# Politecnico di Torino

**Tesi di laurea Magistrale in**

**Ingegneria dei materiali**

# Analisi metallurgica del meccanismo di accensione di un fucile del XVIII secolo


**Relatori:**

Prof. Paolo Matteis

Prof. Giorgio Scavino

**Candidato:**

Mattia Mana


2021

RINGRAZIAMENTI:

Ringrazio la Fondazione Brescia musei per aver permesso la realizzazione di questa attività fornendo il materiale storico e l'autorizzazione a eseguire le analisi. In particolare, il direttore del museo delle armi "L. Marzoli" di Brescia il Sig. Marco Merlo e il Sig. Paolo De Montis per le informazioni riguardo alle armi da fuoco storiche e alle fonti da consultare. Infine, un ringraziamento all'armaiolo Luca Svanosio per la dettagliata descrizione dei componenti e dei materiali utilizzati nel meccanismo di innesco.

# Indice


Introduzione ..... 6

1. Tecniche di produzione ..... 8

1.1 Ferro o acciaio ..... 8

1.2 Reagenti ..... 10

1.2.1 Minerale ..... 10

1.2.2 Combustibile ..... 12

1.3 Processo diretto ..... 15

1.3.1 La fornace ..... 15

1.3.2 Processo produttivo ..... 20

1.4 Processo indiretto ..... 25

1.4.1 La fornace ..... 25

1.4.2 Il forno di affinamento ..... 28

1.4.3 Processo produttivo ..... 28

1.5 Cementazione ..... 33

1.5.1 Cementazione “in cassetta” ..... 33

1.5.2 Cofusione ..... 34

1.6 Acciaio al crogiolo ..... 35

2 Meccanismi di accensione ..... 36

2.1 Origine delle armi da fuoco ..... 36

2.2 Meccanismo di accensione a miccia ..... 37

2.2.1 Nascita ..... 37

2.2.2 Elementi costruttivi ..... 38

2.3 Meccanismo di accensione a ruota ..... 42

2.3.1 Nascita ..... 42

2.3.2 Elementi costruttivi ..... 43

2.3.3 Preparazione e caricamento ..... 45

2.3.4 Funzionamento ..... 46

2.4 Meccanismo di accensione ad acciarino ..... 47

2.4.1 Nascita ..... 47

2.4.2 Elementi costitutivi ..... 48

2.4.3 Preparazione e caricamento ..... 54
2.4.4 Funzionamento ..... 54
3 Analisi meccanismo di accensione ..... 55
3.1 Componente ..... 55
3.1.1 Architettura e datazione ..... 55
3.1.2 Ipotesi materiali e trattamenti ..... 56
3.2 Tecnica di analisi ..... 59
3.2.1 Disassemblaggio ..... 59
3.2.2 Taglio ..... 61
3.2.3 Inglobatura ..... 64
3.2.4 Lucidatura e attacco acido ..... 64
3.2.5 Analisi al microscopio e Microdurezze ..... 65
4 Risultati analisi ..... 66
4.1 Piattello del cane ..... 66
4.1.1 Analisi macroscopica ..... 66
4.1.2 Analisi microscopio ..... 67
4.1.3 Analisi microscopio dopo attacco acido ..... 70
4.1.4 Microdurezze ..... 73
4.1.5 Risultati ..... 75
4.2 Molla del cane ..... 76
4.2.1 Analisi macroscopica ..... 76
4.2.2 Analisi microscopio ..... 77
4.2.3 Analisi microscopio dopo attacco acido ..... 83
4.2.4 Microdurezze ..... 88
4.2.5 Risultati ..... 89
4.3 Batteria ..... 90
4.3.1 Analisi macroscopica ..... 90
4.3.2 Analisi microscopio ..... 91
4.3.3 Analisi microscopio dopo attacco acido ..... 94
4.3.4 Microdurezze ..... 99
4.3.5 Risultati ..... 102
Conclusioni ..... 103

# Introduzione

La capacità di utilizzare utensili è stata una delle caratteristiche che hanno permesso alla razza umana di evolversi e affermarsi come specie dominante sul pianeta Terra. I periodi in cui è convenzionalmente suddivisa la preistoria umana, in particolare per le popolazioni di Europa e Medio Oriente, sono denominati sulla base del principale materiale utilizzato per la realizzazione degli utensili, età della pietra, età del bronzo, età del ferro. Lo sviluppo delle tecniche di lavorazione dei metalli permise di costruire strumenti dalle forme più complicate, più leggeri e durevoli dando un enorme spinta all'evoluzione umana. I primi metalli ad essere lavorati furono quelli caratterizzati da elevata duttilità e che era possibile trovare facilmente in natura per primo il rame e nei millenni anche oro e platino. La lavorazione di questi metalli fu all'inizio quasi esclusivamente limitata alla produzione di gioielli e piccoli oggetti d'arte, e sebbene ciò segni l'inizio della metallurgia non ebbe un grande impatto sulla società dell'età della pietra. La prima grande rivoluzione nella realizzazione di utensili si ebbe con la scoperta che era possibile ottenere un materiale più duro e resistente aggiungendo al rame altri elementi durante la fusione. La variante di bronzo più antica è quella a base di ramee e arsenico, un semimetallo naturalmente presente in nei minerali contenenti rame. I più antichi manufatti in bronzo sono stati datati al IV millennio A.C., mentre la diffusione die questa in tutta Europa avvenne nei due millenni successivi. Quando le possibilità tecnologiche lo permisero si iniziò ad utilizzare una lega a base di rame e stagno. Essa è più performante della lega rame arsenico, ma lo stagno a differenza dell'arsenico non è naturalmente presente nei minerali di rame e deve essere estratto a parte, spesso in aree geografiche differenti e richiede lo sviluppo di un sofisticato sistema di scambi commerciali a lungo raggio. In ambito europeo questo è il caso della civiltà minoica nel III millennio A.C. le cui rotte commerciali permettevano di importare carbone e stagno sull'isola di Cipro dove erano presenti alcune dei più importanti giacimenti di rame allora noti, dal nome di quest'isola deriva anche il nome latino del metallo," cuprum", e il simbolo chimico che oggi identifica questo elemento, Cu. La scoperta della possibilità di realizzare leghe metalliche con il rame iniziò quasi sicuramente in modo accidentale, l'aggiunta di alcuni minerali nella fornace generò risultati inaspettati che si rivelarono superiori alle aspettative. In maniera similare avvenne molto probabilmente la scoperta del ferro. È possibile trovare il ferro metallico, nel prossimo capitolo si chiarirà la denominazione, sul nostro pianeta in due forme il ferro tellurico e quello meteorico. Il primo è quasi puro e molto raro, a oggi è noto un solo giacimento in Groenlandia. Il secondo è più abbonante e presenta una percentuale molto elevata di nichel che lo rende oggi facilmente identificabile. Esistono alcuni manufatti preistorici in ferro meteorico ma nessuna evidenza che essi abbiano avuto un ruolo nello sviluppo della metallurgia di questo elemento, sono infatti stati lavorati per deformazione a freddo [1].L'inizio della metallurgia del ferro è da ricercare invece nel processo di fusione del rame. I giacimenti di minerali di rame sono solitamente suddivisi in due strati, il più superficiale è costituito da ossidi facilmente riducibili e che permettevano un elevato rendimento. Lo strato più profondo invece è costituito in prevalenza da sulfuri, per poterne estrarre il metallo essi devono essere prima sottoposti a un processo di arrostimento e comunque il loro utilizzo ha una resa

inferiore [2]. Durante la tarda età del bronzo si scoprì che l'aggiunta di minerali di colore bruno rossastro, minerali ferrosi in particolare limonite ed ematite, permetteva di aumentare le rese del processo fusorio diminuendo la percentuale di rame che passava nella scoria. In particolari condizioni, ad esempio se la fusione era aiutata dall'insufflaggio di aria tramite un mantice, oltre al rame e alla scoria era possibile trovare al termine del processo anche una piccola massa metallica spugnosa. Era l'inizio della produzione del ferro tramite processo diretto. Inizialmente prodotto di scarto della fusione del rame si scoprì presto che questa massa metallica poteva essere successivamente lavorata e aveva alcune proprietà interessanti. La durezza di questo metallo era inferire a quella del bronzo, occorrerà attendere la produzione dei primi acciai per poter ottenere di meglio, ma esso era più facilmente lavorabile e meno fragile. I primi utensili per cui sembra che si sia affermato l'utilizzo di ferro sono le lame di pugnali e spade, il rischio di deformazione era più elevato, ma si riduceva di molto quello di rottura, una lama storta si poteva raddrizzare una rotta andava sostituita.

Il ferro e l'acciaio pian piano sostituirono il bronzo in molte applicazioni e rimasero i materiali meccanicamente più performanti fino a dopo la rivoluzione industriale. Tra le categorie di utensili sviluppati dall'umanità le armi e le armature sono da sempre state tra quelle in cui erano applicate le tecnologie e i materiali più all'avanguardia.

In questo documento saranno prima analizzati i principali processi di produzione di ferro e acciaio a partire dal basso medioevo fino agli albori della rivoluzione industriale. Successivamente si procederà ad analizzare una categoria di armi che nacquero in quel periodo, le armi da fuoco, e in particolare le più antiche tipologie di meccanismi di innesco sviluppati. La parte terminale della tesi sarà dedicata alla relazione riguardo le analisi di laboratorio condotte su uno di questi meccanismi.

# 1. Tecniche di produzione

## 1.1 Ferro o acciaio

La parola italiana ferro si rifà al vocabolo latino" ferrum", temine a sua volta derivato dall' etrusco "fezum", sempre di derivazione latina è la parola acciaio, da "acies", origine simile hanno anche i termini equivalenti oggi in uso nelle lingue francesi (fer, acier), e spagnola (hierro, acero).
L'etimologia del termine ferro nelle lingue indoeuropee, ad eccezione del greco e del latino e delle lingue da essi derivate, è da ricercare nell' antico temine sanscrito "ayas", curiosamente esso indicava sì un metallo lavorabile ma di tutt' altra natura, si riferiva infatti principalmente rame e alle sue leghe, dall'evoluzione di questo temine sono nati l'attuale inglese "iron" e tedesco "eisen"
Per quanto riguarda latino e greco si mantenne da subito una distinzione di termini tra rame e ferro, e loro leghe, per il primo si mantenne la parola "aes" insieme a cuprum, dall' origine cipriota del metallo, e si utilizzarono invece i termini "sidéros", greco e "ferrum", latino per indicare il ferro.
Già nel primo millennio avanti Cristo la maggior parte delle civiltà europee avevano un loro termine per indicare il ferro, e all'incirca nello stesso periodo si diffonde anche un secondo temine per indicare una variante del metallo caratterizzata da una durezza e resistenza maggiori, l'acciaio, stomòma in greco, acies in latino, stele e stahal nelle varianti antiche rispettivamente di inglese e tedesco [1].

La notazione moderna, risalente agli inizi del ventesimo secolo, indica il con il termine ferro il ventiseiesimo elemento chimico della tavola periodica, simbolo Fe, un metallo dall'aspetto argenteo, malleabile, si può lavorare sia caldo sia a freddo, saldabile e che praticamente non esiste in natura in forma pura.
Si ritiene che esso sia il metallo più abbondante all'interno del nostro pianeta e il quarto elemento per percentuale in peso nella crosta terrestre [3].
In natura è presente soprattutto in forma di ossido, tra gli ossidi di ferro più abbondanti ricordiamo l'ematite ($Fe_2O_3$) e la magnetite ($Fe_3O_4$), può essere prodotto in forma quasi pura tramite un processo di elettrolisi. Il ferro esiste in tre forme allotropiche al variare della temperatura:

- ferro alfa, struttura cubica a corpo centrato per temperature fino a 910 °C;
- ferro gamma, struttura cubica a facce centrate per temperature comprese tra 910 °C e 1392 °C;
- ferro delta, struttura cubica a corpo centrato per temperature comprese tra 1392 °C e 1538 °C.

La stessa nomenclatura indica invece con il termine acciaio una qualsiasi lega ferro carbonio in cui la percentuale di carbonio non sia superiore al 2.06%, e come ghisa una lega con percentuale di carbonio superiore. La norma UNI EN 10020 assegna un valore limite per ciascuno dei principali

elementi che possono essere presenti in una lega ferro-carbonio [4] [5],acciai in cui almeno uno degli elementi in lega supera il valore massimo in normativa sono definiti legati, in caso contrario non legati. Gli acciai non legati sono poi sono spesso suddivisi in base alla percentuale di carbonio presente in:

- extra dolci $C<0.015\%$
- dolci $0.15\% \leq C < 0.30\%$
- semiduri $0.30\% \leq C < 0.45\%$
- duri $0.45\% \leq C < 0.65\%$
- extra duri $0.65\% \leq C$

Questa classificazione presuppone la possibilità di effettuare accurate misure della composizione chimica del materiale e non poteva certamente essere alla base della distinzione tra ferro e acciaio utilizzata in fino alla fine dell'età moderna.
La distinzione in epoche passate era basata non su criteri di natura composizionale ma sulla base della capacità del materiale di essere deformato plasticamente a freddo e a caldo e di essere indurito tramite trattamento termico di tempra.
Si classificavano quindi le leghe ferrose come:

- ferro: una lega ferrosa lavorabile sia a caldo sia a freddo e che non era possibile indurire tramite tempra;
- acciaio: una lega ferrosa lavorabile a caldo e che era possibile indurire tramite tempra;
- ghisa: una lega ferrosa non lavorabile né a caldo né a freddo e non che non era possibile tramite tempra

Nei capitoli successivi, se non differentemente specificato, i termini: ferro acciaio e ghisa saranno utilizzati con accezione antica, il simbolo Fe sarà invece utilizzato per riferirsi al ferro in quanto elemento chimico.
Saranno ora analizzati i principali processi produttivi che furono utilizzati per la produzione di ferro e acciaio a partire dal basso medioevo fino agli inizi della rivoluzione industriale.

## 1.2 Reagenti

### 1.2.1 Minerale

I minerali di Fe utilizzati per i processi che saranno analizzati più avanti in questo capitolo erano quasi esclusivamente ossidi con contenuto di Fe variabile da 10% a 70% in peso. Si è a lungo creduto che la riduzione dei sulfuri di ferro quali le piriti, $FeS_2$, non fosse alla portata della tecnologia dell'epoca, è stato invece dimostrato da esperimenti condotti alla "Butsen Iron Farm" in Inghilterra [2] che è possibile tramite arrostimento ridurli a limonite e utilizzarli nella produzione di ferro tramite bassoforno, è quindi probabile che questi minerali abbiamo trovato un impiego almeno a livello di produzioni locali.
Di seguito una breve analisi dei principali ossidi di Fe che era possibile ridurre per la produzione di ferro e acciaio tramite bassoforno e altoforno.

**Limonite:** uno degli ossidi di maggior importanza soprattutto agli inizi dell'età del ferro, si trova spesso in strati superficiali di origine alluvionale facilmente accessibili che ricoprono depositi di minerale ricco in rame e piombo, oppure di altri minerali ferrosi quali ematite e magnetite. È facilmente riconoscibile e il processo di riduzione era alla portata anche delle tecniche metallurgiche più antiche. Esiste in molteplici varianti che si possono presentare in varie forme, il contenuto in ferro è minore rispetto a quello di altri ossidi e in età medievale ha ricoperto un ruolo predominante soprattutto in quelle aree in cui non erano presenti o accessibili depositi di minerali ferrosi più pregiati. Spesso ha un alto contenuto sia di fosforo che di manganese. Appare di colore bruno

FIGURE 1-1 LIMONITE

**Goethite:** FeO(OH), ossido idrato di ferro usato spesso in epoca antica insieme alla limonite, ha un contenuto in Fe fino al 60%.

**Ematite:** $Fe_2O_3$ uno degli ossidi più usati per la produzione del ferro e acciaio con i processi descritti successivamente, ha un contenuto di Fe che varia tra il 60% e il 70% e spesso è povero sia in manganese che in fosforo. Frequentemente è il principale costituente dei giacimenti di minerale ferroso al di sotto degli strati di limonite. Questo minerale di alta qualità era spesso la prima scelta dei fabbri per produzione su scala medio piccola, per la produzione su larga scala si poteva essere costretti ad impiegare anche minerali di qualità inferiore come la limonite se i giacimenti di ematite non erano sufficienti. Sebbene ne esistano di varie forme è spesso di colore rossastra. In molte regioni europee l'ematite è presente insieme alla sua forma alluvionale, la limonite, e con essa forma dei conglomerati noti come arenaria ferruginosa, sebbene il contenuto risultante in Fe sia piuttosto basso 10-20% sembra sia stata alle volte utilizzata nelle su piccola scala tramite processo diretto.

FIGURE 1-2 GOETHITE

FIGURE 1-3 EMATITE

**Magnetite:** $Fe_3O_4$ l'ossido più ricco in ferro, contenente una percentuale di Fe superiore al 70%. Ha un aspetto nero o blu-grigio. È un costituente primario delle rocce ignee e come intrusione nelle metamorfiche. La densa texture del minerale lo rende più difficile da ridurre rispetto all'ematite e per molto tempo si è pensato che non fosse utilizzato nelle prime produzioni di ferro. Oggi è stato accertato che erano invece utilizzate dopo arrostimento.

FIGURE 1-4 MAGNETITE

**Siderite:** $FeCO_3$, carbonato di colore giallo, bruno o grigio, contiene fino al 50% di Fe e può essere trasformato in ematite tramite processo di arrostimento. Può avere un alto contenuto in manganese mentre il contenuto in fosforo è generalmente basso. Era utilizzato in regioni quali Inghilterra, Austria e Germania.

FIGURE 1-5 SIDERITE

A seguito dell'estrazione i minerali dovevano essere lavorati per separare la parte utile dalla ganga, nel periodo di interesse di questo documento i processi più utilizzati erano di principalmente frantumazione e selezione manuale, con l'aiuto di processi di lavaggio e arrostimento. L'arrostimento è un processo in cui blocchi di minerale sono riscaldai su un fuoco a temperature tra 400° e 800° in aria libera utilizzando prevalentemente legno essiccato come combustibile. Il processo di arrostimento utilizzato per il minerale di Fe deriva dal corrispondente utilizzato per minerali di rame ed era già ben conosciuto fin dall' antichità. Questo processo è utile nel caso si utilizzino ossidi, ma obbligatorio quando si devono trattare carbonati e sulfuri che in conseguenza tendono a trasformarsi in ossidi.
Per quanto riguarda i carbonati come la siderite la reazione al processo di arrostimento è la seguente:

$$2FeCO_3 + O = Fe_2O_3 + 2CO_2$$

E ha come prodotto l'ematite. Per quanto riguarda la pirite la reazione è:

$$2FeS_2 + 5O_2 = 2FeO + 4SO_2$$

Con ossido ferroso come prodotto.
Esperimenti condotti da Tylecote e Clough a fine XX secolo hanno dimostrato che arrivare a completa riduzione dei sulfuri di ferro è necessario un processo più drastico di quanto generalmente effettuato utilizzando carbone di lega quale combustibile in sostituzione del legname. La completa riduzione dei sulfuri non è necessaria se il processo di produzione di ferro e acciaio è condotto a temperatura inferiori a 1000°, come poteva accadere per il processo condotto bassoforno, in questo caso i sulfuri restano confinati nella scoria. Per temperature di lavoro più elevate lo zolfo si infiltra a bordo di grano nei cristalli di Fe e porta al fenomeno di fragilità al rosso. A causa di questo rischio di infragilimento sebbene fosse possibile e siano stati molto

probabilmente utilizzati sulfuri come fonte di Fe, essi non dovevano essere molto popolari tra i fabbri in epoche passate.
Tramite arrostimento gli ossidi di Fe rilasciano l'acqua in essi contenuta, sia libera che legata, e assumono una struttura porosa, essa è più congeniale di quella originale al successivo processo di riduzione. Per questi motivi pur non essendo questo processo necessario nel caso di utilizzo di ossidi di Fe quale minerale, e Agricola non ne fa cenno nella sua opera [6], sono state trovate testimonianze che esso fosse utilizzato fin dall'epoca antica attraverso il medioevo e successivamente.
Nel caso della limonite per temperature superiori a 550° si ha la seguente reazione:

$$2Fe_2O_3.H_2O + \text{calore} = \ 2Fe_2O_3 + 3H_2O$$

Similmente per la goethite:

$$2FeO.OH + calore = Fe_2O_3 + H_2O$$

In entrambi i casi si ha come risultato ematite e acqua.
Per quanto riguarda l'ematite durante l'arrostimento si assiste ad una modifica fisica del minerale, esso si ammorbidisce e assume una struttura porosa, il primo cambiamento lo rende più facilmente trattabile da processi di meccanici quali la frantumazione, il secondo aumenta la suscettibilità all' effetto dei gas riducente usati nei processi di fabbricazione successivi. Questi comportamenti sono ancora più accentuati nel caso di arrostimento della magnetite

## 1.2.2 Combustibile

FIGURE 1-6 CARBONE DI LEGNA

Il combustibile è uno degli elementi fondamentali di processo di riduzione del minerale ferroso, esso fornisce sia il calore necessario affinché le reazioni di riduzione avvengano sia sviluppa gas che agiscono da agenti riducenti. Al giorno d'oggi il combustibile più usato per l'alimentazione degli altoforni è il carbon coke, combustibile ad alto potere calorifico ottenuto da processi di raffinazione del petrolio o del carbonfossile. Nel periodo precedente al XVIII secolo il principale combustibile in uso in Europa era il carbone di legna (fig. 1-6), sebbene si siano trovate alcune testimonianze dell'uso di carbon fossile nella scoria di alcune forge ed esso fosse impiegato in Cina nel processo di produzione della ghisa. Il carbone di legna è stato impiegato in quasi tutti gli impianti a bassoforno e nelle prime produzioni in altoforno. Altri combustibili più raramente impiegati nei bassiforni erano il legname, soprattutto nelle regioni scandinave, la torba, prevalentemente in Irlanda.

## *Il carbone di legna*

Il carbone di legna, da qui in poi indicato semplicemente come carbone, rappresenta il prodotto finale della decomposizione termica del legname. Il legno, un composto polimerico di carboidrati ha alla base una percentuale di circa 50% carbonio, 44% ossigeno e 6% idrogeno. Se bruciato lentamente in difetto d'aria a temperature inferiori a 200° rilascia acqua, gas, oli essenziali, trementine; se la temperatura è invece superiore ai 480° la reazione è esotermica con rilascio di sostanze volatili, e si produce carbone e catrame.

Il contenuto di carbonio nel carbone varia da 78% al 92% a seconda di quali piante si siano utilizzate per produrlo, laddove gli alberi a foglia larga producono in media più catrame e carbonio rispetto alle conifere.

I principali costituenti minerali del carbone si concentrano nelle ceneri e hanno un elevata nella quantità di monossido di carbonio CO prodotto durante la combustione del carbone. Esperimenti condotti a fine XX secolo [2], hanno dimostrato l'esistenza di differenze di comportamento tra i carboni prodotti con legnami differenti, il carbone prodotto da conifere è più reattivo a temperature tra i 600° e gli 800° laddove quello derivante da piante a foglia larga è più reattivo nell' intervallo tra 800° e 1000°. Il primo è quindi ottimale nella parte alta della fornace il secondo nella zona limitrofa ai condotti per l'immissione dell'aria. La composizione ideale del carbone sarebbe quindi una miscela dei due in modo da avere un buon rendimento in ogni zona nella fornace, nel periodo considerato la scelta degli alberi da utilizzare per la produzione di carbone era dettata più dalla disponibilità degli stessi che da considerazioni di rendimento.

Qualunque fosse la sua origine il potere calorifico del carbone era circa 7000Kcal /kg più del doppio di quello del legno verde, 3000 Kcal/kg.

## *Produzione del carbone di legna*

Due erano i principali processi produttivi utilizzati per la produzione del carbone prima dell'invenzione del moderno processo tramite storta. Entrambi descritti in "De la pirotechnia" [7] sono la produzione tramite catasta e quella tramite fossa.

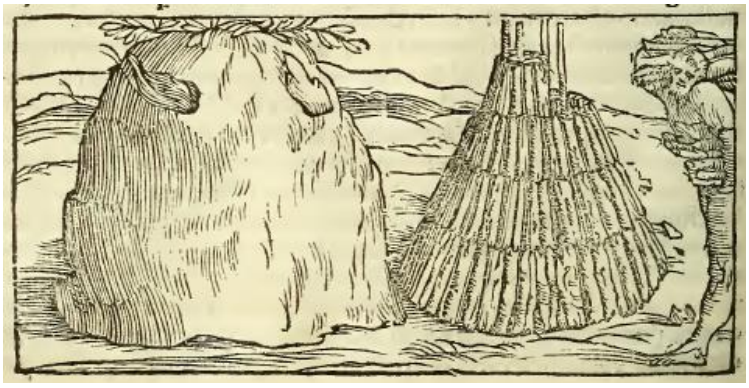


**FIGURE 1-7 ESEMPIO DEL METODO A CATASTA PER LA PRODUZIONE DI CARBONE [7]**

La catasta (fig. 1-7) era composta da tre o quattro pali verticali che venivano piantati in un'area pianeggiante e su cui erano poi disposti circonferenzialmente in strati successivi tronchetti alternati con cippato fino a creare una struttura a cono o a piramide. Il tutto era poi ricoperto da fronde e rivestito uno strato di terra e argilla di circa 30cm. Sulla sommità della catasta era lasciata un'apertura e ulteriori fori di ventilazione erano aperti nel rivestimento presso la base. L'accensione avveniva dalla dall'apertura sulla sommità, che era successivamente sigillata dopo che le fiamme si erano propagate all'intera catasta. Il tutto era lasciato bruciare lentamente per 6-8 giorni prima di procedere allo

spegnimento tramite soffocamento chiudendo tutte le aperture alla base. Le dimensioni della catasta potevano essere adattate a seconda della necessità produttiva ed era necessario essiccare il legname per anche un anno prima di poterlo utilizzare per produrre carbone.

