</i>	60,3	13,8	$7 \text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{SiO}_2 + 12 \text{CO} \rightarrow 5 \text{Fe} + 3 (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{SiO}_4) + 12 \text{CO}_2$	35,7	21,5
<i>high</i>	64,0	8,6	$4 \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + 9 \text{CO} \rightarrow 5 \text{Fe} + (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{SiO}_4) + 9 \text{CO}_2$	62,5	40,0

**Tabella 3.3:** Principali fonti di scoria e relativi contributi in termini di ossidi. [7]

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	BaO	TiO <sub>2</sub>	SrO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
minerale	**	**	*	**	*	*	*	*	*	*	*	*
combustibile	*		*	**	**	**				*	**	*
pareti forno	**	**			*	*		*	*			
additivi	*			*								

\* presente in piccole quantità

\*\* presente in quantità rilevanti



## 4 Produzione delle canne bresciane

Sel nel capitolo precedente sono state illustrate in termini più generali le tecnologie intorno alle quali si sviluppa la siderurgia antica, in queste pagine si cerca di ricostruire l'intera filiera di produzione di una canna bresciana – dalla fucinatura del metallo grezzo fino alla pregiata decorazione del prodotto finito nelle botteghe cittadine – a partire dai documenti dell'epoca. Attraverso una lettura marcatamente ingegneristica delle fonti storiche è infatti possibile risalire ai processi tecnologici adottati dalle maestranze locali nei secoli XVI e XVII, che rappresentano il periodo d'oro della produzione armiera bresciana e la finestra cronologica di riferimento per i reperti in esame. L'obiettivo di questa indagine preliminare è quello di individuare, per ciascuna fase della lavorazione della canna, i principali fenomeni metallurgici coinvolti, così da poterli confrontare con i risultati ottenuti dalle analisi sperimentali condotte in laboratorio.

La maggiore difficoltà che si incontra in questa fase risiede nello scarso livello di scientificità dei testi a disposizione, che molto spesso vengono redatti da osservatori esterni, privi in parte o del tutto di conoscenze metallurgiche. D'altro canto, né le autorità cittadine né i maestri di canne hanno alcun interesse nella divulgazione dei segreti del mestiere, tanto più che severe leggi emanate dalla Repubblica Veneta – sotto la cui custodia si trova l'intero territorio bresciano – impongono che l'arte della fabbricazione delle canne sia trasmessa ai soli abitanti della Val Trompia [17].

Di particolare interesse in questa ricerca sono la *Relazione* del capitano veneto Giovanni De Lezze, attraverso la quale emergono la struttura organizzativa e la distribuzione degli impianti sul territorio triumplino, e la cosiddetta *Supplica Zanola*, un documento che consente di associare a ciascuna maestranza coinvolta nel ciclo produttivo una specifica gamma di utensili da lavoro. Entrambi i documenti sono ampiamente citati nelle opere di Marco Morin [6][18] e Francesco Rossi [19], che hanno cercato di dare un'organizzazione più sistematica delle informazioni in essi riportate e che per questo motivo sono state un prezioso punto di partenza per la nostra analisi.

### 4.1 La fucina o fuoco grosso

Quale che sia il metodo adottato per la riduzione del minerale, l'acciaio grezzo proveniente dai forni fusori deve essere sottoposto a una preliminare operazione di fucinatura. Il *fuoco grosso* è l'impianto destinato a tale operazione: qui un pesante maglio azionato da mulini ad acqua colpisce ripetutamente il metallo, portato al calor bianco (indicativamente a una temperatura di 1200 °C) dalla combustione del carbone di legna. La martellatura a caldo ha il duplice scopo di espellere la scoria dal grezzo e forgiare il metallo in semilavorati, tipicamente barre o lame di acciaio.

Durante le operazioni di forgia, le bande di ferro vengono generalmente ripiegate su se stesse, in modo tale da conferire al materiale una maggiore uniformità composizionale. Tuttavia, come ampiamente dimostrato dalle analisi condotte su spade e altre armi da taglio di epoca tardo-medievale e rinascimentale, non è raro che vengano saldate assieme strisce di materiale

caratterizzate da tenori di carbonio anche molto diversi. Questa tecnica è nota come damasco saldato e consente di ottenere lame caratterizzate da un'elevata durezza superficiale (dove si concentrano gli strati ad alto contenuto di carbonio) e da una buona flessibilità (garantita da un cuore in materiale tenero e poco carburato) [14].

La deformazione plastica a caldo lascia all'interno della microstruttura del metallo delle tracce abbastanza evidenti, soprattutto negli acciai antichi, dove la presenza di inclusioni non metalliche è in genere significativa. La scoria inglobata nel materiale tende infatti a distribuirsi lungo le direzioni principali di deformazione, formando delle vere e proprie scie di inclusioni riconoscibili anche ad occhio nudo.

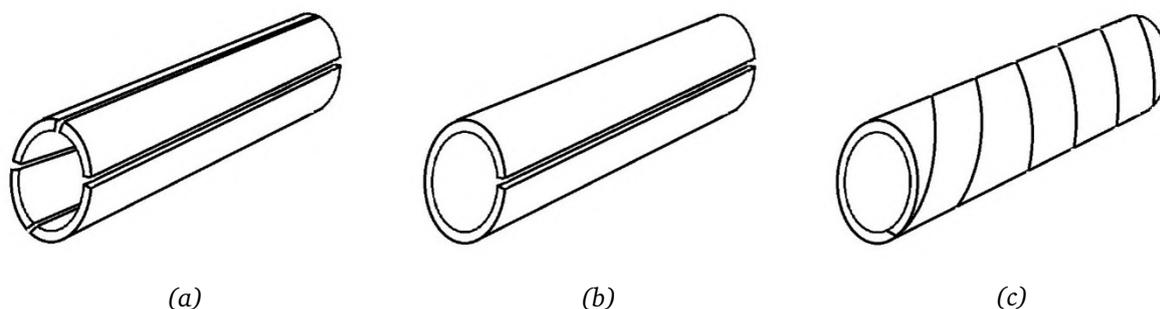
## 4.2 La bollitura della canna nel *fogatello*

Il processo di formatura vera e propria della canna a partire dai semilavorati si svolge presso fucine di piccole dimensioni, chiamate *fogatelli* – evidentemente un diminutivo dialettale del termine "fuoco". Qui le bande di acciaio sono poste sui carboni ardenti e portate a temperature superiori ai 1200 °C, avvolte intorno ad un mandrino e saldate per martellatura. La saldatura del metallo allo stato solido prende il nome di bollitura e si fonda sull'interdiffusione del ferro metallico tra due o più lembi da unire, quando questi sono portati a temperature prossime a quelle del calor bianco e compressi l'uno contro l'altro sotto l'azione del martello. Non si esclude in questa fase l'utilizzo di un additivo fluxante (o fondente), vale a dire una sostanza che, combinandosi con l'ossido di ferro, dà luogo a un ossido misto dalle proprietà bassofondenti: trovandosi allo stato liquido, esso verrebbe facilmente espulso a causa della pressione esercitata durante la saldatura dei lembi metallici. In assenza di tale accorgimento, l'ossido di ferro si conserva allo stato solido e rimane in gran parte intrappolato all'interno del giunto.

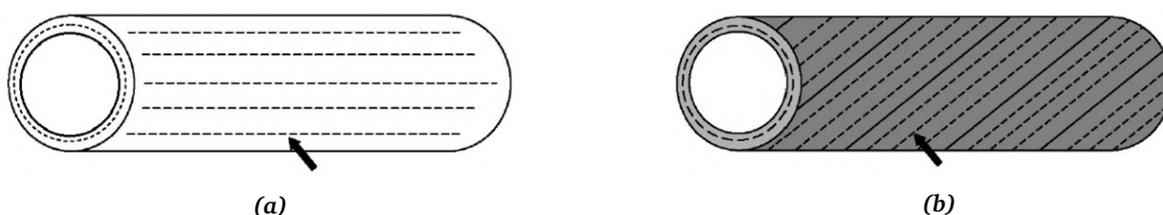
L'aspetto più controverso di questa operazione consiste nel fatto che le fonti dell'epoca non specificano in quale modo avvenisse l'avvolgimento della canna, ma si limitano a considerazioni più generali – sostanzialmente, quanto esposto nelle righe precedenti. È noto tuttavia che già in età rinascimentale in Europa e in altre parti del mondo la produzione di canne per bollitura sia caratterizzata da almeno tre varianti in merito alla direzione di avvolgimento della lama metallica attorno al mandrino:

- **avvolgimento a botte:** più bande sono disposte longitudinalmente rispetto alla direzione del mandrino, secondo una logica che ricorda la disposizione delle assi di legno di una botte. Il manufatto presenta quindi tante linee di saldatura quante sono le bande che lo compongono, che si sviluppano linearmente lungo la direzione longitudinale.
- **avvolgimento a U:** un'unica banda di metallo, più larga rispetto alle precedenti, è sagomata longitudinalmente attorno al mandrino, in modo analogo ai moderni tubi saldati. In questo caso è presente un'unica linea di giunzione, che attraversa la canna in tutta la sua lunghezza.
- **avvolgimento elicoidale:** lunghe e sottili bande metalliche vengono arrotolate a spirale attorno al mandrino. La linea di saldatura non si sviluppa nella direzione longitudinale della canna, ma segue un caratteristico percorso a spirale.

Anche se le lavorazioni successive rendono difficilmente riconoscibile il processo di formatura della canna a partire dalla sola osservazione del prodotto finito, ognuna delle tre tecniche sopra descritte lascia inevitabilmente un segno all'interno del materiale. Durante le operazioni di bollitura infatti le scorie presenti sulla superficie delle strisce vengono inglobate all'interno del cordone di saldatura, rendendo questa zona particolarmente ricca di inclusioni non metalliche e riconoscibili in modo più o meno marcato in fase di analisi metallografica al microscopio.



**Figura 4.1:** Strategie di bollitura adottate in passato per la produzione di canne di archibugio: (a) avvolgimento a botte (b) avvolgimento a U (c) avvolgimento elicoidale.



**Figura 4.2:** Distribuzione presunta delle inclusioni non metalliche all'interno della canna: (a) linee di scoria disposte orizzontalmente nella direzione longitudinale della canna, tipiche di una bollitura a botte o a U (b) linee di scoria avvolte a spirale attorno al corpo della canna, con andamento circolare se osservate in sezione trasversale, risultato di una bollitura elicoidale. Rielaborazione di un'illustrazione di M. Tanaka e M. Kitada [20].

Un'ulteriore traccia della strategia di avvolgimento adottata è dalla distribuzione delle inclusioni all'interno delle diverse sezioni esaminate: queste risulteranno di forma allungata e allineate nella direzione principale della deformazione plastica, vale a dire nella direzione di avvolgimento delle bande metalliche.

### 4.3 Trivellatore, drizzatore e vitonatore

Se le lavorazioni precedenti sono generalmente associate a impianti più strutturati, tali da essere censiti dalle autorità locali negli estimi e nei catasti, la trivellatura e la rettificazione della canna sono affidate a piccole maestranze artigiane, le cui botteghe spesso si trovano nei centri urbani e non necessitano della forza motrice del torrente Mella per azionarne i macchinari.

La trivellatura è sostanzialmente un'operazione di asportazione di truciolo e consiste nella foratura interna della canna, in modo tale da portarla al diametro esatto della palla. Compito del *drizzatore* – altrimenti definito livellatore – è invece quello di verificare le tolleranze geometriche e dimensionali del manufatto, operando con lime e martelli sulle superfici esterne, trapani e trivelle sul foro interno. Si tratta di operazioni non secondarie nella produzione delle canne di archibugio, che oltre a richiedere manodopera altamente specializzata necessitano di utensili particolari: è significativo che nella *Relazione* del De Lezze si ponga l'accento sulle proprietà meccaniche del materiale dei trapani di testa, definiti «trivelle [...] di finissimo azzale» [19].

Una volta forata e rettificata, la canna entra nell'officina del mastro *vitonatore*, incaricato della realizzazione del vitone di culatta e della madre vite atta a ospitarlo. Anche se gli osservatori contemporanei non hanno lasciato nessuna descrizione esplicita in merito a tali operazioni, è stato possibile risalire al processo tecnologico adottato grazie alla descrizione degli utensili del mestiere. Gli attrezzi enumerati nella cosiddetta *Supplica Zanola* lasciano infatti presupporre



che le filettature fossero realizzate per deformazione plastica e non per asportazione di truciolo: «per fare li maschi, et madre vite, bisognano mazze grosse, martelli a proposito, morse grosse et lime». Ad ogni modo, anche questa ipotesi dovrà essere verificata nelle analisi metallografiche successive attraverso l'osservazione al microscopio della distribuzione delle inclusioni non metalliche.

#### 4.4 *Molatore, fornitore e camuzzatore*

Con l'applicazione della vite di culatta si chiude il processo di formatura vera e propria della canna. Tutte le lavorazioni che si trovano a valle di questa operazione sono infatti da ricondurre quasi esclusivamente agli aspetti estetici del prodotto, che pure contribuiscono in modo non irrilevante al prestigio di cui le armi bresciane godono nel mercato europeo già nel XVII secolo.

La finitura superficiale esterna della canna è opera del *molatore*, che si occupa della sgrasatura e della levigatura del manufatto. Dal momento che gli estimi collocano le botteghe di questi artigiani in prossimità dei canaletti e dei piccoli corsi d'acqua urbani, alcuni autori hanno ipotizzato che i macchinari utilizzati per la molatura richiedessero l'acqua come forza motrice. Non è tuttavia da escludere che la necessità idrica di tali botteghe fosse piuttosto legata alla lubrificazione durante l'operazione di abrasione del metallo [19].

Con il termine *fornitori* si identifica invece una pluralità di maestranze dedite all'inserimento di tutti quegli elementi accessori che concorrono alla realizzazione di un'arma da fuoco completa: dalla cassa in legno di noce ai meccanismi di accensione, dagli organi di mira alle ricche decorazioni al cesello. Proprio a queste ultime si dedica l'ultima categoria di artigiani citati, i *camuzzatori*, che impreziosiscono le canne bresciane con raffinati fregi a rilievo, realizzati a freddo per semplice asportazione di truciolo o all'acquaforte. Per comprendere quanto il ruolo di questi artigiani fosse tutt'altro che marginale nell'economia del prodotto, basti pensare che la maggior parte delle firme a noi pervenute – una su tutte quella di Lazzarino Cominazzo, che ha dato il nome ad un'intera categoria di canne – non appartenga ai mastri bollitori, bensì ai camuzzatori.

*Tabella 4.1:* Impianti, maestranze e tecnologie impiegate nella realizzazione di un archibugio

impianto o bottega	processo tecnologico	tipologia di lavorazione
fuoco grosso	martellatura del blumo metallico e produzione dei semilavorati (lame o sbarre)	deformazione plastica a caldo
fogatello	formatura della canna tramite avvolgimento delle barre attorno a un mandrino	deformazione plastica a caldo e saldatura a pressione (bollitura)
trivellatore	foratura e alesatura della canna	asportazione di truciolo
drizzatore	rettifica interna ed esterna, verifica delle tolleranze	deformazione plastica a freddo e asportazione di truciolo
vitonatore	esecuzione delle filettature e applicazione del vitone di culatta	deformazione plastica a freddo e asportazione di truciolo
molatore	finitura e lucidatura delle superfici esterne	asportazione di truciolo
fornitore	costruzione e applicazione della cassa in legno, dei meccanismi e degli elementi accessori	operazioni varie
camuzzatore	decorazione superficiale della canna e degli accessori	attacco chimico (incisione all'acquaforte) e asportazione di truciolo (cesellatura)



## 5 Analisi e prove sperimentali

Dopo una breve introduzione ai manufatti in esame, viene illustrato il processo di campionatura e di analisi dei reperti.<sup>1</sup> L'indagine si articola sostanzialmente in tre macro-fasi distinte. In un primo momento i campioni sono sottoposti a un'osservazione preliminare al microscopio ottico (OM), che permette di evidenziare la microstruttura interna del materiale – particolare interesse è riservato alle costituenti metallografiche, ma anche alla morfologia e alla distribuzione inclusioni di scoria. Successivamente si procede con alcune prove di microdurezza, volte a una maggiore caratterizzazione del metallo dal punto di vista delle proprietà meccaniche, e con l'analisi composizionale, attraverso cui è possibile calcolare il tenore di carbonio e degli altri elementi in lega. L'ultimo atto del percorso sperimentale consiste infine nell'osservazione dei provini al microscopio elettronico a scansione (SEM): qui un sistema spettrometrico a dispersione di energia (EDS) consente di analizzare e caratterizzare chimicamente le inclusioni non metalliche presenti in gran numero nei reperti.

### 5.1 Reperto O109: canna di archibugio del XVII secolo

Il primo reperto analizzato è una canna di archibugio catalogata presso il Museo delle Armi "Luigi Marzoli" di Brescia con il numero di inventario O109, la cui produzione viene ricondotta indicativamente al XVII secolo. Fiore all'occhiello della tradizione armiera bresciana, questo esemplare mostra una raffinata decorazione ad intaglio che ricopre la superficie a vista della canna in tutta la sua lunghezza. La raffigurazione di uccelli, foglie di acanto, fauni, satiri e altre creature fantastiche – particolarmente elegante la testa di drago che si sviluppa lungo la parte terminale del manufatto – inducono a considerare con ragionevole certezza la canna in questione un prodotto di lusso, destinato ad arricchire le collezioni di principi e cardinali, o ad accompagnarli nelle loro attività venatorie.

Nonostante sia danneggiata in prossimità del vivo di volata, la canna si presenta in buono stato di conservazione e quasi interamente libera da ruggine. La lunghezza totale dell'oggetto è di appena 525 mm, misurati tra la bocca di fuoco e il vitone di culatta, che delimita posteriormente la canna: confrontando le dimensioni della canna in esame con quelle di archibugi di analoghe dimensioni, è lecito ipotizzare che essa fosse destinata ad un archibugio di lunghezza compresa tra i 700-1000 mm. La canna presenta esternamente sezioni circolari e un profilo leggermente conico, tale per cui il diametro massimo (22 mm) si trova in corrispondenza della culatta, mentre il diametro minimo (12,5 mm) corrisponde al restringimento che precede il vivo di volata. Internamente la canna si presenta liscia e con diametro – più propriamente, calibro – costante su tutta la lunghezza, con diametro pari a 9 mm. A differenza di alcuni esemplari coevi, l'oggetto in esame è totalmente sprovvisto di sistemi di mira e non mostra segni che possano far pensare che questi, presenti in origine, siano stato rimossi in un secondo momento.

---

<sup>1</sup>Dal momento che la descrizione di un'arma da fuoco presuppone l'utilizzo di un lessico specifico talvolta poco accessibile per chi non ha dimestichezza nel settore, si consiglia di fare riferimento al piccolo glossario tecnico riportato al fondo del documento (appendice A).



**Figura 5.1:** Reperto O109: canna di archibugio del XVII secolo. In evidenza, un dettaglio delle incisioni decorative presenti sul dorso del manufatto: nella zona di culatta si riconosce una figura antropomorfa (verosimilmente un fauno o un fanciullo), mentre il vivo di volata è sagomato a forma di testa di drago.

L'archibugio è un'arma da fuoco ad avancarica normalmente caricata a palla asciutta, vale a dire con un unico proiettile alla volta – in genere, una palla di piombo. La forza propulsiva è conferita alla palla dalla detonazione della polvere nera contenuta all'interno della camera di scoppio, che si trova in prossimità del vitone di culatta. Quale che fosse il meccanismo di accensione designato, è fuori di dubbio che il foro praticato sul lato destro della canna – in gergo focone – avesse il compito di mettere in comunicazione la scintilla, prodotta esternamente, con la carica contenuta nella camera.

## 5.2 Reperto O163: canna di trombone del XVII secolo

Il secondo reperto analizzato è una canna di trombone catalogata presso il Museo delle Armi "Luigi Marzoli" di Brescia con il numero di inventario O163, la cui produzione è attribuita a maestranze locali ed è da collocarsi cronologicamente all'inizio del XVII secolo. La tipologia di arma è riconoscibile in modo inequivocabile dalla volata, che si apre a campana in modo molto accentuato – in gergo si parla di strombatura – tanto da suggerire l'analogia con l'omonimo strumento a fiato. La canna giunge a noi quasi perfettamente intatta, priva di difetti evidenti e in buono stato di conservazione. Manca tuttavia il vitone di culatta, che avrebbe dovuto sigillare la parte posteriore del manufatto: al suo posto si vede chiaramente la filettatura della madre vite atta ad ospitarlo. Questa canna si presenta sobria, priva di decorazioni degne di nota e suddivisa in due ordini, raccordati da un anello circolare: squadrata e a base ottagonale in prossimità della culatta, tonda e a parete più sottile nella parte di volata, dove lo spessore della canna (2,2 mm) rimane costante lungo tutto lo sviluppo a campana.

La lunghezza del manufatto – misurata al netto del vitone di culatta, non pervenuto – è di 485 mm, cosa che ci permette di ipotizzare che potesse essere montato su un trombone lungo complessivamente 600-900 mm. L'interno della canna non presenta traccia di rigatura ed è caratterizzato da una sezione circolare con diametro costante e pari a 14,5 mm nel tratto squadrato, mentre ha diametro via via crescente nel tratto di volata. Sulla faccia superiore della parte ottagonale, in corrispondenza della culatta, è ben visibile una punzonatura a sette gigli, che contornano uno scudetto rettangolare. Aspetto, questo, che non abbiamo avuto modo



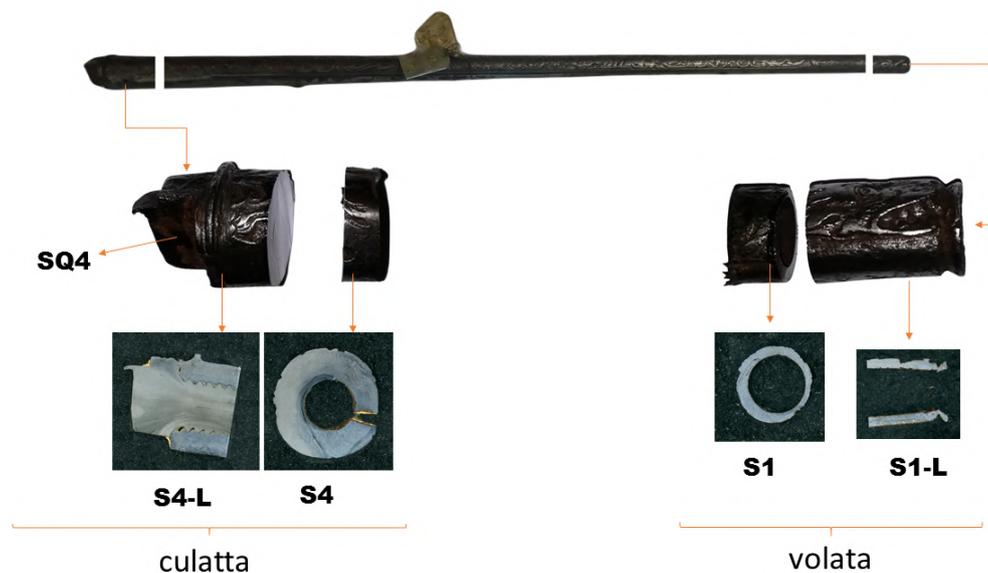
**Figura 5.2:** Reperto O163: canna di trombone del XVII secolo. Nel dettaglio, la punzonatura a sette gigli che sovrasta la culatta.

di approfondire, ma che potrebbe rivelarsi molto interessante dal punto di vista della ricerca storiografica, per una più dettagliata collocazione cronologica e geografica del reperto.