Il secondo metodo prevede invece una fossa (fig. 1-8) di poco meno di un metro di diametro e profonda altrettanto riempita con legname ridotto in piccoli pezzi, la zona centrale è lasciata vuota per permettere l'accensione e l'ultimo strato anche in questo caso è ricoperto da terra e argilla. Entrambi i metodi sono stati in uso in alcune aree dell'Europa anche in periodi successivi al XIX secolo.

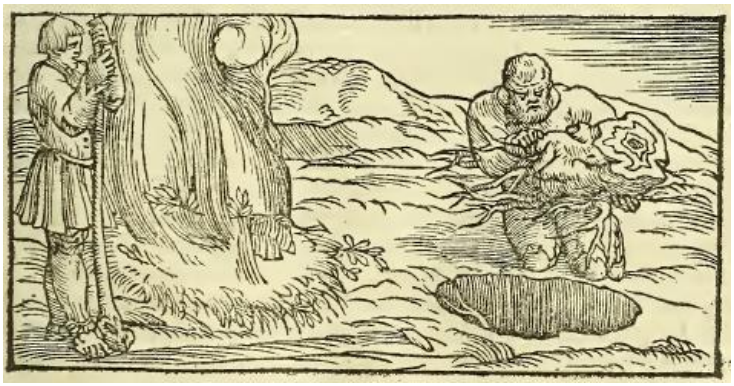


**FIGURE 1-8 ESEMPIO DEL METODO A FOSSA PER LA PRODUZIONE DI CARBONE [7]**

## *Consumi*

Non si hanno informazioni storiche riguardo alla quantità di carbone utilizzata per unità di peso di ferro prodotto con l'utilizzo di bassoforno, basandosi su esperimenti condotti ai nostri giorni [1] [2] [8] si può ipotizzare un utilizzo in parti uguali di minerale e combustibile. Considerando invece il ferro prodotto al termine del processo invece del minerale, si è ottiene all'incirca un rapporto di 1:5 con il combustibile utilizzato, rapporto che sale anche oltre 1:18 conteggiando il combustibile necessario per le fasi di preriscaldamento e quello consumato dopo l'introduzione dell'ultima carica di minerale. Un buon rapporto in peso tra il legname di partenza e il carbone prodotto con esso è di 1:5.7. Mettendo insieme questi risultati e assumendo una produzione di ferro di circa 10kg per ogni ciclo si può calcolare che un albero 30m di altezza e 0.25m di diametro poteva fornire combustibile per almeno due cicli di produzione al bassoforno. Questi consumi permettevano certamente la produzione di ferro su piccola scala, ad esempio una produzione locale di un villaggio, senza intaccare le risorse boschive. Molto più critica divenne invece la situazione con l'introduzione della produzione su larga scala tramite altoforno in cui crebbe a dismisura oltre alla dimensione della produzione il consumo di combustibile per unità di metallo prodotta.

Nel XVIII secolo prima dell'inizio dell'utilizzo del carbone fossile come combustibile in molti paesi europei la produzione di ferro e acciaio a seguito dell'eccessivo sfruttamento delle risorse boschive e forestali stava affrontando una crisi dovuta alla mancanza di combustibile. Infatti, se per il bassoforno le produzioni si attestavano su decine, centinaia di chilogrammi di metallo ottenibile per ogni produzione per l'altoforno si può considerare una produzione media di mille chilogrammi di ghisa al giorno per un periodo continuativo di 20-30 settimane all'anno. Considerando un rendimento ghisa/minerale del 33% e un rapporto combustibile/minerale 2:1, [9] e con le ipotesi fatte al caso precedente si ottiene in consumo di oltre 34t di legname per un solo giorno di produzione. Riportando il calcolo all'intera campagna di produzione di 7-8 mesi all'anno si arriva a un consumo totale di circa 30000 alberi, questo senza considerare il consumo di

combustibile necessario per le operazioni di preparazione dell'altoforno e il successivo affinamento.

### *Altri combustibili*

Con l'avvento dell'altoforno e la crisi del carbone di legna si rese necessario trovare una fonte di combustibile alternativa, i possibili candidati erano due la torba e il carbone fossile. La prima era abbondante soprattutto in Inghilterra e Irlanda e poteva essere estratta a basso costo. A più riprese tra il XVI e il XVII secolo si tentò senza successo di sostituirla al carbone [2], ma sia usata da sola sia in aggiunta al carbone portava a scarsi risultati, rimase in uso principalmente per il processo di stagionatura dell'altoforno. A partire dal XVIII secolo iniziò ad essere utilizzato con successo il carbon fossile, coke, che andrà poi via via a sostituire il carbone di legna [10]. Nei successivi paragrafi ci si riferirà ad esso come coke, mentre se non differentemente specificato il termine carbone sarà utilizzato per indicare il carbone di legna

## 1.3 Processo diretto

Il processo diretto è stato il primo processo sviluppato per la produzione di ferro e acciaio, il termine diretto sta ad indicare che la produzione era effettuata in un solo passaggio, dalla fornace si otteneva la massa metallica da lavorare successivamente tramite deformazione meccanica.

### 1.3.1 La fornace

Le fornaci utilizzate per la produzione di ferro e più raramente acciaio spaziavano dalle più primitive fornaci a tazza passando per le fornaci a fossa per la scoria e quelle a cupola fino ad arrivare al più evoluto bassoforno, una fornace a camino antenata del moderno altoforno e di simile concezione. Sebbene nel corso della storia si sia assistito a un'evoluzione della struttura delle fornaci, le nuove architetture non sostituirono in toto le precedenti, infatti, anche le forme più semplici e arcaiche hanno continuato ad essere usate in alcune aree, ad esempio si trovano esempi di fornaci a tazza nella penisola scandinava in uso nel XVIII-XIX secolo.
La fornace qualunque sia la sua forma deve soddisfare alcuni prerequisiti fondamentali:

- essere costituito di materiale capace di sopportare temperature di 1000°-1400°;
- permettere l'apporto di aria dall' esterno;
- permettere l'evacuazione dei gas esausti;
- permettere la circolazione dei gas riducenti attraverso gli strati di minerale e combustibile;
- permettere una separazione tra la massa ferrosa e la scoria.

Queste strutture erano costituite principalmente di pietra o argilla con un rivestimento interno in argilla refrattaria capace di resistere fino a 1300° e in alcuni casi anche a 1700°. Il flusso d'aria poteva essere sia a circolazione forzata sia a circolazione indotta. Nel primo caso l'aria era introdotta tramite l'utilizzo di meccanismi esterni, principalmente mantici, collegati a condotti (tuyeres in inglese) inseriti all' orlo del crogiolo oppure nella parte bassa della fornace. Nel

secondo il flusso d'aria era dovuto all' effetto camino che si andava a creare in caso di fornaci sufficientemente alte e opportunamente rastremate.
La produzione nel caso di tiraggio forzato era più veloce e permetteva di trattare minori quantità di minerale, necessitava però di operai addetti all'azionamento dei mantici oppure più tardi dell'accesso ad acqua corrente. Nel secondo caso occorreva trattare quantità maggiori di minerale, oltre 100kg, e una campagna di produzione necessitava di alcuni giorni.
Qualunque fosse la forma della fornace occorreva sempre prevedere un modo di evacuare la scoria prodotta durante il processo di riduzione, i metodi proposti durante i secoli possono essere riassunti in tre varianti:

1. nessuna rimozione durante il processo fusorio, la scoria era rimossa a processo terminata e occorreva separarla meccanicamente dalla massa ferrosa;
2. rimozione della scoria durante il processo fusorio, questo processo non era continuo ma discreto e poteva essere effettuato o rimuovendo scoria semisolida attraverso un'apertura nella parte anteriore della fornace oppure la scoria liquida tramite un'apertura alla base della fornace. Questo secondo metodo simile a quanto fatto oggi nei moderni altoforni richiedeva una grande competenza tecnica inquanto se non eseguito correttamente porta a una perdita di calore e allo spegnimento prematuro della fornace;
3. realizzazione di una fossa alla base della fornace in cui la scoria fusa attraversata la massa ferrosa poteva raccogliersi e poter essere estratta come blocco dopo che si fosse solidificata.

Di seguito saranno presentati le principali varianti della fornace per processo diretto a partire dai più semplici sviluppati nell'età del ferro alle versioni post medievali e infine alcuni esempi contemporanei ancora in uso in alcune regioni del continente africano.
Per una migliore contestualizzazione si è preferito includere anche alcuni esempi più antichi rispetto al periodo generalmente trattato in questa ricerca.

## *Fornace a tazza (bowl furnace)*

Si tratta della versione storicamente più antica, in Europa era sicuramente utilizzata fin dal VI secolo A.C., in Georgia sono stati trovati resti di fornaci risalenti al secondo millennio A.C..
Si tratta semplicemente di una fossa scavata nel terreno (fig. 1-9) le cui pareti erano rivestite da argilla refrattaria, necessariamente a tiraggio forzato, per la produzione del ferro occorreva creare una zona altamente riducente nella zona degli ugelli. Non c'è movimento della massa fusa durante la produzione e questo limita necessariamente la massima quantità di minerale trattabile, non è possibile rimuovere la scoria durante il processo e la successiva separazione meccanica tra massa ferrosa e scoria generava necessariamente delle perdite. Le dimensioni erano generalmente tra 0.5 e 1m sia per quanto riguarda il diametro sia per la profondità della fossa.

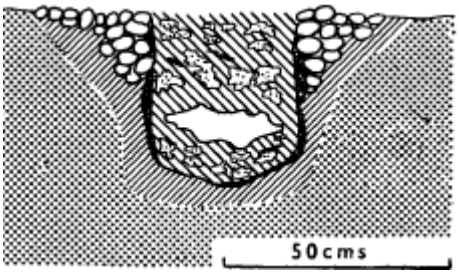
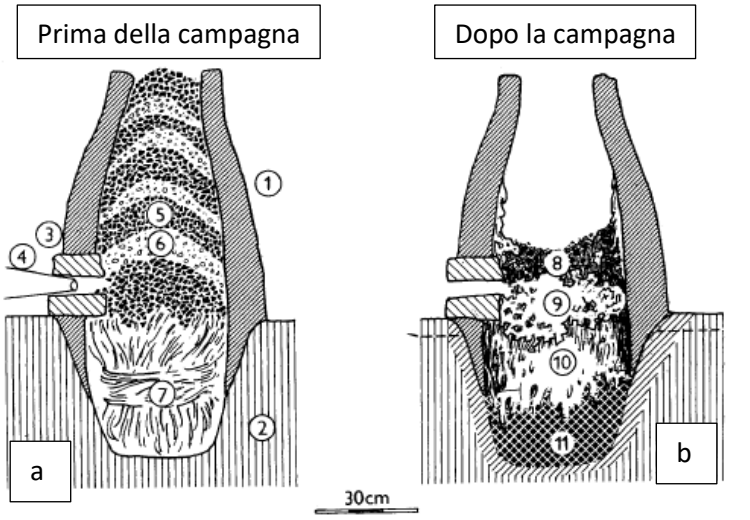



**FIGURE 1-9 VISTA IN SEZIONE DI UNA FORNACE A TAZZA [2]**

## *Fornace a fossa per la scoria (slag pit-furnace)*

L'aggiunta di pareti di contenimento intorno alla fossa delle fornaci a tazza aveva il duplice vantaggio di garantire una migliore contenimento della carica e di permettere di aumentare il volume della stessa. Una conseguenza dell'aumento dell'l'altezza della fornace è il crearsi di zone a differenti temperature in cui il gas riducente può agire sul minerale e aumento del tempo necessario alla carica per muoversi lentamente lungo la fornace. Mantenendo la forma a calderone per la fossa come nella versione precedente e spostando i condotti per l'immissione dell'aria al livello del suolo non si verifica più nessun processo di riduzione nella porzione sotterranea della fornace. La fossa si trasforma così in un contenitore per la scoria che dopo aver attraversato la massa metallica spugnosa che si forma al livello dei condotti si raccoglie e solidifica nella fossa. Affinché questo meccanismo di raccolta della scoria potesse funzionare occorreva che la fossa rimanesse libera fino a quando non iniziava la fusione della scoria stessa. Si ipotizza che per raggiungere questo risultato la fossa ad inizio campagna fosse riempita con carbone o pezzi di legno (fig. 1-10a) che a contatto con la scoria fusa iniziavano a bruciare liberando progressivamente spazio per la stessa (fig. 1-10b). Le dimensioni di questo tipo di fornaci potevano variare da circa 0,4m per diametro e profondità della fossa, capace di ospitare circa 25kg di scoria, 0.8-0.9m durante il tardo periodo romano, potevano ospitare fino a 450kg di scoria. Il tiraggio sicuramente forzato nel caso delle fornaci più piccole poteva essere naturale per le più grandi dotate di un'alta struttura a camino. Il limite produttivo per questo tipo di fornace era dato dalla dimensione della fossa, una volta che essa era stata riempita dalla scoria era necessario spegnere la fornace e procedere a rimuoverla. Nel caso delle fornaci più grandi si preferiva a volte smantellare la costruzione esistente e procedere alla costruzione di una nuova.




1 Camino; 2 Suolo; 3 Condotti dell'aria; 4 Mantice; 5 Carbone; 6 Minerale; 7 paglia o fascine; 8 Scoria; 9 spugna metallica; 10 blocco di scoria; 11 Carbone e ceneri

**FIGURE 1-10 VISTA IN SEZIONE DI UNA FORNACE A FOSSA PER LA SCORIA, PRIMA(A) E DOPO(B) LA CAMPAGNA [2]**

## *Bassoforno (shaft furnace)*

Si tratta della versione tecnologicamente più avanzata della fornace per processo diretto di produzione del ferro, è un'evoluzione della fornace a fossa e precorritrice dell'altoforno usato per il processo indiretto. Si distingue dalla fornace a fossa soprattutto per il metodo di rimozione della scoria, qui non più raccolta in una cavità interna alla fornace, ma progressivamente rimossa durante il processo produttivo. Come già visto in precedenza la rimozione poteva avvenire sia con

la scoria in forma semisolida sia in forma liquida. L'aumento di altezza della fornace allunga il tempo di discesa della carica attraverso la fornace e quindi il tempo per il quale il minerale è esposto all'azione riducente dei gas.
È possibile classificare le strutture dei bassiforni in tre categorie:

- parete sottile autoportante
- parete sottile rinforzata
- parete spesse

Della prima versione si sono ritrovati i resti risalenti ad un periodo che va dal tardo Impero Romano all'alto medioevo. La struttura era costituita di argilla, aveva diametro interno massimo tra 0.25m e 0.75m e un'altezza stimata di poco superiore al metro. Questo tipo di strutture con parteti di spessore compreso tra 0.1m e 0.3m era facile da riparare o ricostruire. Il tiraggio era quasi sempre forzato.
La seconda versione è rappresentata da fornaci scavate all'interno di terrapieni o accorpate alle pareti dell'edificio della forgia, in questi casi la maggior parte della struttura era ricavata in una preesistente e solamente la parete frontale doveva essere realizzata in argilla. Anche per questa categoria i resti archeologici sono databili dal tardo periodo romano al medioevo. Il tiraggio era quasi sempre forzato
L'ultima versione è rappresentata da una fornace realizzata quasi interamente in pietra con rivestimento interno in argilla, fino a 0.2m di spessore (fig. 1-11-a,b,c ) La solida struttura in pietra permetteva di aumentare l'altezza e le dimensioni della fornace, sebbene oggi i resti ritrovati non siano completi si stima che originariamente queste strutture avessero un'altezza compresa tra 1m e 2m. Il rivestimento in argilla poteva essere facilmente sostituito quando danneggiato senza dover ricostruire l'intera struttura. Il tiraggio era spesso forzato, e la rimozione della scoria quasi sempre avveniva in forma liquida.

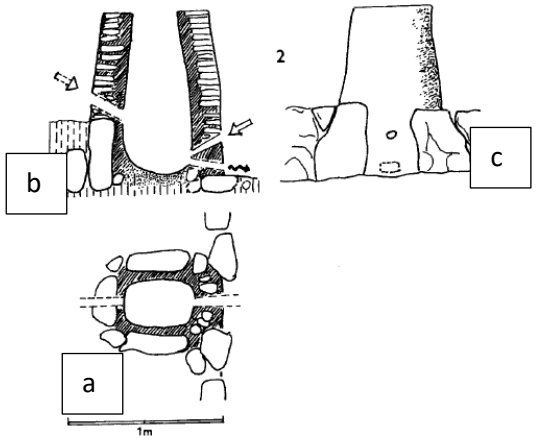



**FIGURE 1-11 VISTA DALL'ALTO(A), IN SEZIONE(B) E LATERALE(C) DI UN BASSOFORNO A PARETI SPESSE [2]**

Si stima che all'inizio del basso medioevo il bassoforno fosse la tipologia di fornace più diffusa in Europa. Due versioni più avanzate di bassoforno furono largamente utilizzate in età moderna, il forno catalano e lo stückofen.

## *Forno Catalano o bassofuoco*

Una delle due principali varianti di fornace utilizzate per processo diretto in epoca moderna. Diffusa come suggerisce il nome soprattutto nella zona mediterranea a cavallo dei Pirenei. Si compone di una fornace a crogiolo aperto, 0.5-0.9m di profondità dimensioni di circa 0.6m alla base e 0.8m in cima (fig. 1-12). Il crogiolo era diviso in due parti da una lastra di acciaio, nella parte frontale si caricava il carbone e frammenti fini di minerale, nella parte posteriore frammenti grossolani di minerale, dopo la preparazione della carica la lastra divisoria era rimossa. Alla base

della fornace era presente un'apertura per la rimozione della scoria liquida. L'aria era insufflata non grazie a mantici ma all'utilizzo di una tromba idroeolica, si tratta di un sistema in cui l'acqua viene fatta precipitare da un bacino all'interno di un tubo fino a un tino sottostante. L'acqua trascina con sé dell'aria, aspirata anche da intagli laterali alla tubazione, raggiunto il tino che ha un al suo interno un piano a circa metà altezza, i due fluidi si separano, acqua defluisce da un foro alla base dello stesso, aria era convogliata in tubazioni dirette poi alla fornace. Era possibile variare l'angolo di incidenza della corrente d'aria per modificare il risultato finale. L'uso di un basso angolo di incidenza proteggeva la massa ferrosa dalla decarburazione permettendo la produzione di acciaio, per contro l'utilizzo di un angolo di incidenza alto permetteva di ottenere ferro malleabile, dalle minori caratteristiche meccaniche, ma più facilmente lavorabile. Al termine della produzione che durava approssimativamente 6 ore, la massa ferrosa, di peso circa 100kg era estratta dalla sommità della fornace.

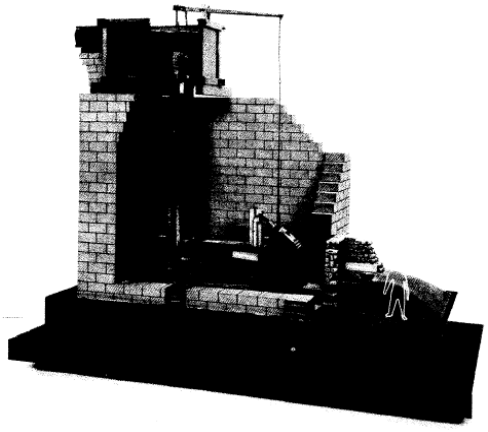


**FIGURE 1-12 VISTA IN SEMISEZIONE DI UN FORNO CATALANO [22]**

## *Stückofen*

Seconda delle varianti di fornace utilizzate in epoca moderna, si sviluppa prevalentemente nell' odierna Austria nella regione della Stiria, il nome deriva dalla parola tedesca "Stück" che identifica la massa metallica. A differenza del caso precedente si tratta di una struttura a pareti spesse di altezza considerevole, circa 3-4m, molto simile agli altoforni sui contemporanei(fig. 1-13b). Il diametro del crogiolo era di 0.8-1m restringendosi fino a 0.5m alla sommità. L'aria era insufflata tramite una coppia di mantici azionati idraulicamente(fig. 1-13a). La produzione durava circa 18h raggiungendo temperature di anche 1500° nel crogiolo, questo produceva masse ferrose di diverse centinaia di chilogrammi e tra i prodotti di scarto una modesta quantità di ghisa liquida. La rimozione della massa ferrosa a fine produzione richiedeva complessi sistemi di catene e carrucole.

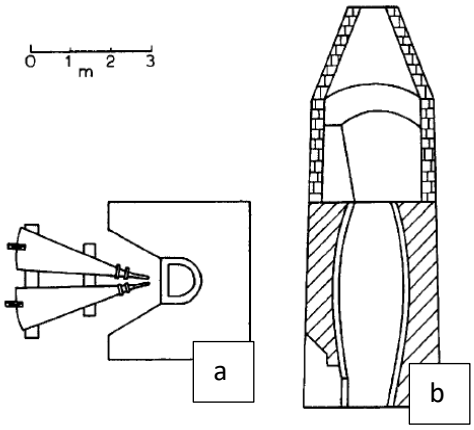



**FIGURE 1-13 STÜCKOFEN, VISTA DALL'ALTO(A) E IN SEZIONE(B) [22]**

### *Fornaci contemporanee*

Oggi il processo diretto non è più utilizzato per la produzione a livello industriale di ferro e acciaio le fornaci del tipo descritto nei paragrafi precedenti non sono più costruite se non a scopo di ricerca. Esse non sono però completamente scomparse dalla faccia della Terra, sono ancora utilizzate in alcuni villaggi dell'Africa per la produzione di ferro e talvolta acciaio con tecniche tradizionali molto simili a quelle utilizzate in Europa prima della rivoluzione industriale. Si tratta degli ultimi esempi di utilizzo del processo diretto. In una relazione pubblicata nel 1937 [11]si riassumono i molti design di fornaci utilizzati nelle diverse aree dell'africa quasi tutte per processo diretto. Sono incluse la maggior parte delle varianti viste in precedenza in questo capitolo, si spazia da semplici fornaci a tazza fino a bassiforni sia in argilla (fig. 1-15 e fig.1-14) che in pietra, anche di dimensioni e complessità considerevoli. Sebbene le più imponenti costruzioni non abbiano nulla da invidiare alle più tarde versioni di bassoforno sviluppate in Europa non si ritrovano nel panorama Africano altri metodi di insufflaggio dell'aria che non siano i mantici azionati da forza muscolare oppure il tiraggio indotto. Manca insomma evidenza di quelle innovazioni introdotte in Europa con il forno catalano o lo stuckofen che permisero di assoggettare la forza dell'acqua per azionare il sistema di ventilazione e permisero lo sviluppo del processo indiretto. Le testimonianze che ci sono giunte a partire dal XX secolo [11] [12] [13] [14] [15] [16]attestano che la quantità e la qualità del metallo prodotto sono in linea con quanto ipotizzato per le equivalenti fornaci Europee.

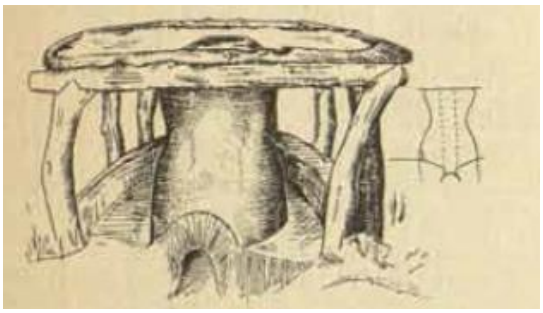


**FIGURE 1-14 SCHIZZO DI BASSOFORNO A AKPAFU (GHANA) [11]**

**FIGURE 1-15 ESEMPIO DI FORNACE A FOSSA DI SCORIA CONTEMPORANEA (ETIOPIA) [12]**

## 1.3.2 Processo produttivo

Il nome processo diretto deriva dal fatto che permette con un solo passaggio produttivo di ottenere ferro, meno spesso acciaio. Il prodotto di questo processo è una massa semisolida e spugnosa. A differenza di quanto accade per il processo indiretto non esistono trattazioni teoriche coeve, e nelle aree in cui questa tecnica ancora è praticata, principalmente zone rurali nel continente africano, ci si affida principalmente a tradizioni orali rituali piuttosto che a nozioni ingegneristiche. Ne risulta che la descrizione teorica seguente sia basata soprattutto su esperimenti, svolti a partire dal XX secolo, interessati a ricreare e studiare quello che era il processo antico e all'analisi dei reperti archeometallurgici, soprattutto resti di fornaci e blocchi di scoria. [17] [18] [2] [19] Di seguito le fasi del processo come sono state ipotizzate nelle ricostruzioni.

## *Preparazione della fornace*

La prima fase del processo è il preriscaldamento della fornace tramite la combustione di carbone effettuata per diverse ore con un blando apporto di aria. L'ossigeno in queste condizioni comincia a combinarsi con il carbonio del combustibile rilasciando anidride carbonica secondo la reazione:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

Successivamente durante l'ascensione attraverso i vari strati di combustibile l'anidride carbonica reagisce ulteriormente dando luogo al principale agente riducente di questo processo, il monossido di carbonio

$$CO_2 + C \rightarrow 2CO$$

Si è stimato che solo una piccolissima percentuale di anidride carbonica, meno del 4%, raggiunga la cima della fornace in questa fase.