Il trombone è un'arma ad avancarica: sia il proiettile sia la carica detonante vengono inseriti frontalmente, dal lato della bocca, e pigiati contro il vitone di culatta, sul fondo della canna. La scintilla, prodotta esternamente da un meccanismo di accensione o più semplicemente da una miccia accesa, è posta in comunicazione con la camera di scoppio attraverso il focone, un piccolo foro praticato sul lato destro della canna. La caratteristica forma a campana della volata è legata alla tipologia di munizioni generalmente adottate per caricare quest'arma da fuoco: diversamente dall'archibugio, il trombone non è caricato a palla singola, ma a munizioni spezzate. Questo significa che all'interno della canna viene inserita una pluralità di proiettili – non si escludono anche proiettili impropri quali pietre, cocci, vetri – che si aprono a ventaglio una volta espulsi dalla canna. Il trombone è perciò particolarmente adatto all'attività venatoria, specie l'uccellazione, dove l'ampiezza della rosa di proiettili compensa la scarsissima precisione dell'arma, ma anche alla difesa delle gallerie di mina e contromina, in quanto letale a distanza ravvicinata. È dunque superfluo sottolineare che la canna in esame non presenta alcun riferimento per la mira – cosa, del resto, di scarsa utilità pratica, data la natura dell'oggetto.

### 5.3 Prelievo dei campioni

La campagna sperimentale si è aperta in data 1/12/2020 presso il Museo delle Armi "Luigi Marzoli" di Brescia, una volta ottenuta l'autorizzazione a procedere da parte della Soprintendenza Archeologica. In questa sede è stata innanzi tutto acquisita la documentazione fotografica dei reperti intatti, così come conservati dal museo. Con l'ausilio di una piccola troncatrice portatile sono poi state prelevate da ciascuno di essi le parti di maggior interesse, sulle quali si sarebbe concentrata l'analisi metallografica. Per non alterare la microstruttura originale del metallo, l'operazione di taglio è stata condotta a più riprese e verificando attraverso una termocoppia che la temperatura della superficie di taglio non superasse mai i 250 °C.



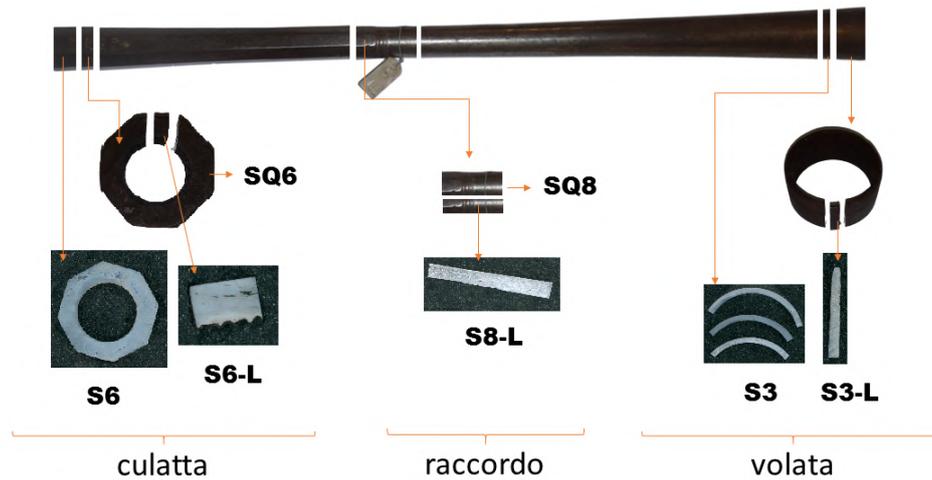
**Figura 5.3:** Prelievo dei campioni S1, S1-L, S4, S4-L E SQ4 dalla canna di archibugio

Trasferiti i pezzi di interesse presso i laboratori del Politecnico di Torino, un secondo taglio – questa volta più fine, realizzato con una troncatrice di precisione lubrificata a olio e acqua – ha permesso di estrarre i campioni veri e propri, che sono stati immediatamente inglobati in una resina termoindurente.

Come illustrato dalla tabella 5.1, dai due manufatti esaminati sono stati ottenuti dodici campioni. Il criterio alla base della selezione è fondamentalmente quello di analizzare per ciascuna canna il vivo di volata, la culatta ed eventuali altre aree di interesse ricavando per ognuna di esse una sezione trasversale e una longitudinale. Appartengono all'archibugio (reperto O109) i campioni S1, S1-L, S4, S4-L, mentre al trombone (reperto O163) sono da ricondursi i campioni S3, S3-L, S6, S6-L e S8-L. Il numero fa riferimento alla regione della canna da cui proviene il materiale, la lettera L invece è stata apposta per indicare che il campione riporta una sezione longitudinale. Gli ultimi tre campioni (SQ4, SQ6 e SQ8) rappresentano infine i residui delle operazioni di taglio dei campioni S4-L, S6 e S8-L: diversamente dai precedenti, questi non verranno inglobati in resina, in quanto la loro ragione d'essere si esaurisce nell'ambito della sola analisi chimica allo spettrometro ottico.

## 5.4 Preparazione dei campioni

Una volta tagliati, i campioni sono stati puliti e lavati con acqua, asciugati e inglobati all'interno di una resina fenolica opaca – la bakelite – per mezzo di un apposito macchinario. Avendo cura di orientare correttamente la superficie che si intende analizzare sul piattello preriscaldato dell'inglobatrice, si inseriscono i campioni nella camera del dispositivo e si avvia il programma: nel nostro caso, si porta la bakelite in polvere ad una temperatura di 160 °C, che ne consente la fusione, e si impone alla camera una pressione di 4000 psi, in modo tale che la resina riempia perfettamente tutti gli interstizi. Dopo 7 minuti l'operazione può considerarsi conclusa ed è possibile estrarre il campione dalla macchina. Si ritiene infatti che le condizioni di temperatura e di pressione applicate in questa circostanza non producano nel provino alcun tipo di alterazione, tenendo conto sia della microstruttura effettivamente osservata (esposta in seguito), sia della



**Figura 5.4:** Prelievo dei campioni S3, S3-L, S6, S6-L, SQ6, S8-L e SQ8 dalla canna di trombone

**Tabella 5.1:** Catalogazione dei campioni. Le ultime quattro colonne indicano le analisi e le prove eseguite su di essi: osservazione al microscopio ottico (OM), microdurezza Vickers ( $\mu$ -HV), analisi chimica quantitativa (OES) e analisi delle scorie al microscopio elettronico (EDS)

sigla	reperto	oggetto	area di prelievo	sezione	OM	$\mu$ -HV	OES	EDS
S1	O109	archibugio	vivo di volata	trasversale	+	+		+
S1-L	O109	archibugio	vivo di volata	longitudinale	+			+
S4	O109	archibugio	culatta	trasversale	+	+		+
S4-L	O109	archibugio	vite di culatta	longitudinale	+			+
S3	O163	trombone	vivo di volata	trasversale	+	+		+
S3-L	O163	trombone	vivo di volata	longitudinale	+			
S6	O163	trombone	culatta	trasversale	+	+		+
S6-L	O163	trombone	culatta	longitudinale	+			+
S8-L	O163	trombone	raccordo	longitudinale	+	+		+
SQ4	O109	archibugio	vite di culatta	longitudinale			+	
SQ6	O163	trombone	culatta	trasversale			+	
SQ8	O163	trombone	raccordo	longitudinale			+	



natura stessa del reperto: è verosimile supporre che un'antica canna di arma da fuoco sia stata esposta a sollecitazioni ben superiori durante il suo normale funzionamento.

La preparazione dei campioni inglobati prevede una prima levigatura grossolana, con carta abrasiva da 60 grit, che ha il duplice obiettivo di asportare eventuali strati alterati durante le operazioni di taglio e spianare la superficie di interesse del campione, rendendola quanto più possibile planare e parallela alla faccia cieca dello stesso. Si tratta di un'operazione delicata, in quanto è concreto il rischio di asportare troppo materiale o di creare sfaccettature nel metallo, che comprometterebbero la bontà delle analisi successive. Dopo questa prima levigatura, è possibile procedere alla lucidatura manuale del campione su carte abrasive con granulometria via via più fine, da 120 grit a 4000 grit (lubrificando con acqua) e in ultima istanza su panno con sospensione diamantata ( $3 \mu\text{m}$  e  $1 \mu\text{m}$ ) e lubrificante specifico.

Prima di procedere con l'osservazione al microscopio ottico, i campioni vengono sottoposti ad un opportuno attacco metallografico, che attraverso una reazione chimica di corrosione selettiva della superficie del materiale ne mette in evidenza la struttura cristallina. Nello specifico, i campioni sono stati immersi in Nital al 3,5 % vol. per un tempo variabile tra i 20 e i 60 secondi. L'operazione si è rivelata piuttosto complicata a causa dell'estrema eterogeneità composizionale del metallo, tipica nei manufatti antichi: nonostante si sia cercato di ottenere un attacco quanto più uniforme possibile, alcune zone del campione risultano infatti maggiormente attaccate rispetto ad altre.

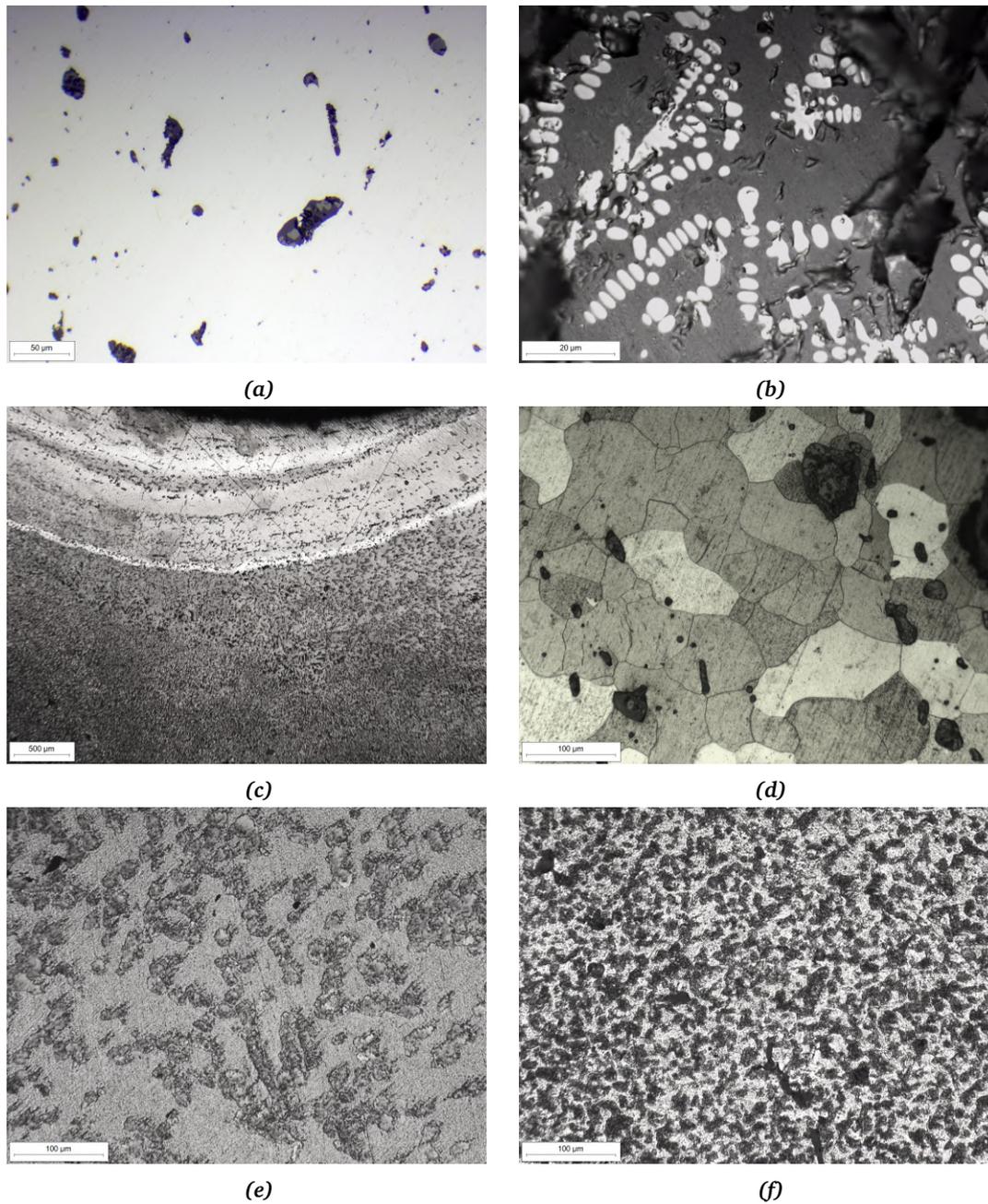
## 5.5 Osservazione metallografica preliminare

Una volta lucidati i campioni, è stata condotta una prima analisi a partire dall'osservazione della microstruttura dei reperti presso un microscopio ottico a riflessione (OM). Oltre a fornire un valido strumento di indagine per quanto riguarda la dimensione dei grani e le differenti componenti metallografiche che costituiscono il reticolo cristallino, questo strumento permette di identificare in modo molto nitido la morfologia e la distribuzione delle inclusioni non metalliche, così come la presenza di linee di saldatura, di cavità interne e di eventuali altri elementi notevoli. Grazie a un computer installato a bordo macchina è stato possibile documentare quanto osservato con un elevato numero di fotografie, che sono state raccolte in un dossier.

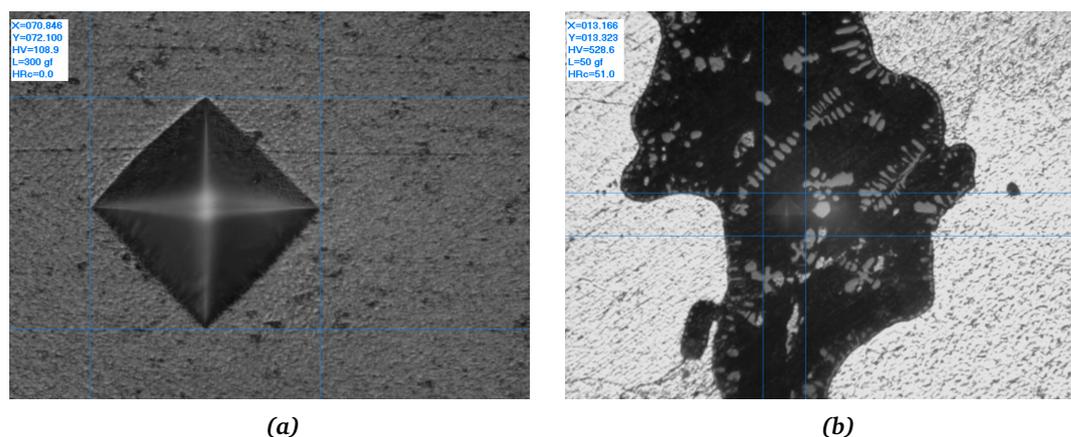
Nelle pagine che seguono (cap. 6) vengono riportati i risultati di tale osservazione, accompagnati dalle immagini più rappresentative della documentazione prodotta. Una prima serie di fotografie è stata scattata prima dell'attacco metallografico ed è sostanzialmente dedicata all'analisi delle inclusioni di scoria, che si presentano nella maggior parte dei casi come macchie di colore scuro all'interno della matrice metallica (di colore chiaro e aspetto riflettente). La seconda serie di immagini è invece orientata alla microstruttura dei reperti. A seguito dell'azione corrosiva del Nital, infatti, vengono messi in evidenza i bordi di grano e le costituenti metallografiche che compongono la superficie esposta del campione: le aree a più elevato tenore di carbonio – tendenzialmente perlitiche – subiscono un attacco più marcato e assumono un colore scuro-opaco, mentre le aree a minore concentrazione di carbonio – a prevalenza ferrite – risentono meno dell'azione del Nital e conservano un aspetto chiaro-riflettente.

## 5.6 Prove di microdurezza

Un metodo piuttosto rapido di caratterizzazione meccanica di un materiale è sicuramente la prova di durezza, che consente di avere un'idea di massima delle proprietà resistenziali del campione esaminato. Per determinare la durezza di regioni molto localizzate – quali superfici



**Figura 5.5:** Esempi di microstruttura osservati al microscopio ottico: (a) inclusioni di scoria in campione non attaccato (b) immagine ad alto ingrandimento di un'inclusione bifasica (c) saldatura di bande metalliche caratterizzate da tenori di carbonio differenti (d) grani di ferrite grossolana a seguito di attacco Nital (e) miscela grossolana di ferrite e perlite a seguito di attacco Nital (f) miscela fine di ferrite e perlite a seguito di attacco Nital.



**Figura 5.6:** Misurazioni di microdurezza Vickers: (a) sulla matrice metallica, con carico pari a 500 gf (b) su un'inclusione non metallica, con carico ridotto a 50 gf.

verniciate, pezzi di piccolo spessore e perfino singoli grani – la normativa UNI ISO 6507-1 descrive una specifica classe di prove a bassi carichi definite appunto prove di micro-durezza.

La prova è stata effettuata presso i laboratori del Politecnico di Torino attraverso un indentatore automatico micro-Vickers *Leica VMHT*. Il valore di durezza, espresso in scala Vickers, viene calcolato a partire dalle dimensioni dell'impronta lasciata dal penetratore piramidale in diamante sulla superficie del metallo, secondo questa formula:

$$HV = \frac{0,102 \cdot 1,8544 \cdot 10^6 \cdot F}{d^2}$$

Dove  $F$  è il modulo della forza applicata (espresso in Newton), mentre  $d$  (espresso in micrometri) rappresenta il valor medio tra le due diagonali dell'impronta. Affinché la prova sia valida, è importante che la distanza tra il centro di una misurazione e quello della successiva o il bordo del campione sia superiore a quattro volte la lunghezza  $d$ . La penetrazione dell'indentatore diamantato all'interno del provino produce infatti una deformazione plastica che, seppur localizzata, comporta l'incrudimento locale del materiale: se si effettuasse una nuova misurazione in prossimità della zona deformata, ne risulterebbe un valore di durezza superiore, che tuttavia non corrisponde alla durezza effettiva del manufatto originale.

Una prima serie di misurazioni è stata condotta sui campioni S1, S4, S3, S6 e S8L – vale a dire sulle quattro sezioni trasversali delle canne analizzate, più il tratto di raccordo tra la sezione ottagonale e quella conica del trombone – con l'obiettivo di stabilire quale sia l'andamento della durezza all'interno della sezione, il valore medio e il grado di dispersione. Le misurazioni sono state effettuate applicando un carico di 300 gf a distanze regolari (dai 300 ai 500  $\mu\text{m}$ , in funzione delle dimensioni del campione), spostandosi in linea retta lungo un diametro dell'oggetto. La seconda serie di misurazioni invece non ha seguito uno schema geometrico preciso, ma è stata condotta in modo tale da intercettare con il penetratore determinati punti di interesse, in particolar modo le inclusioni non metalliche di grandi dimensioni. Dal momento che la prova ha interessato aree molto circoscritte, il carico applicato è stato ridotto a 50 gf.

## 5.7 Analisi chimica quantitativa

Nella caratterizzazione di un materiale metallico un ruolo non secondario è giocato dall'analisi composizionale degli elementi chimici presenti in lega: questi non solo sono utili a



determinare le proprietà tecnologiche del materiale, ma possono fornire informazioni circa la provenienza del minerale e il processo produttivo adottato. Restringendo l'indagine al campo degli acciai, che sono l'oggetto del nostro studio, l'obiettivo primario dell'analisi è quello di individuare il tenore di carbonio presente in lega e di pochi altri elementi generalmente ritenuti significativi quali manganese, silicio, fosforo, zolfo e rame.

I rilevamenti vengono effettuati per mezzo del quantometro, uno specifico spettrometro a emissione ottica – in inglese *Optical Emission Spectroscopy* (OES) – utilizzato per l'analisi chimica composizionale di superfici solide, in particolar modo quelle metalliche. Opportunamente eccitato, infatti, ciascun elemento della tavola periodica emette delle radiazioni luminose caratterizzate da un determinato spettro elettromagnetico: studiando l'emissione fotonica che scaturisce dal materiale metallico quando questo viene sottoposto a una forte scarica elettrica è perciò possibile risalire alla natura e alla quantità relativa degli elementi chimici presenti in lega. Nel caso in esame, la prova è stata condotta presso la postazione *GNR S7 Metal Lab Plus* allestita nei laboratori del Politecnico di Torino, che è dotata di uno spettrometro con eccitazione a scintillio, elettrodo in tungsteno e atmosfera inerte a base di Argon.

La scelta dei provini da sottoporre ad analisi quantometrica è ricaduta su quelle porzioni di materiale prelevate dai reperti che non sono state inglobate, così da non compromettere l'integrità dei nove campioni già lucidati e dedicati all'osservazione metallografica. Per effettuare correttamente la prova è necessario spianare il campione con carte abrasive a grana grossa (P60, P120, P240), in modo tale da disporre di una superficie piana e libera da ossidi esterni delle dimensioni di circa  $1\text{ cm}^2$ . Dal momento che gli acciai antichi, diversamente dai prodotti industriali odierni, sono spesso contraddistinti da una forte disomogeneità composizionale, si consiglia di effettuare le rilevazioni su più porzioni del manufatto e di elaborare i risultati ottenuti con strumenti statistici adeguati. L'operazione, tuttavia, si è rivelata piuttosto complessa, in quanto dalle canne in esame è possibile ricavare un numero molto limitato di superfici piane di dimensioni sufficienti a garantire una misurazione affidabile: sono stati individuati in tutto tre provini (SQ4, SQ6 e SQ8), uno dei quali – l'ultimo citato – non ha portato a risultati scientificamente attendibili in fase di misurazione a causa delle numerose cavità presenti al suo interno. Un altro elemento di disturbo per il corretto svolgimento della prova è infatti dato dall'abbondanza di cavità inclusioni non metalliche, che ostacolano la conduzione elettrica e invalidano l'esito della misurazione. Per poter condurre un numero maggiore di misurazioni e migliorare la qualità statistica dei dati dal punto di vista statistico, la superficie dei provini analizzati è stata rispianata quattro volte e per ognuna di esse è stata eseguita ripetutamente una serie di prove – tipicamente dalle due alle cinque misurazioni per serie, in funzione delle dimensioni dell'area di prova disponibile.

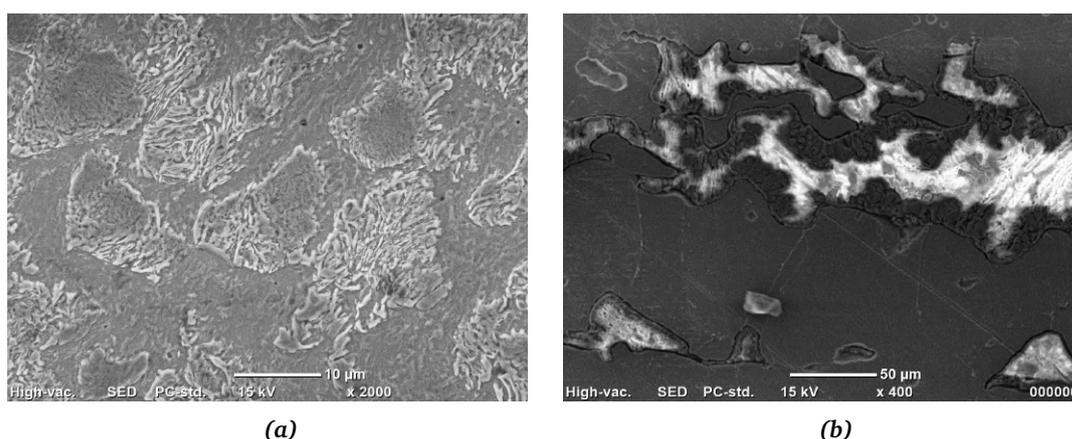
Date le numerose difficoltà riscontrate durante l'esecuzione della prova, sarà necessario verificare che i risultati dell'analisi quantometrica siano coerenti con le microstrutture osservate al microscopio ottico e con i valori di durezza misurati. Una volta confermata la validità dei dati ottenuti, è lecito ipotizzare che la composizione chimica misurata a livello locale possa essere rappresentativa dell'intero campione. Ipotesi, questa, che seppur ragionevole non può prescindere dalla consapevolezza della forte eterogeneità composizionale dei manufatti antichi.

## 5.8 Analisi chimica elementare delle inclusioni

Le operazioni di misura e analisi dei reperti si concludono con l'osservazione dei campioni inglobati attraverso un microscopio elettronico a scansione (SEM). Il potere risolutivo garantito dal fascio di elettroni, nettamente superiore rispetto a quello che si ottiene con la radiazione luminosa tipica del microscopio ottico, permette infatti di indagare la superficie dei campioni

con ingrandimenti superiori a 1000. Le immagini prodotte risultano inoltre caratterizzate da una notevole profondità di campo, che conferisce maggiore tridimensionalità al soggetto osservato. È possibile distinguere le diverse componenti microstrutturali della matrice metallica o delle inclusioni in funzione della loro intensità luminosa, derivante dall'emissione e dalla conversione in segnali elettrici degli elettroni secondari emessi dal campione. Queste caratteristiche fanno del SEM uno strumento importante di verifica e approfondimento delle microstrutture osservate in sede di microscopia ottica, specialmente in quelle situazioni in cui è richiesto un elevato grado di dettaglio.

La ragione principale dell'utilizzo di un microscopio elettronico, tuttavia, risiede nella possibilità di condurre su aree molto localizzate del campione analisi chimiche semi-quantitative. Integrato all'interno della macchina – nel caso specifico, un piccolo dispositivo da banco (modello *JMC-6000 Plus*) disponibile anch'esso presso il Politecnico di Torino –, è presente infatti un sistema di spettrometria a dispersione di energia (EDS), che permette di identificare gli elementi chimici presenti nel materiale attraverso una rilevazione dell'intensità e della distribuzione dei raggi X emessi dall'interazione del fascio elettronico con la superficie del campione. Questa tecnologia si dimostra particolarmente efficace nell'analisi di materiali chimicamente disomogenei a livello microscopico ed è stata adottata come strumento privilegiato nello studio delle numerose inclusioni non metalliche contenute nei manufatti in esame.



**Figura 5.7:** Esempi di rilevamenti SEM-EDS: (a) isole di perlite, riconoscibile dalla caratteristica microstruttura lamellare (b) fenomeno di carica elettrostatica all'interno di un'inclusione bifasica.

Perché la prova possa svolgersi correttamente, è necessario che il campione sia un buon conduttore elettrico o che si adottino efficaci misure di messa a terra: diversamente, il fascio di elettroni produrrebbe un effetto di carica elettrostatica sull'oggetto, provocandone il surriscaldamento. Dal momento che tutti i campioni osservati, pur presentando il metallo sulla superficie a vista, sono inglobati in una resina isolante, la messa a terra è stata realizzata per mezzo di un nastro adesivo conduttore. Ciononostante, è possibile che all'interno del campione stesso alcune aree risultino particolarmente povere di ferro e ricche di elementi isolanti, dando luogo a fenomeni di carica molto localizzati: un esempio su tutti è dato dalle inclusioni di fayalite, che essendo per lo più costituita da ossidi non conduttori tende a trattenere gli elettroni e quindi a caricarsi elettrostaticamente. Nelle immagini acquisite, l'accumulo di carica elettrostatica si manifesta sotto forma di aloni molto luminosi che si sovrappongono alla microstruttura del campione, rendendola difficilmente interpretabile [21].

## 6 Risultati: microstruttura, microdurezza e composizione chimica media

Sono qui riportati i dati sperimentali ottenuti dalle analisi descritte nel capitolo precedente, in particolare quelli relativi alla microstruttura e alle caratteristiche meccaniche del materiale. Partendo da una scansione ad alta risoluzione di ciascuno dei nove campioni inglobati, vengono proposte alcune immagini rappresentative delle costituenti metallografiche riscontrate durante l'osservazione al microscopio. Sono messe in evidenza la morfologia dei grani, le disomogeneità composizionali, la presenza di linee di saldatura ed eventuali altre caratteristiche notevoli.

Attraverso strumenti grafici e tabelle sono infine illustrati i risultati ottenuti dalle prove di microdurezza – condotte sulle sezioni trasversali – e dalle analisi composizionali al quantometro – condotte sui tre campioni non inglobati in resina. Si è invece deciso di non trattare in questa sede l'analisi chimica elementare delle inclusioni di scoria, alla quale sarà dedicato un capitolo a parte.

### 6.1 Archibugio: vivo di volata

#### 6.1.1 Sezione trasversale

Il campione che rappresenta la sezione trasversale della canna di archibugio (reperto O109) in prossimità del vivo di volata è indicato con la sigla S1. In riferimento alla fig.6.1, è possibile notare come la circonferenza esterna sia pressoché regolare nella metà inferiore del campione, che corrisponde alla superficie della canna a contatto con la cassa, mentre la metà superiore, corrispondente alla superficie decorata del manufatto, appare irregolare. Il foro, che misura circa 9 mm di diametro, è collocato in posizione eccentrica rispetto all'asse della canna e presenta una lieve deformazione.

Lungo la direzione circonferenziale del manufatto si sviluppano numerose linee di scoria, composte da inclusioni di forma tendenzialmente allungata e dimensione variabile tra i pochi micrometri e il millimetro. Al loro interno si individua distintamente una fase chiara, dall'aspetto tondeggiant e ramificato, dispersa in una matrice più scura. Particolarmente interessante la linea che, sul lato destro dell'immagine, si avvolge senza apparente soluzione di continuità sulla sezione, congiungendo la superficie esterna con quella interna della canna. Questo fenomeno è verosimilmente riconducibile all'operazione di bollitura e si verifica quando gli ossidi superficiali presenti sui due lembi di materiale da unire vengono intrappolati all'interno del manufatto.

Per quanto riguarda le costituenti metallografiche, il campione è caratterizzato quasi interamente da una microstruttura ferritica, costellata di piccoli carburi di cementite terziaria a bordo grano. La presenza di perlite lamellare è molto sporadica e concentrata in gran parte in corrispondenza della metà superiore della canna, dove anche i grani ferritici appaiono più fini. La metà inferiore presenta invece esclusivamente ferrite a grani grossi, tipica degli acciai ricotti.



Del tutto assenti nel campione sono le microstrutture caratteristiche dei trattamenti di tempra e rinvenimento, quali martensite e bainite.

### 6.1.2 Sezione longitudinale

Per studiare la sezione longitudinale del vivo di volata occorre analizzare il campione S1-L, mostrato in fig. 6.2 con la bocca rivolta verso sinistra. Il lato superiore mostra sul profilo esterno una linea irregolare e frastagliata, dovuta alla decorazione a intaglio che impreziosisce il manufatto. Il lato inferiore, al contrario, presenta in sezione uno spessore regolare e uniforme, fatta eccezione per il restringimento – in gergo *gioia di bocca* – che contraddistingue la parte terminale della canna. Gli aloni rossastri che caratterizzano alcuni tratti della superficie esterna sono dovuti alla presenza di ossidi e altri prodotti di corrosione.

Pur essendo ricche di inclusioni bifasiche perfettamente riconducibili a quelle osservate nella sezione trasversale, le linee di scoria che percorrono la sezione parallelamente all'asse della canna sono meno evidenti già ad un primo esame macroscopico: non solo le linee sono meno numerose, ma le inclusioni che ne fanno parte hanno dimensioni generalmente più contenute e una forma molto allungata.

Coerentemente con quanto emerso dall'indagine condotta sul campione S1, la microstruttura è prevalentemente composta da ferrite grossolana a grani equiassici nella parte inferiore del manufatto, ferrite-perlite nella parte superiore, più ricca in carbonio. Si nota inoltre una tendenza dei grani a farsi più piccoli a mano a mano che ci si avvicina alla superficie esterna, dove è presumibile che il raffreddamento sia stato più rapido. Nessun elemento tuttavia lascia intendere che il metallo sia stato sottoposto a particolari trattamenti termici.

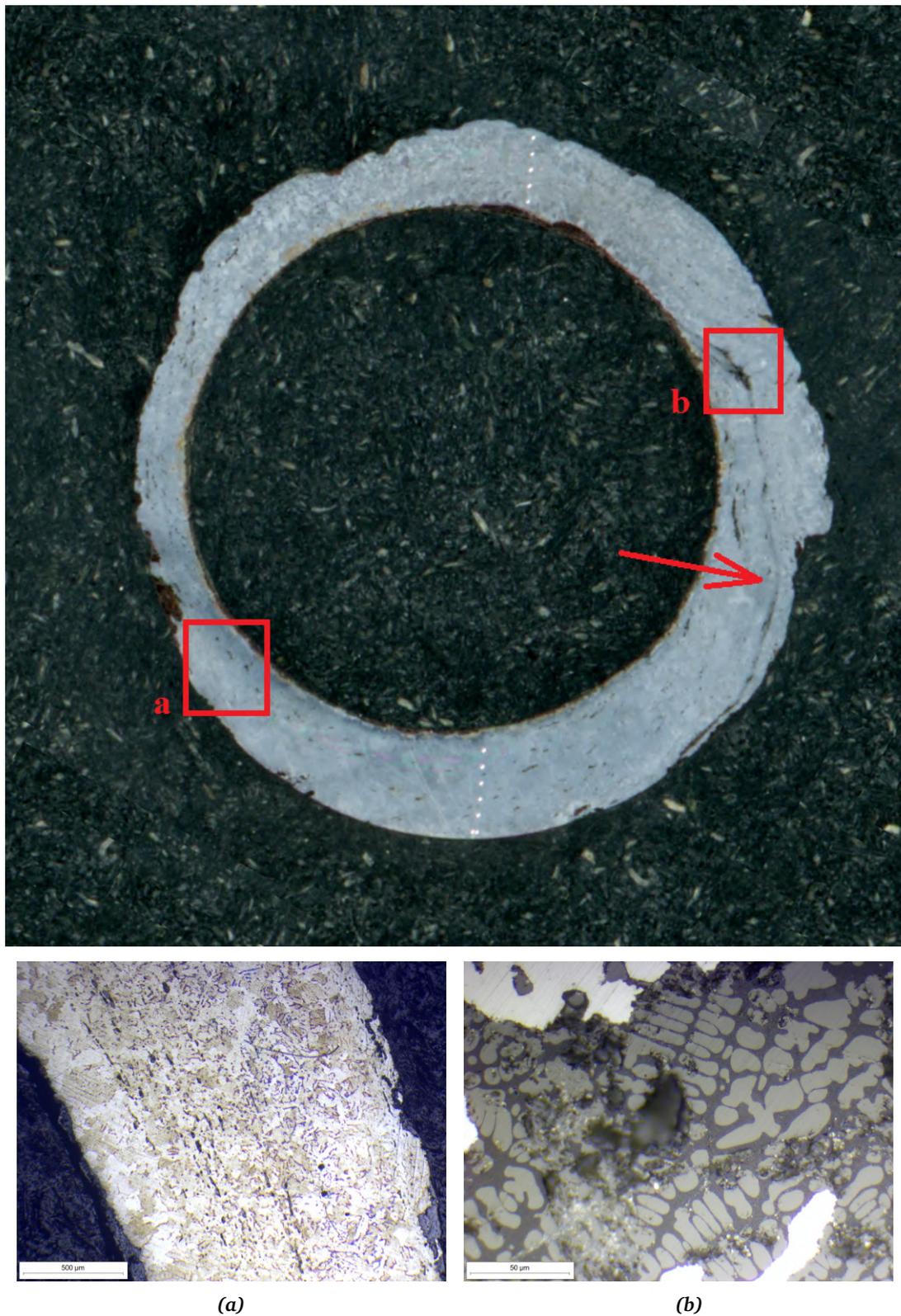
### 6.1.3 Microdurezza

Dopo aver individuato un diametro che intersecasse indicativamente sia la parte superiore sia quella inferiore del manufatto, sono state condotte 11 misurazioni di microdurezza con carico pari a 300 gf – operazione definita *cucitura* (fig.6.3). Dai dati ottenuti emerge una durezza media di 123 punti Vickers, con picchi che non si discostano significativamente dal valore medio. L'andamento appare inoltre sostanzialmente privo di gradienti: non sono state individuate grosse discontinuità o direzioni privilegiate né tra la superficie esterna e quella interna della canna, né tra una parte e l'altra della sezione.

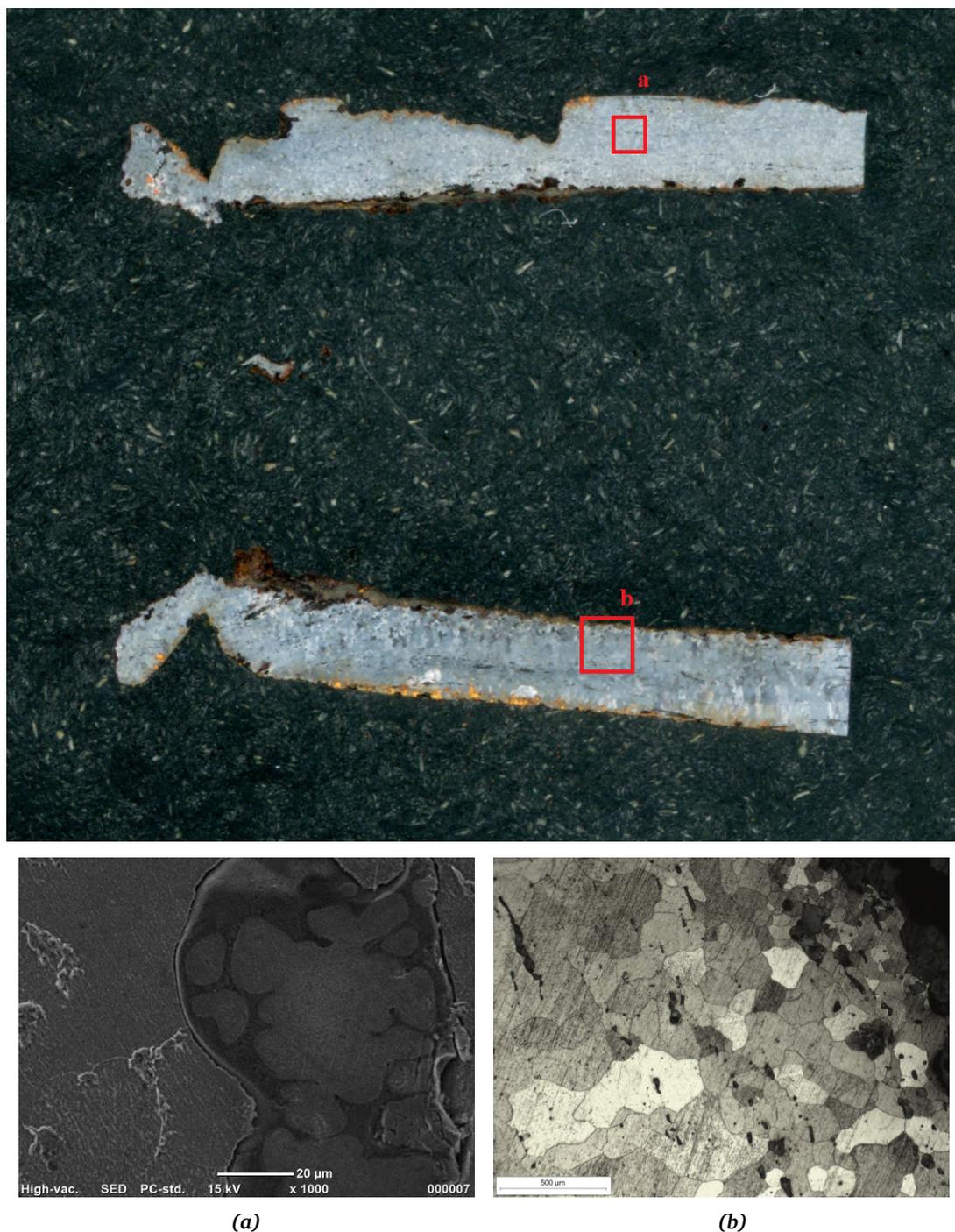
Una seconda serie di 9 misurazioni è poi stata eseguita con carico pari a 50 gf su alcune delle inclusioni di maggiori dimensioni. Non vi sono ragioni particolari a sostegno di questa scelta, se non la maggiore facilità di condurre correttamente la prova secondo le modalità descritte dalla norma UNI ISO 6507-1. In questo caso viene rilevata una durezza media di 362 punti Vickers, con un indice di dispersione piuttosto elevato: si va da un minimo di 159 HV a un massimo di 541 HV. Tutti i risultati sono riportati nella tabella 6.1.

**Tabella 6.1:** Microdurezza misurata sul campione S1

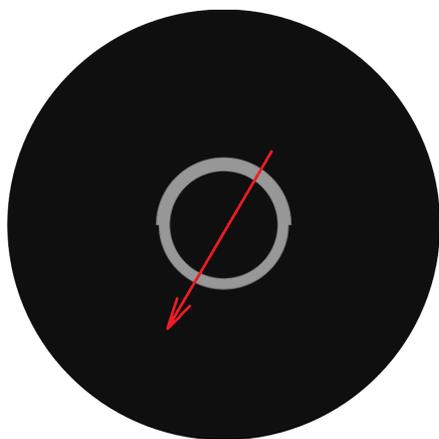
valore	durezza Vickers [HV]	
	cucitura	inclusioni
medio	123	362
massimo	142	541
minimo	102	159



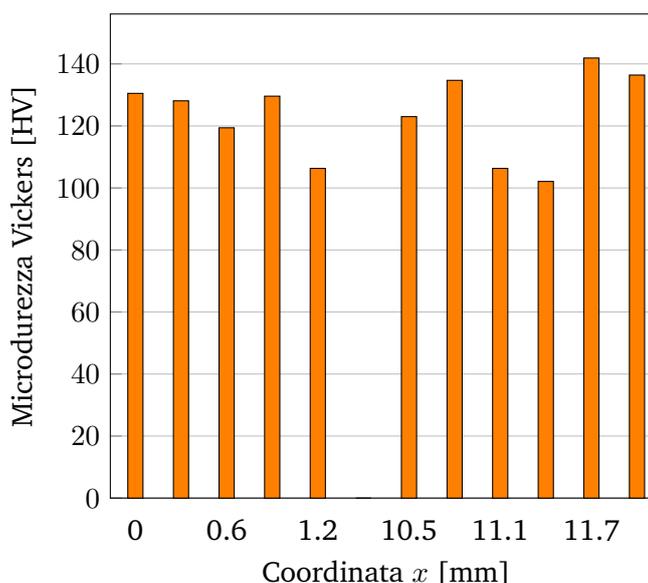
**Figura 6.1:** Scansione e microstruttura del campione S1: la freccia rossa mette in evidenza la linea di saldatura, sul lato destro della figura. **(a)** il dettaglio mostra una zona di transizione tra la regione ferritica (a sinistra) e la regione a microstruttura mista ferrite-perlite. In mezzo, numerose linee di inclusione con andamento circolare. **(b)** immagine ad elevato ingrandimento di un'inclusione bifasica, con una cavità al centro (fuori fuoco).



**Figura 6.2:** Scansione e microstruttura del campione S1-L: **(a)** microstruttura ferritico-perlitica in un'immagine ad alto ingrandimento acquisita presso il SEM. Nel lato sinistro è messa in evidenza una piccola formazione di perlite lamellare, mentre nel lato destro campeggia un'inclusione bifasica. **(b)** microstruttura ferritica grossolana propria della parte superiore del manufatto. Le macchie scure rappresentano le inclusioni, ordinate in linee che attraversano diagonalmente l'immagine. Avvicinandosi al bordo della sezione (in alto a destra) la microstruttura si fa più fine.