## *Produzione del ferro*

Nella seconda fase si comincia a caricare minerale ferroso insieme al combustibile, il rapporto in peso tra i due reagenti non era fisso ma molto spesso era utilizzato 1:1. Gli ossidi di ferro a contatto con il monossido di carbonio cedono ossigeno generando anidride carbonica, di seguito la reazione nel caso dell'ematite:

$$3Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2Fe_3O_4 + CO_2 \uparrow$$

Come conseguenza di queste reazioni aumenta la quantità di anidride carbonica nella parte alta della fornace, a bassa temperatura, circa 500°, anche questo gas agisce da agente riducente. In questa seconda fase il flusso di aria viene molto aumentato fino a raggiungere i 200-300l/min. Durante tutta il processo le temperature all'interno della fornace sono molto differenti dai 1200°, occasionalmente fino a 1600°, nel crogiolo in prossimità dei condotti per l'aria, a meno di 300° alla bocca; la distribuzione non è a strati ma segue un profilo simile a quello di una fiamma. La carica e i gas riducenti come nel moderno altoforno seguono lo stesso percorso in senso di marcia opposto, dalla bocca al crogiolo la carica, dal crogiolo verso l'esterno i gas. Si tratta di un processo in cui la massa ferrosa non raggiunge mai la fusione, come si può vedere dal diagramma Fe-C (fig. 1-16) all'interno del crogiolo potrebbe esistere ghisa allo stato liquido, ma non appena si diminuisce la percentuale di carbonio la temperatura di fusione si innalza e non è possibile raggiungere lo stato liquido con un acciaio o con ferro a basso contenuto di carbonio. Per quanto riguarda

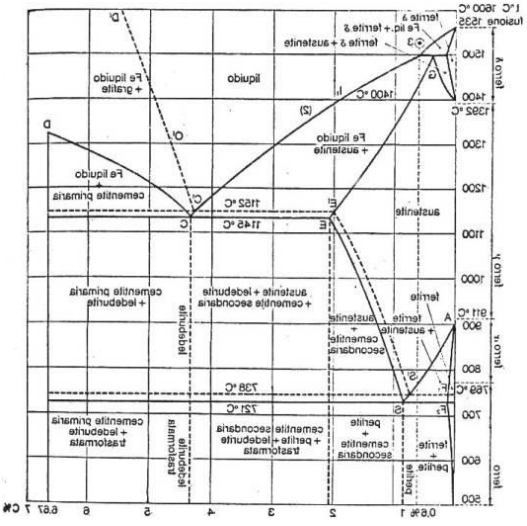



**FIGURE 1-16 DIAGRAMMA FERRO/CARBONIO**

la ghisa in Europa nel periodo trattato non era particolarmente utilizzata per fusioni ed era considerata materiale di scarto.

Di seguito sono descritte le reazioni a cui va incontro il minerale di ferro, supposto nuovamente ematite, nella sua discesa verso il crogiolo (fig. 1-17). Nella parte alta della fornace iterazione con i gas a 500-550° produce un minerale completamente secco e poroso, effetto che viene ulteriormente accentuato se esso era stato calcinato precedentemente. Quando la temperatura raggiunge i 700-750° la maggior parte del minerale è ridotto a Magnetite e una piccola parte ulteriormente a wustite

$$3Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2Fe_3O_4 + CO_2 \uparrow$$

$$Fe_3O_4 + CO \rightarrow 3FeO + CO_2 \uparrow$$

La superficie esterna dei grani del minerale può ricoprirsi di un sottilissimo strato di ferro metallico.

$$Fe_2O_3 + 3CO \rightarrow 2Fe + 3CO_2 \uparrow$$

$$FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2 \uparrow$$

Dopo che tutta la wustite è stata ridotta, il minerale raggiunge zone con condizioni altamente riducenti e temperatura superiore a 900° può iniziare una reazione di carburazione in cui il γ-Fe assorbe carbonio dal gas

$$2CO \rightarrow C_\gamma + CO_2 \uparrow$$

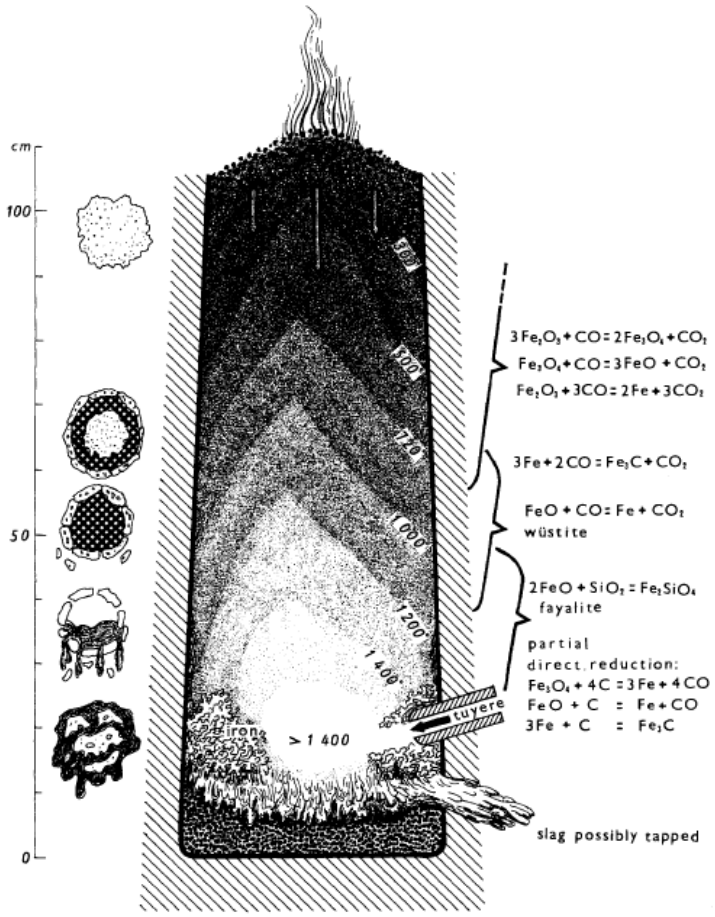



**FIGURE 1-17 SCHEMA RIASSUNTIVO DELLE REAZIONI NEL PROCESSO DIRETTO [2]**

Nel caso delle particelle di ferro più piccole la reazione può procedere fino a generare ghisa fusa. Quando i conglomerati di ferro wustite e minerale raggiungono zone a temperatura di 1100-1200° si innesca una ulteriore reazione che porta i composti di Fe a legarsi con le particelle di ganga, soprattutto ossidi di silicio, per dà luogo a fayalite $Fe_2SiO_4$ principale costituente della scoria, che fonde e fluisce fuori dalla massa ferrosa. Il rivestimento esterno dei grani si frantuma e le particelle di Fe si riaggregano tra di loro e con altri grani di Fe a formare una massa porosa che aderisce alle parteti della fornace all'incirca all'altezza dei condotti per l'aria. La scoria fusa cola attraverso i pori della massa ferrosa e si raccoglie nell'area sottostante da cui tramite un'apposita apertura può poi essere rimossa.

Quando la temperatura è superiore a 1000° alle reazioni tra gas e minerale si aggiungono anche quelle di reazione diretta tra minerale e combustibile, esse possono essere di riduzione con sviluppo ulteriore di monossido di carbonio:

$$Fe_3O_4 + 4C \rightarrow 3Fe + 4CO \uparrow$$

$$FeO + C \rightarrow Fe + CO \uparrow$$

oppure di carburazione:

$$C \rightarrow C_\gamma$$

Due sono i meccanismi con cui la scoria interagisce con il minerale, da una parte tende a decarburare Fe già carburato, dall' altra protegge la massa metallica dell'eccessiva ossidazione a cui andrebbe incontro in prossimità dei condotti di immissione dell'aria. Con il progressivo accumulo di scoria nella parte bassa del crogiolo sempre più minerale si trova da essa circondato prima di poter terminare il processo di riduzione, si assiste in questo caso a una riduzione del rendimento della fornace. Per contro rimuovendo troppa scoria viene meno la protezione che essa garantisce al minerale nella zona dei condotti, favorendone la rapida ossidazione che lo porta a trasformarsi in scoria ferruginosa. Il controllo della quantità di scoria nel crogiolo era quindi un passo fondamentale del processo.

## *Rimozione della massa ferrosa*

La massa ferrosa al termine della produzione veniva estratta attraverso un'apertura nella parete frontale della fornace oppure dalla sommità. Nella maggior parte dei casi essa era costituita da ferro a bassissimo contenuto di carbonio e quasi priva di impurità quali: S, P, Si, Mn [20] [21]. Per quanto riguarda lo zolfo il bassissimo contenuto è legato al combustibile utilizzato, esso è quasi assente nel carbone e presente invece nel coke. Per quanto riguarda P, Si e Mn la spiegazione della loro assenza va ricercata nella stabilità dei corrispondenti ossidi, come si evince dal diagramma di Ellingham (fig. 1-18) essi sono ancora stabili nelle condizioni tipiche del bassoforno e quindi passano nella scoria. Se erano assenti micro-impurità metalliche o dovute allo zolfo erano invece presenti macro-impurità dovute alla presenza di scoria intrappolata all'interno

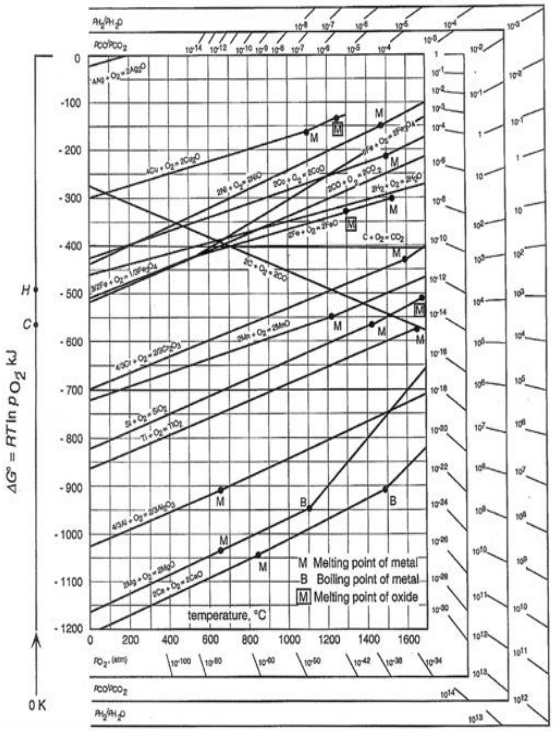



FIGURE 1-18 DIAGRAMMA DI ELLINGHAM

della massa metallica, queste sarebbero state poi rimosse successivamente tramite azione meccanica durante il processo di forgiatura.

### *Produzione di acciaio*

Dagli esperimenti condotti su ricostruzioni di bassiforni risulta che con le opportune condizioni fosse possibile produrre acciaio con processo diretto [2]. Il minerale doveva caricato in fornace doveva essere sottoposto precedentemente ad arrostimento e contenete almeno il 60% di ossido di Fe, anche un alto contenuto di manganese sarebbe stato utile. Il processo è facilitato da un eccesso di combustibile, il rapporto minerale/combustibile nella carica della fornace era probabilmente più vicino a 2:3 rispetto a quello di 1:1 tipico per la produzione di ferro. Infine, occorreva progettare la posizione dei condotti dell'aria in modo da ridurre il più possibile la riossidazione del Fe già carburato e permettere un lungo periodo di residenza del minerale in condizioni carburanti. Sebbene di non facile realizzazione queste condizioni erano sicuramente alla portata di alcuni maestri dell'epoca medievale e moderna. L'acciaio soprattutto se in quantità considerevole era un prodotto molto ricercato, di difficile reperibilità e di elevato valore economico.

## 1.4 Processo indiretto

In contrasto con quando avveniva con il processo diretto in questo caso il prodotto della fornace non era ferro ma ghisa, utilizzabile direttamente per colata in stampi, ma troppo fragile per essere lavorata tramite deformazione meccanica, fosse essa a freddo o a caldo. Per ottenere ferro, o acciaio, da questo processo occorreva dunque aggiungere un ulteriore passaggio detto di affinazione. Si utilizzava di un secondo forno in cui la ghisa era decarburata fino a raggiungere un tenore di carbonio che la rendesse lavorabile.

### 1.4.1 La fornace

Il primo altoforno costruito nell'Europa occidentale di cui si abbia testimonianza risale al 1345 e sorse nella conta di Namur in Belgio [22]. I primi altiforni, precedenti al XVII secolo. Erano di sezione quadrata, realizzati in pietra a cui molto presto si andarono ad aggiungere rinforzi in ferro. Le dimensioni esterne erano comprese tra 4,5m e 5,5m per ogni lato con una dimensione interna che andava da 1.2m a 1.7m a cui si deve ancora sottrarre lo spessore del rivestimento refrattario, l'altezza era di circa 6m, una piattaforma era costruita sulla sommità intorno alla bocca per permettere il carico del materiale (fig. 1-19a). Erano presenti due aperture sui fianchi della fornace una per la rimozione dei prodotti fusi l'altra per l'insufflaggio dell'aria (fig. 1-19b). Essa era fornita da un sistema di mantici, in genere due, l'azionamento dei quali avveniva sempre tramite energia idraulica e non tramite il lavoro di personale dedicato come era spesso nel caso del bassoforno. La potenza necessaria all' azionamento dei mantici era contenuta, e poteva essere facilmente ottenuta dai corsi d'acqua disponibili. Tylecote [22] stima circa 1CV per l'azionamento dei mantici ottenibile con una ruota di larghezza 0.3m e diametro 3m con una portata d'acqua di 1.7-2.5m$^3$/h. Il principale vantaggio della sostituzione dell'energia muscolare con quella idraulica nell'azionamento dei mantici fu il fatto che quest'ultima garantiva un apporto di aria costante e continuo permettendo di estendere di molto la durata delle campagne produttive, si passò da ore al massimo alcuni giorni per le produzioni in bassoforno a mesi di produzione continuativa, giorno e notte, per l'altoforno. Ecco allora che l'alto costo in termini di tempo e combustibile necessario per il riscaldamento e il raffreddamento della fornace, dovuto alle dimensioni della struttura, poteva essere spalmato su una produzione molto più ampia rendendo questa tecnologia economicamente vantaggiosa. Spesso le fornaci furono

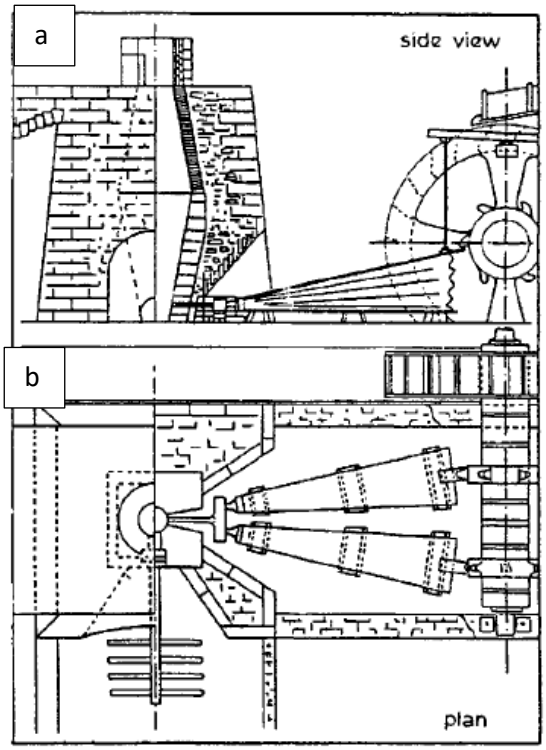



FIGURE 1-19 VISTA IN PIANTA (B) E LATERALE(A) DI UN ALTOFORNO [22]

dotate di coperture per proteggerle dalla pioggia. Naturalmente l'utilizzo di energia idraulica non era senza inconvenienti, il sito di costruzione della fornace doveva essere ubicato vicino ad un corso d'acqua, in un ambiente con un'umidità maggiore rispetto a quello scelto per i bassiforni [1]. Un primo rischio era quello di danneggiamento delle pareti stesse della fornace a causa dell'umidità esterna e del forte calore interno, a questo si ovviò con intelaiature di rinforzo prima in legno, poi per scongiurare rischi di incendio esse furono sostituite con equivalenti in ferro. Un secondo rischio, ben più grave, era quello legato all'infiltrazione di umidità dal basamento al crogiolo, questo avrebbe potuto portare ad un aumento eccessivo della pressione a causa della formazione di vapore e in definitiva all'esplosione dell'altoforno. Per ridurre al minimo questo rischio si procedevano a scavare dei fossati intorno alla fornace in cui si sarebbe raccolta eventuale acqua presente nel sottosuolo. Alcune varianti di altoforno utilizzarono sistemi di apporto di aria simili a quelle sviluppate per le più moderne varianti di bassoforno, una sola apertura frontale da cui si immetteva aria e si rimuovevano i prodotti, come nel caso dello stuckofen, l'uso di una tromba idroeolica per la produzione di aria in pressione sfruttando l'energia idrica invece di utilizzare mantici, come per il forno alla catalana, quest'ultimo caso era ad esempio quello scelto per i forni alla bresciana [23].

Al termine di ogni campagna produttiva occorreva sostituire il rivestimento refrattario del crogiolo. Vista in sezione la fornace era costituita da due sezioni a tronco di piramide la parte alta a sezione crescente dalla bocca, zona che prende il nome di tino, e la parte bassa che prende il nome di sacca a sezione decrescente fino a raccordarsi con un crogiolo di forma rettangolare., confrontata ai moderni altoforni era assente la zona a sezione costante tra tino e sacca che prende il nome di ventre. L'ugello del condotto dell'aria, spesso unico, realizzato in ferro e collegato ai due mantici, era posizionato a circa 0.3m dal fondo del crogiolo, questo era il livello massimo che potevano raggiungere metallo e scoria fusa durante la produzione.

La rimozione dei prodotti fusi avveniva inizialmente tramite un foro praticato alla base del crogiolo che quando non in utilizzo era chiuso da un tappo di argilla.

Nel XVII secolo la dimensione degli altoforni continua ad aumentare passando a circa 7m per il lato e incrementando l'altezza da 6 a 9m, aumento di altezza era necessario per mantenere inalterate le condizioni operative nel crogiolo pur aumentandone le dimensioni. L'angolo della sacca diventa molto più ripido e la zona a pianta quadrata del crogiolo tende a scomparire. Nonostante la maggior difficoltà di manutenzione del crogiolo la versione con sacca a basso angolo di inclinazione e crogiolo quadrata continua ad essere costruita e utilizzata fino al XIX secolo. Tra la fine del XVIII e il XVIII secolo a causa della penuria di carbone legata all'eccessivo sfruttamento delle foreste gli altoforni cominciarono ad essere alimentati con coke, al punto che salvo pochi casi isolati alla fine del XIX secolo non si utilizzava più il carbone per queste fornaci.

Sempre a partire dal XVII secolo si modifica l'apertura per la rimozione della ghisa, si introdusse il sistema dell'avancrogiuolo, derivato dall' esperienza maturata con la fusione di metalli non ferrosi, esso permetteva di aumentare la capacità del crogiolo, allontanare l'apertura di rimozione dalla zona più calda della fornace e in generale di facilitare le operazioni degli addetti alla fornace. Nell'immagine 1-20 i principali elementi dell'avancrogiuolo. Era costituito da un corto corridoio orizzontale che partiva dalla base del crogiolo per sfociare nell' apertura frontale della fornace,

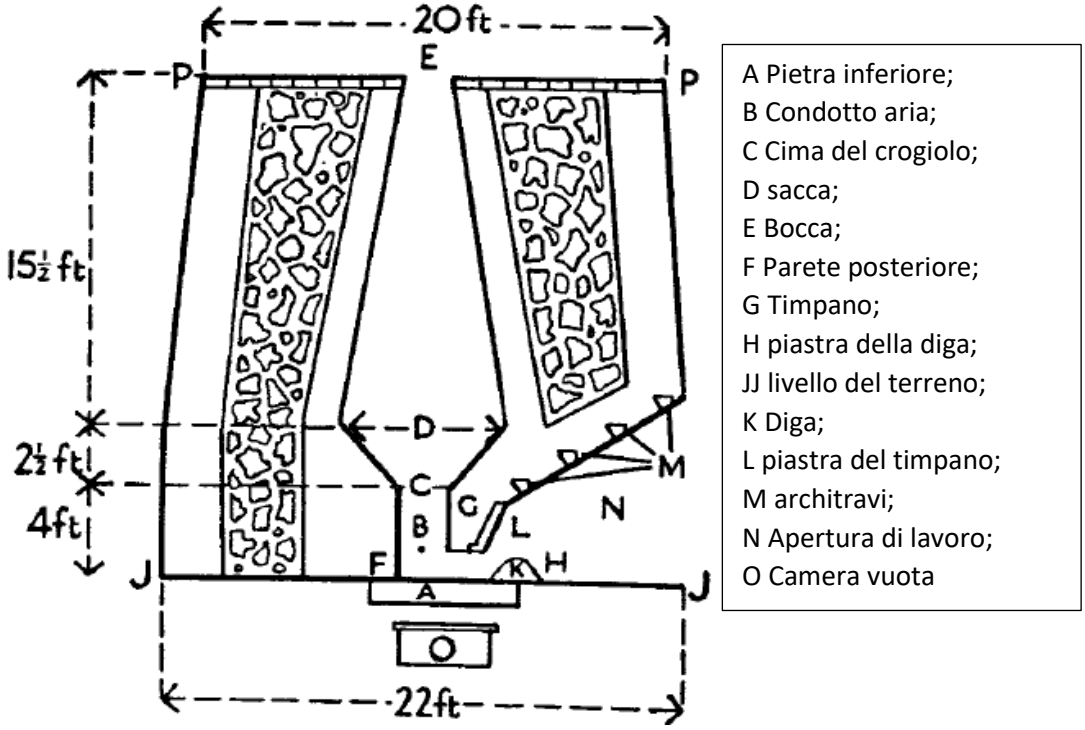



FIGURE 1-20 SEZIONE DI ALTOFORNO CON AVANCROGIUOLO [1]

una pietra era posta al termine del condotto con funzione di diga(**K**) per la ghisa fusa. La porzione della parete sul lato opposto della diga prende il nome di timpano(**G**). Inizialmente diga e timpano erano costituite semplicemente in pietra successivamente furono rivestite con piastre in ghisa(**L**)(**H**) per evitare che fossero danneggiate quando dall' esterno si andava ad agire con lunghe aste metalliche sull'interno del crogiolo. Al di sotto del crogiolo venne costruita una camera vuota(**O**) per proteggere la struttura soprastante dall' umidità, essa era sormontata da un tetto in ghisa dello spessore di circa 0.1m e lo spazio tra essa e il basamento dell'altoforno era riempito di sabbia; questa soluzione andò a sostituire le trincee scavate intorno alla fornace e usate in precedenza. Altra modifica del crogiolo fu il passaggio da una pianta rettangolare a una circolare che evitava l'accumulo di materiale agli angoli dello stesso, si ritiene che questa modifica sia stata introdotta per la prima volta in Svezia intorno al 1650 per poi diffondersi in tutt'Europa durante il XVIII secolo [1].

## 1.4.2 Il forno di affinamento

Si tratta del forno necessario alla seconda fase di questo processo, può essere costituito da un solo crogiolo oppure da due. La prima versione è tipica dell'Italia, deve era nota come processo bresciano, dell'Austria, della Germania e della Francia a partire dal XIX secolo, il secondo della Gran Bretagna e della Francia prima del XIX secolo ed è conosciuto come processo vallone. Erano forni di forma quadrata (fig. 1-21a) e sormontati da un camino chiusi nella parte posteriore e su uno dei due lati in cui era fissato il condotto dell'aria, mentre gli altri due lati rimanevano aperti. Il crogiolo e le pareti erano rivestiti da piastre in ghisa con dimensione interna tra 0.65m e 0.85m di lato e 0.2m circa di profondità (fig.1-21b) [24]. La piastra di fondo era spesso inclinata verso il lato libero (fig. 1-21c) per permetter una più agevole rimozione delle ceneri che andavano a formarsi sulla sommità del materiale trattata. L'incidenza del getto d'aria poteva essere variata agendo su una delle piastre, questo permetteva di aumentare o ridurre l'ossidazione della ghisa trattata.

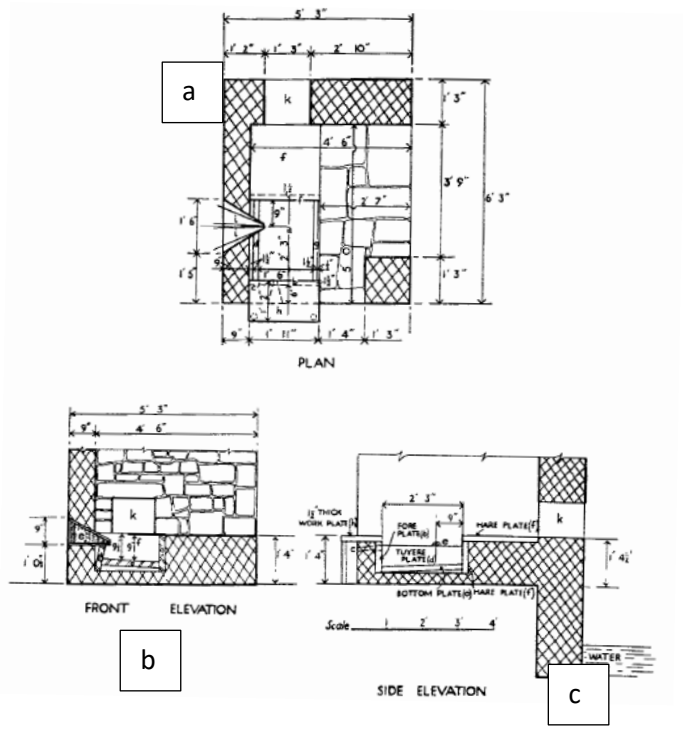



FIGURE 1-21 FORNO DI AFFINAMENTO, VISTA IN PIANTA(A), FRONTALE(B) E LATERALE(C) [1]

## 1.4.3 Processo produttivo

### *Preparazione dell'altoforno*

Le due principali attività di questa fase erano la preparazione della carica e quella della fornace. La carica era costituita principalmente da combustibile e minerale, con un rapporto combustibile/minerale maggiore rispetto a quello utilizzato per il processo diretto.
Molto spesso il minerale trattato durante una campagna produttiva aveva origini differenti e quindi differente qualità, % ossidi di ferro, che risultava in una differente temperatura di fusione, per uniformare il più possibile questa temperatura si procedeva a un miscelamento dei vari minerali prima di introdurli nell'altoforno. Per quanto riguarda il combustibile era formato da carbone a cui negli anni si andò sostituendo sempre più il coke. Ai costituenti principali si andavano ad aggiungere elementi flussanti, principalmente calcare, e scoria proveniente da bassiforni. I primi avevano il compito di aumentare la fluidità dei prodotti fusi ed erano tanto meno necessari tanto migliore era la qualità del minerale trattato, con un rapporto flussante/minerale compreso tra 1:10 e 1:20; la seconda era aggiunta per aiutare a diluire le impurità della ghisa.