**Figura 6.3:** Direzione di prelievo delle misure di microdurezza lungo la cucitura di S1



**Figura 6.4:** Misure di microdurezza in ordine di prelievo lungo la cucitura di S1

## 6.2 Archibugio: vite di culatta

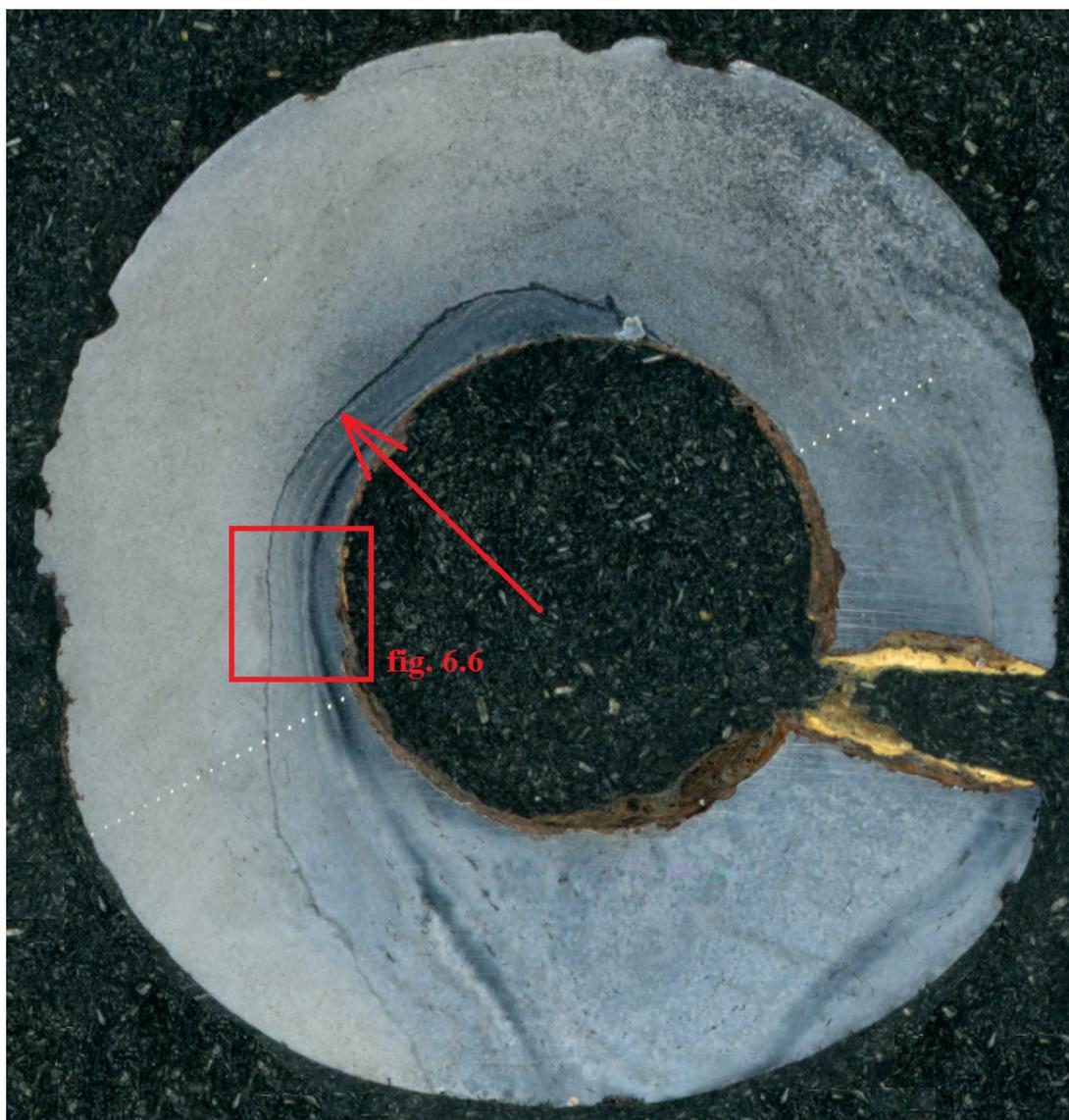
### 6.2.1 Sezione trasversale

Il campione S4 è stato prelevato in corrispondenza della camera di scoppio del reperto O109 e mostra una sezione trasversale della culatta. Come per i campioni finora descritti, il bordo esterno della sezione si presenta approssimativamente liscio e continuo nella metà inferiore della canna, mentre assume un andamento irregolare e discontinuo nella metà superiore, decorata per incisione. Il prelievo del campione è stato effettuato in modo tale da mettere in evidenza il foro del focone, che nella fig.6.5 appare parzialmente otturato da materiale di ossidazione (dal colore rossastro). Uno strato di ossidi di colore più scuro ricopre anche buona parte della superficie interna della camera di scoppio, in particolare nella zona adiacente al focone.

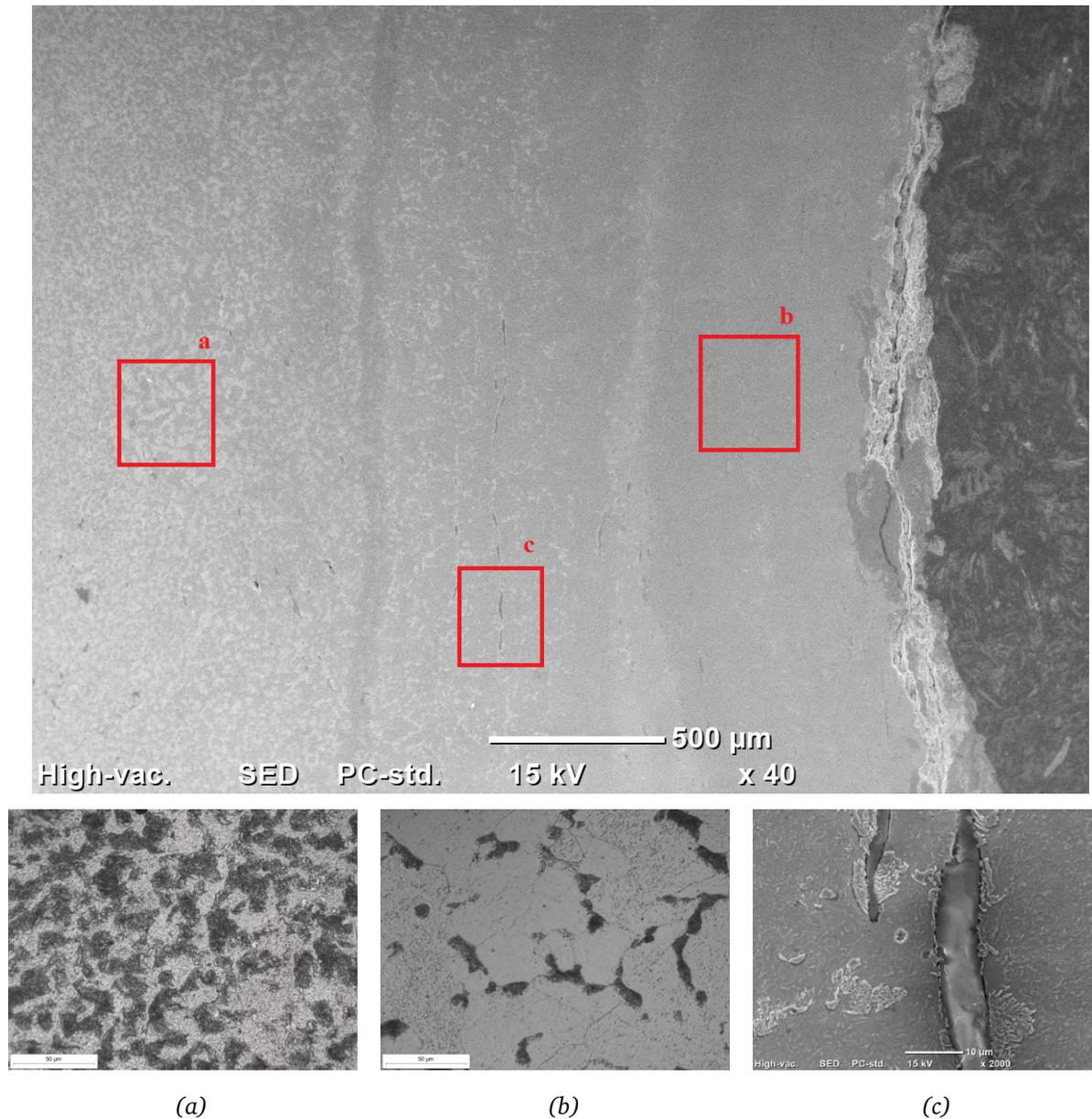
Le inclusioni non metalliche sono abbondanti e organizzate prevalentemente in linee di scoria che percorrono il manufatto in direzione circonferenziale. Per quanto riguarda la natura e le dimensioni, è possibile individuare le caratteristiche inclusioni bifasiche di forma allungata grandi fino a  $500 \mu\text{m}$ , ma anche piccole scorie globulari dall'aspetto meno familiare. Analogamente a quanto osservato nella sezione di bocca, anche la culatta presenta una marcata linea di demarcazione che si sviluppa tra il foro interno e la superficie esterna della canna con un andamento paragonabile all'evolvente di cerchio.

La conferma che quella descritta nel paragrafo precedente sia a tutti gli effetti una linea di saldatura si ha confrontando le diverse microstrutture che si trovano da una parte e dall'altra della stessa. Visibilmente più ricco in carbonio, il materiale metallico esterno alla linea presenta una microstruttura di perlite lamellare, che tende a infittirsi a mano a mano che ci si avvicina al bordo del campione. Al contrario, sul versante interno prevale una microstruttura ferritica a basso contenuto di carbonio, dove la sporadica presenza di lamelle perlitiche va a ridursi procedendo verso gli strati adiacenti il foro della canna. Da questo lato della sezione vi è inoltre una maggiore alternanza di strati più o meno ricchi di carbonio, che il microscopio ottico traduce rispettivamente in fasce di colore scuro e fasce di colore chiaro. Un'ipotesi plausibile è che

tale stratificazione derivi dalla sovrapposizione di acciai a diverso tenore di carbonio durante le operazioni di forgiatura del semilavorato grezzo, ovvero delle lame metalliche prodotte nel fuoco grosso. Sebbene i livelli esterni del manufatto mostrino una maggiore concentrazione di carbonio rispetto a quelli interni, la profondità dello strato in esame e la gradualità con cui la perlite cede il posto alla ferrite inducono ad escludere che la canna sia stata oggetto di cementazione. Ancor più remota è la possibilità che il metallo sia stato sottoposto a tempra o ad altri trattamenti termici di indurimento, in quanto non vi sono tracce di martensite o altre microstrutture che possano ricondurre a eventi simili.



**Figura 6.5:** Scansione ad alta risoluzione del campione S4: la freccia rossa indica la linea di saldatura, mentre i riquadri servono a contestualizzare i dettagli mostrati nella fig.6.6.



**Figura 6.6:** Visualizzazione dettagliata della microstruttura del campione S4: la linea di saldatura è rappresentata dalla linea scura che attraversa verticalmente la parte sinistra dell'immagine. **(a)** fascia ad alto tenore di carbonio, con microstruttura perlitico-ferritica. **(b)** fascia a medio-basso tenore di carbonio, con microstruttura prevalentemente ferritica e isolata presenza di perlite non risolta. **(c)** inclusione di scoria immersa in una matrice di ferrite e perlite.



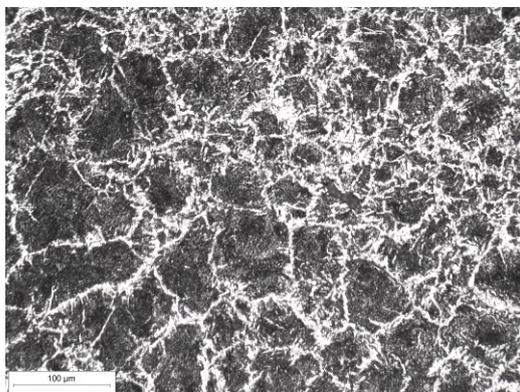
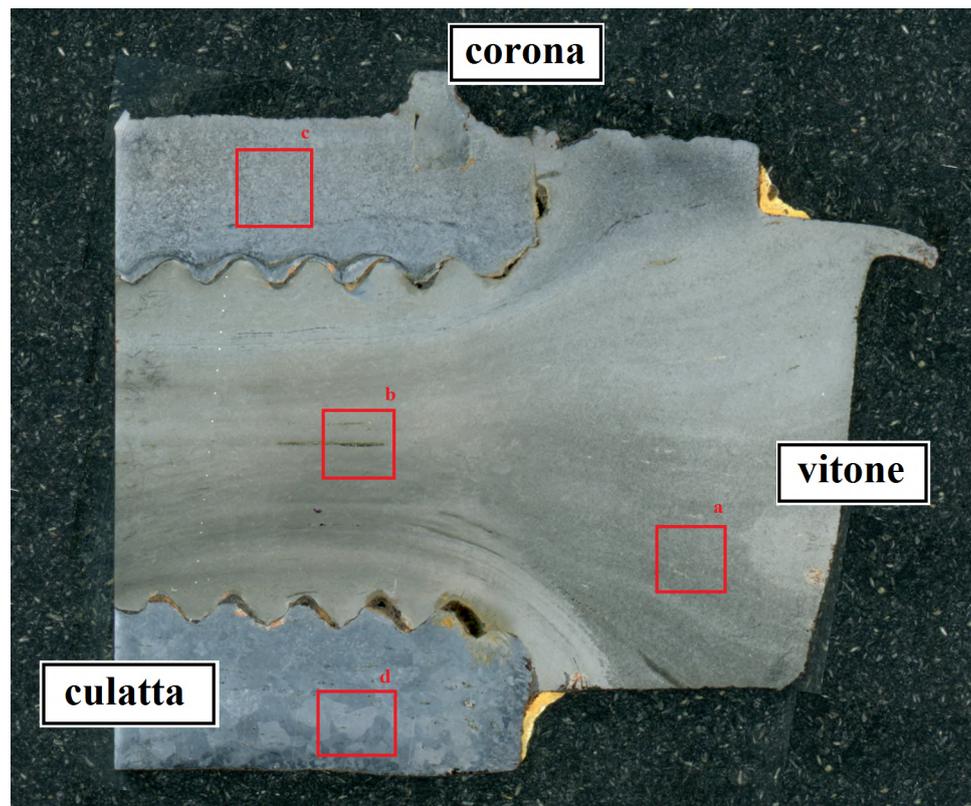
## 6.2.2 Sezione longitudinale

Il campione S4-L permette di studiare in posizione di assemblaggio tre distinte parti della canna: il vitone di culatta, che in questo caso costituisce l'oggetto principale di interesse, l'estremità filettata della culatta – e quindi della canna vera e propria – e infine la piccola corona che sormonta quest'ultima. Ad eccezione della codetta, di cui si conservano esclusivamente i pochi millimetri solidali alla testa della vite, tutti i pezzi sono visibili nella loro integrità.

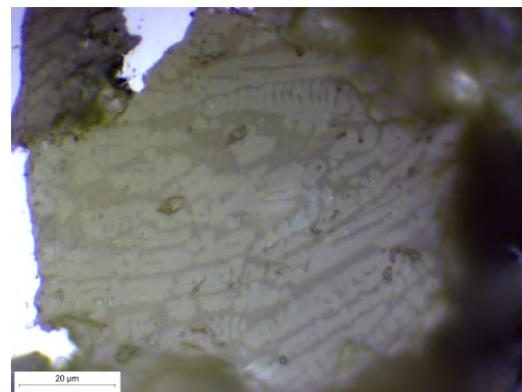
Il vitone di culatta è caratterizzato da una significativa presenza di porosità e linee di scoria, per lo più orientate lungo la direzione assiale del manufatto: alcune di esse, chiaramente visibili ad occhio nudo, si estendono anche per alcuni millimetri. Diversamente da quanto osservato sul corpo della canna, queste inclusioni non presentano la tipica alternanza di fasi chiare globulari e fasi scure. Sono infatti riconoscibili due fasi distinte, una grigia chiara e dendritica e una grigio scuro di aspetto opaco, spesso intervallate da importanti cavità interne. In prossimità della filettatura, le linee di scoria seguono il profilo del dente, generando un percorso ondulato: questo fenomeno è indice del fatto che la fabbricazione della vite sia avvenuta per deformazione plastica. Se la filettatura fosse stata prodotta per asportazione di truciolo, le inclusioni risulterebbero infatti disposte in linea retta e si interromperebbero bruscamente in corrispondenza del bordo del dente.

La microstruttura del vitone è contraddistinta da una molteplicità di strati di materiale eterogenei per contenuto di carbonio e costituenti metallografiche. Le regioni che nella scansione del campione (fig.6.7) appaiono di colore più scuro sono generalmente contraddistinte da una microstruttura a isole di perlite lamellare ben sviluppata immerse in una matrice di ferrite proeutetoidica, mentre quelle più chiare presentano una matrice ferritica di composizione ipoeutetoidica, con nucleazione di piccole strutture perlitiche a bordo grano.

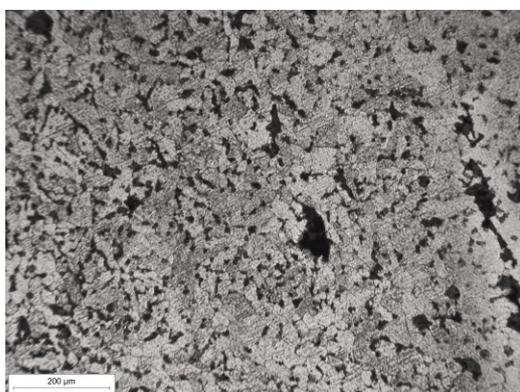
Per quanto concerne la parte di culatta che ospita la madrevite, invece, si riscontrano indicativamente le medesime costituenti osservate nei campioni precedenti. Le linee di scoria, abbondanti ma non numerose come quelle presenti sulla vite, si sviluppano in direzione longitudinale e anche in questo caso seguono il profilo della filettatura. L'aspetto delle inclusioni torna ad essere quello globulare bifasico e la porosità interna è minore rispetto alla vite. In termini di microstruttura, la parte superiore del manufatto – che corrisponde al lato decorato della canna – è costituita da ferrite a grana fine mista a perlite non risolta. Al contrario, la parte inferiore mostra grani di ferrite equiassica di grandi dimensioni, perlite quasi totalmente assente e bordi di grano costellati da piccoli carburi precipitati.



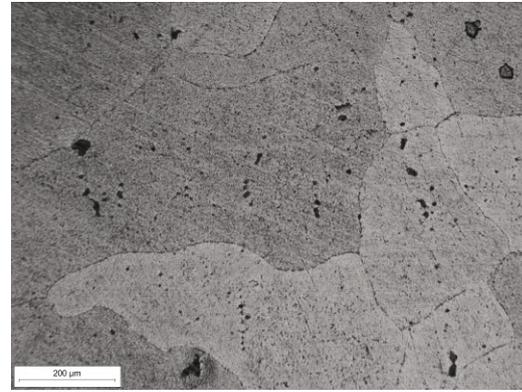
(a)



(b)



(c)



(d)

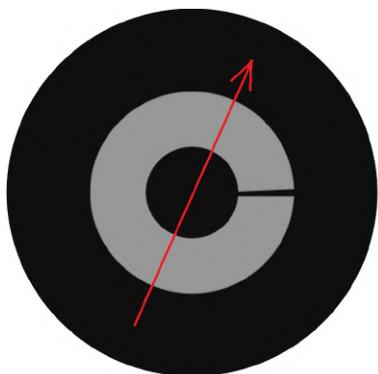
**Figura 6.7:** Scansione e micrografia campione S4-L: (a) isole di perlite lamellare circondate da ferrite. (b) inclusione di scoria bifasica. (c) microstruttura miste di ferrite e perlite. (d) microstruttura grossolana composta da ferrite equiassica.

### 6.2.3 Microdurezza

Sono state condotte due prove rispettivamente sui campioni S4 e S4-L. Nel primo caso l'oggetto delle misurazioni è stata la sezione trasversale della culatta (fig. 6.8), mentre nel secondo caso l'analisi si è soffermata sul vitone che sigilla posteriormente la canna (fig. 6.10). Come si è visto in precedenza, il carico applicato lungo la cucitura è di 300 gf, contro i 50 gf applicati localmente per lo studio delle singole inclusioni di scoria.

Si è scelto sul campione S4 un diametro sufficientemente distante dal focone che intersecasse sia la parte lavorata sia la parte liscia del manufatto, quindi è stato possibile procedere con le rilevazioni. A fronte di 32 misurazioni, ne risulta una durezza media pari a 166 punti Vickers, con picchi di oltre 200 HV in corrispondenza delle bande ad alto contenuto di carbonio e in prossimità dei bordi esterni della canna, dove la microstruttura è più fine. Relativamente alle inclusioni, sono state prelevate solo tre misurazioni: i valori di durezza si attestano in un intervallo compreso tra i 466 e i 562 HV.

Le prove condotte sulla vite – una serie di 14 misurazioni che taglia l'oggetto lungo una direzione perpendicolare al proprio asse di simmetria – attribuiscono al manufatto una durezza media di 250 HV, con massimi che superano i 300 HV. Non sembrano sussistere grandi differenze tra la parte centrale della vite e la filettatura: i valori di picco sarebbero piuttosto da attribuire alla presenza di bande ricche di scoria e ad elevato tenore di carbonio. La presenza di importanti cavità interne ha fatto sì che non sia stato possibile eseguire delle misure attendibili localizzate sulle singole inclusioni: nonostante il carico ridotto a 50 gf, l'impronta lasciata dal penetratore risulta non conforme ai criteri di validità della prova sanciti dalla normativa. Tutti i risultati sono illustrati nella tabella 6.2.



**Figura 6.8:** Direzione di prelievo delle misure di microdurezza lungo la cucitura di S4

**Tabella 6.2:** Microdurezza misurata sui campioni S4 e S4-L

valore	durezza culatta [HV]		durezza vite [HV]	
	cucitura	inclusioni	cucitura	inclusioni
medio	166	525	250	-
massimo	228	561	322	-
minimo	123	466	165	-

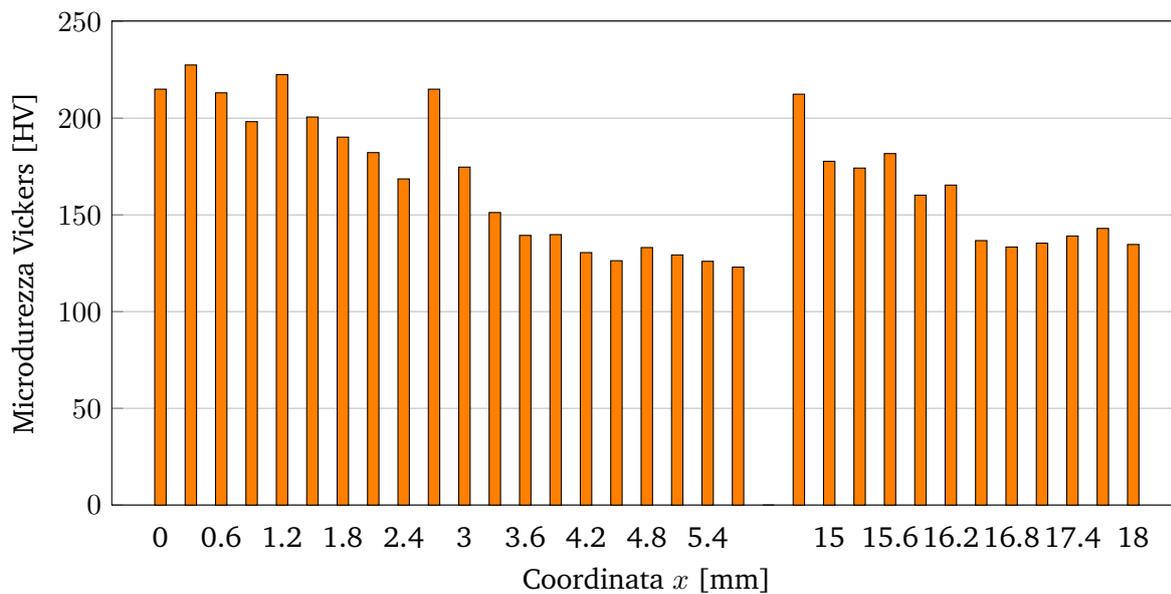


Figura 6.9: Misure di microdurezza in ordine di prelievo lungo la cucitura di S4.