La preparazione della fornace era costituita principalmente da una pulizia e riparazione del rivestimento interno dopo della fine della campagna precedente, a cui seguiva il riscaldamento e la rimozione dell'umidità accumulatasi durante il periodo di fermo, questa procedura prese il nome di "stagionatura". Pur con l'accorgimento di coprire la bocca della fornace durante il periodo in cui non operava non si riusciva ad evitare che una certa quantità di umidità penetrasse all'interno, era quindi necessario provvedere all'essicamento dello spazio interno tramite la combustione di una carica di solo combustibile per alcuni giorni, normalmente tre o quattro, a volte anche una settimana. Al combustibile utilizzato per le normali operazioni di produzione per la stagionatura si andava ad affiancare anche la torba.

## *Prime operazioni in altoforno*

Quando si giudicava che l'interno della fornace fosse completamente secco si poteva procedere con le operazioni di fusione. In questa fase prima dell'inserimento della prima carica contenente minerale, una grata costituita da corte barre di ferro era calata all'interno e posto su supporti a poca distanza dal fondo del crogiolo. Combustibile e minerale si andavano ad adagiare su questa grata e non sul fondo del crogiolo lasciando quindi uno spazio tra i due. Attraverso l'apertura frontale si osservava cosa accadesse nello spazio sottostante la grata, non appena cominciavano a formarsi i primi prodotti fusi era il segnale che l'altoforno era pronto ad entrare in attività. Si procedeva quindi a sigillare lo spazio tra diga e timpano prima con uno strato di scoria, poi con terra umida e infine con argilla. Idealmente questo tappo avrebbe dovuto essere a tenuta stagna, ma spesso a causa dell'eccessivo calore proveniente dal crogiolo tendevano a prodursi crepe attraverso le quali fiamme e gas potevano fuoriuscire. Se le fuoriuscite erano contenute, esse erano ignorate e si poteva procedere, in caso contrario si ripeteva il processo di sigillatura.

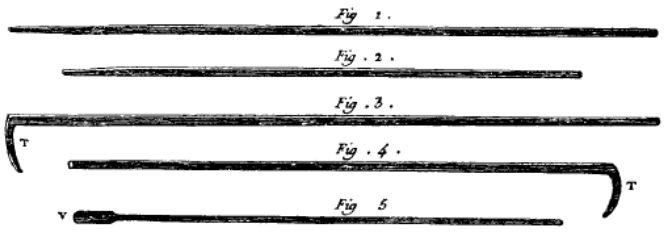



FIG. 27. Implements used in the smelting process.
From Diderot et d'Alembert, Grande Encyclopédie de France. Planches, tome 3, Forges ou Art du Fer, seconde section, planche IX, Paris 1765. Similar illustrations in Traité du Fer et de l'Acier, Planche 3, Paris 1804.

**FIGURE 1-22 GANCI UTILIZZATI PER LE OPERAZIONI IN ALTOFORNO [1]**

È stato documentato in alcuni casi [1] anche l'aggiunta di una piastra in ghisa tra timpano e diga per aumentare la tenuta del tappo, il fatto che la sua efficacia fosse legata ad una precisa pulizia dai rimasugli di scoria tra una rimozione e la successiva durante la stessa campagna è probabilmente alla base della solo sporadica diffusione di questo accorgimento.
Terminato il tappo si rimuoveva la grata agendo con lunghe aste dalla bocca dell'altoforno (fig. 1-22), si collegavano i mantici ai condotti e si iniziava ad insufflare aria. L'insufflaggio doveva avvenire in modo graduale per evitare picchi di pressione all'interno della fornace che avrebbero potuto portare ad un danneggiamento della struttura stessa.

## *Fusione in altoforno*

Si tratta di un processo a due flussi controcorrente, da una parte la carica inserita dalla bocca dell'altoforno progressivamente scende verso il crogiolo dall' altra il flusso di gas riducenti che sviluppati dalla combustione di carbone e coke in prossimità del condotto dell'aria risale tutta la struttura fino a fuoriuscire dalla bocca. Le reazioni chimiche che si sviluppavano nella parte alta dell'altoforno erano del tutto analoghe a quelle già viste nel bassoforno. Nella prima parte della discesa corrispondente alla parte alta del tino (fig. 1-23), con temperature intorno a 500°, si assisteva ad un'asciugatura del minerale e alla comparsa di una struttura porosa, similmente a quando avveniva con un processo di arrostimento. Nel caso siano presenti carbonati in questa zona si assisteva anche alla generazione di acido carbonico. Nella parte bassa del tino avvenivano invece le reazioni di riduzione indiretta, in questo caso i gas, principalmente monossido di carbonio, reagivano con il minerale rimuovendo ossigeno da esso. A questo punto della sua discesa la carica aveva raggiunto la giunzione tra tino e sacca, la zona più larga dell'altoforno qui iniziava la fusione della scoria, la carburazione del minerale, e il suo passaggio a una consistenza semisolida. Le condizioni a questo punto erano molto simili a quelle terminali per il processo diretto, ma in qui a differenza di quanto accadeva nel bassoforno la carica non ha ancora raggiunto il crogiolo (fig. 1-23) e la zona a massima temperatura. Man mano che ci si avvicinava al livello del condotto dell'aria la temperatura aumentava, e raggiunti i 1400° iniziava la fusione del minerale carburato. Ghisa e scoria fuse si raccoglievano nel crogiolo, al di sotto del condotto. A causa di un minor peso specifico la scoria galleggiava sulla ghisa, proteggendola dall'effetto ossidante del getto d'aria e impedendone la decarburazione.

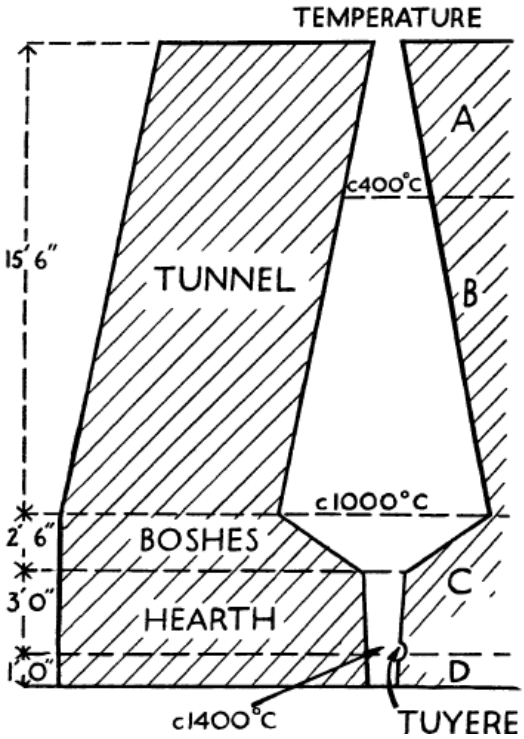



**FIGURE 1-23 SEZIONE ALTOFORNO, ZONE E TEMPERATURE [1]**

Durante la fusione due erano i modi per sincerarsi dell'andamento del processo [1]: si poteva osservare l'interno del crogiolo attraverso un piccolo spazio tra l'ugello del mantice e il condotto, detto "oculus fusoris" oppure dalla bocca della fornace immergere in lungo gancio nel crogiolo e analizzare il materiale che vi rimaneva attaccato. La rimozione della scoria in questa fase era effettuata quando il suo livello superava quello della diga. La frequenza di questa operazione dipendeva soprattutto dalla purezza del materiale, maggiore era la percentuale di ossido di ferro minore la quantità di scoria che si formava e doveva essere rimossa. In ogni caso uno strato di scoria era sempre lasciato a protezione della ghisa sottante. Una volta fuoriuscita dal crogiolo la scoria si raffreddava velocemente e dopo che era divenuta solida si procedeva alla sua asportazione per via meccanica.

## *Rimozione della ghisa fusa*

Quando era invece la ghisa a raggiungere il livello della diga era il momento di procedere alla sua estrazione. I mantici erano fermati interrompendo il flusso d'aria e il tappo a lato della diga era rimosso permettendo la fuoriuscita della lega liquida.
La ghisa fusa era fatta fluire in un letto di sabbia accuratamente selezionata e mantenuta moderatamente umida. Essa doveva contenere sufficiente umidità da mantenerla compatta ma non troppa da ridurre eccessivamente la porosità, doveva infatti essere sufficientemente porosa da permettere la fuoriuscita dei gas intrappolati nel metallo liquido. Terminata la colata la ghisa era ricoperta con un ulteriore strato di sabbia per ridurne la decarburazione. A questo punto l'avancrogiolo era ripulito dalla scoria tramite l'utilizzo di ganci metallici ed era poi risigillato per poter riprendere la fusione. Ogni pulizia rovinava in parte il rivestimento refrattario che doveva infine essere completamente sostituito a fine campagna. La rimozione della ghisa avveniva in media un paio di volte al giorno e a partire dal terzo giorno di operazioni [1], con una produzione media di 1t di ghisa ogni 24 ore. Il rendimento teorico massimo dell'altoforno partendo da un minerale ricco e ben preparato è del 70% [9], rese del 50% erano da considerarsi elevate, in questi processi nei migliori casi si attestava al 40 % ma a causa di minerale o combustibile scandenti si poteva scendere anche al 10%.
La campagna produttiva andava avanti ininterrottamente giorno e notte, senza considerare domeniche o altri giorni di festa. All'inizio del XVII secolo si effettuavano generalmente due/tre campagne all'anno, nel XVIII secolo quasi sempre una sola, la durata totale era in ogni caso di circa 20-30 settimane.

## *Affinamento della ghisa*

La massa di ghisa ricoperta di carbone era posta su una piastra di fronte alle condotte dell'aria (fig. 1-24a), la combustione del carbone alimentata dal getto d'aria portava velocemente la ghisa a fusione. Il processo descritto di seguito era tipicamente applicato per ghisa grigia.
La lega fusa si riversava nel crogiolo dove l'operatore addetto all'affinamento aveva il compito di mantenerla in movimento evitando che essa aderisse al fondo o alle pareti del crogiolo. Quest'operazione era condotta tramite una barra di ferro su cui inevitabilmente andava a depositarsi parte del metallo che sarebbe poi stato rimosso in un secondo tempo tramite un piccolo martello. La scoria che in questa fase si separa dal metallo fuso era lasciata accumulare nel crogiolo finché non raggiungeva un apposito foro da cui era fatta defluire (fig. 1-23b). Il risultato di

questa prima fusione era una massa semisolida le cui parti erano in differenti stati di decarburazione. A questo punto si utilizzava un secondo strumento, costituito da una barra a forma di croce, per rompere la massa metallica, le parti risultati erano poi esposte a turno al getto d'aria finché non erano tutte affinate al livello voluto. La massa metallica era quindi esposta un'ultima volta al getto d'aria, che era incrementato rispetto alle fasi precedenti, per portarla nuovamente a fusione, il metallo fuso si raccoglieva a questo punto in una massa spugnosa all'interno del bagno di scoria. Infine, essa era blasmata in forma sferica. Il risultato era una massa di ferro spugnosa con intrappolate all'interno parti di scoria. Poiché non era possibile avvalersi di analisi chimiche per determinare l'avanzamento del processo ci si basava sul colore del metallo, delle scintille generate e della diversa capacità di adesione della scoria sulla ghisa e sul ferro. L'intera procedura richiedeva circa un'ora.

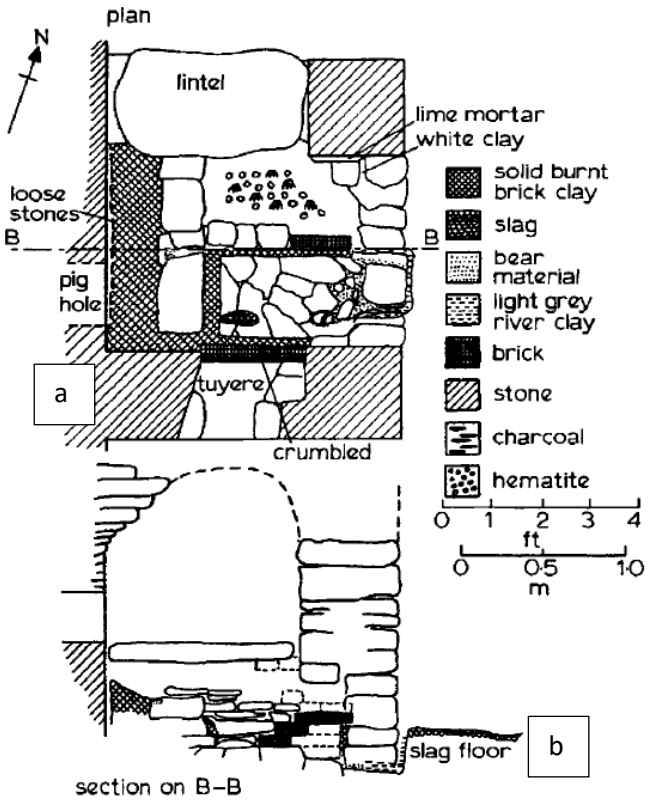



**FIGURE 1-24 FORNO DI AFFINAMENTO, VISTA FRONTALE(A) E IN SEZIONE(B) RICOSTRUZIONE DA ROVINE DI STONY HAZEL (INGHILTERRA) [22]**

In caso il materiale di partenza fosse stato ghisa bianca occorreva apportare alcune modifiche alla procedura descritta poc'anzi. La ghisa bianca tende a fondere più facilmente e ad essere meno liquida, cosa che la porta ad aderire facilmente al fondo del crogiolo prima che un'adeguata decarburazione potesse avvenire. Gli accorgimenti che venivano presi erano volti a ritardare la fusione della ghisa, in particolare si diminuiva la profondità del crogiolo e il getto d'aria era orientato quasi orizzontalmente e la sua intensità ridotta. In questo modo era possibile evitare la completa fusione della ghisa, l'intero processo era più lungo di quello precedete e comportava un consumo maggiore di combustibile. A questo punto la massa di ferro, o acciaio, era formata con l'ausilio di un maglio azionato ad acqua, durante questa fase essa era ripetutamente riscaldata e tramite azione meccanica si procedeva alla rimozione della scoria.

## 1.5 Cementazione

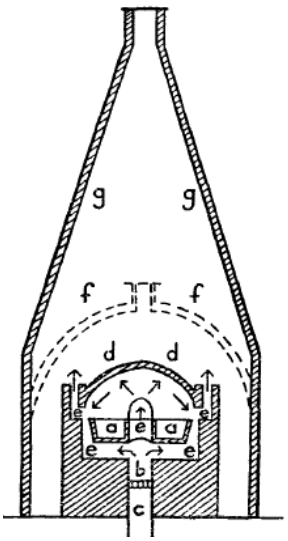
Si tratta di un processo tuttora utilizzato per incrementare la durezza superficiale dei componenti in acciaio (qui usato nell' accezione moderna) a basso tenore di carbonio tramite l'aumento della percentuale di C a partire dalla superficie del componente. In tempi passati era il processo più utilizzato per trasformare il ferro prodotto in bassoforno in acciaio [25]. Come si è visto nei paragrafi precedenti l'acciaio era anch'esso direttamente producibile tramite processo diretto, ma il suo ottenimento era difficile soprattutto nel caso fosse necessaria una grande massa di composizione il più possibile omogenea. L'alternativa era utilizzare il bassoforno per produrre ferro, oltretutto povero in zolfo e fosforo, e poi trasformarlo in acciaio successivamente. Il ferro, 0.05-0.15%C, riscaldato a 900-950°, in fase austenitica, assorbe carbonio da sostanze cementanti [26]. È inoltre possibile utilizzare sostanze nitrurati quali corno, cuoio o polvere di zoccoli, come catalizzatori del processo. Si tratta comunque di un processo lungo, si stimano 12 ore per ottenere 2mm di spessore cementato.

### 1.5.1 Cementazione "in cassetta"

Processo tuttora esistete anche se oggi poco usato e soppiantato quasi completamente dalla cementazione in fase gassosa, più veloce e facilmente controllabile. Si tratta di una reazione allo stato solido tra il ferro e il combustibile ricco di carbonio, nella fattispecie carbone.
Quando il carbone è bruciato in ambiente aperto sviluppa una miscela di $CO_2$ e CO, al contatto con il ferro il C può diffondersi. La relazione è la seguente:

$$2CO \rightarrow CO_2 + [C]$$

Dove "[C]" è il carbonio che si dissolve nella matrice di ferro. Sono stati recentemente condotti esperimenti [27], per verificare quale risultato in termini di profilo di durezza fosse possibile ottenere utilizzando carbone come elemento carburante. Il risultato è stato che già con trattamenti di 30-40min appena al di sopra della temperatura di austenitizzazione è possibile ottenere un sottile strato cementato ad alta durezza, oltre 55HRC, mentre strati di spessore più elevato potevano essere ottenuti con temperature di circa 1000°. Il processo usato in passato prevedeva di ricoprire la massa di ferro con il carbone che era poi bruciato con insufflaggio d'aria (fig. 1-25), per ottenere una corretta cementazione




a) Recipienti contenenti ferro e carbone
b) Focolare con grata
c) Pozzetto per le ceneri
d) Soffitto interno a cupola
e) Flusso delle fiamme (indicato con frecce)
f) Soffitto esterno a cupola (vecchia struttura)
g) Soffitto alto a camino (fine XXIII secolo)

FIGURE 1-25 FORNACE PER CEMENTAZIONE IN CASSETTA, SHEFFIELD (INGHILTERRA) [1]

occorreva che il ferro fosse ben circondato dal carbone. Essendo questo un trattamento superficiale se si voleva ottenere una massa di acciaio avente composizione il più possibile omogenea era conveniente cementare frammenti di piccole dimensioni e saldarli successivamente insieme durante forgiatura piuttosto di trattare una massa di grandi dimensioni.

### 1.5.2 Cofusione

Entrambi gli autori V. Biringuccio e G. Agricola nelle loro opere [22] [6] [7] danno una descrizione molto simile di un'altra variante del di processo usato a loro dire per trasformare decine di kg di ferro prodotto tramite bassoforno in acciaio. Sebbene la quantità di metallo trasformato non appaia realistica è interessante il processo di trasformazione. Entrambi gli autori lo definiscono cofusione ed è basato sulla reazione del ferro non con il carbone come nel processo precedente ma con ghisa proveniente da scarti del processo diretto. La reazione avveniva in un crogiolo sotto copertura di un bagno di scoria, aria era insufflata per innalzare la temperatura fino a 1150-1200°. In queste condizioni il ferro tendeva ad acquisire carbonio dalla ghisa. Poiché il processo di cementazione è soprattutto superficiale per ottenere un acciaio il più possibile uniforme la massa di ferro è estratta dal bagno di scoria temprata per renderla più fragile, frantumata e i frammenti reinseriti nel bagno, questo processo veniva ripetuto più volte.

## 1.6 Acciaio al crogiolo

Si tratta di un processo antico, praticato nelle sue molte varianti in Asia centrale, India e Sri Lanka a partire almeno dal V secolo DC, ma solo recentemente riscoperto in Europa, durante il XVII e il XVIII secolo [28] [29] [30]. Esso permette di produrre piccoli lingotti di acciaio ad alta percentuale di carbonio, sia ipoeutettoidico che ipereutettoidico, a partire da frammenti di ferro e materiale carburante. Il suo prodotto più noto è quello che viene comunemente chiamato acciaio di Damasco, anche se non ci sono evidenze che la città siriana sia mai stata luogo di produzione di questo prodotto, molto probabilmente solo uno snodo commerciale in cui veniva rivenduti ai mercanti europei prodotti provenienti da oriente. La caratteristica più evidente di questo prodotto è l'aspetto, a seguito della lucidatura e attacco acido è visibile un caratteristico disegno dovuto alle diverse fasi presenti, prevalentemente ferrite e perlite per la versione ipoeutettoidica e ferrite e cementite per la versione ipereutettoidica [31] [32].

Sul finire del XVIII secolo alcuni lingotti provenienti dall'India, noto come acciaio wootz, furono inviati alla Royal society di Londra per essere esaminati. Si trattava di un acciaio con ottime proprietà meccaniche ma difficile da lavorare a caldo, oltre la temperatura di transizione austenitica. Gli studi condotti su questi lingotti sono alla base dell'uso dei moderni acciai legati. In parallelo altri studi furono condotti in Russia dal generale Pavel Pereovich Anosov, che basandosi sull'analisi di armi in acciaio Damasco riuscì a replicare le tradizionali tecniche produttive.

In generale il processo si basa sulla carburazione di frammenti di ferro, prodotto tramite processo diretto, con un composto ad alto contenuto di carbonio [33], carbone, frammenti vegetali oppure ghisa. Il ferro e l'elemento carburante erano introdotti in un crogiolo chiuso realizzato in argilla refrattaria (fig. 1-26), un gran numero di questi crogioli erano poi posti in una fornace. L'elevata temperatura raggiunta, sufficiente a fondere il metallo, favoriva la reazione di carburazione mentre il fatto che la reazione avvenisse in un contenitore stagno evita il rischio di successiva ossidazione. A differenza del processo di cementazione descritto nel paragrafo non c'è contatto tra il ferro e il combustibile utilizzato nella fornace. Dopo lo spegnimento della fornace i crogioli erano frantumati per estrarre i lingotti di acciaio. A causa dell'elevata percentuale di carbonio questo acciaio era particolarmente ricercato per armi da taglio e utensili dotati di lama.

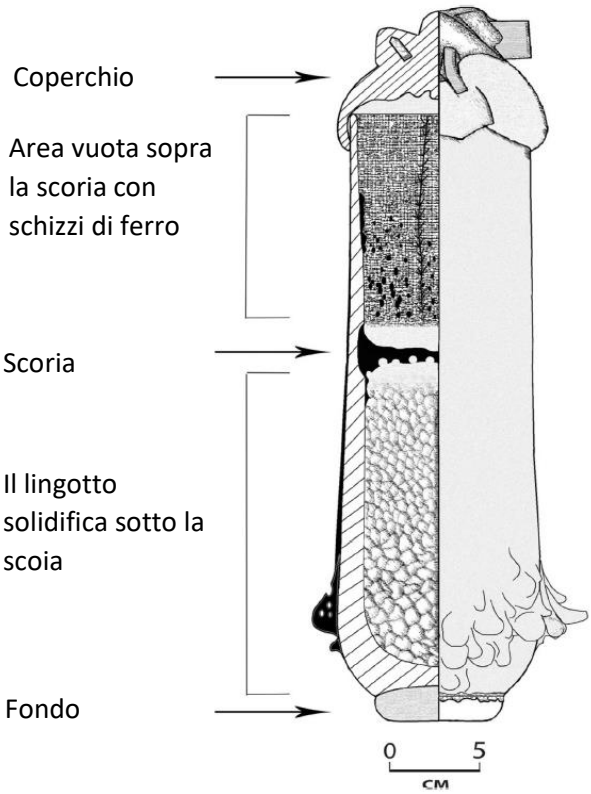



FIGURE 1-26 SEZIONE DI UN CROGIOLO [29]

# 2 Meccanismi di accensione

## 2.1 Origine delle armi da fuoco

L'origine dell'uso della polvere da sparo in Europa è avvolta nel mistero, i suoi scopritori europei più accreditati sono il frate inglese Roger Bacon (fig. 2-1) e il monaco tedesco Berthold Schwarz (fig.2-2) [34] [25], secondo altre teorie essa sarebbe invece stata importata dal mondo arabo oppure dall' estremo oriente. Quel che è certo è che tra il 1000 e il 1200 furono effettuati molti esperimenti che portarono alla scoperta di miscele di polveri che tendevano ad incendiarsi facilmente. Rapidamente si iniziò ad intuire che questi composti potevano avere interessanti applicazioni in campo bellico. La prima testimonianza nota di un'arma da fuoco è una miniatura contenuta nel testo "De officii regum" del 1326 raffigurante un cannone [35]. Da una parte si svilupparono le artiglierie, armi da fuoco pesanti e pensate per essere impiegate per lo più in postazioni fisse, a difesa di fortificazioni, sul ponte di imbarcazioni oppure in posizioni strategiche sui campi di battaglia. Dall'altra armi portatili per l'impiego da parte di singoli soldati oppure per attività venatoria e più tardi sportiva. Agli inizi le due tipologie differivano principalmente per le loro dimensioni, e non per la loro concezione, ma con il passare del tempo tesero a differenziarsi sempre più a causa delle specifiche necessità di utilizzo. Le prime versioni di armi da fuoco portatili erano molto rudimentali e nella concezione simili ad un cannone su scala ridotta. Si trattava di tubi in ferro chiusi ad un'estremità, spesso ma non sempre montati su un supporto in legno (fig. 2-3), la canna diventava infatti presto rovente e impossibile da maneggiare senza un apposito sostegno. Erano tutte armi ad avancarica in cui polvere e palla erano inserite dalla bocca dell'arma. Data la scarsa qualità delle prime miscele la carica necessaria era enorme, occupava in 60% della lunghezza della camera ed era sormontata da un tappo in legno e infine della palla che a volte sporgeva dalla bocca dell'arma. Sulla sommità del tubo era praticato un foro comunicante con la camera interna, denominato focone, che permetteva di incendiare la polvere contenuta nella canna.