## 6.2.4 Analisi chimica composizionale

Le analisi composizionali condotte sul campione non inglobato SQ4 completano lo studio della matrice metallica del reperto O109. Come si è detto nel paragrafo 5.7, dedicato alla descrizione della prova, le ridotte dimensioni dell'oggetto sono state il principale limite al numero di misurazioni eseguite: se la sezione della vite, che occupa gran parte della superficie del provino, ha permesso di effettuare 13 rilevazioni, dalla madre vite – ovvero dal corpo della canna – sono state ritenute valide appena 2 misurazioni. La fig. 6.12 illustra i valori di concentrazione media degli elementi leganti, mentre i risultati integrali della prova sono esposti nella tabella 6.3.

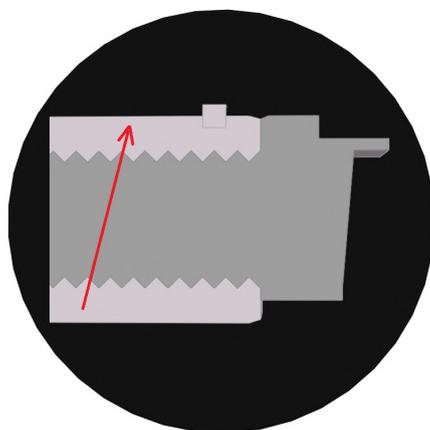
Entrambi i materiali presentano un tenore di carbonio dell'ordine dello 0,2 % e una contaminazione da zolfo e fosforo sostanzialmente trascurabile. Quanto agli altri elementi leganti, il vitone di culatta è caratterizzato da un contenuto significativo di rame e nichel, mentre la madre vite presenta modeste tracce di titanio e vanadio. Il silicio, particolarmente abbondante nel corpo della canna, è probabilmente dovuto all'influenza esercitata dalle inclusioni di scoria sull'analisi quantometrica.

## 6.3 Trombone: vivo di volata

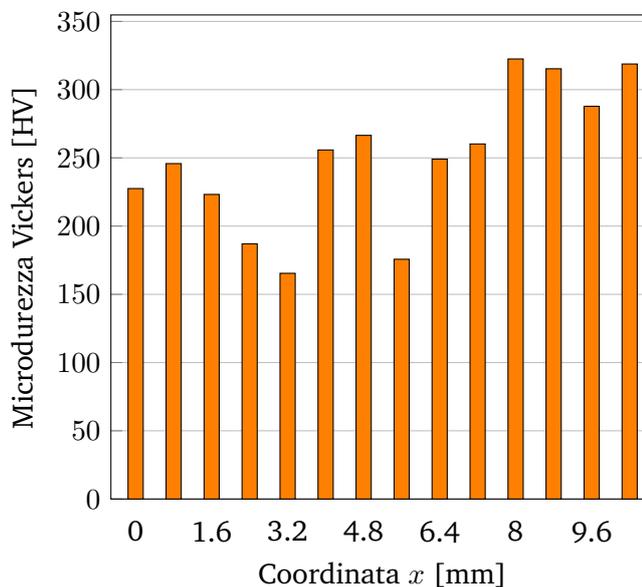
### 6.3.1 Sezione trasversale

Quanto al trombone (reperto O163), la sezione trasversale del vivo di volata è rappresentata dal campione S3. Dal momento che il diametro della canna in questa sezione eccede i 38 mm della camera dell'inglobatrice a resina, il manufatto è stato tagliato in tre settori circolari: occorre dunque tenere conto che i tre segmenti che costituiscono il campione sono in realtà parte di un'unica circonferenza e vanno dunque interpretati come un *continuum* – al netto del materiale asportato inevitabilmente durante il taglio, dovuto allo spessore della lama adottata.

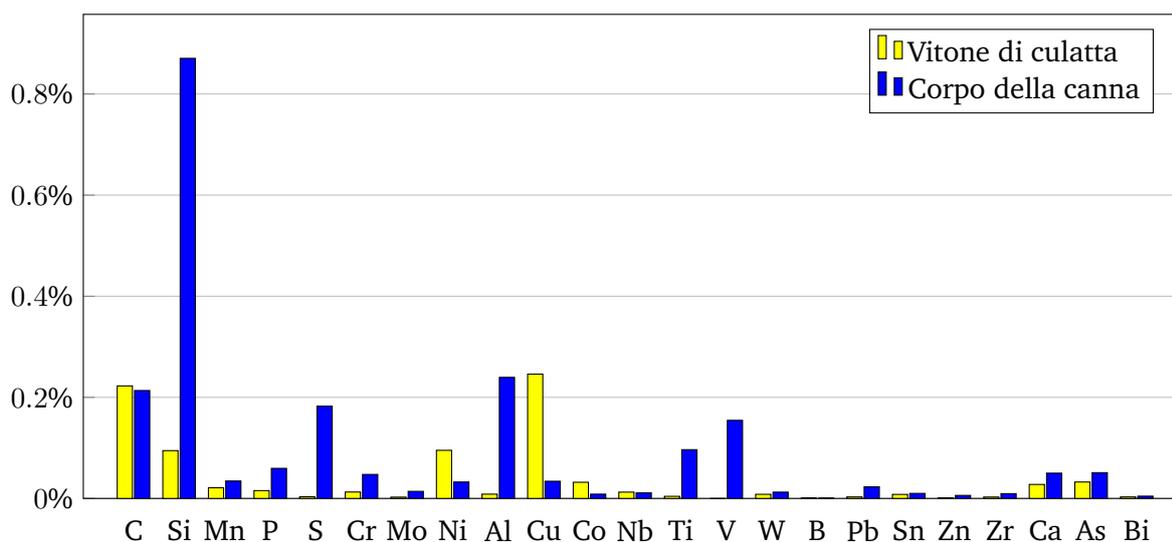
A livello macroscopico, la superficie metallica appare chiara e non presenta le bande scure proprie degli strati ad alto tenore di carbonio. Ipotesi che trova conferma nell'osservazione ad alto ingrandimento condotta presso il microscopio ottico, che mette in luce una microstruttura



**Figura 6.10:** Direzione di prelievo delle misure di microdurezza lungo la cucitura di S4-L.



**Figura 6.11:** Misure di microdurezza in ordine di prelievo lungo la cucitura di S4-L.



**Figura 6.12:** Analisi chimica degli elementi leganti. Sono messi a confronto la composizione della canna (misurata nella sezione di culatta) e quella del vitone del reperto O109. Percentuali espresse su base massa.

**Tabella 6.3:** Analisi composizionale dei campioni S4 e S4-L

	prove vite [%]							
	1	2	3	4	5	6	7	8
C	0,260	0,274	0,260	0,087	0,195	0,240	0,227	0,270
Si	0,081	0,086	0,164	0,100	0,100	0,074	0,079	0,142
Mn	0,024	0,019	0,037	0,019	0,020	0,016	0,018	0,034
P	0,015	0,014	0,014	0,020	0,014	0,014	0,014	0,017
S	<0,001	<0,001	0,002	0,002	<0,001	<0,001	<0,001	0,004
Cr	0,031	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,012
Mo	0,008	0,002	<0,001	<0,001	0,001	0,001	<0,001	<0,001
Ni	0,130	0,085	0,102	0,039	0,110	0,101	0,120	0,075
Al	0,010	0,007	0,020	0,009	0,006	0,005	0,008	0,013
Cu	0,289	0,260	0,266	0,117	0,278	0,277	0,271	0,188
Co	0,037	0,031	0,037	0,010	0,038	0,036	0,038	0,024
Nb	0,011	0,013	0,013	0,013	0,012	0,012	0,012	0,013
Ti	0,006	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
V	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
W	0,007	0,014	0,004	0,011	0,012	0,007	0,005	0,007
B	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Pb	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Sn	0,009	0,008	0,008	0,007	0,008	0,008	0,008	0,008
Zn	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Zr	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002	0,003
Ca	0,035	0,041	>0,0500	>0,0500	0,032	0,021	0,029	>0,0500
As	0,037	0,027	0,038	0,020	0,035	0,032	0,042	0,037
Bi	0,004	0,003	0,002	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003
Fe	99,002	99,096	98,853	99,365	99,115	99,132	99,106	99,141

**Tabella 6.3:** Analisi composizionale dei campioni S4 e S4-L

	prove vite [%]					prove madre vite [%]	
	9	10	11	12	13	1	2
C	0,226	0,265	0,251	0,252	0,087	0,224	0,203
Si	0,078	0,086	0,061	0,051	0,128	1,656	0,085
Mn	0,017	0,019	0,012	0,012	0,027	0,056	0,013
P	0,015	0,015	0,015	0,015	0,019	0,092	0,027
S	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,005	0,336	0,029
Cr	0,012	0,011	0,011	0,011	0,011	0,038	0,057
Mo	0,002	<0,001	0,002	0,002	<0,001	0,014	<0,001
Ni	0,097	0,099	0,114	0,118	0,047	0,036	0,029
Al	0,008	0,007	0,005	0,004	0,009	0,468	0,011
Cu	0,266	0,285	0,280	0,277	0,143	0,055	0,013
Co	0,035	0,035	0,040	0,042	0,013	0,013	0,004
Nb	0,012	0,012	0,013	0,013	0,014	0,012	0,010
Ti	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,185	0,008
V	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,272	0,037
W	0,007	0,005	0,010	0,009	0,009	0,021	0,004
B	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	<0,0005	<0,0005
Pb	<0,002	<0,002	0,002	0,004	<0,002	0,023	<0,002
Sn	0,008	0,008	0,009	0,008	0,007	0,014	0,006
Zn	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,006	<0,001
Zr	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,017	0,002
Ca	>0,0500	>0,0500	0,021	0,014	>0,0500	>0,0500	>0,0500
As	0,029	0,031	0,036	0,038	0,020	0,058	0,044
Bi	0,003	0,004	0,002	0,003	0,002	0,005	0,004
Fe	99,127	99,033	99,107	99,116	99,333	94,513	99,323



sostanzialmente ferritica e povera di carbonio, che è limitato a sporadici aggregati perlitici o a piccoli carburi posti in corrispondenza dei bordi dei grossi grani di ferrite equiassica (fig. 6.13). Il materiale presenta le caratteristiche di un acciaio extra dolce allo stato ricotto e non vi è traccia di eventuali trattamenti termici di indurimento o affinamento della grana.

Le inclusioni – tutte simili tra loro e accomunate dall'aspetto bifasico già individuato nei campioni analizzati fino a questo punto – sono abbondanti e in genere disposte lungo linee di scoria circonferenziali, soprattutto in corrispondenza delle regioni a grana grossa. Non emerge tuttavia alcuna evidenza in merito alla presenza di linee di saldatura, che possano fornire elementi utili a definire la modalità di arrotolamento della canna.

### 6.3.2 Sezione longitudinale

Il campione S3-L mostra una sezione longitudinale dell'estremità anteriore del vivo di volata del trombone. Nella scansione proposta in fig.6.14, si riconoscono sul bordo inferiore del campione due scanalature: si tratta di una gioia di bocca, piccolo fregio che inanella la canna in corrispondenza della bocca di fuoco. Il bordo superiore, più regolare e privo di discontinuità importanti, rappresenta invece l'anima interna del manufatto.

Nella zona attigua alla gioia di bocca – e, più in generale, lungo la superficie esterna della canna – la microstruttura è composta in prevalenza da grossi grani di ferrite equiassica, non dissimile da quella osservata nella sezione trasversale. Avvicinandosi alla superficie interna si trovano aree via via più ricche in carbonio, caratterizzate da una microstruttura mista di ferrite e perlite, anche se quest'ultima rimane largamente minoritaria.

La separazione tra le diverse costituenti metallografiche è resa ancora più netta nell'estremità sinistra del campione, dove un fascio di linee di scoria taglia longitudinalmente la sezione. Queste inclusioni sono contraddistinte da numerose cavità interne e appaiono monofasiche, di colore scuro.

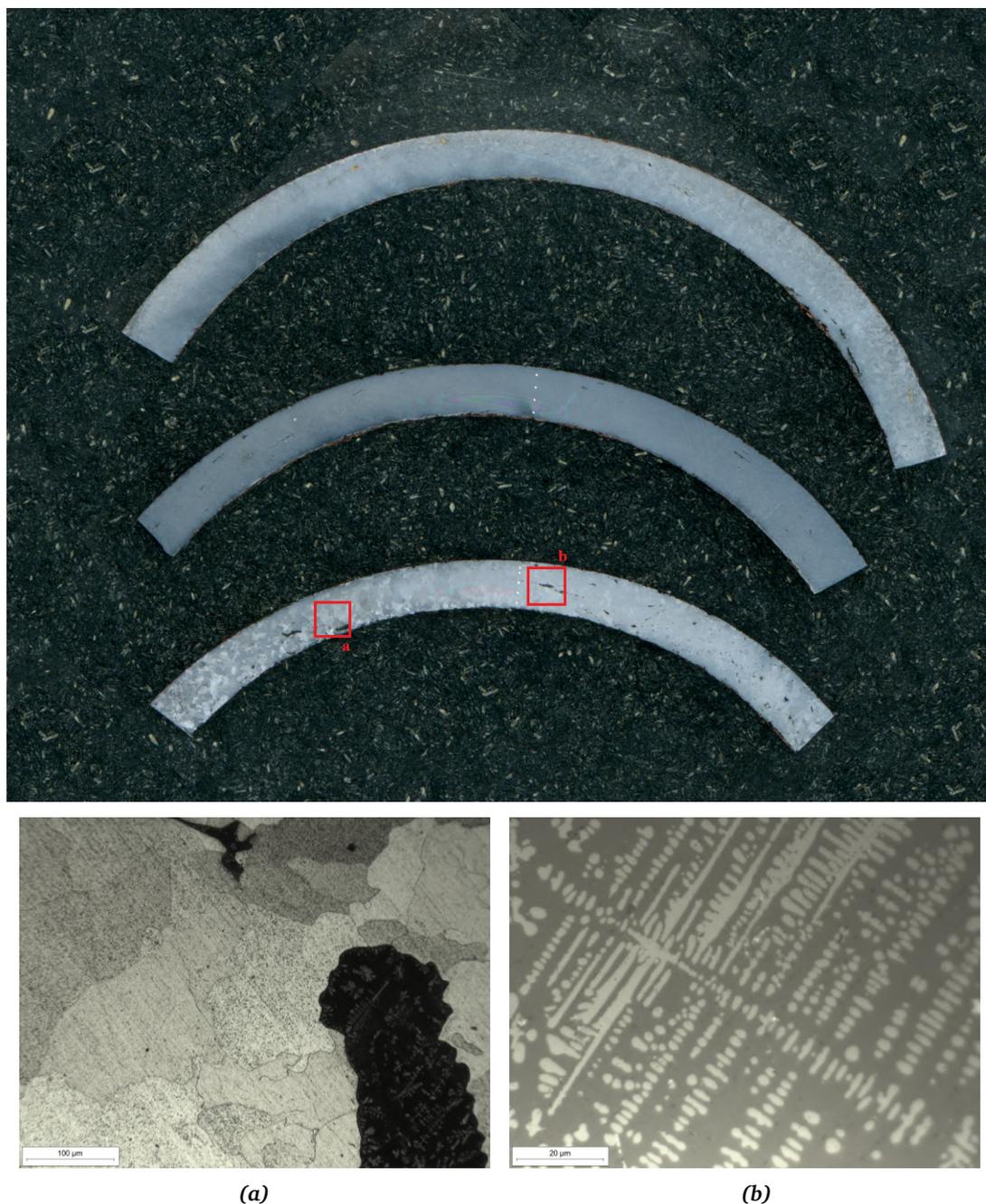
### 6.3.3 Microdurezza

Per misurare la microdurezza del manufatto è stata condotta una prima serie di prove con carico pari a 300 gf lungo due raggi selezionati in modo casuale (fig. 6.15). A causa del ridotto spessore disponibile, poco superiore ai 2 mm, sono state effettuate solo 9 misurazioni. I valori ottenuti vanno da un massimo di 132 HV a un minimo di 100, con una media che si attesta intorno ai 113 punti Vickers.

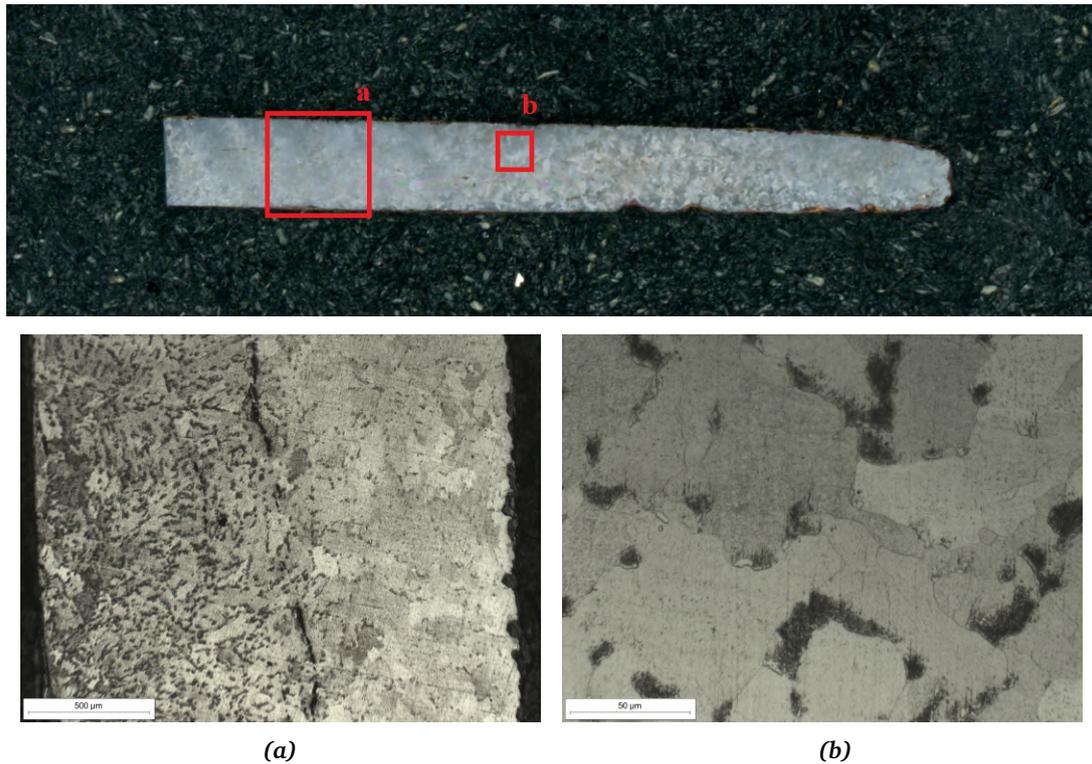
Una seconda serie di dati deriva invece dalle 11 misurazioni effettuate con carico pari a 50 gf sulle inclusioni di scoria, da cui risulta una durezza media di 522 HV. La tabella 6.4 raccoglie i principali risultati della prova.

**Tabella 6.4:** Microdurezza misurata sul campione S3

valore	durezza Vickers [HV]	
	cucitura	inclusioni
medio	113	522
massimo	132	653
minimo	100	324



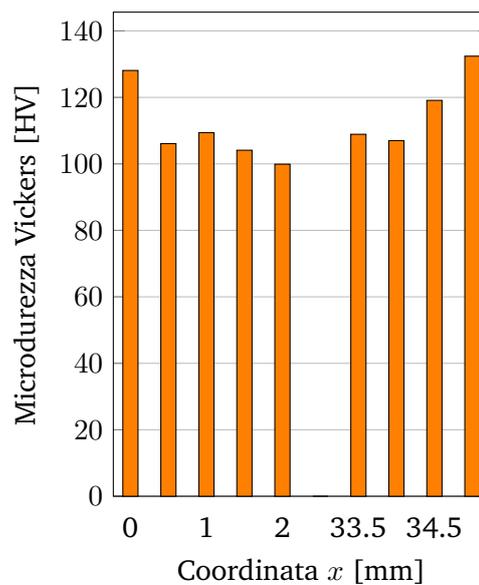
**Figura 6.13:** Scansione e microstruttura del campione S3: **(a)** grani di ferrite equiassica in una regione a bassissimo tenore di carbonio. Sulla destra, un'inclusione di scoria. **(b)** immagine ad alto ingrandimento di un'inclusione bifasica: si riconosce una fitta trama di fasi chiare disposte in modo ordinato e simmetrico all'interno di una matrice più scura.



**Figura 6.14:** Scansione e microstruttura del campione S3-L: **(a)** linee di scoria disposte in direzione longitudinale, che separano strati di materiale eterogenei: sul lato sinistro un acciaio a microstruttura perlitico-ferritica, sul lato destro grani di ferrite equiassica propri di un acciaio extra dolce. **(b)** immagine ad alto ingrandimento di una microstruttura mista di ferrite e perlite.



**Figura 6.15:** Direzione di prelievo delle misure di microdurezza lungo la cucitura di S3



**Figura 6.16:** Misure di microdurezza in ordine di prelievo lungo la cucitura di S3



## 6.4 Trombone: culatta

### 6.4.1 Sezione trasversale

L'estremità a base ottagonale del trombone viene studiata attraverso il campione S6, che ne riproduce una sezione trasversale. Più precisamente, il campione rappresenta la parte terminale della culatta nota anche come camera di scoppio, all'interno della quale ha luogo l'esplosione della carica. In corrispondenza del foro è infatti visibile un accenno di filettatura, appartenente alla madrevite deputata ad ospitare il vitone che sigilla posteriormente la canna (non pervenuto insieme al reperto).

Come si nota dalla fig. 6.17, la sezione è costellata di inclusioni di dimensione variabile, dai pochi micrometri fino al millimetro, per lo più di forma allungata e disposte in modo disomogeneo lungo linee di scoria che percorrono il manufatto secondo una direzione circonferenziale. Oltre alle classiche inclusioni bifasiche globulari, si distingue un'altra tipologia di scorie: apparentemente monofasiche, queste inclusioni sono in realtà formate da una fase grigio-chiara di forma aciculare immersa in una matrice grigio-scura.

Quanto alle componenti metallografiche, si alternano senza apparente criterio logico aree ferritico-perlitiche a microstruttura fine e aree di ferrite più grossolana, dove il carbonio è presente quasi esclusivamente sotto forma di carburi a bordo grano.