FIGURE 2-1 ROGER BACON

FIGURE 2-2 BERTHOLD SCHWARZ

A volte queste armi erano utilizzate con l'ausilio di un sostegno, simile ad un cavalletto, per aumentarne la stabilità, più spesso erano imbracciate dal tiratore che posizionatala sotto l'ascella la reggeva con la mano sinistra e accendeva la polvere con la destra. Anche la sola posizione di tiro

pregiudicava la possibilità di una mira accurata aggiungendo il forte rinculo, la scarsa precisione dell'arma in sé e il fatto che il focone era posto sulla linea di puntamento, si può intuire che l'effetto di queste armi consisteva più nell' impatto psicologico dovuto a fumo e rumore che nell'effettivo danno fisico arrecato al nemico [36]. Il grande potenziale distruttivo promesso dalla polvere nera portò negli anni sviluppare meccanismi di innesco sempre più affidabili e precisi per superare le forti limitazioni insite nelle versioni primitive (fig. 2-4).

FIGURE 2-3 BOMBARDELLA DI FRANKENBURG, HISTORISHES MUSEUM (BERNA), 1460 CIRCA [37]

Nei seguenti paragrafi saranno prese in considerazione solamente le armi da fuoco portatili e nello specifico i principali meccanismi di accensione sviluppati prima dell'avvento del sistema di innesco a percussione e della retrocarica. Possiamo dividere i meccanismi di accensione in tre categorie, elencate di seguito in ordine cronologico di sviluppo:

1. Meccanismo di accensione a miccia
2. Meccanismo di accensione a ruota
3. Meccanismo di accensione ad acciarino

Se è possibile definire un ordine cronologico per la comparsa dei differenti meccanismi non è possibile fare lo stesso per la loro scomparsa, infatti essi coesistettero per lunghi periodi e la loro adozione e il loro abbandono furono legati non solo a vantaggi funzionali ma anche a tradizioni di utilizzo, convenienza economica e disponibilità di artigiani specializzati.

FIGURE 2-4 BOMBARDELLA DI TANNENBERG,GERM. NATIONALMUSEUM (NORIMBERGA), 1390 CIRCA [37]

## 2.2 Meccanismo di accensione a miccia

### 2.2.1Nascita

Primo meccanismo di accensione ad essere sviluppato e curiosamente anche il più longevo di quelli analizzati, sue versioni erano ancora in uso in Tibet durante il XX secolo [34]. Propedeutica e fondamentale per questa invenzione fu quella dello scodellino. Inizialmente ricavato sulla canna era composto da un rialzo o un incavo intorno al foro del focone che permetteva di alloggiare una piccola quantità di polvere da sparo da innescare tramite una miccia. Le micce erano costituite da corda di canapa imbevuta di salnitro e alcool [35] per bruciare lentamente e senza fiamma.
Nelle prime versioni lo scodellino era ricavato direttamente nella canna e posto sulla sua sommità, posizione che interferiva con la linea di mira. Successivamente con l'introduzione di un apposito elemento dedicato ad alloggiare il meccanismo di accensione, la piastra, venne spostato sul lato destro dell'arma e ad esso inglobato.

## 2.2.2 Elementi costruttivi

L'adozione dello scodellino permise la realizzazione del primo sistema d'accensione a miccia. Il meccanismo nella sua versione più rudimentale, risalente probabilmente agli inizi del XV secolo, era costituito da una leva a bracci diseguali fissata su un lato del teniere (fig. 2-5), elemento che per le armi da fuoco prenderà la denominazione di detto cassa. Il braccio più lungo e pesante era quello inferiore manovrato dal tiratore mentre quello più corto terminava con uno spacco a cui veniva fissata la miccia. Portando verso l'alto il braccio inferiore si abbassava quello superiore avvicinando la miccia allo scodellino e innescando la polvere in esso contenuta. La leva prese il nome di serpe, serpentino o draghetto. Il maggior peso del braccio inferiore manteneva la miccia lontana dallo scodellino in posizione libera. La descrizione di questo meccanismo è stata ricavata principalmente da illustrazioni di test dell'epoca e non da reperti, restano dubbi quindi riguardo all'uso di un eventuale molla di ritorno come per le balestre.

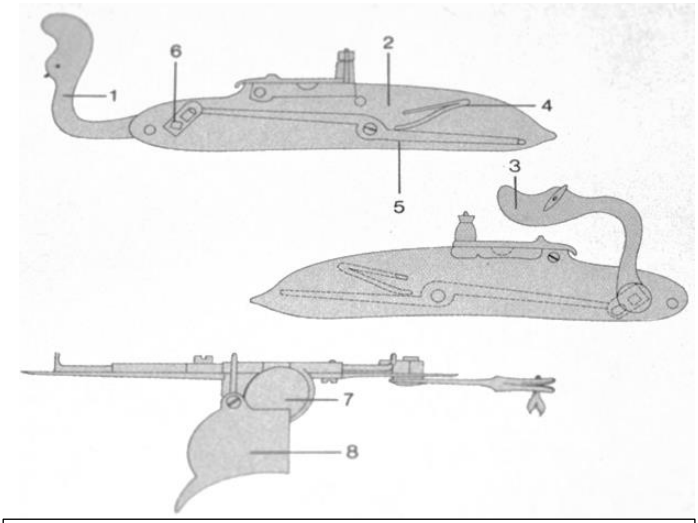
FIGURE 2-5 ARCHIBUGIO A MICCIA, LANDESZEUGHAUS (GRAZ), 1560 CIRCA - MECCANISMO A SCATTO [37]

Verso la metà del XV secolo si iniziò a spostare lo scodellino a lato della canna per permettere di liberare la linea di mira e si introduce un copriscodellino girevole, che pur non essendo a tenuta stagna permetteva di offrire un po' di protezione alla polvere e dagli agenti atmosferici (fig. 2-6) Questa nuova configurazione rendeva obbligatoria l'adozione di un meccanismo di accensione che non richiedesse il diretto intervento del tiratore nell'accostare l'innesco alla polvere, infatti ciò avrebbe reso l'operazione ancora più complicata di quanto fosse con scodellino centrale. Ecco allora che il sistema a miccia si evolve, nasce il concetto di meccanismo di accensione separato, montato su un supporto, denominato cartella, e fissato sul lato destro dell'arma. La leva a due bracci si trasforma in un elemento incernierato ad un'estremità, si inverte in verso di azionamento e si introducono una o più molle a lamina. Esistevano due versioni di questo sistema che differivano principalmente per la funzione delle molle, un sistema era detto a stanghetta e l'altro a scatto.

FIGURE 2-6 ARCHIBUGIO A RETROCARICA APPARTENUTO A ENRICO XVIII, TORRE DI LONDRA, 1537 CIRCA - MECCANISMO A STANGHETTA [37]

## *Meccanismo a stanghetta*

Sistema (fig. 2-7) in cui la molla (**4**) funge da richiamo. La serpe(**1**) è fissata su un lato della piastra (**2**), quello all'esterno dell'arma. Essa è calettata su un perno (**6**), passante attraverso la cartella, e collegato dall'altro lato al braccio maggiore di una leva, la stanghetta (**5**). Questa leva ha fulcro a circa 2/3 della sua lunghezza e con una molla a lamina agente sul braccio inferiore. La molla è fissata alla cassa ad una delle sue estremità mentre l'altra agisce sulla stanghetta generando una forza che mantiene il draghetto in posizione armata, ciò lontano dallo scodellino (**7**). Al momento di far fuoco il tiratore premeva sul braccio più corto della stanghetta e vincendo il carico della molla, generalmente esiguo, portava la miccia, fissata al morsetto (**3**) della serpe, a contatto con lo scodellino, rilassando la pressione sulla leva il draghetto torna alla posizione iniziale. L'apertura del copriscodellino (**8**) era manuale e andava effettuata prima di fare fuoco [37]. Era un sistema funzionale, tra quelli che utilizzavano la miccia, semplice, robusto, e questo gli permise di rimanere in uso anche in Europa fino al XVIII secolo soprattutto in ambito militare, dove semplice è sinonimo di economico e robusto di richiedente poca manutenzione.




1 Serpe; 2 Piastra; 3 Morsetto; 4 Molla; 5 Stanghetta
6 Perno; 7 Scodellino; 8 Copriscodellino

**FIGURE 2-7 ELEMENTI COSTITUTIVI DI UN MECCANISMO A STANGHETTA [37]**

## *Meccanismo a scatto*

Sistema (fig. 2-8) in cui la molla(**1**) ha funzione di azionamento. La serpe(**2**) è simile al caso precedente per quanto riguarda la parte posizionata sul lato esterno della piastra (**3**), sul lato interno invece sul perno(**4**) passante è fissato un dente di arresto(**5**). Su questo dente agivano due elementi, da un lato una molla a lamina che tendeva a spingere in avanti il draghetto e quindi a portare la miccia in contatto con lo scodellino, dall'altra una leva di arresto(**6**) che lo manteneva in posizione armata. Al momento di far fuoco il tiratore agendo su di un grilletto premeva sul braccio inferiore della leva e liberava il dente di arresto, sotto il carico della molla la serpe ruotava e portava la miccia accesa allo scodellino(**7**). Il copriscodellino(**8**) è sempre ad azionamento manuale.

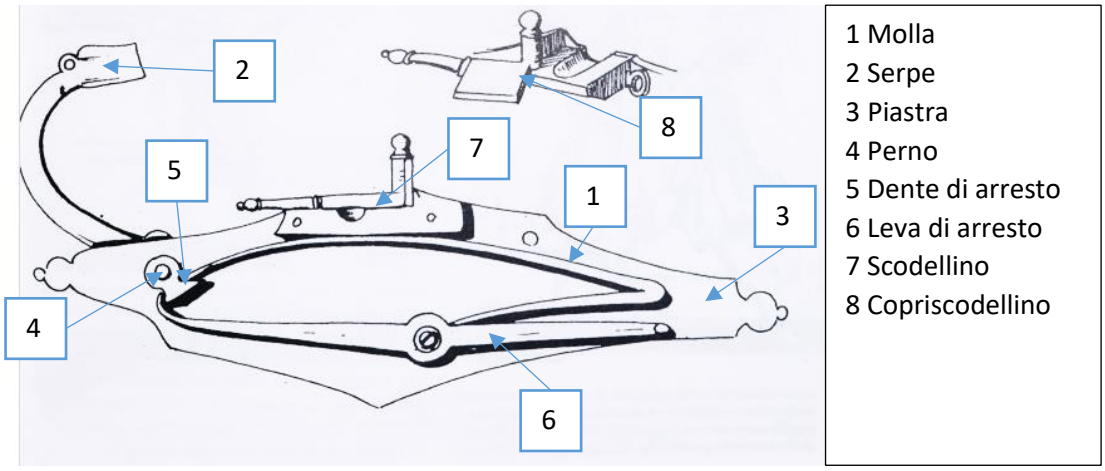



FIGURE 2-8 ELEMENTI COSTITUTIVI DI UN MECCANISMO A SCATTO [34]

Il sistema è leggermente più complesso del precedente, aveva il vantaggio della velocità di accensione, questo permise di sviluppare i primi fucili per il tiro a volo. Per contro presentava almeno due svantaggi: primo il movimento rapido della serpe rischiava di spegnere la miccia, inconveniente potenzialmente mortale in guerra o durante la caccia di animali di grossa taglia, secondo il rischio di far partire involontariamente il colpo nel caso di difetti nel dente di arresto. Per questi motivi la soluzione a stanghetta fu generalmente quella preferita in ambito militare.

## *Preparazione e caricamento*

Sebbene l'adozione del meccanismo a miccia (fig. 2-9)avesse semplificato notevolmente le operazioni di accensione e sparo delle armi da fuoco le operazioni preparatorie e di caricamento rimanevano molto complesse. La miccia doveva essere mantenuta accesa durante tutto il periodo in cui si voleva poter far fuoco, operazione per fortuna facilitata dal fatto che essi bruciavano molto lentamente e si potesse utilizzare una miccia per accenderne un'altra. Proiettile e polvere dovevano essere inseriti separatamente dalla bocca dell'arma.

FIGURE 2-9 MOSCHETTO A MICCIA, ARMÈMUSEUM (STOCCOLMA), 1688 [37]

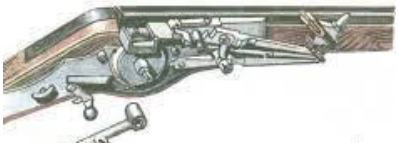
Di seguito la lista delle operazioni [35] che il tiratore dove effettuare dopo un colpo prima di poter sparare il successivo, essa è valida per tutte e due le varianti presentate in precedenza.

- Rimuovere la miccia accesa dalla serpe e reggerla con medio anulare e mignolo della mano sinistra
- Assicurarsi che la miccia fosse accesa ai due capi, se uno si fosse spento si sarebbe usato l'altro per riaccenderla
- Voltare l'arma con la bocca, dell'arma, verso l'alto e reggerla con la mano sinistra
- Versare con la mano destra una carica di polvere dalla fiaschetta all'interno della canna

- Introdurre nella canna una pallottola prelevata da una tasca o dalla bocca, del tiratore, solitamente in battaglia i soldati mettevano in bocca la pallottola prima di iniziare a caricare.
- Introdurre nella canna uno stoppaccio di carta o canapa
- Comprimere con il calcatoio tutto il contenuto della canna
- Versare nello scodellino la polvere, generalmente polvere più fine contenuta in una seconda fiaschetta
- Chiudere il coperchio dello scodellino
- Spolverare l'arma
- Posizionare la miccia accesa nella serpe
- Ravvivare la miccia soffiandoci sopra

A questo punto l'arma era nuovamente pronta a fare fuoco. Considerando che tutte queste operazioni erano condotte avendo in una mano una miccia accesa si può capire quanta attenzione occorresse fare per evitare esplosioni accidentali e perché si svilupparono altre soluzioni per i meccanismi di accensione. Il fatto di dover avere la continuamente la miccia accesa rendeva chiaramente difficili imboscate e operazioni notturne

## 2.3 Meccanismo di accensione a ruota



### 2.3.1 Nascita

FIGURE 2-10 PISTOLA A RUOTA COSTRUITA PER L'IMPERATORE CARLO V

Si tratta del primo sistema di accensione basato su scintille create ad hoc al momento richiesto e non da un innesco da mantenere sempre rovente. Il meccanismo utilizza lo sfregamento tra una ruota metallica e un frammento di pirite su di essa premuto per genera scintille che innescano la polvere contenuta nello scodellino e attraverso il focone la carica contenuta nella canna. Il principio di generare scintille tramite lo sfregamento di opportune pietre era noto fin dalla preistoria e all'epoca dell'invenzione del meccanismo a ruota esistevano già di anni i focili, antenati dei moderni accendisigari. Non vi fu quindi l'invenzione di un nuovo sistema per dar fuoco ad un elemento infiammabile quanto piuttosto l'applicazione alle armi da fuoco di un sistema esistente.

Le prime armi da fuoco equipaggiate con questo tipo di meccanismo di accensione e aventi datazioni certa sono una pistola e un archibugio costruite per l'imperatore Carlo V (fig.2-10) e datate rispettivamente 1530 e 1533, nella collezione dell'Armeria del Consiglio dei Dieci a Venezia sono conservate invece alcune armi miste, sia balestra che arma da fuoco, risalenti ai primi anni del XVI secolo.

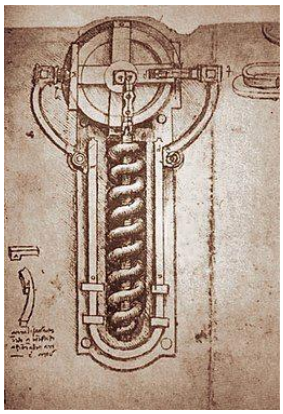


FIGURE 2-11 MECCANISMO A RUOTA, CODICE ATLANTICO

Sebbene non esista una paternità certa per questo meccanismo, il suo sviluppo avvenne probabilmente tra il 1475 e il 1525. Alcune teorie ne accreditano l'invenzione a Leonardo Da Vinci sulla base di alcuni disegni presenti nel "Codice Atlantico" (fig. 2-11)e datati 1482, altre a Jonathan Kiefuss, inventore tedesco residente a Norimberga gli inizi del XVI secolo, nel codice Loffelholz (fig. 2-12) stampato proprio a Norimberga nel 1505 sono presenti i disegni costruttivi di questo meccanismo, ma l'esistenza dello stesso Kiefuss è dubbia [34]. Chiunque sia stato l'inventore di questo meccanismo di accensione, basandosi su alcuni proclami emananti dai governanti europei dell'epoca per proibirne l'uso, si può affermare che esso fosse abbastanza diffuso già nel primo quarto del XVI secolo, il proclama dell'imperatore Massimiliano d'Asburgo è datato 1517, quello del duca Alfonso d'Este 1522.

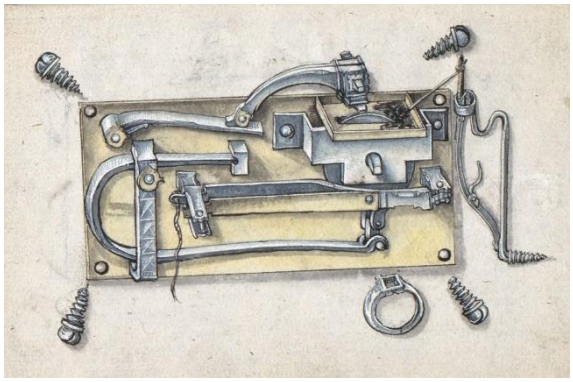


FIGURE 2-12 MECCANISMO A RUOTA, CODICE LUFFELHOLZ

## 2.3.2 Elementi costruttivi

In questo caso siamo di fronte a un meccanismo complesso, molto più complicato come realizzazione sia del predecessore a miccia sia del successore ad acciarino, costituito da non meno di una ventina di componenti e alle volte da più di cinquanta. Con riferimento alla fig. 2-13 saranno elencati i vari elementi costitutivi e le loro principali caratteristiche.

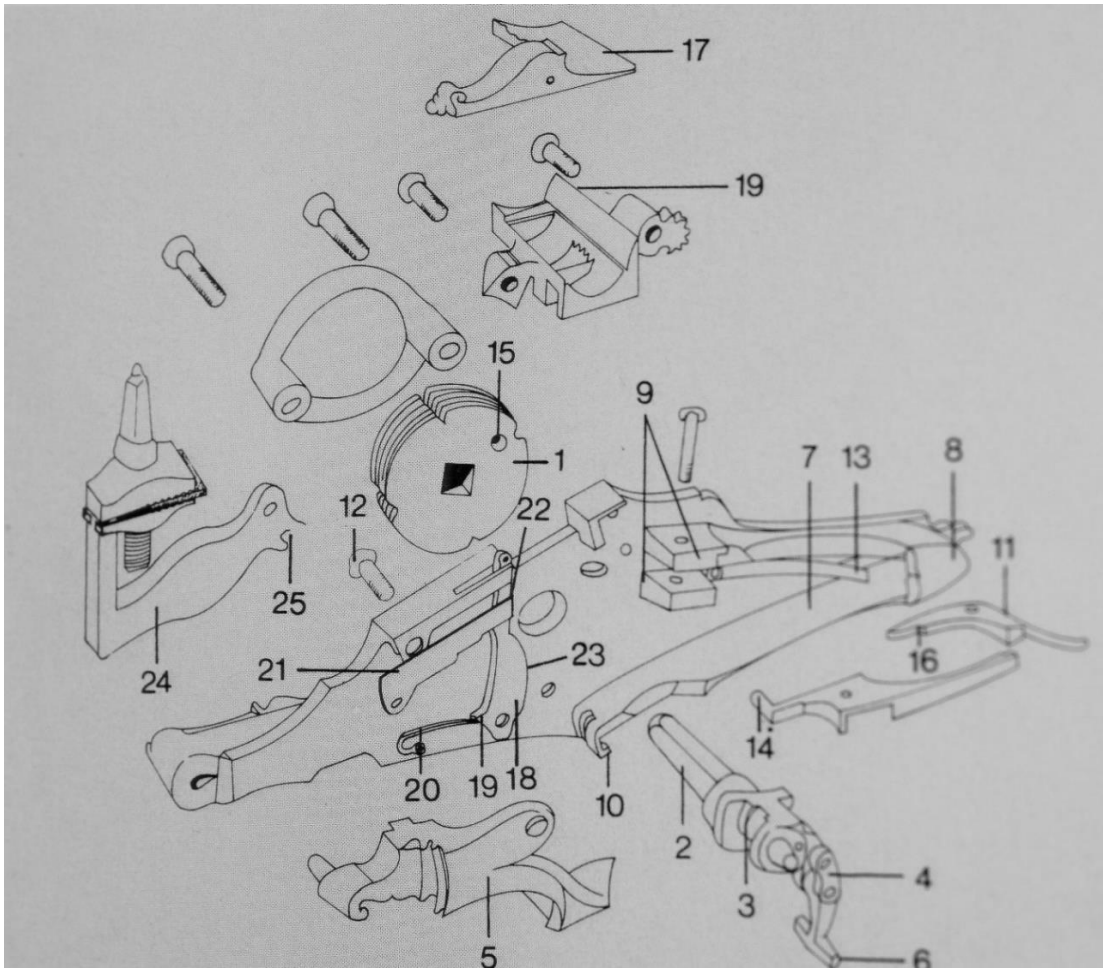



FIGURE 2-13 ELEMENTI COSTITUTIVI DI UN MECCANISMO A RUOTA [37]

Il ruotino (**1**) è un cilindro di acciaio temprato con diametro di circa 50mm e spessore tra i 6 e i 9mm avente sulla superficie laterale profonde scanalature longitudinali interrotte ad intervalli regolari da scanalature trasversali. Presenta due fori, uno quello centrale a sezione quadrata serviva per accogliere l'asse, altro a sezione circolare e posto a circa 2/3 del raggio aveva pareti svasate (**15**) e accoglieva il dente.

L'asse (**2**) è un perno avente all'estremità che andrà ad inserirsi nel ruotino sezione quadrata e terminante all'altra estremità con un collo d'oca (**3**) a cui era fissata una catena di tipo Galle (**4**), simile a quella dell'odierna catena da bicicletta, di solito di sole tre maglie delle quali l'ultima ha una struttura a T all'estremità libera (**6**). Il perno appoggia sulla cartella e su un robusto elemento che prende il nome di briglia (**5**). Il mollone del rotino (**7**) avente forma a V è ancorato alla cartella tramite un rilievo posteriore a testa espansa (**8**) e a due masselli (**9**) all'estremità del braccio più corto, il braccio più lungo termina invece con un doppio gancio (**10**) sagomato per accogliere la

struttura a T. Per effettuare l'inserimento della struttura a T occorre comprimere parzialmente il mollone con il risultato che esso risulta sempre in parte caricato. La leva di scatto è inserita tra i due masselli e fissata tramite la vite del mollone che funge anche da suo asse, ad un'estremità termina con il dente (**14**) una struttura ad angolo retto rispetto al resto della leva che passando attraverso un foro nella cartella era in contatto con la superficie interna del ruotino. La pressione del dente sul ruotino e assicurata da una molla a V (**13**) che tende a spingere verso l'esterno l'estremità della leva di scatto opposta al dente. Il ruotino tende sempre a ruotare sotto l'effetto del mollone e ad espellere il dente, operazione facilitata dalle pareti svasate del suo foro. All'avanzare del dente di scatto, sotto l'effetto del ruotino, la parte opposta della leva di scatto si solleva e permette l'avanzamento della leva di grilletto che tramite una sua parte detta gradino (**16**) impedisce ulteriori movimenti, questo ovviamente finché non viene ritratta dal tiratore tramite la pressione del grilletto.

**FIGURE 2-14 ARCHIBUGIO A RUOTA, REAL ARMERIA (MADRID), 1546 [37]**

Il copriscodellino (**17**) è articolato su di un braccio piatto (**18**), imperniato nella zona inferiore alla cartella e dotato di tallone (**19**) su cui agisce una molla a lamina (**20**). L'azione di questa molla tende a spostare il copriscodellino al di sopra dello scodellino, un'altra molla a lamina (**21**) dotata ad un'estremità di un gancio (**22**) agisce invece da contrasto e può essere esclusa tramite un apposito bottone per le operazioni di ricarica. La parte centrale del braccio piatto è sagomata a gobba (23) ed entra in contatto con il collo d'oca del perno durante lo sparo per aprire automaticamente il copriscodellino. Il copriscodellino nelle versioni più arcaiche era ad apertura manuale e non erano necessarie quindi il perno piatto (**18**) e le molle (**20** e **21**). La serpe del meccanismo a miccia è sostituita dal cane, leva ad un braccio con funzione analoga utilizzando una pietra focaia invece della miccia. Il cane (**24**) è imperniato alla cartella e tra le ganasce, regolate tramite una vite ad occhiello regge la pietra. All' estremità è dotato di un doppio tallone (**25**) su cui agisce una molla a V. La massima pressione era presente nelle due posizioni estreme, a contatto con il copriscodellino e ruotato completamente indietro. Per impedire che partisse un colpo a causa di un'involontaria pressione del grilletto oppure di una non corretta tenuta del meccanismo interno poteva essere presente una sicura manuale aggiuntiva che andava a bloccare la leva di scatto. In alternativa si poteva mantenere il cane ruotato lontano dallo scodellino, un eventuale scatto avrebbe liberato il ruotino ma non generato scintille. Come si può immaginare dalla lunga lista di componenti realizzare un meccanismo di questo genere non era facile e richiedeva conoscenze specifiche, anche la sua riparazione doveva essere effettuata da artigiani esperti e specializzati (fig.2-14 e fig. 2-15), non poteva certo essere fatta da un semplice fabbro di paese come poteva invece avvenire per il meccanismo a miccia.