### 6.4.2 Sezione longitudinale

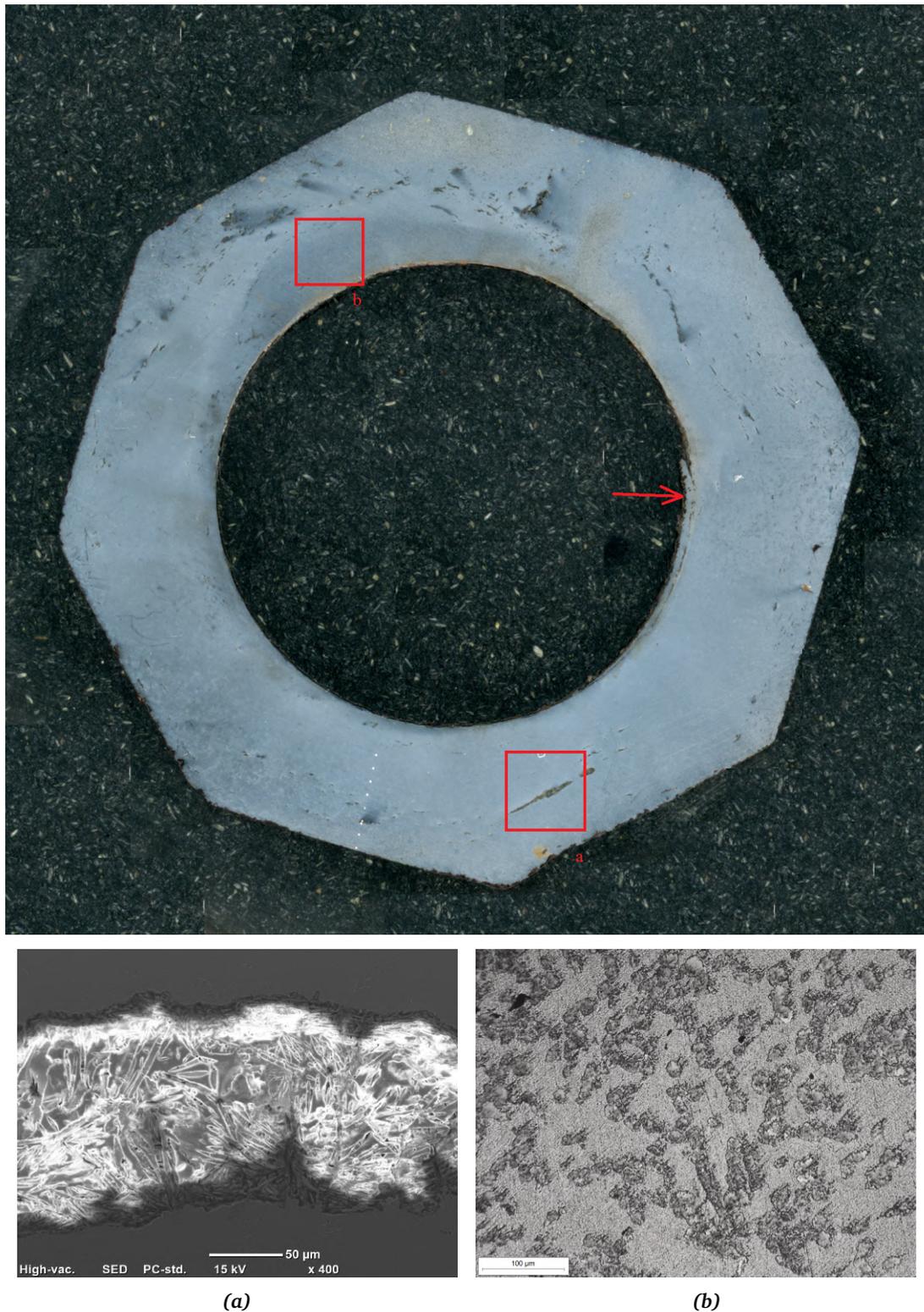
Il campione S6-L contiene una vista in sezione dell'estremità posteriore della culatta, che è stata ricavata in modo tale da metterne in evidenza la filettatura: benché parzialmente abrasa e in cattivo stato di conservazione, i denti della madrevite sono riconoscibili sul lato superiore del pezzo (fig. 6.18).

La sezione è attraversata longitudinalmente da numerose linee di scoria, in genere costituite da inclusioni sottili e oblunghe. Osservandole al microscopio ottico, si nota la classica morfologia bifasica chiaro-scura, con prevalenza della fase scura. Particolarmente importante l'inclusione che occupa la parte centrale del provino, che si estende per parecchi millimetri e presenta una grossa cavità centrale, che nella scansione del campione appare come una macchia nera. Dalle immagini ad alto ingrandimento risulta che le porosità, generalmente concentrate a ridosso delle inclusioni di scoria, sono abbondanti e uniformemente distribuite: al microscopio si manifestano come aree fuori fuoco rispetto alla superficie di osservazione.

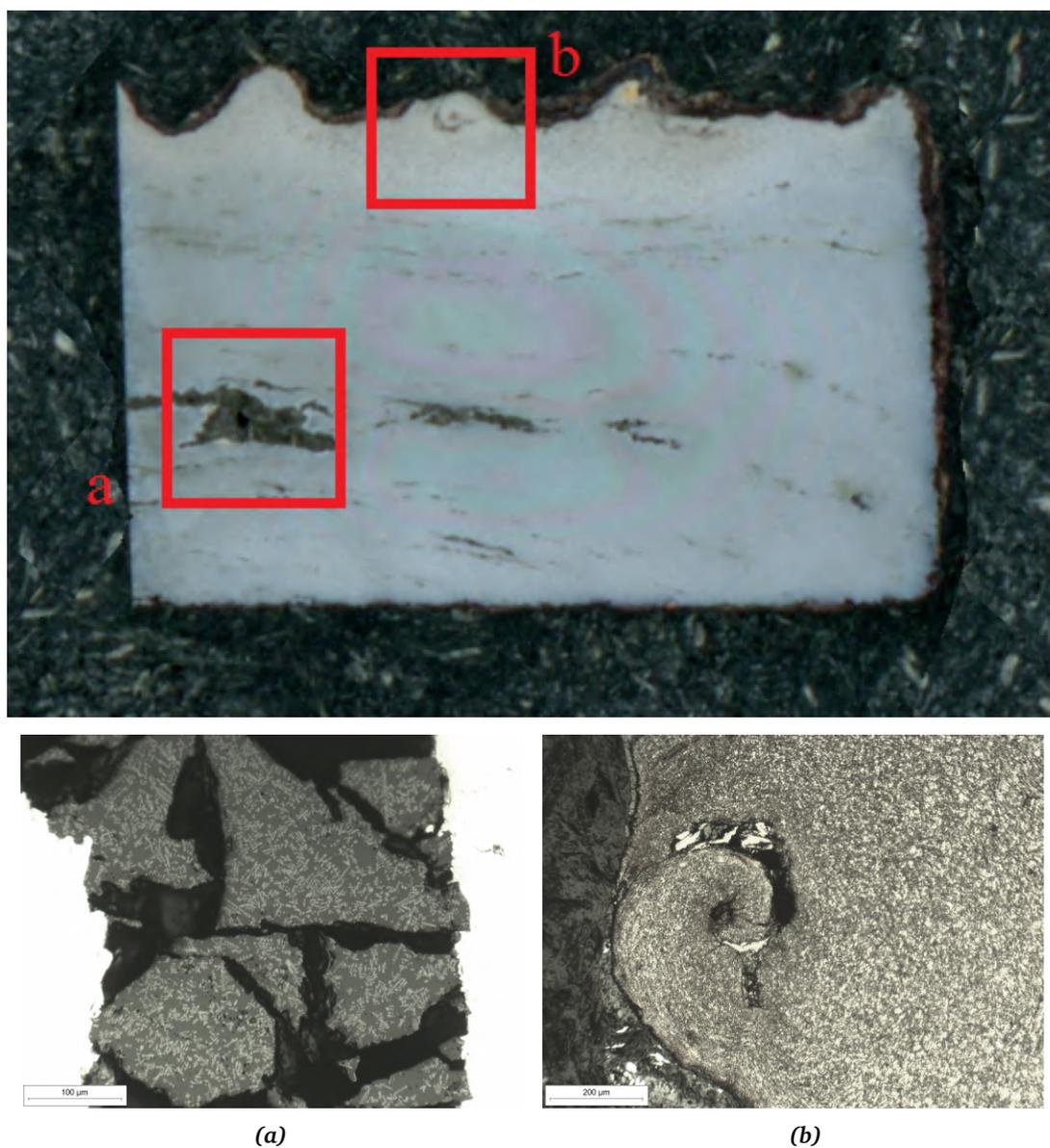
La microstruttura non è dissimile da quella studiata nel campione S6: fine in prossimità del filetto, dove ferrite e perlite sono presenti in uguale concentrazione; più grossolana nella zona centrale, dove a dominare sono grossi grani ferritici. Fatta eccezione per questa eterogeneità microstrutturale, il tenore di carbonio all'interno del materiale sembra distribuito in modo sostanzialmente omogeneo. Come osservato per i campioni precedenti, non sono state trovate tracce di bainite o martensite, tali da far presupporre l'esistenza di trattamenti termici a carico del manufatto.

### 6.4.3 Microdurezza

La microdurezza della culatta del reperto O163 è stata misurata attraverso una serie di 7 rilevamenti lungo un raggio del campione S6 (fig. 6.19). A fronte dell'applicazione di un carico pari a 300 gf, è emersa una durezza media di 142 punti Vickers. I valori ottenuti si discostano in maniera poco significativa dal valor medio e confermano una sostanziale omogeneità nella durezza del materiale.



**Figura 6.17:** Scansione e microstruttura del campione S6: la freccia indica la filettatura. **(a)** inclusione di scoria osservata al SEM: nonostante il fenomeno di carica sia particolarmente intenso, è possibile cogliere la natura aciculare della seconda fase che contraddistingue questa tipologia di inclusioni. **(b)** immagine ad alto ingrandimento della microstruttura ferritico-perlitica in corrispondenza di una regione a maggiore tenore di carbonio.

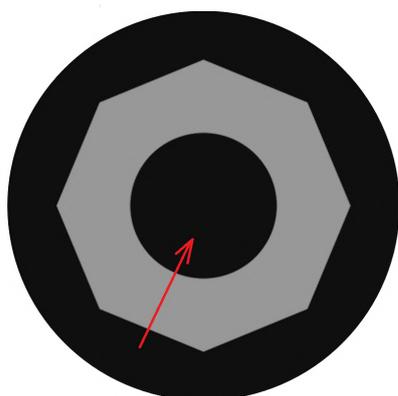


**Figura 6.18:** Scansione e microstruttura del campione S6-L: **(a)** immagine ad alto ingrandimento della grossa inclusione di scoria al centro del campione, in cui sono messe in luce le numerose cavità interne e la caratteristica morfologia bifasica globulare. **(b)** dettaglio del profilo filettato, dove è riconoscibile la microstruttura ferritico-perlitica: le analisi spettrometriche (SEM-EDS) suggeriscono che le macchie chiare e lucenti che sembrano inglobate nel filetto sono costituite da ferro metallico puro.

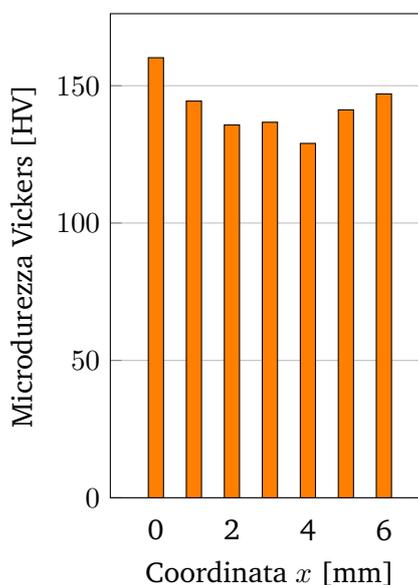
Data l'abbondanza di scoria nel materiale, è stato possibile prelevare 18 misurazioni con carico ridotto a 50 gf localizzate alle inclusioni non metalliche di maggiori dimensioni. In questo caso la dispersione dei risultati è decisamente maggiore, verosimilmente a causa dell'eterogeneità morfologica e composizionale delle stesse. La tabella 6.5 esprime in sintesi i risultati della prova.

**Tabella 6.5:** Microdurezza misurata sul campione S6

valore	durezza Vickers [HV]	
	cucitura	inclusioni
medio	142	429
massimo	160	1225
minimo	129	179



**Figura 6.19:** Direzione di prelievo delle misure di microdurezza lungo la cucitura di S6

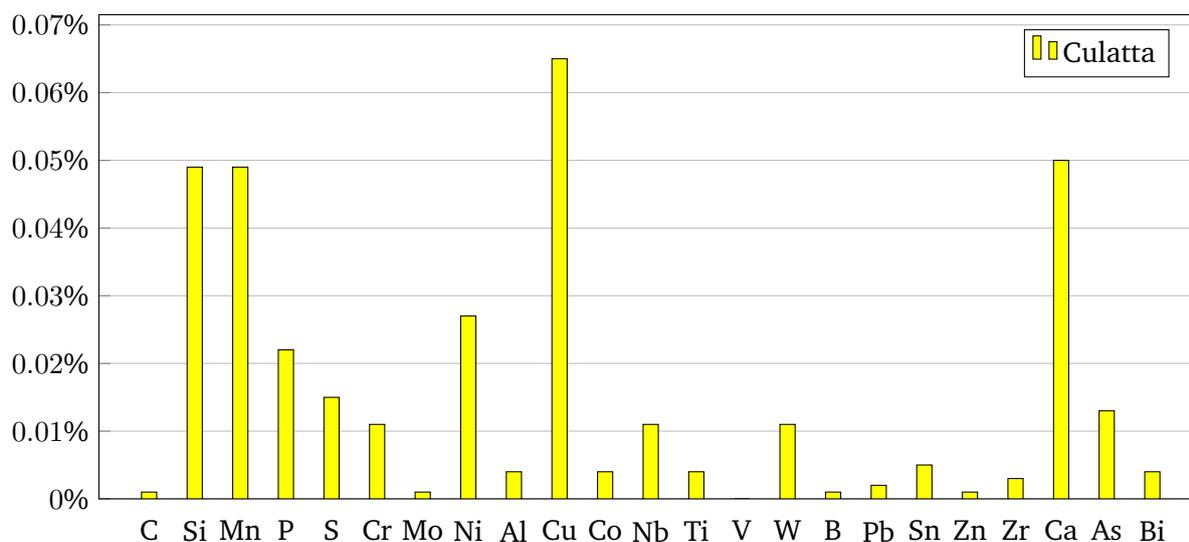


**Figura 6.20:** Misure di microdurezza in ordine di prelievo lungo la cucitura di S6

#### 6.4.4 Analisi chimica composizionale

Le analisi composizionali condotte sul campione non inglobato SQ6 completano lo studio della matrice metallica del reperto O163. I risultati della prova, frutto di 14 misurazioni, sono illustrati nella tabella 6.6. Il materiale è caratterizzato da un bassissimo tenore di carbonio, ai limiti della capacità di rilevamento dell'apparato sperimentale (< 0,001 %). Tra gli elementi leganti emergono invece significative concentrazioni medie di rame, calcio, silicio e manganese, le cui abbondanze relative sono rappresentate nell'istogramma di fig. 6.21.

Come osservato nel campione SQ4, la contaminazione da fosforo e zolfo è piuttosto bassa: entrambi gli elementi, il cui contenuto medio si attesta intorno allo 0,02 %, non superano quasi mai lo 0,05 % in massa.



**Figura 6.21:** Analisi chimica degli elementi leganti nel campione SQ6. Percentuali espresse su base massa.

**Tabella 6.6:** Analisi composizionale del campioni SQ6

	prove [%]						
	1	2	3	4	5	6	7
C	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Si	0,0440	0,0520	0,0380	0,1120	0,0390	0,0430	0,0340
Mn	0,0500	0,0470	0,0340	0,1230	0,0430	0,0390	0,0290
P	0,0230	0,0210	0,0240	0,0270	0,0210	0,0210	0,0240
S	0,0150	0,0110	0,0390	0,0600	0,0060	0,0050	0,0140
Cr	0,0110	0,0110	0,0110	0,0110	0,0120	0,0110	0,0110
Mo	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Ni	0,0270	0,0270	0,0260	0,0270	0,0280	0,0290	0,0280
Al	0,0030	0,0040	0,0030	0,0090	0,0030	0,0030	0,0020
Cu	0,0580	0,0610	0,0670	0,0580	0,0680	0,0760	0,0690
Co	0,0030	0,0040	0,0040	0,0030	0,0040	0,0050	0,0040
Nb	0,0110	0,0110	0,0120	0,0120	0,0110	0,0120	0,0120
Ti	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0030
V	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
W	0,0080	0,0120	0,0090	0,0080	0,0100	0,0040	0,0090
B	<0,0005	0,0006	<0,0005	<0,0005	0,0007	0,0007	<0,0005
Pb	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Sn	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050
Zn	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Zr	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030
Ca	>0,0500	>0,0500	>0,0500	>0,0500	0,0302	0,0152	>0,0500
As	0,0140	0,0110	0,0090	0,0140	0,0140	0,0180	0,0120
Bi	0,0030	0,0040	0,0070	0,0010	0,0040	0,0030	0,0040
Fe	99,6580	99,6480	98,7780	99,0540	99,6960	99,7030	99,6550

**Tabella 6.6:** Analisi composizionale dei campioni SQ6

	prove [%]						
	8	9	10	11	12	13	14
C	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Si	0,0730	0,0450	0,0370	0,0400	0,1400	0,0410	0,0400
Mn	0,0790	0,0470	0,0360	0,0350	0,1220	0,0430	0,0340
P	0,0240	0,0220	0,0210	0,0210	0,0260	0,0210	0,0230
S	0,0220	0,0070	0,0040	0,0060	0,1660	0,0040	0,0070
Cr	0,0110	0,0110	0,0110	0,0110	0,0110	0,0120	0,0110
Mo	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Ni	0,0270	0,0270	0,0290	0,0270	0,0260	0,0280	0,0280
Al	0,0060	0,0030	0,0020	0,0030	0,0190	0,0020	0,0030
Cu	0,0620	0,0640	0,0690	0,0650	0,0660	0,0680	0,0640
Co	0,0040	0,0040	0,0040	0,0030	0,0040	0,0040	0,0050
Nb	0,0110	0,0120	0,0110	0,0110	0,0110	0,0120	0,0110
Ti	0,0040	0,0040	0,0030	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040
V	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
W	0,0150	0,0070	0,0120	0,0120	0,0100	0,0060	0,0070
B	<0,0005	0,0006	0,0007	0,0008	<0,0005	0,0007	0,0007
Pb	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Sn	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	0,0040	0,0050	0,0050
Zn	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Zr	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030
Ca	>0,0500	0,0401	0,0130	>0,0500	>0,0500	0,0152	>0,0500
As	0,0100	0,0150	0,0190	0,0070	0,0140	0,0200	0,0100
Bi	0,0040	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0020
Fe	99,3960	99,6790	99,7140	99,6760	93,4730	99,7080	99,6700

## 6.5 Trombone: raccordo

### 6.5.1 Sezione longitudinale

La serie dei campioni inglobati in resina si conclude con la sezione longitudinale del tratto di raccordo tra l'ordine quadro e l'ordine tondo della canna di trombone, che coincidono rispettivamente con la culatta e la volata del manufatto. In questo modo si intende verificare se le due parti siano state realizzate in momenti differenti e saldate insieme successivamente oppure se il processo di formatura abbia avuto luogo senza soluzione di continuità. Prendendo come riferimento la fig.6.22, è possibile individuare sul lato superiore il profilo della sobria decorazione a rilievo che impreziosisce il raccordo; il lato inferiore, liscio e più regolare, rappresenta invece la superficie del foro interno della canna. Il materiale che si trova a destra del raccordo costituisce parte della volata, mentre quello sulla sinistra è riconducibile alla culatta.

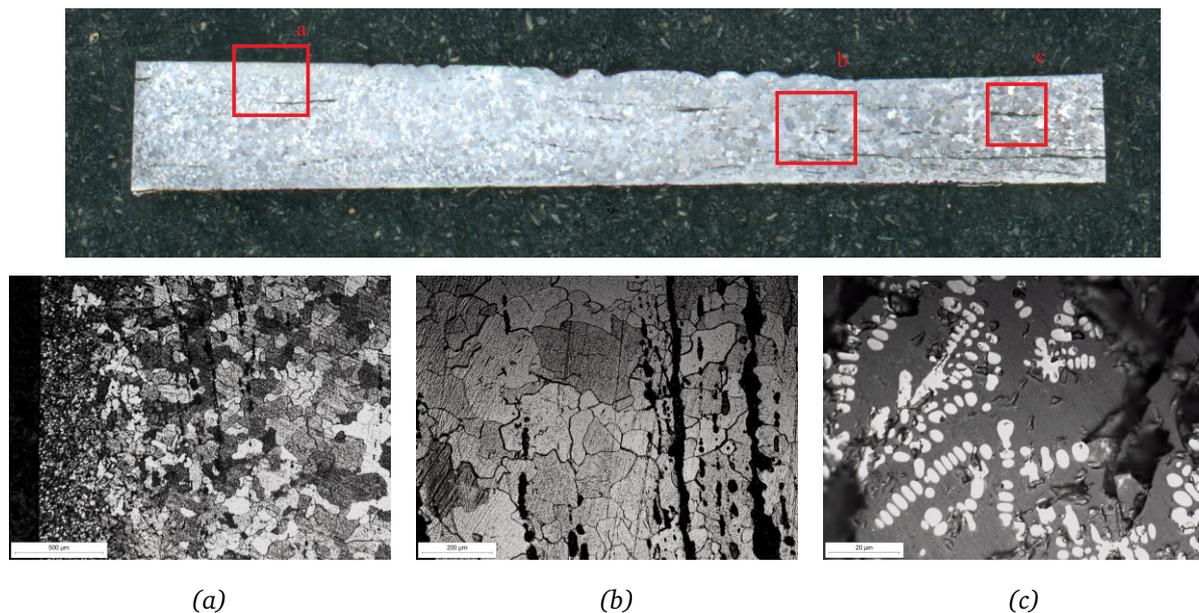
Il campione è percorso in tutta la sua lunghezza da numerose linee di scoria, particolarmente evidenti sul versante di volata. La morfologia delle inclusioni non metalliche rispecchia quella osservata in precedenza: una matrice scura, tipicamente di forma allungata, contenente una trama più o meno fitta di globuli tondeggianti di colore chiaro.

La microstruttura è formata in prevalenza da grossi grani di ferrite equiassica, distribuiti omogeneamente su gran parte della superficie del campione. Anche se a livello macroscopico non vi sono evidenti gradienti nella concentrazione di carbonio – peraltro mediamente molto bassa –, in prossimità del bordo superiore dell'estremità di culatta il microscopio ottico mette in evidenza uno strato spesso circa 500  $\mu\text{m}$  di materiale a grana più fine, caratterizzato da una struttura mista di ferrite e perlite non risolta. Procedendo da sinistra verso destra, non si incontrano tracce riconducibili a saldature o a giunzioni di materiale diverso, né emergono discontinuità significative nella microstruttura, il che porta ad escludere che i due ordini della canna siano stati fabbricati separatamente.