**FIGURE 2-15 PISTOLA A RUOTA, REAL ARMERIA (MADRID), 1545 CIRCA [37]**

## 2.3.3 Preparazione e caricamento

L'adozione del meccanismo a ruota semplificò molto le operazioni di caricamento e preparazione al fuoco rispetto a quello a miccia, e al contrario di quest'ultima non sono qui presenti rischi di accensione accidentale della polvere in quanto tutte le operazioni sono eseguite in assenza di fiamme o scintille. L'immagine 2-16 illustra le operazioni che era necessario effettuare tra uno sparo e il successivo.

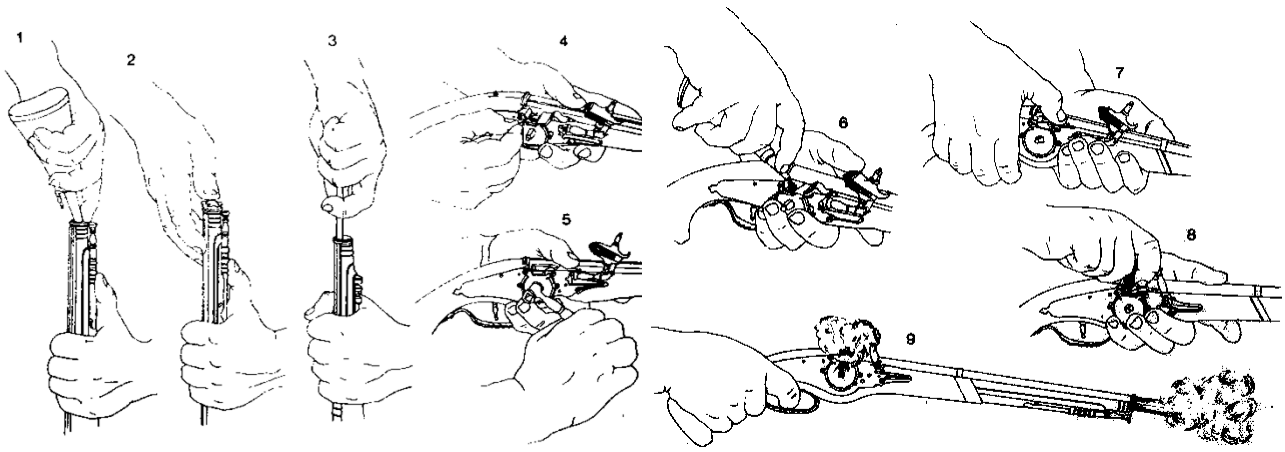



FIGURE 2-16 SEQUENZA DI CARICAMENTO DI UN'ARMA A RUOTA [37]

1. Inserire la carica di polvere in canna
2. Inserire in canna il proiettile e uno stoppaccio di carta o canapa
3. Comprimere il contenuto della canna con il calcatoio
4. Pulire il focone con uno specillo
5. Armamento della ruota per mezzo della chiave, durante la carica il mollone del ruotino entra in tensione e raggiunto il punto di carica il dente entra nell'apposito foro ricavato ne ruotino.
6. Aprire il copriscodellino e versare nello scodellino la polvere
7. Chiudere il copriscodellino, premendo un apposito bottone che libera una delle molle a lamina.
8. Armare il cane portando la pietra ad appoggiarsi con il copriscodellino

Sebbene il numero di operazioni da effettuare rimanesse considerevole, a differenza del caso precedente si avevano entrambe le mani completamente libere per eseguirle e non c'erano rischi di esplosioni accidentali. Al termine del caricamento l'arma poteva essere mantenuta armata per lungo tempo senza doversi preoccupare dell'esaurimento della miccia. Ulteriore semplificazione delle operazioni di caricamento si ebbe con l'introduzione delle cartucce [34], costituite da un involucro di carta contenente la polvere per un colpo, ma quasi mai la palla. In questo caso dopo aver aperto la cartuccia il tiratore versava una piccola parte della polvere nello scodellino e poi il resto della cartuccia in canna seguita dalla palla, la carta della cartuccia fungeva anche da stoppaccio.

Elemento fondamentale con questo meccanismo diventa la chiave, si tratta di un elemento semplice e di facile realizzazione ma indispensabile per la ricarica del ruotino, il suo smarrimento durante una battaglia trasformava una costosa arma da fuoco in un semplice bastone. A causa di questo rischio era spesso legata all'arma tramite una cordicella.

### 2.3.4 Funzionamento

A momento dello sparo con il cane in posizione armata il tiratore preme il grilletto, questo ritrae la leva del grilletto lasciando la leva di scatto libera di muoversi. Il ruotino riesce a questo punto ad espellere il dente e inizia a girare velocemente al distendersi del mollone, nelle versioni più avanzate la pressione del grilletto apre anche automaticamente il copriscodellino, in altre l'apertura è manuale. Le scintille innescano la polvere contenuta nello scodellino da qui il focone e la carica in canna. Inoltre, l'arma poteva essere armata preventivamente per essere costantemente pronta al fuoco a comando e si riduceva di molto l'influenza degli agenti atmosferici. In contrasto con la complessità costruttiva del meccanismo il suo utilizzo risulta molto semplice. La semplicità di utilizzo unita, come visto nei paragrafi precedenti, a una procedura di caricamento semplificata e alla possibilità di realizzare armi a canna corta aprirono la strada a nuovi utilizzi per le armi da fuoco. In ambito miliare ridiedero lustro alla cavalleria, in declino dopo le ripetute sconfitte ad opera della fanteria, si ricordano le battaglie Crécy, Agincourt e Poitiers e la guerra hussita. L'introduzione delle pistole a ruota permetteva alla cavalleria di avvicinarsi al nemico fare fuoco e poi ritirarsi velocemente per ricaricare, e con un sufficiente numero di cavalieri disposte in file successive, di mantenere un fuoco costante. Per contro data l'elevata complessità costruttiva, delle riparazioni e come conseguenza del costo di entrambe, l'uso del meccanismo a ruota non si affermò mai per la fanteria da campo se non per i corpi di élite come le guardi del corpo. In ambio civile soppiantò le armi a miccia per attività sportiva e venatoria solo nel caso delle classi più abbienti (fig. 2-17), ma fu soprattutto nelle attività criminali che ebbe in importante impatto. Era ora possibile produrre armi compatte che potevano essere nascoste sotto i vestiti e armate preventivamente, era altresì possibile tendere agguati senza il bersaglio fosse messo in allarme dal fumo e dal bagliore della miccia.
La facilità di impiego in attività losche è alla base dei proclami emanati, come si è visto in precedenza, nella prima metà del XVI secolo da molti governanti che vietavano la produzione e il possesso di armi a ruota all'interno dei confini cittadini, soprattutto quelle di quelle a canna corta.

**FIGURE 2-17 CARABINA A RUOTA, MUSEO NAZIONALE D'ARTIGLIERIA (TORINO), 1630 CIRCO [37]**

## 2.4 Meccanismo di accensione ad acciarino

Basato, come il precedente meccanismo a ruota, sull'utilizzo di scintille generate dallo sfregamento di una pietra focaia su un supporto di acciaio, risulta molto più semplice nella concezione e nella realizzazione rispetto al suo predecessore.

### 2.4.1 Nascita

Come per i casi precedenti anche per questo non si hanno indicazioni precise riguardo all'invenzione del meccanismo di accensione ad acciarino, anche detto focile. Molto probabilmente fu sviluppato intorno alla metà del XVI secolo, il più antico esempio oggi noto è una piastra a doppio meccanismo ruota e acciarino conservata al Museo d'artiglieria di Torino [34] e datata tra il 1550 e il 1600. Altre testimonianze a favore di questa ipotesi si possono ritrovare nei proclami emanati da diversi regnanti per limitarne o proibirne il possesso e l'uso, similmente a quanto accaduto qualche decina di anni prima per le armi a ruota. Una legge del 1542 emanata dal parlamento britannico su proposta del re Enrico VIII vietava il possesso di fucili e archibugi a canna corta (fig. 2-18) a chi non un reddito annuale superiore alle cento sterline, nella convinzione gli assassini, le violenze e i delitti fossero limitati alle classi meno abbienti [35]. Anche se con differenti modalità leggi simili furono emanate in Italia e nelle terre d'Asburgo. Dubbio è anche l'area geografica che ha dato i natali a questo meccanismo, probabilmente esso fu sviluppato in maniera indipendente in più luoghi. Una prima versione più semplice che rimase nota con il nome di Snaphaunce ebbe origine probabilmente nei paesi bassi e da lì si diffuse in nord Europa, paesi scandinavi, Germania, isole britanniche e grazie alle rotte commerciali marittime anche in gran parte dell'Africa. Una seconda versione, più evoluta, nota ora come Misquelet, ma questo nome deriva da un periodo successivo, fu sviluppata nei paesi mediterranei, forse in Italia o in Spagna. Sebbene risulti più evoluta del precedente Snaphaunce il Misquelet è un suo concorrente non un discendente. Da queste prime varianti se ne svilupparono molte altre a seconda delle aree geografiche ma nessuna di esse riuscì ad imporsi sullo scenario europeo fino all'avvento della versione definita acciarino francese o moderno.

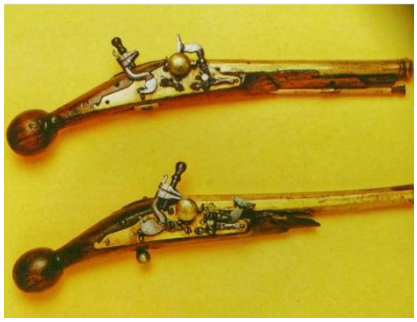


FIGURE 2-18 PISTOLE SNAPHANCE, SALE D'ARMI DEL CONSIGLIO DEI DIECI

Si tratta del primo sistema di accensione di cui si può identificare con ragionevole certezza l'ideatore. Si tratta di Marin Le Bougeoys, costruttore ci congegni meccanici, pittore e scultore, discendente da una famiglia di artigiani orologiai fabbri e armaioli, unì le migliori caratteristiche delle versioni precedenti e migliorò il dente d'arresto fino a creare un sistema di sicura che si poteva finalmente definire tale. La nuova versione venne alla luce tra il 1610 e il 1615 e verso l'inizio del XVII secolo era alla base delle armi da fuoco utilizzate dai maggiori eserciti europei in cui soppiantò le più antiquate armi a miccia. Univa infatti la semplicità costruttiva, e al conseguente costo contenuto e facilità di riparazione, del meccanismo a miccia con i vantaggi di carica e utilizzo dei meccanismi a ruota.

## 2.4.2 Elementi costitutivi

Come già visto nel paragrafo precedente molte versioni di questo meccanismo furono sviluppate negli anni, tutte avevano però alcuni elementi in comune che sono ora illustrati con riferimento alla figura 2-19.

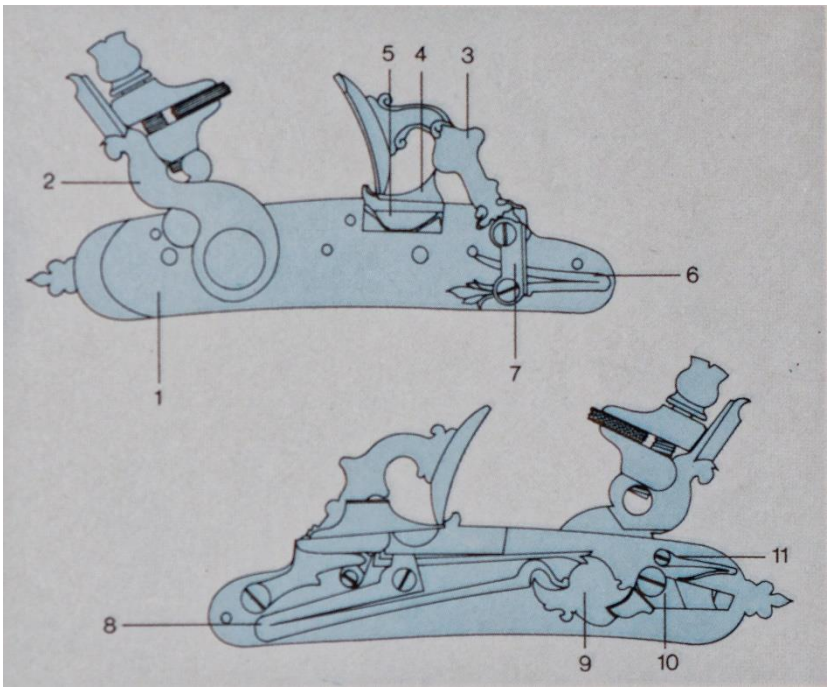



FIGURE 2-19 ELEMENTI COSTITUTIVI DI UN MECCANISMO AD ACCIARINO [37]

Il meccanismo era montato su di una piastra metallica detta cartella(**1**) a cui era solidale lo scodellino. Lo scodellino(**5**) era sempre dotato di un copriscodellino(**4**) apribile. Era presente un braccio di leva(**2**) imperniato ad un'estremità alla cartella e dotato di ganasce all'estremità opposta. Tra queste due ganasce, la cui distanza era regolabile tramite una vite, era posta e saldamente trattenuta la pietra focaia. Questo braccio di leva fu chiamato con nomi differenti nelle varie lingue, "cane", in italiano a causa della forma che ricordava questo animale che stringe qualcosa in bocca, "cock", in inglese a causa del movimento al momento dello sparo che ricorda un gallo al momento di beccare, e proprio a questa azione deve il nome in olandese "snaphans". Altro elemento sempre presente è una barra in acciaio(**3)** che su cui la pietra focaia andava a battere alla fine della sua corsa, essa prende il nome di martellina. La martellina è mantenuta nella posizione iniziale sopra lo scodellino da una molla(**6**), che prende il nome di molla della martellina, essa ruota sotto l'impatto della pietra focaia. I fissaggi della martellina e della sua molla possono essere collegati tramite una briglia(**7**) per rinforzarli. Il cane è forzato da una molla(**8**) che lo spinge verso la martellina, e gli fornisce lo slancio necessario. Questa molla è detta molla del cane o mollone. A seconda della variante il mollone può agire direttamente sul cane oppure su una noce(**6**) imperniata ad esso all'altra estremità della cartella. Il sistema è poi fornito di un

meccanismo di scatto(**10**) atto a trattenere il cane in posizione armata che è liberato al momento di premere il grilletto.

## *Varianti*

Saranno ora illustrate le prime due avarianti di questo meccanismo a fare la comparsa su panorama europee e la versione finale del processo di evoluzione che sarà poi oggetto di analisi nei capitoli successivi.

### Snaphaunce

Una delle prime varianti di questo meccanismo ad essere sviluppata, le sue prime testimonianze risalgono al 1570-1575, nacque probabilmente in olanda [37].
Il nome come visto nel paragrafo precedente deriva dalla somiglianza del movimento del cane con quello di un gallo che becca il cibo. Una leggenda vuole molto diffusa nel paese d'origine, priva di prove a supporto, vuole che sia stato sviluppato da ladri di pollame per avere un'arma affidabile a basso costo che evitasse di farli scoprire a causa della miccia accesa [35].

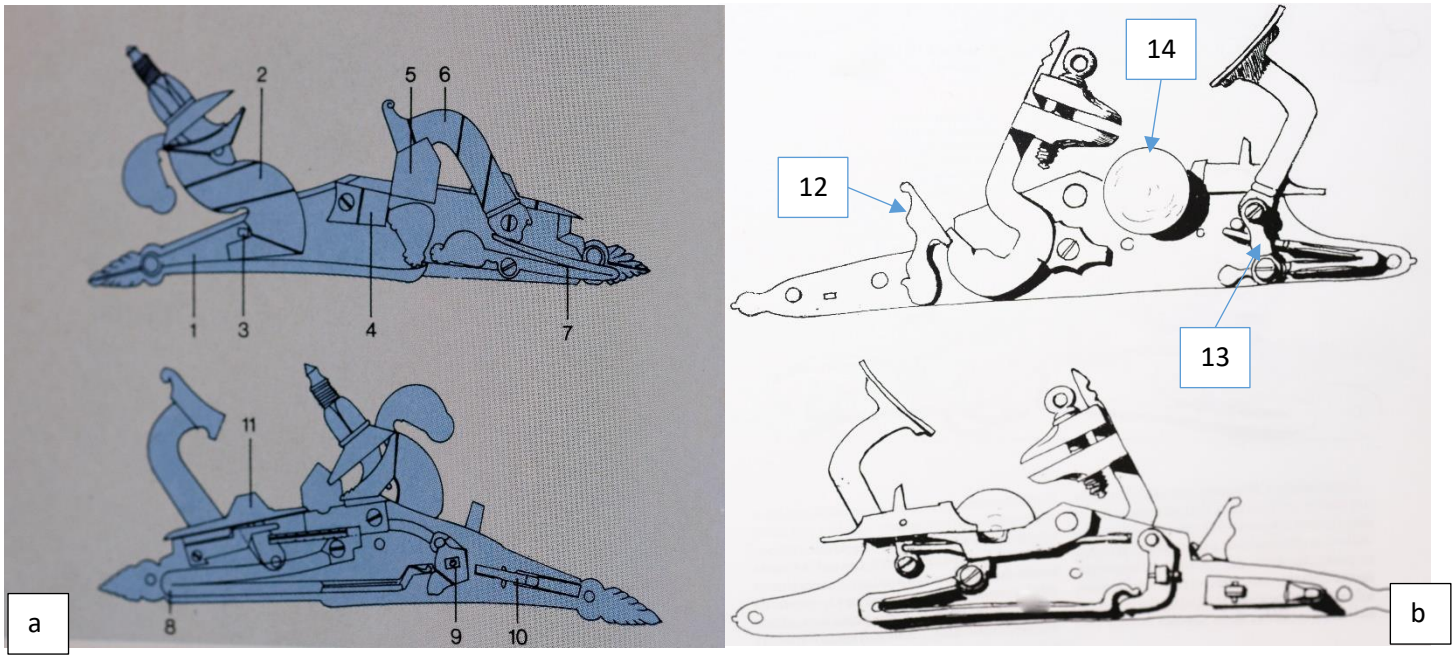



**FIGURE 2-20 ELEMENTI COSTITUTIVI DI UN MECCANISMO SNAPHAUNCE (A)(B) [37] [35]**

Le due figure 2-20a e 2-20b mostrano i principali elementi costitutivi. Il cane (**2**) è di dimensioni più massicce rispetto a quello usato nelle versioni successive ed è previsto un respingente sagomato(**4**), fissato tramite viti all'esterno della cartella(**1**), per arrestarne la rotazione dopo che la pietra focaia è venuta in contatto con la martellina per evitare che essa vada a urtare lo scodellino. Sul lato interno della cartella sul perno del cane è calettata in modo eccentrico la noce (**9**), un elemento sagomato che si interfaccia sia con il mollone(**8**) sia con un sistema di leveraggio che aziona il movimento del copriscodellino (**11**). Quest'ultimo è del tipo a scorrere molto simile a quello utilizzato nelle armi a ruota. La martellina (**6**) è sostenuta da un braccio molto angolato simile a quello usato per il cane nelle armi a ruota. Il movimento della martellina è contrastato da

una molla a V (**7**), la forma della parte centrale, vicino al perno, del braccio della martellina fa sì che la molla tenda riportare il braccio in una delle due posizioni estreme, sopra lo scodellino oppure rovesciata all'indietro. La prima posizione è quella di fuoco (fig. 2-21) la seconda quella di sicura, in quest'ultima infatti anche nel caso di abbattimento del cane la pietra focaia non entra in contatto con la martellina e non sviluppa scintille e non ci sono rischi che parta accidentalmente un colpo. Essedo il copriscodellino guidato dal movimento del cane esso in questo caso si sarebbe comunque aperto e in seguito sarebbe stato necessario rifornirlo di polvere da sparo. Per evitare ciò in alcune versioni è previsto un sistema di sicurezza ulteriore composto da un gancio (**12**) posto dietro il cane che può essere utilizzato per bloccarlo.

**FIGURE 2-21 PETRINALE A SNAPHANCE, NATIONALMUSEET (COPENHAGEN), FINE XVI SECOLO [37]**

Per rinforzare il fissaggio della martellina e della sua molla può essere utilizzata una briglia che unisce le due viti che le collegano. Alle volte è presente un disco (**14**) all'estremità dello scodellino per fornire una parziale protezione al tiratore dalle vampate che vi si sviluppavano. Per quanto riguarda il sistema di scatto esso è composto da un dente (**3**) che passando attraverso la cartella va a bloccare il movimento del cane. Alla pressione del grilletto tramite un sistema di scatto (**10**) esso viene ritratto liberando il cane. Il movimento del dente è orizzontale.

## Micheletto (Miquelet)

Variante del meccanismo ad acciarino di origine mediterranea, si sviluppò prevalentemente in Italia e Spagna e ad oggi non sì è ancora riusciti a determinare con esattezza in quale di questi due paesi nacque.

Pur con grandi similitudini le versioni sviluppate nelle due nazioni mantengono alcune differenze. Le prime testimonianze scritte risalgono al 1580, mentre il più antico esempio noto è la piastra a doppio meccanismo ruota acciarino citata nel primo paragrafo di questo capitolo. Il nome sembra derivi da una leggenda spagnola anche in questo caso legata ad una banda di ladri, chiamati i Migueletes, un esponente della quale inventò questo meccanismo per risolvere il problema legato alla poca furtività permessa dal precedente sistema a miccia durante gli agguati e le razzie notturne [35]. Sebbene folcloristica anche questa leggenda come quella legata allo Snaphaunce ha poco fondo di verità, il nome micheletto non fu usato fino a fine XVIII secolo, in spagna era nota come "patilla", perno, probabilmente per la sporgenza presente alla base del cane, in generale fu noto come meccanismo mediterraneo. La figura 2-22 ne mostra un esempio mentre nella figura 2-23

**FIGURE 2-22 PISTOLA A MICHELETTO, METROPOLITAN MUSEUM OF ART (NEW YORK), 1687 [37]**

sono presentati i principali elementi constitutivi. Era caratterizzato dalla presenza sia del mollone(**1**) che della molla della martellina(**2**) all'esterno della cartella(**3**), se ciò da un lato li esponeva di più ad urti e intemperie dall'altro diminuiva lo spazio necessario all'interno della cassa e aumentava quindi la robustezza della stessa. I molloni di questa variante risultano quindi molto massicci e solidi. La versione italiana e quella spagnola si distinguono prevalentemente per la direzione di azione del mollone sul cane(**4**), nella parte anteriore spingendo verso il basso la versione italiana, agendo nella parte posteriore e verso l'alto quella spagnola. Il cane è dotato di

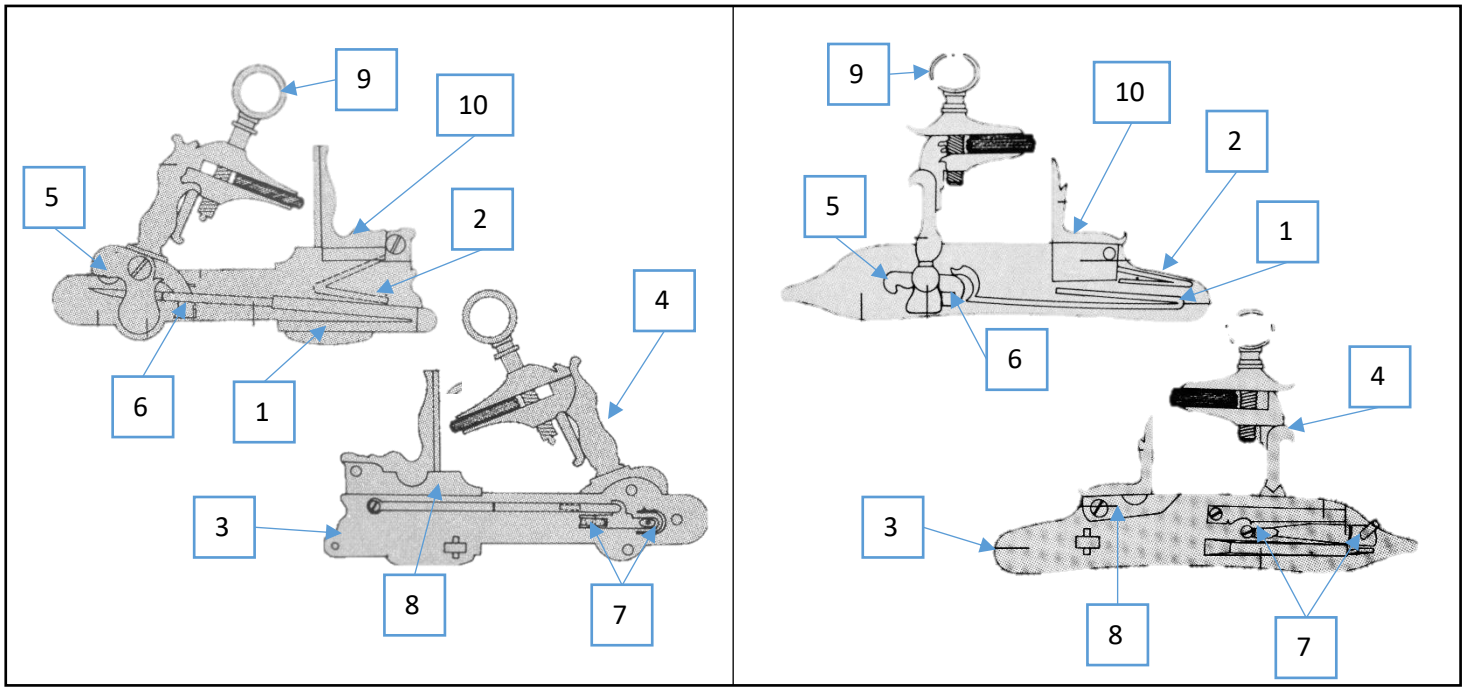



FIGURE 2-23 ELEMENTI COSTITUTIVI DI UN MECCANISMO MIQUELET [37]

due becchi nella parte inferiore vicino al suo perno, prendono nome di tallone (**5**) quello posteriore e sperone(**6**) quello anteriore. Essi servivano per bloccare la rotazione del cane, tramite opportuni becchi(**7**) passanti nella cartella, in due differenti posizioni. Il tallone serviva a bloccarlo nella posizione armata come già visto per le precedenti versioni, lo sperone era usato per mantenerlo in un'altra posizione, definita di mezzo cane, intermedia tra quella armata e quella abbattuta sullo scodellino.

La posizione di mezzo cane era una posizione di sicurezza, il mollone non era abbastanza carico per fa abbattere il cane e allo stesso tempo la posizione era abbastanza arretrata da permettere di armare lo scodellino(**8**). I due becchi di arresto si ritraevano al momento di premere il grilletto. Il sistema con i due becchi evita la necessità della noce dall'altro lato della cartella. La ganascia del cane è azionata da una vite ad anello(**9**) per facilitarne la movimentazione anche in mancanza di cacciavite o altri strumenti. Soprattutto per i meccanismi spagnoli l'angolo di impatto della pietra focaia sulla martellina è particolarmente favorevole, al punto che non è necessario che la pietra sia sagomata ad hoc ma una qualsia forma è sufficiente per il suo funzionamento. Rispetto alla versione nordica quella mediterranea introduceva una notevole semplificazione del copriscodellino, esso era un tutt'uno con la martellina, il nuovo componente prese il nome di

batteria(**10**). Era composto da una piastra a L incernierata all' estremità più lontana dal cane, quando il lato verticale veniva colpito della pietra focaia esso si ribaltava scoprendo lo scodellino e allo stesso tempo produceva scintille che vi cadevano dentro. Questa semplificazione accorpava la martellina, il copriscodellino ed eliminava la necessità del disco e della briglia tra martellina e la sua molla, riducendo quindi il costo del meccanismo. La faccia verticale della martellina è profondamente rigata per favorire la produzione di scintille, alle volte per semplificare la manutenzione la faccia verticale è divisa in due parti unite ad incastro, di cui quella interna è solidale al copriscodellino quella esterna su cui va ad impattare la pietra può essere sostituita quando usurata. Le semplificazioni rispetto allo snaphaunce permisero al micheletto di imporsi in alcuni ambienti extraeuropei, Arabia, Turchia, Persia, Russia [35] in cui era ancora molto diffuso il sistema a miccia, ma non furono invece sufficienti a farlo imporre nel nord Europa e in Marocco dove orami l'arma di origine olandese era ampiamente in uso.

## Moderno o alla francese

Con poche modifiche questa fu la versione del meccanismo ad acciarino che domino il panorama di tre continenti, Europa, America e Asia, tra il la fine del XVII secolo e gli inizi del XIX. Come visto all'inizio del paragrafo per questa versione è la prima di cui si conosce con ragionevole certezza l'inventore e da questo deriva il nome alla francese.

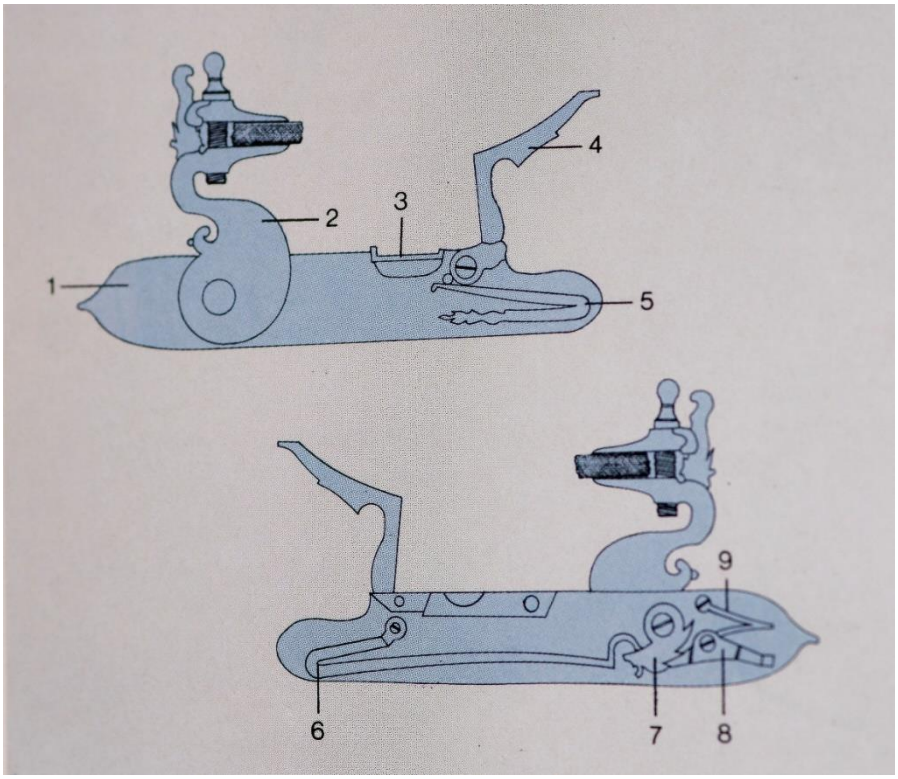



**FIGURE 2-24 ELEMENTI COSTITUTIVI DI UN MECCANISMO MODERNO [37]**

Il sistema di azionamento (fig. 2-24) è con mollone (**6**) interno che agisce sulla noce (**7**) e non direttamente sul cane (**2**), scelta derivata dallo snaphans. Il cane è a collo dritto nei modelli più arcaici, mentre dalla metà del XVII secolo è quasi sempre realizzato a collo di cigno, spesso a

doppio collo per migliorarne la robustezza (fig. 2-25 e fig. 2-26). Dal micheletto è invece derivato l'utilizzo della batteria (**4**) elemento che unisce la funzione di copriscodellino e di martellina. La molla della batteria (***5***), una molla a V che contrasta l'apertura della batteria stessa è insieme al cane l'unico elemento posto all'esterno della cartella(**1**). Lo scodellino(**3**) è un elemento separato e fissato tramite viti alla cartella.

Lo scatto (**8)** è di concezione nuova differente sia da quello usato per le piastre a ruota sia da quello usato nelle precedenti versioni ad acciarino, esso agisce in direzione verticale e non più orizzontale. Contrastato da una molla a V, la molla dello scatto (**9**) e liberato dal grilletto agisce su due tacche ricavate nella noce che corrispondono alla posizione di sicura e a quella di sparo. Questa nuova direzione di azionamento, attribuita a Marin Le Bourgeoys, è la vera innovazione di questa versione, un sistema di sicurezza integrato nel meccanismo che permette di avere realmente un'arma sicura senza necessitare dell'aggiunta di ganci manuali. Come si può vedere nell'immagine alla pagina precedente (fig. 2-24) precedente il numero di componenti necessari è molto esiguo, questo insieme alla robustezza del sistema e alla facilità di riparazione lo resero la scelta preferita di tutti gli eserciti dell'epoca, a partire dal XVIII secolo sostituì sia lo snaphance che il micheletto.

FIGURE 2-25 MECCANISMO CON CANE A DOPPIO COLLO

Nel corso della sua vita operativa questo tipo di meccanismo subì numerose modifiche minori volte soprattutto a ridurne l'usura e la corrosione, senza però modificarne sostanzialmente il funzionamento. Un primo rinforzo riguardo gli assi di rotazione del cane e della batteria che tendevano a deformarsi a causa dei continui urti. Per la batteria si introdusse una briglia solidale allo scodellino che bloccava la testa della vite, per il cane si sovrappose alla noce una briglia che ne univa il fulcro a quello della leva di scatto.

FIGURE 2-26 COPPIA DI PISTOLE A PIETRA FOCAIA, MUSÉE D'ARMES (LIEGI), 1775 CIRCA [37]

Per quanto riguarda la corrosione, essa era soprattutto alla combustine della polvere nera. Per ovviare al problema si procedette a sostituire gli elementi in ferro a maggior contatto con la polvere con equivalenti in ottone, lo scodellino subì questa modifica e anche il focone, il quale invece di un foro nella canna si trasformò in un cilindretto di ottone forato e filettato che era poi avvitato nella parete della canna. L'impiego dell'ottone in funzione del ferro avvenne prevalentemente in campo militare, in campo civile soprattutto per le armi di pregio si ricorse, per gli stessi componenti, all'oro o al platino. Ultima miglioria di notevole importanza fu sul finire del XVIII secolo l'invenzione di uno scodellino impermeabile [34]. Si componeva di un copriscodellino con il dorso molto bombato e sagomato nella parte inferiore in modo da avvolgere completamente il bordo dello scodellino proteggendoli da pioggia e infiltrazioni di umidità. Lo

scodellino appena presentato prende comunemente il nome di “cucchiaino da tè” e fu ampiamente utilizzata in campo civile, meno in campo militare dato che a quell’epoca andavano già diffondendosi i meccanismi a percussione.

## 2.4.3 Preparazione e caricamento

Il caricamento e la preparazione al fuoco dell’arma non differiscono di molto dal caso del meccanismo a ruota, semplificandosi ulteriormente con l’eliminazione del caricamento tramite un elemento esterno meccanismo, la chiave di caricamento, e quindi potenzialmente smarribile. Le azioni necessarie al caricamento sono le seguenti (fig. 2-27):

- Inserire la carica di polvere in canna
- Inserire in canna il proiettile e uno stoppaccio di carta o canapa
- Comprimere il contenuto della canna con la bacchetta
- Arretrare il cane in posizione di mezza monta, se disponibile
- Pulire lo scodellino con lo specillo
- Versare nello scodellino la polvere e poi chiudere il copriscodellino, o la batteria.
- Armare il cane portandolo in posizione arretrata, tutta monta

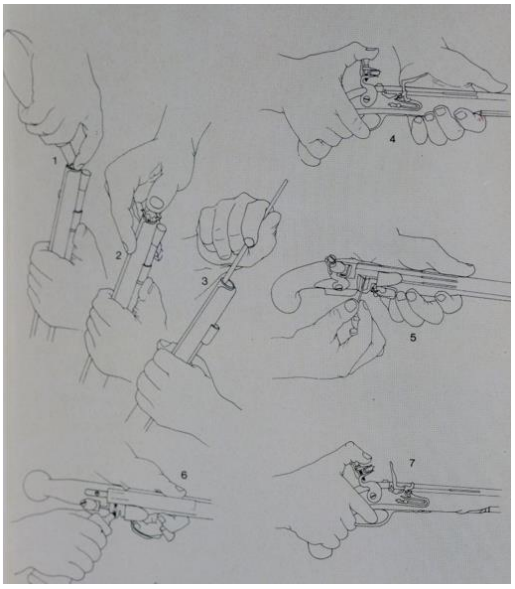



FIGURE 2-27 SEQUENZA DI CARICAMENTO DI UN MECCANISMO AD ACCIARINO MODERNO [37]

Con l’avvento di questo meccanismo, soprattutto della variante moderna, velocizzarono molto le operazioni di caricamento, anche grazie all’introduzione del bossolo in carta, al punto che in un trattato della seconda metà del XVIII [35]troviamo che alle reclute dell’esercito inglese era richiesto di saper sparare quindici colpi in tre minuti e tre quarti, un colpo ogni quindici secondi.

## 2.4.4 Funzionamento

Il funzionamento del meccanismo ad acciarino è concettualmente lo stesso per tutte le versioni analizzate. Quando il grilletto viene premuto si movimenta il sistema di scatto, vincendo l’azione delle molle, e lasciando libero di ruotare il cane. Nel caso dello snaphance e del micheletto, come anche di tutte le varianti da loro derivate l’azione del grilletto si traduce in un movimento orizzontale, lungo lo spessore della cartella, dei denti dello scatto, nel caso dell’acciarino moderno il movimento è verticale. La conseguenza per tutti e tre i casi è una veloce rotazione del cane sotto effetto del mollone. Il cane si abbatte sulla martellina generando scintille che innescano la polvere nello scodellino. Nel caso del micheletto e della versione moderna è lo stesso impatto del cane sulla batteria a scoprire lo scodellino, per lo snaphance ciò avviene tramite un leveraggio comandato dalla rotazione della martellina, sempre in questa versione il movimento del cane è arrestato da un elemento respingente. Come per tutti i meccanismi analizzati in precedenza dallo scodellino le scintille si trasmettono attraverso il focone fino all’interno della camera.

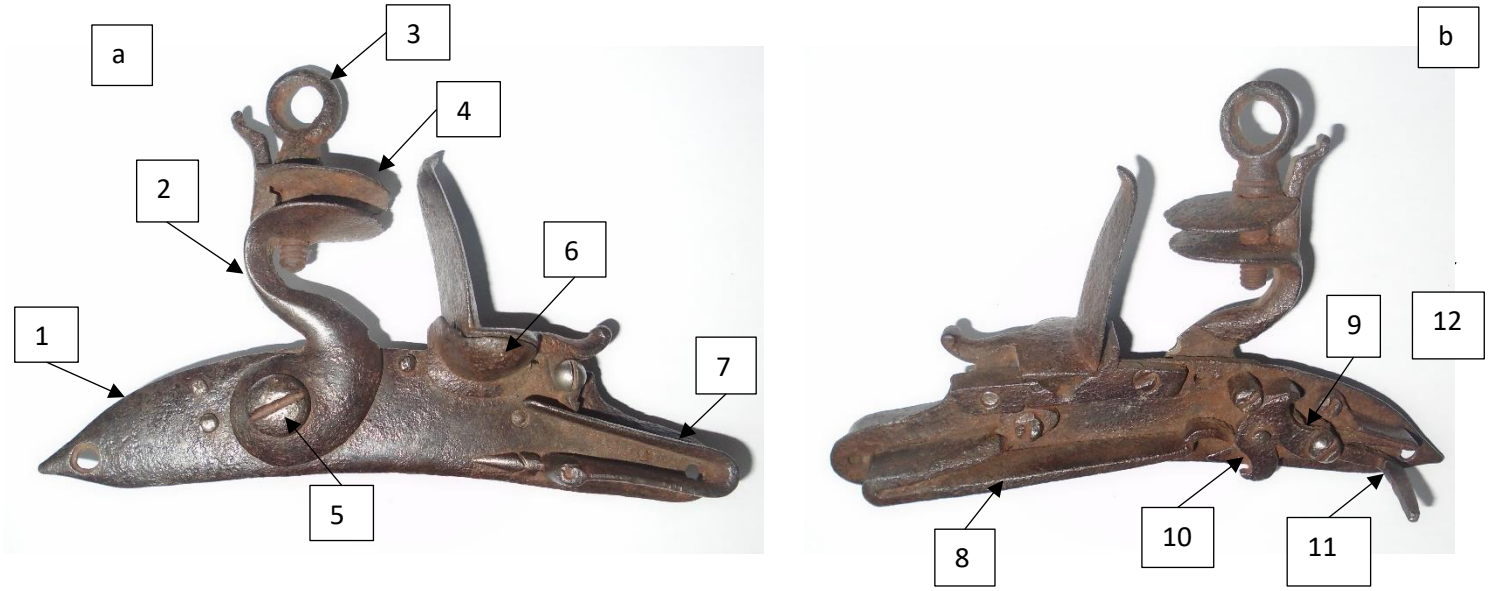
# 3 Analisi meccanismo di accensione

## 3.1 Componente

Il componente che sarà oggetto dei successivi due capitoli è un meccanismo di accensione a pietra focaia prelevato da un fucile messo a disposizione per analisi dalla “Fondazione Brescia Musei”.

### 3.1.1 Architettura e datazione

Il componente sotto analisi è un meccanismo di accensione a pietra focaia, che in base alle sue caratteristiche è stato classificato come acciarino moderno o alla francese.
Le figure 3-1°a e 3-1b ne presentano gli elementi costitutivi prima dello smontaggio.




1 Piastra; 2 Cane; 3 Vitone del cane; 4 Piattello del cane; 5 Vite del cane; 6 Scodellino; 7 Molla della batteria; 8 Molla del cane; 9 Noce; 10 Briglia; 11 Leva dello scatto; 12Molla dello scatto

FIGURE 3-1 COMPONENTE ANALIZZATO, ELEMENTI COSTITUITIVI, RECTO (A) E VERSO (B)

Numerosi elementi concorrono a questa decisione, una serie di scelte progettuali che, come è tipico di questa variante, uniscono i principali vantaggi delle versioni snaphaunce e micheletto.
Dal design snaphaunce ritroviamo:

- La posizione interna della molla del cane, anche detto mollone. Questa soluzione permette di alloggiare quasi tutti i componenti all’ interno della cassa evitando danneggiamenti dovuti ad urti e proteggendoli dagli agenti atmosferici.
- La forma snella del cane generalmente definita a collo di cigno.

- La presenza di una noce collegata al cane e posizionata dal lato opposto della cartella rispetto ad esso. Questo elemento è necessario per poter permettere l'alloggiamento interno della molla del cane

Dal design micheletto invece:

- Numero molto limitato di componenti. Ciò permetteva di contenere i costi del meccanismo e di semplificare le operazioni di riparazione e manutenzione
- La presenza della batteria, un unico elemento che unisce le funzioni di martellina e copriscodellino, la conseguente scomparsa del leveraggio necessario per aprire il copriscodellino
- Vitone del cane con estremità ad occhiello per permettere l'uso di una semplice bacchetta senza necessità di utensili specifici. Questa scelta è tipica della variante micheletto, al contrario non è molto usata nella variante moderna.

Differente dalle versioni precedenti e caratteristico dell'acciarino moderno è invece il sistema di scatto ad azione verticale e non orizzontale. Sono altresì assenti ganci o altri sistemi di arresto del cane a parte quello costituito dall'interfaccia tra la noce e la molla dello scatto.
Mancano invece alcuni elementi che saranno poi caratteristici delle versioni più evolute di acciarino moderno:

- Cane a doppio collo. Variante sviluppata per rinforzare il componente che sarà adottata quasi ovunque a partire dagli inizi del XIX secolo.
- Briglia di rinforzo per la vite della batteria. In alternativa erano utilizzate viti di diametro maggiore.

La variante acciarino moderno colloca il componente come successivo al 1620, la struttura pur non appartenendo alle versioni più evolute presenta già alcuni miglioramenti che furono introdotti successivamente rispetto ai primi meccanismi sviluppati. Un esempio è la presenza della braghetta un rinforzo per la vite del cane posto sopra la noce che la unisce al fissaggio della leva dello scatto.
Basandosi su queste osservazioni e confrontano il meccanismo con numerose schede di armi presenti in letteratura [37] [38], il meccanismo è stato datato alla seconda metà del XVIII secolo.

### 3.1.2 Ipotesi materiali e trattamenti

Per ciascuno dei componenti che costituiscono il meccanismo si sono stimati i materiali e i trattamenti termici più probabili sulla base della loro funzione. Alcuni di questi componenti saranno poi analizzati nei successivi capitoli per verificare la veridicità di queste ipotesi.

#### *Cane*

Componente che per la sua funzione è soggetto a molteplici e ripetuti urti. Nelle versioni più pregiate era realizzato in acciaio trattato tramite tempra e rinvenimento, e ciò permetteva di avere un design più snello. La tempra era effettuata in olio per ridurne la drasticità ed era sempre seguita da un rinvenimento per evitare di infragilire il componente finale. Nel caso delle versioni più povere si utilizzava ferro e/o acciaio poco pregiato e si ricorreva ad un aumento dello spessore

del componente per compensare le minori caratteristiche meccaniche del materiale. All'estremità superiore ha un foro filettato in cui si inserisce la vite del cane, l'applicazione di un trattamento di tempra e rinvenimento aiuta a ridurre l'usura del filetto.

### *Piattello del cane*

Componente non soggetto ad elevati stress meccanici, ha un foro passante non filettato per l'inserimento del vitone del cane. Realizzato in ferro e senza trattamento termico.

### *Vitone del cane*

Componente utilizzato per mantenere in posizione il piattello del cane e di conseguenza la pietra focaia. Come tutte le viti è solitamente realizzata in acciaio per ridurre l'usura sui filetti.
La filettatura era realizzata a mano tramite filiera a sua volta creata tramite maschiatura.
Il processo iniziava realizzando il maschio, esso era ricavato lavorando con una lima una barra di acciaio temprabile. Si creava così il filetto sul maschio e inseguito si temprava l'utensile così realizzato. Esso era successivamente utilizzato per realizzare la filiera, si procedeva inserendo il maschio in un preforo realizzando la filettatura per asportazione di materiale, anche in questo caso l'utensile era realizzato in acciaio e temprato a fine lavorazione. A questo punto si avevano a disposizione un maschio e una filiera compatibili, che potevano essere utilizzati per creare fori e filettati e le viti corrispondenti. Fino all'età napoleonica queste filettature non erano standardizzate e ogni coppia maschio filiera era unica per restituire elasticità al pezzo.

### *Molla del cane*

Principale elemento elastico del meccanismo, sempre realizzato in acciaio a medio alto tenore di carbonio. Oggi le molle sono spesso realizzate in acciaio armonico ad alto contenuto di silicio, anche in età rinascimentale si optava spesso per questo tipo di leghe anche se non si era a conoscenza della composizione chimica. La selezione del materiale era effettuata per via empirica, ad esempio verificandone la lavorabilità tramite una lima. A causa delle differenze di durezza dovute alla composizione chimica delle varie leghe in alcuni casi era la barra di materiale ad usurarsi in altri la stessa lima. Dopo la formatura erano sottoposte a trattamento di tempra sempre seguito da rinvenimento.

### *Batteria*

Componente sottoposto a continui e ripetuti urti con la pietra focaia durante i quali si generano scintille. Affinché questo avvenga occorre che la faccia di impatto abbia durezza molto elevata, questo non è invece strettamente necessario per la restante parte del componente. Per ottenere questo scopo era possibile operare in almeno con differenti modalità: tempra completa, tempra localizzata e riporto di materiale.

1. Il primo metodo prevede l'utilizzo di acciaio a medio/alto tenore di carbonio sottoposto a tempra e rinvenimento su tutto il componente.
2. Il secondo metodo prevede di riscaldare fino alla temperatura necessaria la faccia di impatto. Senza preoccuparsi della temperatura, in genere inferiore, raggiunta dalla

restante parte del pezzo. Prima dell'invenzione delle moderne tecnologie di misura si giudicava la temperatura dell'acciaio tramite il colore raggiunto, in questo caso lo si voleva al color rosso ciliegia. Quando la zona voluta ha raggiunto la temperatura giusta si immerge il componente in olio. Al termine del processo si ottiene una zona ad alta durezza nell'area interessata e a durezza via via decrescente man mano che ci si allontana da essa.

3. Il terzo metodo permette l'utilizzo di un materiale più scadente per realizzare il corpo della batteria, acciaio a minor tenore di carbonio o ferro. Su di esso si applica poi un'aggiunta di materiale ad alta durezza, acciaio ad alto tenore di carbonio, unendo il tutto tramite saldatura, anche a stagno, oppure fissaggio ad interferenza. Questo metodo permetteva a fine vita del componente di sostituire solamente il materiale di riporto.

### *Molla dello scatto*

Elemento elastico, realizzato in acciaio ad alto tenore di carbonio sottoposto infine a tempra e rinvenimento. Valgono le stesse considerazioni fatte per la molla delle cane.

### *Vite di fissaggio del cane*

Vite utilizzata per creare un vincolo assiale tra il cane e il perno del cane. Per quanto riguarda il materiale e il trattamento valgono le stesse considerazioni fatte per il vitone del cane.

### *Vite di fissaggio della batteria*

Vite utilizzata per creare un vincolo assiale tra il cane e il perno del cane. Per quanto riguarda il materiale e il trattamento valgono le stesse considerazioni fatte per il vitone del cane.

### *Molla della batteria*

Elemento elastico, realizzato in acciaio a medio alto tenore di carbonio sottoposto infine a tempra e rinvenimento. Valgono le stesse considerazioni fatte per la molla delle cane.

### *Cartella*

Elemento usato come base e supporto per l'intero meccanismo. A questo componente è richieste un'alta resistenza all'usura ma non una buona tenacità. Era realizzato in acciaio a medio alto tenore di carbonio e successivamente sottoposto a trattamento di tempra ma non a successivo rinvenimento. Per massimizzare la drasticità della tempra in questo caso essa era eseguita non in olio ma in acqua possibilmente gelida.

### *Noce*

Elemento usato per connettere il cane alla molla del cane e alla molla di scatto. Non sopporta urti ma è in contatto con due molle ad elevata durezza. Per evitarne l'usura precoce essa è realizzata in acciaio ad alto tenore di carbonio e poi sottoposta a tempra in acqua senza rinvenimento successivo. È possibile realizzare una tempra localizzata solamente sulle aree in contatto con le molle invece di una tempra completa.

## 3.2 Tecnica di analisi

### 3.2.1 Disassemblaggio

Il meccanismo è stato disassemblato separando i differenti componenti, in alcuni casi è stato sufficiente svitare le viti di fissaggio (fig. 3-2), in altri casi la parte terminale della vite era stata ribattuta, similmente a un fissaggio tramite rivetti ed è stato necessario procedere a lavorazione meccanica per asportarle(fig. 3-3) .