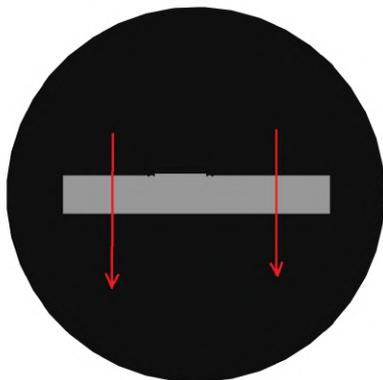
### 6.5.2 Microdurezza

Sul campione S8-L sono state condotte due serie di prove, entrambe con carico pari a 300 gf e destinate a misurare la durezza della matrice metallica. La prima serie, che interessa la porzione di materiale a sinistra del raccordo, mira a valutare le proprietà meccaniche della culatta del trombone. La seconda, invece, si concentra sulla metà di destra del campione e permette di misurare la durezza della volata (fig. 6.23).

A fronte di 15 rilevazioni effettuate sul lato di culatta, risulta una durezza media di 111 punti Vickers, con valori compresi tra 85 HV e 185 HV. Sul lato di volata le misurazioni sono state 13 e hanno fornito una durezza media pari a 129 HV, con una dispersione dei valori misurati non dissimile da quella osservata nella prima serie. Tutti i valori significativi sono rappresentati nella tabella 6.7. Volendo sovrapporre i risultati in unica serie di dati, si ottiene un valore medio molto simile ai precedenti (119 HV). Pur non essendo evidenti particolari derive o discontinuità, si è constatato che i massimi di durezza tendono a concentrarsi per ciascuna delle due serie in prossimità del diametro interno della canna.



**Figura 6.22:** Scansione e microstruttura del campione S8-L: (a) immagine a basso ingrandimento della microstruttura, che mette in evidenza il sottile strato superficiale di composizione ferritico-perlitica. (b) dettaglio della matrice ferritica grossolana che caratterizza gran parte del manufatto, attraversata da un fascio di linee di scoria. (c) immagine ad alto ingrandimento di un'inclusione non metallica: si riconosce la fase chiara e luminosa, dall'aspetto tondeggiante, immersa in una matrice scura e opaca.



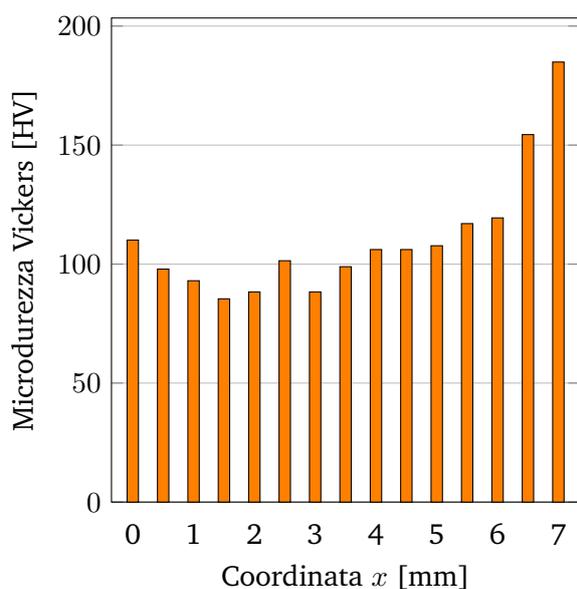
**Figura 6.23:** Direzione di prelievo delle misure di microdurezza lungo la cucitura di S8-L

**Tabella 6.7:** Microdurezza misurata sul campione S8-L

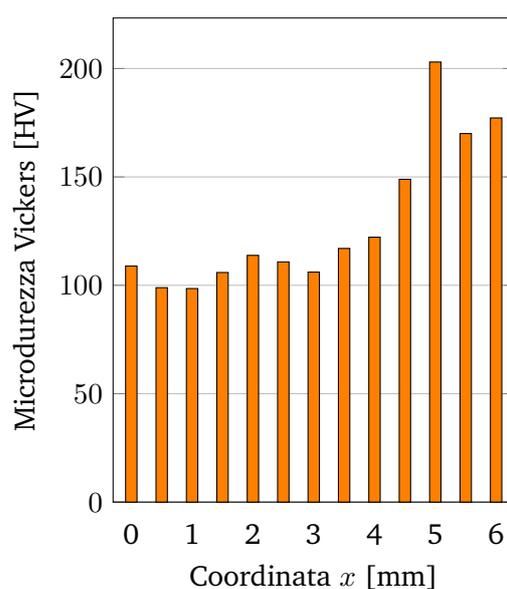
valore	durezza Vickers [HV]	
	culatta	volata
medio	111	129
massimo	185	203
minimo	85	99

### 6.5.3 Analisi chimica composizionale

Come già anticipato nel cap.5, dal campione SQ8 non è stato possibile ottenere analisi spettrometriche scientificamente attendibili. Con ogni probabilità l'insuccesso delle prove condotte è da imputarsi alla presenza di cavità interne di grandi dimensioni: queste, congiuntamente alla scarsa disponibilità di superfici piane sufficientemente estese, hanno compromesso la validità dell'operazione. Anche nei casi in cui l'apparecchio di prova non ha restituito alcun messaggio di errore e ha eseguito le operazioni di misura senza apparenti anomalie, i risultati si sono subito rivelati inattendibili, in quanto caratterizzati da percentuali di ferro inferiori al 90 %.



**Figura 6.24:** Misure di microdurezza in ordine di prelievo lungo la cucitura di S8-L (lato culatta)



**Figura 6.25:** Misure di microdurezza in ordine di prelievo lungo la cucitura di S8-L (lato volata)

In virtù di queste considerazioni, si è deciso di non riportare in questo documento alcun dato composizionale relativo al campione SQ8.

## 7 Risultati: composizione chimica delle inclusioni di scoria

Una caratteristica comune alla maggior parte dei manufatti in acciaio di età pre-industriale è – oltre a una più o meno marcata disomogeneità composizionale – l'elevato contenuto di inclusioni non metalliche. Si tratta prevalentemente di ossidi quali FeO, SiO<sub>2</sub>, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, K<sub>2</sub>O, MnO e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> distribuiti in proporzioni variabili all'interno del materiale in funzione di una molteplicità di fattori. Se si esclude il FeO, questi ossidi non subiscono riduzione all'interno della fornace o, in caso contrario, subiscono una riossidazione completa durante le ultime fasi del processo fusorio e vengono perciò identificati con l'acronimo inglese NRC (*non-reduced compounds*). Come si è visto nel paragrafo 3.4, la qualità e la quantità di tali composti inorganici è condizionata tanto dalla composizione chimica del minerale grezzo quanto da fattori esogeni, direttamente legati al processo tecnologico di riduzione del metallo: l'utilizzo di additivi e flussanti, la composizione delle ceneri di legna, il distacco del materiale di rivestimento dalle pareti del forno fusorio [22].

Secondo gli studi degli scienziati danesi V. F. Buchwald e H. Wivel, che a partire dagli anni '90 hanno condotto un'imponente campagna sperimentale su scorie d'altoforno e antichi manufatti in acciaio rinvenuti nella penisola scandinava, vi è una correlazione tra la temperatura di riduzione, la microstruttura e la composizione chimica delle inclusioni non metalliche del materiale ottenuto. Basse temperature all'interno della fornace producono un'atmosfera povera di monossido di carbonio, dal ridotto potere riducente: ne deriva una matrice metallica debolmente carburata, tipicamente ferritica e caratterizzata da una durezza indicativa pari a  $110 \pm 5$  HV. Le inclusioni saranno invece ricche di ferro non ridotto, che si presenta in forma di wüstite (FeO). Al contrario, temperature elevate garantiscono la formazione di importanti concentrazioni di monossido di carbonio, che favoriscono la reazione di riduzione del minerale grezzo: il risultato sarà una microstruttura prevalentemente perlitica, contraddistinta da un alto tenore di carbonio e da una durezza pari a circa  $225 \pm 20$  HV. D'altro canto le inclusioni appariranno vetrose, generalmente costituite da fayalite ( $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ), silicati e ossidi di calcio. Naturalmente la maggior parte dei forni antichi non consente un controllo così preciso dei processi fusori tale da evitare che al proprio interno si formino zone più calde e zone più fredde, perciò il metallo prodotto rappresenta spesso come una via di mezzo tra i casi limite descritti: si alternano regioni ferritiche a basso tenore di carbonio, dove le inclusioni contengono alte concentrazioni di ossido di ferro, e regioni perlitiche, maggiormente carurate e caratterizzate da scorie vetrose, ricche in silicio e altri ossidi [9].

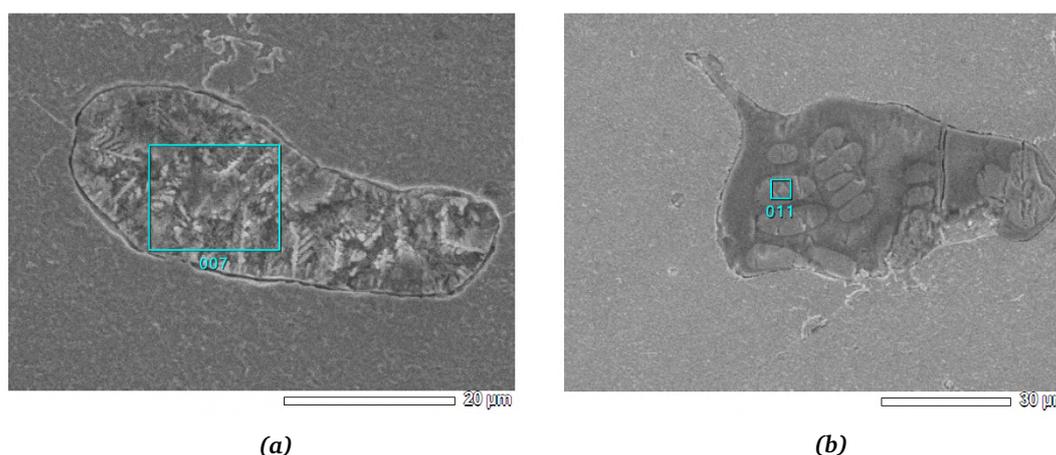
Gli storici della metallurgia sono generalmente concordi sul fatto che le inclusioni di scoria nei manufatti ottenuti per riduzione diretta abbiano origine all'interno del forno di riduzione, mentre quelle appartenenti a manufatti realizzati per riduzione indiretta derivino per la maggior parte dall'operazione di raffinazione della ghisa. Diversamente dal processo diretto, la produzione di acciaio in altoforno consente infatti di separare efficacemente il metallo dalla scoria, che viene estratta allo stato liquido prima di procedere alla colata. A seguito delle differenti tec-

nologie di produzione, le concentrazioni relative degli ossidi non riducibili cambiano: studiando la composizione chimica delle inclusioni non metalliche all'interno dei reperti sarebbe dunque possibile risalire al metodo di riduzione utilizzato. In un lavoro pubblicato nel 2007, gli studiosi francesi P. Dillmann e M. L'Héritier dimostrano infatti che all'interno di uno stesso strato di materiale ferroso gli NRC si trovano in proporzioni costanti tra loro e che, analizzando la composizione chimica delle inclusioni appartenenti a più manufatti e confrontandola con le scorie prelevate dai principali siti fusori operativi nella regione e nell'epoca storica di riferimento, si possa ricondurre i reperti al luogo e alla tecnologia di produzione[23].

Ora, se è vero che la composizione della scoria ha per lo più origine dal processo di riduzione del minerale, è bene osservare che anche gli additivi e le operazioni di fucina possono alterarne la composizione. Questo potrebbe rappresentare un limite alla validità delle analisi condotte sulle canne di arma da fuoco, in quanto il loro processo di formatura presuppone un utilizzo massiccio di additivi scorificanti, principalmente durante la fase di bollitura. Per manufatti poco lavorati, invece, è lecito supporre che le abbondanze relative dei composti che formano la scoria rimangano sostanzialmente inalterate<sup>1</sup>.

## 7.1 Composizione chimica della scoria

Le prove di spettrometria EDS condotte presso il microscopio elettronico hanno interessato sia le inclusioni nel loro complesso, sia le singole fasi distinguibili al loro interno. Per ciascuno dei due manufatti sono messe in evidenza gli ossidi presenti in maggior concentrazione, i rapporti tra le abbondanze relative di alcuni composti ed eventuali singolarità o elementi degni di nota. Anche se la ridotta disponibilità di tempo e di mezzi non ha permesso di analizzare un numero di inclusioni sufficiente a condurre un'analisi multi-variabile come quelle proposte dagli autori sopra citati – per la quale si richiedono in genere almeno 40 prove –, i dati ottenuti confermano le tesi di Buchwald e Wivel e mostrano significative interdipendenze tra i diversi NRC (fig. 7.2).



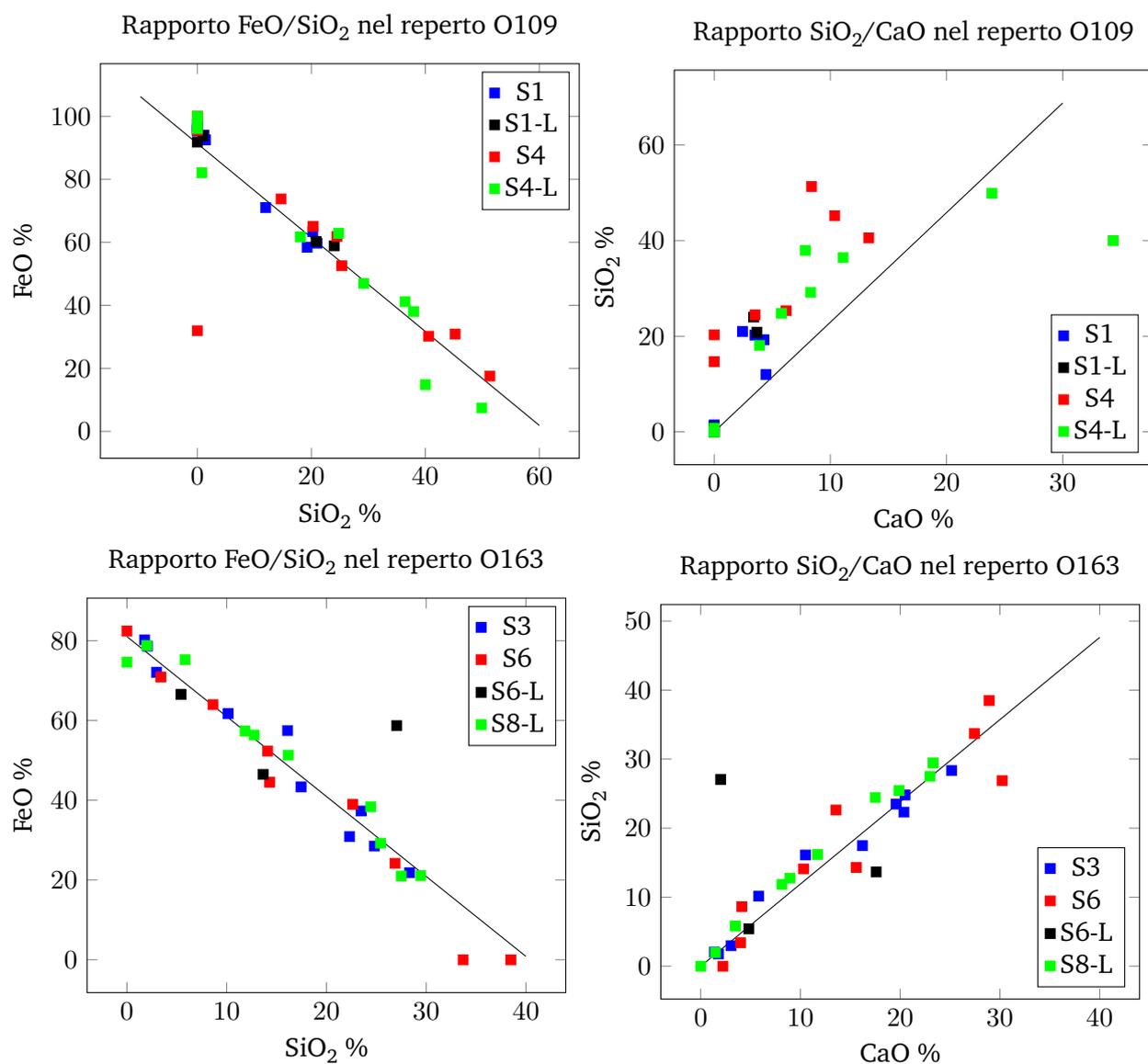
**Figura 7.1:** Esame SEM-EDS di un'inclusione di scoria: (a) analisi volta a misurare la composizione chimica globale della scoria (b) analisi localizzata volta a rivelare la composizione chimica della sola fase chiara dell'inclusione

<sup>1</sup>Tutte le inclusioni che si osservano all'interno del metallo sono quelle che gli artigiani metallurgisti non sono stati in grado di rimuovere dal metallo per mezzo delle operazioni di riduzione in fornace e fucinatura al maglio. Non interessano tanto le quantità assolute, che possono variare in funzione del fatto che il manufatto sia stato lavorato di più o di meno, ma le abbondanze relative, che si suppone possano rimanere pressoché costanti durante l'intero processo di lavorazione.



La canna di archibugio (reperto O109) presenta una scoria ad alto contenuto di ferro, che tende a concentrarsi nelle inclusioni bifasiche sotto forma di wüstite. Questa costituisce gran parte di quella fase globulare che al microscopio appare chiara e che è caratterizzata da percentuali di ossido di ferro ampiamente superiori al 90 %. All'interno della fase scura prevalgono invece i silicati, accompagnati da modeste quantità di ossidi di calcio, fosforo, alluminio, potassio e magnesio. In alcune inclusioni sono inoltre state individuate quantità consistenti di vanadio e cromo, che Buchwald associa ai materiali ferrosi prodotti secondo il metodo indiretto. Verso tali conclusioni conduce anche la verifica di un altro indicatore, che vuole per gli acciai da altoforno rapporti  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  superiori a 4 e  $\text{K}_2\text{O}/\text{MgO}$  circa unitari: condizioni che devono essere verificate dall'analisi chimica globale delle inclusioni, come mostrato nelle tabelle 7.1 e 7.3.

Il contenuto di ferro nelle scorie appartenenti alla canna di trombone (reperto O163) è mediamente più basso e non supera mai, nemmeno nelle fasi chiare, l'80 % in massa. Questo è probabilmente dovuto alla presenza di grandi quantità di manganese, che si sostituisce al ferro nella formazione di wüstite e fayalite: non è un caso che, sommando gli ossidi di ferro a quelli di manganese, si ottengano valori paragonabili a quelli rappresentati dal solo ossido di ferro nel reperto O109. Nonostante non siano state individuate tracce di vanadio o di cromo, i rapporti tra gli NRC più significativa corrispondono a quelli descritti sopra e convalidano l'ipotesi che anche il trombone sia composto da acciaio da altoforno.



**Figura 7.2:** Analisi composizionale a due variabili delle inclusioni di scoria nei reperti: la retta di tendenza identifica in entrambi i casi la presenza di un rapporto costante tra i due ossidi correlati. Tutti i valori percentuali sono espressi su base massa.



**Tabella 7.1:** Analisi chimica globale delle scorie: reperto O109 [% in massa]. Le inclusioni sono classificate in funzione della tipologia: "a" (aciculare), "m" (monofasica), "b" (bifasica).

c.	tipo	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	R <sub>1</sub> *	R <sub>2</sub> **
S4	b	-	4,76	20,3	2,53	-	-	-	65,07	4,3	-
S4	b	-	3,63	14,69	2,79	-	-	-	73,76	4,0	-
S4	b	-	3,68	45,22	1,19	3,71	10,37	-	30,89	12,3	∞
S4-L	b	0,56	3,55	36,45	0,74	2,16	11,09	2,07	41,16	10,3	3,9
S4-L	b	1,88	3,59	37,95	-	1,88	7,85	3,03	38,03	10,6	1,0
S4-L	b	1,48	2,47	29,18	0,67	1,3	8,3	2,65	46,96	11,8	0,9
S4-L	m	2,53	5,28	49,9	-	3,8	23,9	0,31	7,44	9,5	1,5
S4-L	m	0,58	0,98	40,01	0,48	0,17	34,34	0,07	14,79	40,8	0,3

\* rapporto SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
 \*\* rapporto K<sub>2</sub>O/MnO

**Tabella 7.2:** Analisi chimica particolare della scoria: reperto O109 [% in massa].

c.	fase	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
S1	chiara	-	-	-	-	-	-	-	96,41	-	-
S1	chiara	-	-	-	-	-	-	-	95,79	-	-
S1	scura	-	-	11,98	5,22	1,15	4,46	-	71,03	-	-
S1	chiara	-	-	-	-	-	-	-	95,55	-	-
S1	scura	-	1,8	20,24	5,52	-	3,51	-	63,41	-	-
S1	chiara	-	-	1,15	-	-	-	-	94,04	-	-
S1	scura	-	2,03	20,99	4,87	1,21	2,44	-	59,73	-	-
S1	chiara	-	-	1,43	-	-	-	-	92,51	-	-
S1	scura	-	2,53	19,26	7,39	-	4,28	-	58,44	-	-
S1-L	chiara	-	-	0,97	-	-	-	-	93,75	-	-
S1-L	scura	0,86	1,92	20,84	3,53	1,1	3,68	-	60,29	-	-
S1-L	chiara	-	-	-	-	-	-	-	91,79	2,28	2,32
S1-L	scura	1,66	1,52	24	4,75	-	3,39	-	58,88	-	-
S4	scura	-	3,65	40,59	0,79	2,55	13,3	-	30,18	-	-
S4	scura	-	1,01	24,48	3,71	1,52	3,52	-	61,85	-	-
S4	chiara	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-
S4	scura	1,07	1,42	25,34	3,81	2,19	6,19	-	52,58	-	-
S4	chiara	-	-	-	-	-	-	-	95,5	-	-
S4	chiara	1,77	1,42	-	-	-	-	-	31,93	22,96	39,43
S4	scura	-	9,14	51,32	-	3,33	8,38	-	17,56	-	-
S4-L	chiara	-	-	-	-	-	-	-	96,09	-	-
S4-L	scura	0,56	1,53	18,07	5,88	1,25	3,91	-	61,74	-	-
S4-L	chiara	-	3,15	0,79	-	-	-	-	82,08	10,26	-
S4-L	chiara	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-
S4-L	scura	0,91	2,36	24,79	2,07	1,23	5,79	-	62,85	-	-
S4-L	chiara	-	-	-	-	-	-	-	97,66	-	-



Risultati: composizione chimica delle inclusioni di scoria

**Tabella 7.3:** Analisi chimica globale delle scorie: reperto O163 [% in massa]. Le inclusioni sono classificate in funzione della tipologia: "a" (aciculare), "m" (monofasica), "b" (bifasica).

c.	tipo	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MoO <sub>3</sub>	R <sub>1</sub> *	R <sub>2</sub> **
S3	b	2,11	2,72	24,81	6,07	1,82	20,48	6,75	28,52	-	9,12	0,86
S3	b	0,48	2,18	16,11	1,40	0,88	10,51	7,40	57,48	-	7,39	1,83
S3	b	2,14	3,25	28,34	1,51	1,84	25,16	7,16	21,84	-	8,72	0,86
S3	b	2,23	1,50	17,46	2,07	0,92	16,21	11,36	43,34	-	11,64	0,41
S6	a	3,89	4,76	38,49	-	2,33	28,92	14,13	-	-	8,09	0,60
S6	a	3,87	4,88	33,71	-	3,28	27,45	13,33	-	-	6,91	0,85
S6	b	1,73	2,96	14,10	-	1,43	10,32	10,35	52,36	-	4,76	0,83
S6-L	b	-	1,23	13,66	-	1,42	17,59	9,94	46,49	-	11,11	∞
S8-L	b	2,42	1,48	5,83	-	0,57	3,47	6,90	75,26	-	3,94	0,24
S8-L	b	1,36	2,07	16,18	-	1,91	11,71	6,84	51,32	-	7,82	1,40
S8-L	b	1,58	2,29	24,44	-	1,41	17,50	8,02	38,38	-	10,67	0,89
S8-L	b	1,97	2,80	25,44	1,70	1,50	19,88	7,66	29,23	1,76	9,09	0,76
S8-L	b	1,81	3,38	27,51	2,43	2,14	22,98	8,22	21,01	2,48	8,14	1,18
S8-L	b	1,93	2,88	29,45	2,70	2,67	23,29	8,64	21,12	-	10,23	1,38
S8-L	b	2,19	1,12	11,85	0,99	0,99	8,14	10,04	57,38	-	10,58	0,45

\* rapporto SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

\*\* rapporto K<sub>2</sub>O/MnO

**Tabella 7.4:** Analisi chimica particolare della scoria: reperto O163 [% in massa].

c.	fase	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MoO <sub>3</sub>
S3	chiara	1,76	0,46	2,05	0,89	0,42	1,37	12,11	78,64	-	-
S3	scura	1,38	2,87	23,49	1,66	1,74	19,59	6,83	37,31	-	-
S3	scura	2,79	1,40	10,15	0,39	0,75	5,81	9,44	61,74	-	-
S3	chiara	1,73	0,42	1,77	0,06	-	1,77	9,34	80,23	-	-
S3	chiara	3,30	0,50	2,97	1,42	0,30	3,04	8,51	72,08	-	-
S3	scura	1,78	3,18	22,32	3,94	1,14	20,37	7,64	30,89	-	-
S6	chiara	-	-	-	-	-	2,22	15,33	82,45	-	-
S6	scura	-	2,89	14,30	-	2,92	15,59	7,99	44,54	-	-
S6	chiara	2,23	0,42	3,40	-	-	3,99	11,47	70,90	-	-
S6	scura	2,33	1,37	26,88	-	1,38	30,23	7,54	24,19	-	-
S6	chiara	2,67	2,49	8,63	-	1,07	4,12	7,68	63,99	-	-
S6	nd	1,13	3,53	22,63	4,52	1,82	13,56	7,13	38,97	-	-
S6-L	chiara	2,63	0,52	5,42	-	-	4,82	11,36	66,55	-	-
S6-L	nd	-	4,45	27,05	-	1,16	2,00	-	58,71	-	-
S8-L	chiara	6,04	-	-	-	-	-	16,20	74,65	-	-
S8-L	chiara	1,72	1,62	12,76	0,79	0,80	8,95	11,35	56,35	-	0,72
S8-L	chiara	1,75	-	1,98	-	-	1,47	11,90	78,82	-	-

## 8 Conclusioni

In questo breve capitolo conclusivo si intende fare una sintesi dei risultati ottenuti dalle analisi metallografiche, proporre delle ipotesi interpretative circa i fenomeni osservati e delineare quelli che potrebbero essere gli sviluppi futuri della ricerca in merito ai reperti esaminati.

### 8.1 Osservazioni sulla canna di archibugio (reperto O109)

In riferimento alle microstrutture dei campioni analizzati, è lecito concludere che l'archibugio sia stato realizzato per deformazione plastica a caldo a partire da lame di acciaio a basso tenore di carbonio, che l'indagine spettrometrica suggerisce essere poco superiore allo 0,2 %. Mentre le linee di scoria risultano distribuite lungo le direzioni di deformazione, i grani – in maggioranza composti da ferrite equiassica mista a perlite lamellare – non appaiono orientati secondo una direzione preferenziale, cosa che sarebbe invece evidente in caso di deformazione a freddo. Il materiale presenta una microstruttura tipica di un acciaio extra dolce allo stato ricotto, non sottoposta a trattamenti termici di tempra o di indurimento superficiale. All'interno di una stessa sezione si notano talvolta delle disomogeneità nella carburazione del materiale, che tuttavia non sembrano avere origine intenzionale: la presenza di regioni localmente più ricche in carbonio sarebbe quindi da attribuire alla natura intrinsecamente poco omogenea del materiale grezzo di partenza.

La linea di saldatura che accomuna le sezioni trasversali di culatta e di volata del manufatto lascia pochi dubbi in merito al processo di bollitura, che deve aver avuto luogo secondo una logica di avvolgimento elicoidale. Una volta estratta dal mandrino, la canna è stata sottoposta a un'operazione di foratura per asportazione di truciolo, come evidenziato dalle brusche interruzioni nelle linee di scoria in prossimità del diametro interno dell'oggetto. Quanto al materiale grezzo, l'analisi chimica semi-quantitativa delle inclusioni non metalliche sembra far propendere verso l'ipotesi che esso derivi da un processo di riduzione indiretta. Occorre infatti ricordare che in area bresciana l'altoforno – o, più precisamente, il *canecchio* – costituisce l'unico esempio di fornace di riduzione: è dunque possibile che questo sia stato fin da subito impiegato anche per la produzione di ferro crudo o acciaio debolmente carburato.

Un altro aspetto messo in evidenza dall'analisi SEM-EDS della scoria consiste nella sostanziale assenza di manganese, cosa che induce ad escludere che il minerale di partenza fosse la siderite spatica (o mangesifera, appunto) di cui abbondano i giacimenti triumplini. Sembra piuttosto probabile che le lame metalliche che costituiscono il corpo della canna derivino dalla riduzione di minerali ad alto contenuto di ferro, quali ematite e magnetite. Un'ipotesi suggestiva, sicuramente degna di essere indagata e approfondita, è che l'acciaio in esame non sia di produzione locale, ma sia stato importato da altre regioni.

L'ultima osservazione a proposito del reperto O109 riguarda la fabbricazione del vitone di culatta. Come emerge dallo studio delle costituenti metallografiche, questo oggetto è caratterizzato da un tenore di carbonio mediamente superiore rispetto al resto della canna: ne sono la prova una maggior durezza e una più marcata presenza di perlite. L'andamento delle linee di

scoria in corrispondenza della filettatura è continuo e privo di interruzioni, segno del fatto che la realizzazione del filetto sia avvenuta per deformazione plastica.

## 8.2 Osservazioni sulla canna di trombone (reperto O163)

Come per l'archibugio, anche la canna di trombone è stata realizzata attraverso un processo di deformazione plastica a caldo, verosimilmente a temperature ampiamente superiori alla temperatura di austenitizzazione (800-900 °C per leghe a basso tenore di carbonio), e raffreddamento lento in aria: ne deriva una microstruttura piuttosto grossolana, prevalentemente ferritica e a grani equiassici, tipica degli acciai ricotti. Le analisi quantometriche, le prove di microdurezza e le osservazioni al microscopio ottico descrivono un materiale tenace, povero di elementi leganti e dal contenuto di carbonio quasi trascurabile. Un materiale che assomiglia più al ferro crudo (o *ferrazzo*, per usare la terminologia dell'epoca) che al *finissimo azzale*. Se nella produzione di armi bianche le caratteristiche meccaniche privilegiate sono la durezza e la resistenza, nella bollitura delle canne è possibile che si sia scelto di sacrificare queste proprietà a favore di una maggiore duttilità: tale scelta potrebbe essere motivata in parte dalla necessità di sottoporre il materiale a importanti deformazioni plastiche durante la realizzazione del manufatto stesso, in parte dalla necessità di scongiurare il rischio di esplosione della canna durante il suo funzionamento.

Dal momento che nessuna delle sezioni analizzate ha messo in evidenza particolari tracce di saldatura, non è possibile formulare ipotesi circa le modalità di avvolgimento e bollitura. La presenza localizzata di regioni a maggior tenore di carbonio non sembra seguire alcuno schema logico e appare più una conseguenza dell'eterogeneità composizionale del blumo di metallo grezzo che il risultato di un'azione consapevole e intenzionale del maestro di canne.

Quanto alle inclusioni di scoria, abbondanti e di grandi dimensioni, vi sono due indicatori – rispettivamente  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 4$  e  $\text{K}_2\text{O}/\text{MgO} \approx 1$  – che inducono a supporre che il metodo di riduzione adottato sia quello indiretto. Ma il fenomeno più interessante che emerge dall'analisi SEM-EDS è senza dubbio l'elevata concentrazione di MnO in sostituzione del ferro, che accomuna praticamente tutte le rilevazioni effettuate. Questo dato non solo è coerente con la natura dei giacimenti di minerale presenti nel territorio della Val Trompia, ricchi di siderite spatica, ma si colloca perfettamente in linea con le ricerche condotte su altri manufatti di origine bresciana [14][24]. Il Mn è inoltre presente in soluzione solida nella matrice metallica del trombone in quantità superiore rispetto a quella individuata nell'archibugio, rispettivamente 0,05 % contro 0,02 %. Se la totale assenza di manganese nelle scorie del reperto O109 impone cautela nell'attribuire il manufatto – o quanto meno il materiale grezzo – alla produzione siderurgica locale, l'abbondanza di questo elemento nel reperto O163 ne conferma l'appartenenza alla tradizione armiera triumplina.

## 8.3 Future prospettive di ricerca

Come anticipato nell'introduzione, questo lavoro esplora un campo sostanzialmente inedito della ricerca arqueo-metallurgica. Nonostante siano ormai numerosi gli studi nell'ambito della siderurgia antica, la maggior parte dei reperti analizzati appartiene al campo delle armi bianche, degli oggetti di uso quotidiano e di alcuni elementi architettonici. L'analisi metallografica di armi da fuoco portatili rimane invece un sentiero poco battuto, malgrado l'abbondante disponibilità di reperti e l'interesse di storici e collezionisti. Ampliare la ricerca ad un numero maggiore di canne non solo arricchirebbe le conoscenze sulla metallurgia di epoca moderna-rinascimentale, ma fornirebbe un efficace strumento di confronto e di dialogo rispetto ai reperti finora analizzati.



Ulteriori informazioni circa la provenienza degli oggetti in esame potrebbero essere ricavate dal confronto tra la composizione delle inclusioni non metalliche inglobate nei manufatti e le scorie rinvenute in prossimità degli impianti fusori. Questa tecnica di attribuzione, già adottata in altri contesti, consente infatti di associare un determinato reperto metallico al rispettivo forno di riduzione e quindi all'area geografica nel quale esso è stato prodotto. Dal medesimo confronto è inoltre possibile valutare in quale modo le operazioni di fucina modifichino la composizione chimica delle inclusioni e, di conseguenza, quali siano gli additivi utilizzati durante la lavorazione del grezzo.

Tra gli aspetti che non sono stati approfonditi – ma che sicuramente meriterebbero un'indagine *ad hoc* – sono da annoverare le raffinate incisioni che impreziosiscono la canna di archibugio. Grazie a studi specifici sarebbe infatti possibile determinare la composizione chimica della superficie decorata e individuare la tecnica di incisione adottata. Questo consentirebbe da un lato di collocare il reperto con maggior precisione nel panorama manifatturiero locale, dall'altro di restituire alla canna l'aspetto originale.



## A Glossario armi da fuoco

Questa appendice nasce dall'esigenza di facilitare la lettura e la comprensione dei capitoli centrali del documento, nei quali i reperti sono descritti con termini talvolta molto specifici. Le illustrazioni e gli schemi presentati si basano su rielaborazioni personali del già citato lavoro di Marco Morin [18], mentre il breve glossario è stato costruito in parte autonomamente, in parte prendendo a prestito le risorse digitali pubblicate dall'Enciclopedia Treccani.

**archibugio** Antica arma da fuoco portatile composta di una canna di ferro, che si carica con polvere e pallottola di piombo, fissata ad un'armatura di legno, detta cassa, e munita di un dispositivo, molto vario a seconda dei tempi, destinato a dar fuoco alla carica. Probabilmente il nome deriva dal basso tedesco *haakbuse* "canna con dispositivo a uncino per l'accensione", che si modificò in Francia in *harquebusche* e poi *harquebuse*; l'italiano archibugio, che deriva dal francese, ha subito l'influenza delle parole *arco* e *bugio* "perforato".

**bocca** Nelle armi da fuoco, apertura nella parte anteriore della canna (volata) dalla quale fuoriesce il proiettile.

**canna** La canna è un cilindro metallico cavo, al cui interno l'energia chimica dell'esplosivo è convertita in energia cinetica del proiettile; essa serve inoltre a dirigere il tiro e per questo su di essa sono generalmente montati i congegni di puntamento. Esternamente la canna si chiama culatta nella parte posteriore e volata in quella anteriore; all'interno è caratterizzata da tre parti: camera, raccordo e anima. Quest'ultima può essere liscia o rigata, rispettivamente per fucili da caccia a pallini o per fucili da guerra e da caccia a proiettile unico. Le anime lisce possono essere cilindriche, dopo

il raccordo tronco-conico dalla camera di scoppio, ma più generalmente hanno verso la volata una diminuzione di calibro raccordata opportunamente e chiamata strozzatura.

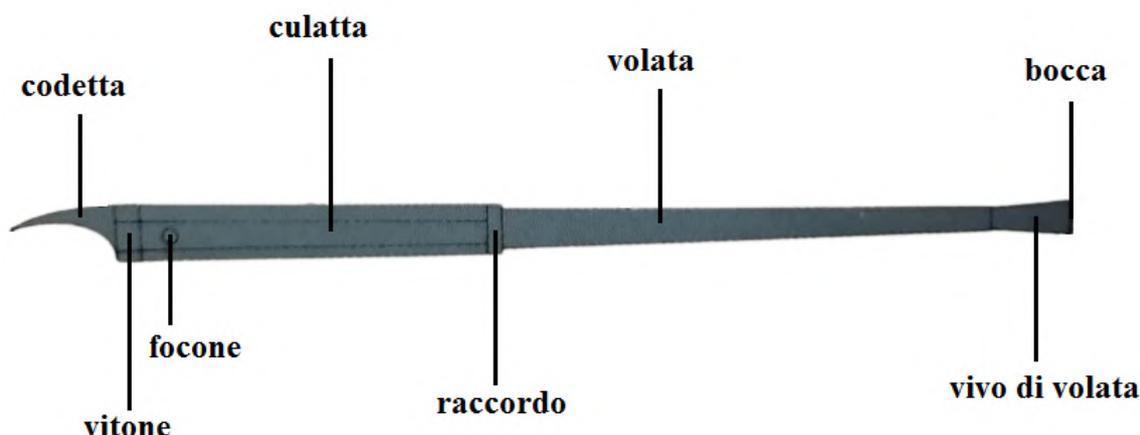
**cassa** Nelle armi da fuoco portatili la cassa è la parte che porta la canna e il meccanismo di otturazione, e che permette il maneggio e le manovre di puntamento; si divide in fusto, impugnatura, calcio.

**codetta** Prolungamento della culatta atto a fissare la parte posteriore della canna sulla cassa.

**culatta** Parte posteriore della bocca da fuoco che, essendo destinata a contenere la carica di lancio, ha spessore maggiore di quello delle altre parti dell'arma. La culatta comunica con la parte anteriore della canna per mezzo di una sezione di raccordo, mentre all'estremità opposta è sigillata da una vite che prende il nome di "vitone di culatta".

**focone** Piccolo foro praticato nella culatta delle armi portatili e delle artiglierie, attraverso il quale si comunicava il fuoco alla carica di lancio. Nelle armi portatili scomparve con l'adozione della capsula fulminante; nelle artiglierie esiste tuttora in qualche tipo.

**fucile** Arma da fuoco portatile, munita di un meccanismo di caricamento e sparo. Il



**Figura A.1:** Elementi costitutivi di una canna di archibugio. Rielaborazione di un'illustrazione di M. Morin [18].

nome deriva da un particolare meccanismo di accensione noto come *focile* (detto anche acciarino).

**munizioni** Materiale bellico (come proiettili, esplosivi, cariche) necessario al funzionamento delle armi da fuoco. Le prime munizioni per armi da fuoco portatili, generalmente di forma sferica, venivano calcate con la bacchetta sulla polvere nera versata nella camera di scoppio ricavata nella culatta della canna. Nel XVI secolo si introdusse l'uso della cartuccia, involucro cilindrico di carta contenente la carica e, a un'estremità, la pallottola.

**pallottola** Proiettile di un'arma portatile normale o automatica. Nelle armi portatili ad avancarica e ad anima liscia, la pallottola era infatti una sfera di piombo che veniva introdotta dalla bocca nella canna del fucile e calcata a colpi di bacchetta sopra la carica di lancio. Il tiro era estremamente impreciso a distanze superiori ai 100 metri, ma d'altra parte gli effetti erano sempre molto gravi in quanto le pallottole, deformate, producevano ferite lacerato-contuse.

**polvere nera** È il più antico degli esplosivi conosciuti, il cui primo impiego si fa risalire ai Cinesi, ma è probabile che le prime composizioni, a base di carbone, salnitro e zolfo, fossero impiegate per scopo pirotecnico. L'uso della polvere nera, come

esplosivo, si diffuse a partire dal 1300 in Europa e si attribuisce al monaco tedesco Berthold Schwarz il primo impiego della polvere nera nelle bocche da fuoco. La composizione classica della polvere nera è circa del 75% di nitrato potassico, 15% di carbone e 10% di zolfo. Queste proporzioni sono state però largamente variate a seconda che interessi aumentare o diminuire la potenza o la velocità di combustione dell'esplosivo.

**proiettile** Oggetto, opportunamente foggato e costituito, destinato a essere lanciato da una bocca da fuoco. Nel linguaggio tecnico, il termine è usato per le artiglierie, mentre per le armi portatili si parla di pallottola.

**tacca di mira** Organo di puntamento installato in prossimità del vivo di volata della canna.

**traguardo** Organo di puntamento installato nella parte posteriore della canna, in prossimità del focone. Il tiratore accosta all'occhio il traguardo e punta l'arma sul bersaglio, che dovrà trovarsi in corrispondenza della linea che collega la tacca di mira (posta sulla volata) al traguardo.

**vivo di volata** Estremità della volata che circonda la bocca di fuoco, in corrispondenza della parte terminale della canna.

## Bibliografia

- [1] G. MARCHESI e L. MURA, *Il forno fusorio di Livemmo (BS)*, *Archeologia Medievale*, vol. 33, pp. 525–540, 2006.
- [2] H. G. BRACK, *Steel- and Toolmaking Strategies and Techniques before 1870*. Liberty (Maine, USA): Pennywheel Press, 2008.
- [3] M. CALEGARI, *Forni «alla bresciana» nell'Italia del XVI secolo*, *Quaderni storici*, vol. 24, n. 70, pp. 77–99, 1989.
- [4] E. BARALDI, *Il modo indiretto di produrre il ferro in Italia dalla fine del Medioevo (XIII-XVI secolo)*, *La metallurgia italiana*, pp. 35–39, 2000.
- [5] R. SEMERARO, *The Italian Gun-making District from a Long-term Perspective. Roots, Turning Points, Evolutionary Factors*, *Annali di Storia moderna e contemporanea*, vol. 5–6, pp. 91–118, 2017–2018.
- [6] M. MORIN e R. HELD, *Beretta: la dinastia industriale più antica al mondo*. Chiasso: Acquafresca editrice, 1980.
- [7] V. F. BUCHWALD, *Iron and Steel in Ancient Times*. Copenhagen: Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab, 2005, vol. 29.
- [8] R. PLEINER, *Iron in Archaeology. The European Bloomery Smelters*. Praga: Institute of Archaeology of the Czech Academy of Science, 2000.
- [9] V. F. BUCHWALD e H. WIVEL, *Slag analysis as a method for the characterization and provenancing of ancient iron objects*, *Materials characterization*, vol. 40, n. 2, pp. 73–96, 1998.
- [10] A. SELSKIENÉ, *Examination of smelting and smithing slags formed in bloomery iron-making process*. *Chemija*, vol. 18, n. 2, pp. 22–28, 2007.
- [11] R. F. TYLECOTE, *A history of metallurgy*. Londra: Maney Publishing, 1992.
- [12] V. BIRINGUCCIO, *De la pirotechnia*. Venezia, 1540.
- [13] H. HOOVER e L. H. HOOVER, *Georgius Agricola: De Re Metallica*. New York: Dover Publications, 1950.
- [14] R. PALLARO, *Armi ed armature in acciaio di epoca rinascimentale: caratteristiche metallurgiche e processi di produzione e di decorazione*, tesi di laurea mag., Politecnico di Torino, 2018.
- [15] E. BARALDI, *Per un'archeologia dei forni alla bresciana*, *Quaderni storici*, vol. 24, n. 70, pp. 101–121, 1989.
- [16] M. F. CHARLTON, E. BLAKELOCK, M. MARTINÓN-TORRES e T. YOUNG, *Investigating the production provenance of iron artifacts with multivariate methods*, *Journal of archaeological Science*, vol. 39, n. 7, pp. 2280–2293, 2012.



## BIBLIOGRAFIA

---

- [17] G. QUISTINI, *Le armi bresciane*, Brixia, 1882.
- [18] M. MORIN, *Armi antiche: armi da fuoco individuali dell'Occidente dalle origini al sistema a percussione*. Verona: A. Mondadori, 1982.
- [19] F. ROSSI, *Fucine gardonesi*, Armi e cultura nel bresciano 1420 - 1870. Supplemento ai Commentari dell'Ateneo di Brescia per l'anno 1981, pp. 21–66, 1981.
- [20] M. TANAKA e M. KITADA, *Microstructure of Japanese Matchlock Gun Fabricated in the Edo Period*, *Journal of the Japan Institute of Metals*, vol. 73, n. 10, pp. 778–785, 2009.
- [21] L. MIRAGLIA, *Caratteristiche del sistema analitico SEM-EDS: valutazione dell'accuratezza e della precisione delle analisi eseguite su standards internazionali di minerali e vetri*, *Rapporti tecnici INGV*, n. 233, 2012.
- [22] G. ŻABIŃSKI, M. BIBORSKI e E. A. MIŚTA-JAKUBOWSKA, *A late medieval or early modern light gun barrel from the Castle Museum in Malbork — Typology, technology of manufacture and identification of the smelting process*, *Archaeological and Anthropological Sciences*, vol. 11, n. 5, pp. 2007–2026, 2019.
- [23] P. DILLMANN e M. L'HÉRITIER, *Slag inclusion analyses for studying ferrous alloys employed in French medieval buildings: supply of materials and diffusion of smelting processes*, *Journal of archaeological science*, vol. 34, n. 11, pp. 1810–1823, 2007.
- [24] A. PAIANO, *Analisi metallurgica di punte di dardi da balestra in epoca medievale*, tesi di laurea mag., Politecnico di Torino, 2021.