FIGURE 3-2 COMPONENTI MECCANISMO DOPO LA PRIMA FASE DI SMONTAGGIO

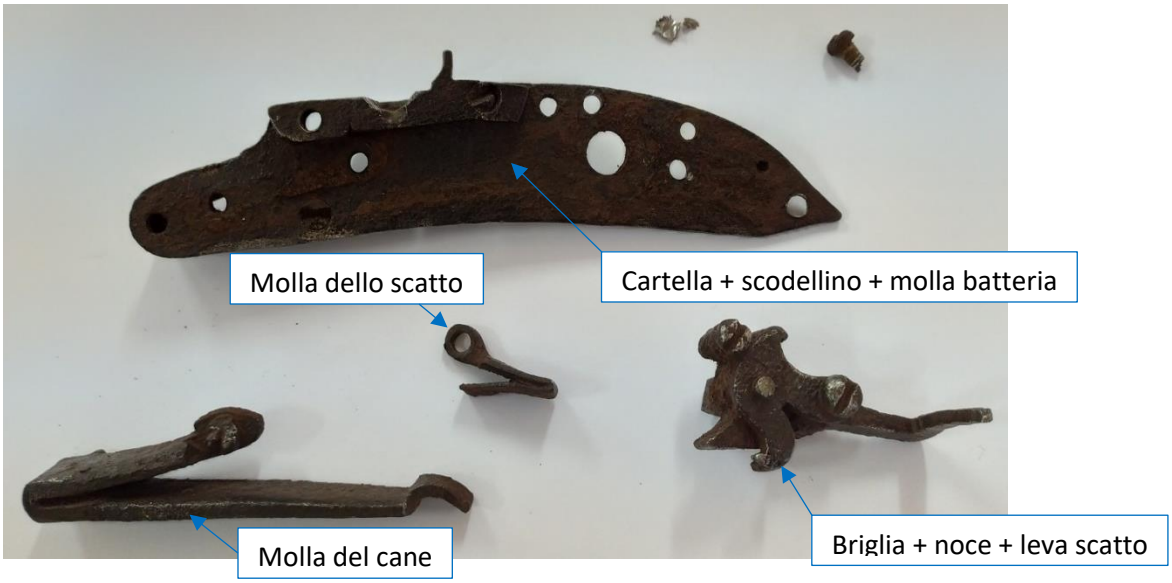



FIGURE 3-3 COMPONENTI MECCANISMO DOPO LA SECONDA FASE DI SMONTAGGIO

A seguito delle due operazioni di smontaggio si sono ricavati i seguenti componenti singoli:

- cane;
- piattello del cane;
- vitone del cane;
- molla del cane;
- batteria;
- molla dello scatto;
- vite di fissaggio del cane ;
- vite di fissaggio della batteria.

Tra questi elementi l'aspetto delle ultime due viti non fa supporre che esse non siano originali, ma frutto di una sostituzione successiva.

Due altri sotto assiemi non sono stati completamente smontati e la loro analisi in dettaglio sarà eventualmente oggetto di successive trattazioni:

- scodellino e molla della batteria sono rimaste unite alla cartella;
- noce e leva di scatto sono tuttora unite da una briglia.

Tra i componenti disponibili ne sono stati selezionati alcuni su cui proseguire le analisi:

- Piattello del cane
  - Ipotizzato in ferro duttile e non trattato termicamente
  - Un campione
- Molla del cane
  - Ipotizzato in acciaio ad alto tenore di carbonio completamente temprato
  - Due campioni
- Batteria
  - Ipotizzata in acciaio ad alto tenore di carbonio trattato termicamente solamente sul lato su cui andava a battere la pietra focaia
  - Due campioni

## 3.2.2 Taglio

I tre componenti selezionati sono stati sezionati in aree valutate di interesse per ricavarne sezioni da sottoporre a successiva analisi.

### *Piattello del cane*

Da questo oggetto è stato ricavato un campione, effettuando due tagli (fig. 3-4a) . L'ipotesi iniziale è che il componente sia del tutto esente da trattamento termico. La selezione del lato del campione da analizzare (fig. 3-4b) non è stata dettata da considerazioni di carattere metallografico, si è selezionato il lato che presentava meno bave dopo il taglio e quindi richiedeva una minore preparazione prima di procedere all'inglobatura.

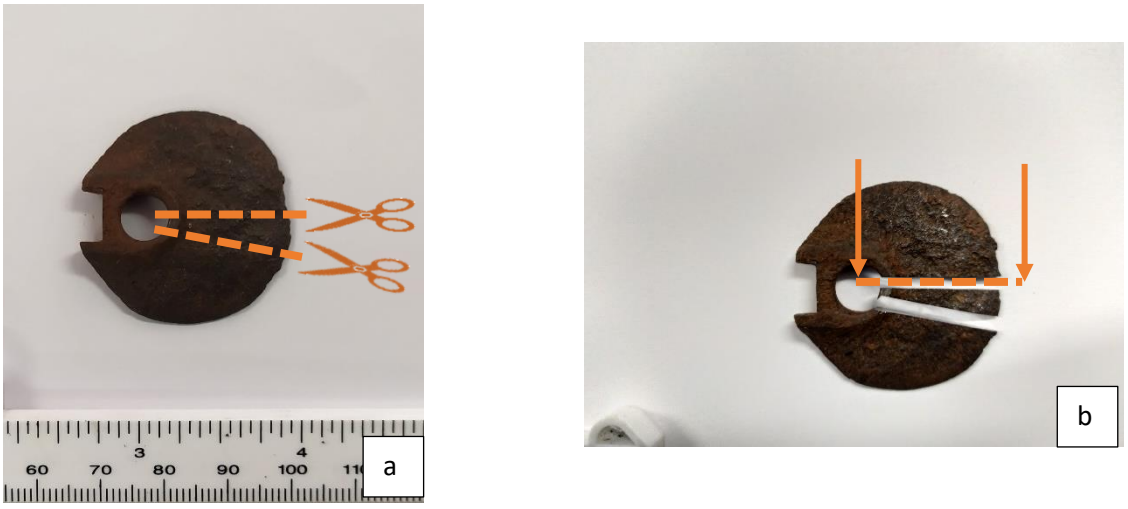



FIGURE 3-4 PIATTELLO DEL CANE, POSIZIONE TAGLI (A) E SEZIONE (B)

## *Molla del cane*

Da questo oggetto si sono ricavati due campioni, uno per analizzare una sezione in direzione trasversale e uno in direzione longitudinale. Per realizzare i due campioni si sono realizzati tre tagli (fig. 3-5a). L'ipotesi riguardo a questo componente è che sia costituito interamente di acciaio temprato, le due sezioni permetteranno di verificare se ci siano variazioni composizionali o di trattamento in una o più direzioni. Come per il caso precedente non essendoci nessuna ragione, se non la facilità di analisi per selezionare il lato del componente da considerare, per ognuno si è selezionata per l'analisi la superficie che presentava meno bave dopo il taglio (fig. 3-5b).

FIGURE 3-5 MOLLA DEL CANE, POSIZIONE TAGLI(A) E SEZIONI(B)

## *Batteria*

Da questo oggetto si sono ricavati due campioni, uno in direzione trasversale e uno in direzione longitudinale. Data la dimensione e la forma del componente rispetto al caso precedente è stato necessario effettuare un ulteriore taglio, per un totale di quattro (fig. 3-6a). L'ipotesi iniziale per questo componente è che esso sia costituito di acciaio con trattamento termico localizzato solamente sulla faccia su cui avveniva l'impatto della pietra focaia. Le due sezioni realizzate (fig. 3-6b) permetteranno di verificare questa supposizione e analizzare la variazione di composizione e trattamento termico nelle due direzioni.

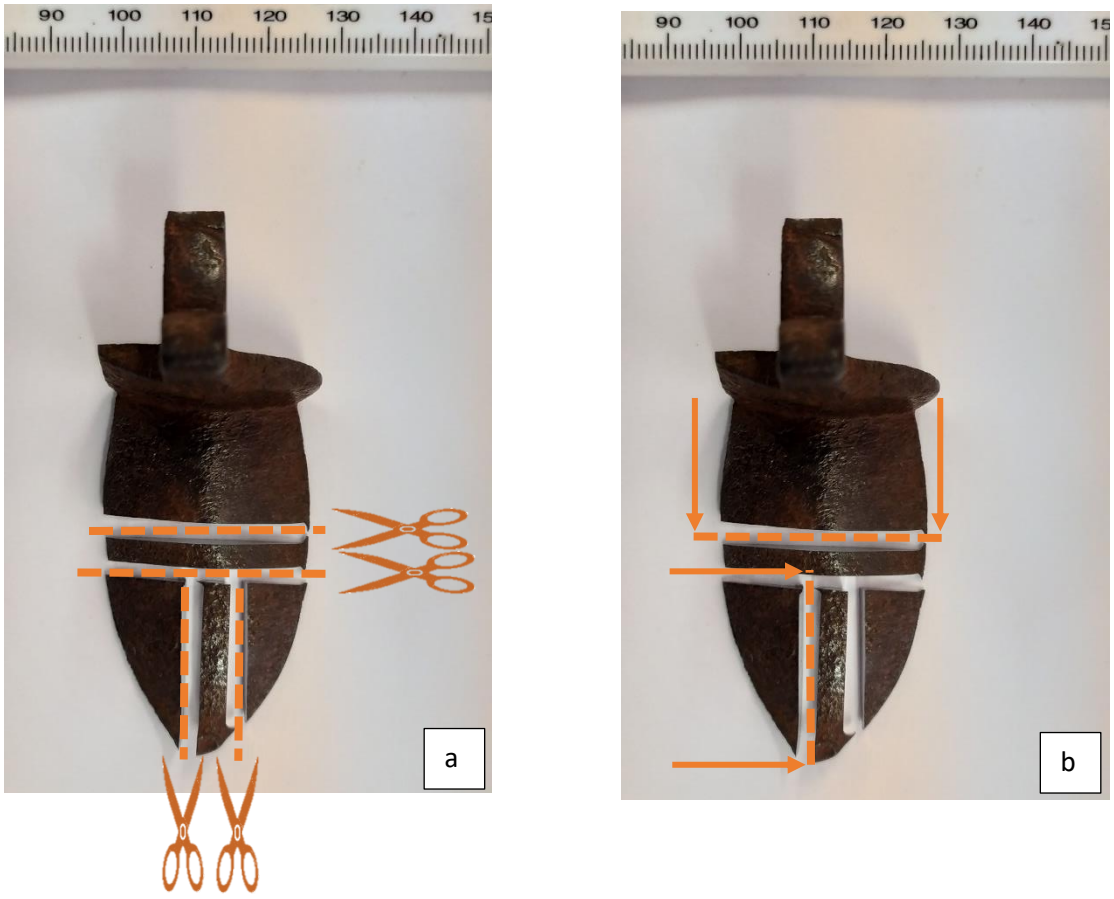



FIGURE 3-6 BATTERIA, POSIZIONE TAGLI(A) E SEZIONI(B)

## 3.2.3 Inglobatura

Le sezioni ricavate al punto precedente sono state inglobate in resina. Il processo è stato eseguito a caldo con un ciclo di 12 minuti a 180°. Si è ipotizzato che questo riscaldamento, data la sua brevità e la temperatura bassa rispetto a quella usualmente utilizzata per il rinvenimento degli acciai, non abbia alterato le proprietà metallografiche dei campioni o ridotto la loro durezza.

## 3.2.4 Lucidatura e attacco acido

I provini sono stati sottoposti a lucidatura manuale tramite uso di carta e pasta abrasiva di dimensioni via via decrescenti, in particolare ogni provino è stato lucidato con carte 60, 120,240,320,600,1200,2500 e 4000 e infine tramite paste abrasive da 3 e 1µm.
Le seguenti figure presentano le immagini derivanti da scansione (fig. 3-7b, fig. 3-8b e fig.3-9b) dei provini ricavati dai tre componenti dopo lucidatura e un richiamo alla posizione delle sezioni effettuate (fig. 3-7a, fig. 3-8a fig. 3-9a):

### *Piattello del cane*

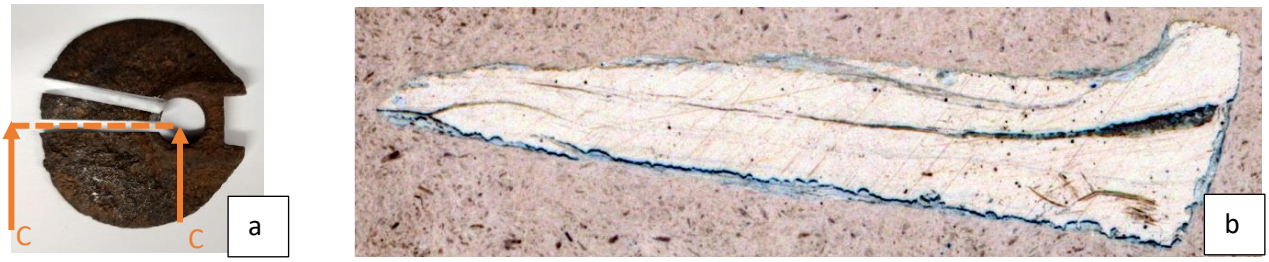



FIGURE 3-7 PIATTELLO DEL CANE, POSIZIONE(A) E SCANSIONE DELLA SEZIONE(B)

### *Molla del cane*

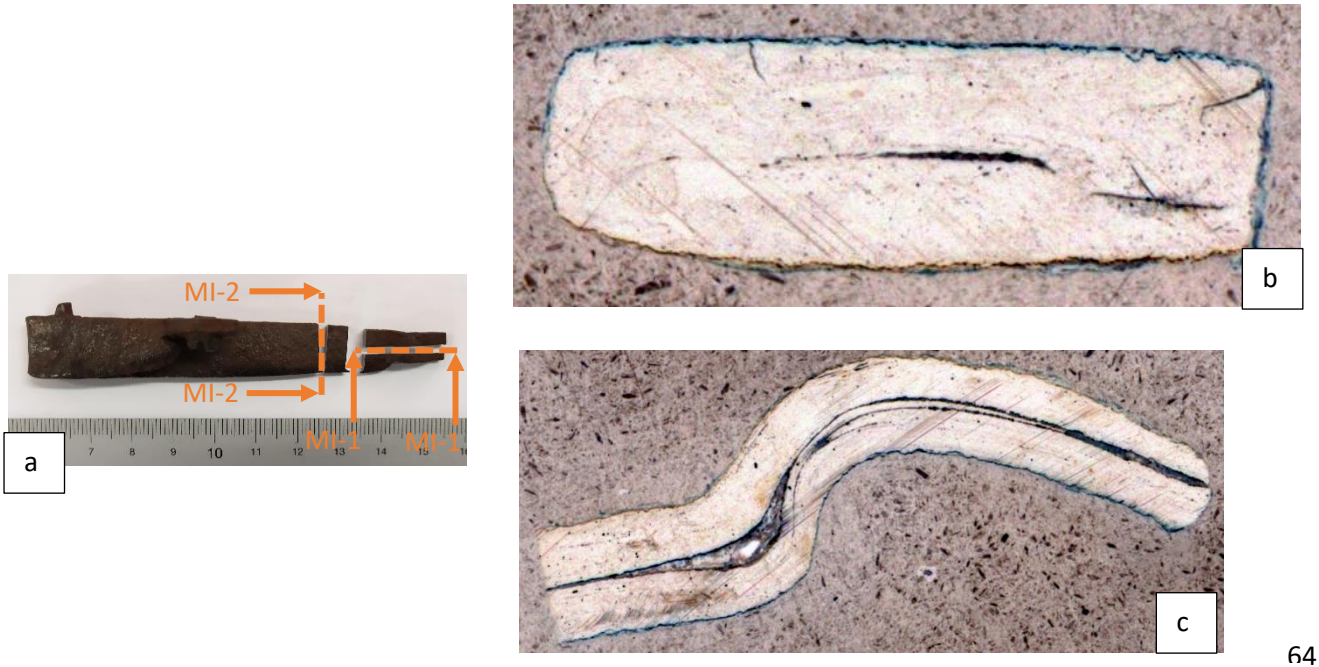



FIGURE 3-8 MOLLA DEL CANE, POSIZIONE DELLE SEZIONI (A) E SCANSIONE DELLE SEZIONI: MI-1(C) E MI-2(B)

*Batteria*

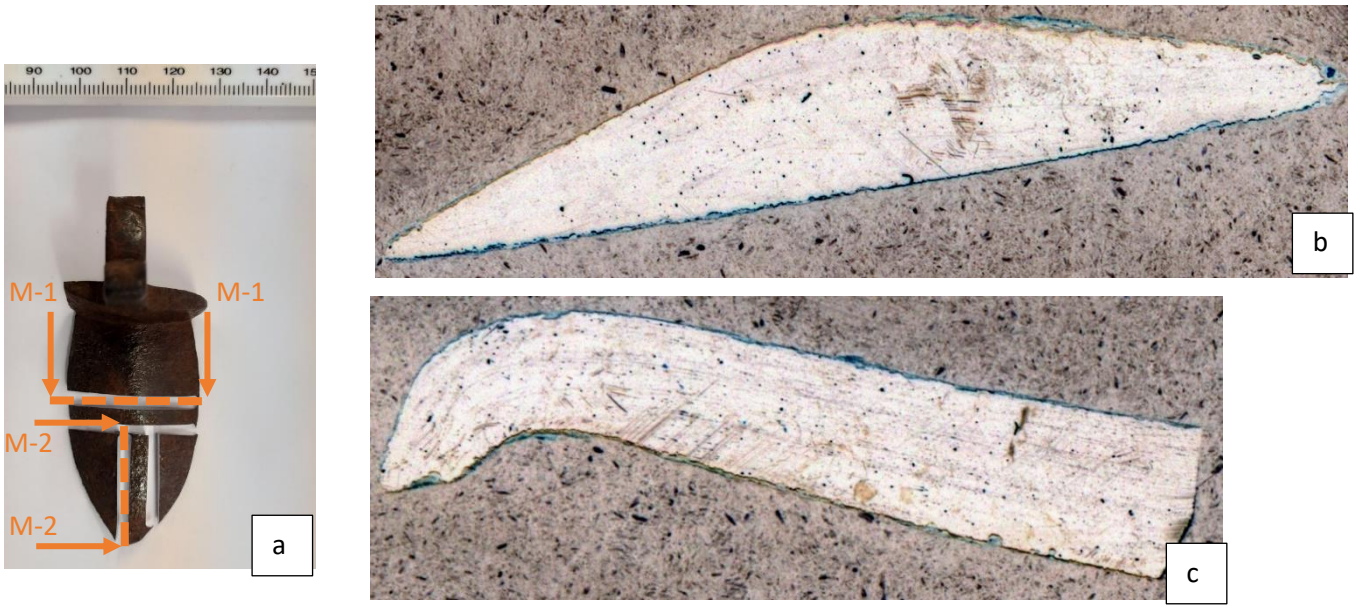



FIGURE 3-9 BATTERIA, POSIZIONE DELLE SEZIONI (A) E SCANSIONI DELLE SEZIONI: M-1(B) E M-2(C)

Già da queste immagini si sono ricavate alcune informazioni inaspettate, sia la molla che il piattello del cane presentano importanti discontinuità interne.
Al termine della lucidatura dopo un primo rilievo fotografico eseguito con l'aiuto di un microscopio ottico si è provveduto ad effettuare un attacco acido tramite soluzione Nital al 3,4% per evidenziare le differenti fasi costituenti. Per quanto riguarda i due campioni provenienti dal mollone l'attacco acido si è rivelato troppo intenso, con il risultato di ottenere un campione molto scuro.
Su questi due campioni è stata eseguita una seconda lucidatura per rimuovere lo strato superficiale che aveva subito l'attacco e infine esso è stato ripetuto con soluzione Nital meno concentrata, 1,7%, che ha dato questa volta buoni risultati.

## 3.2.5 Analisi al microscopio e Microdurezze

I cinque campioni realizzati nei paragrafi precedenti sono stati oggetto di analisi al microscopio ottico prima e dopo attacco acido. Nel primo caso è possibile raccogliere soprattutto informazioni riguardo alla distribuzione delle inclusioni nel componente e fare ipotesi sulla tecnica usata per la realizzazione, nel secondo caso distinguere le differenti fasi costituenti il materiale e verificare la presenza di un eventuale trattamento termico per aumentare durezza e proprietà meccaniche.
Per l'analisi al microscopio sono stati utilizzati differenti ingrandimenti a partire da 2x fino a 100x.
L'ultima analisi è stata quella tramite microdurometro per avere ulteriori informazioni riguardo al trattamento termico e il suo profilo all'interno del componente.
Essa è stata condotta con un carico di 300g, corrispondente a un test HV0.3, con l'ausilio di una telecamera e di un software di analisi per misurare la dimensione dell'impronta e calcolare il corrispondente valore di durezza.

# 4 Risultati analisi

Saranno ora presentati i risultati delle differenti fasi  di analisi su ciascun componente

## 4.1 Piattello del cane

### 4.1.1 Analisi macroscopica

Si evidenziano molteplici discontinuità, più evidenti in prossimità del foro per il passaggio del vitone del cane. Viste queste discontinuità si è ipotizzato che il componente sia stato realizzato saldando insieme due spezzoni di materiale. Per quanto è possibile distinguere dalla scansione a basso ingrandimento la disposizione delle inclusioni segue in generale il profilo della sezione (fig. 4-1b).

Si sono identificate tre aree da analizzare più in dettaglio al microscopio:

1. In prossimità del foro della vite
2. Al centro della sezione in prossimità della discontinuità maggiore
3. Vicino al diametro esterno del pezzo

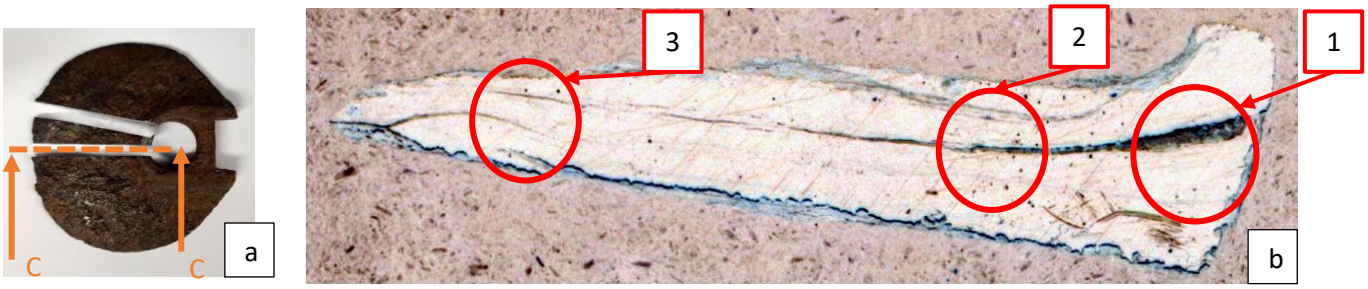



FIGURE 4-1 PIATTELLO DEL CANE, POSIZIONE DELLE AREE ANALIZZATE(A) E SEZIONE C(B)

Il piattello del cane non necessita di elevate prestazioni meccaniche o di resistenza all'usura. Il foro è solo di passaggio e quindi non è filettato, cosa che renderebbe utile un indurimento del materiale per evitare degradazione precoce. Il componente è stato perciò supposto in ferro esente da trattamento termico.

## 4.1.2 Analisi microscopio

### *Zona 1*

In questa zona è ben visibile la discontinuità evidenziata nella scansione a basso ingrandimento (fig. 4-2a e fig. 4-2b), le inclusioni, rappresentate da punti e macchioline scure, all'interno del campione tendono normalmente a disporsi lungo le linee di deformazione plastica.

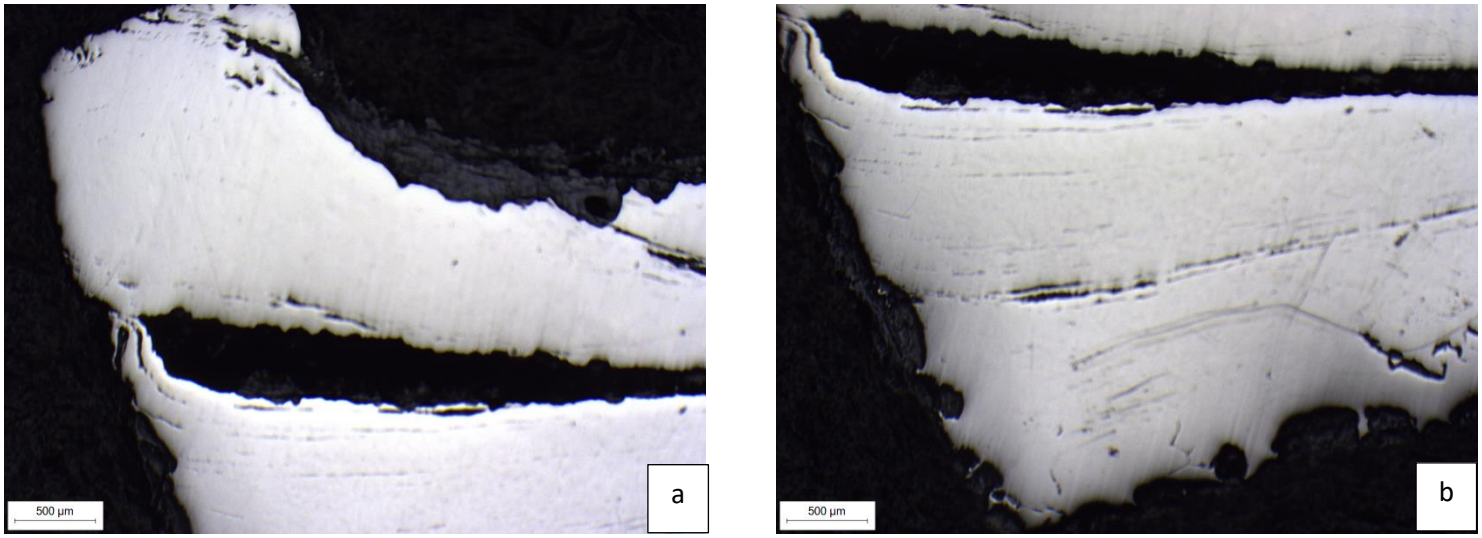



FIGURE 4-2 PIATTELLO DEL CANE, ANALISI AL MICROSCOPIO, ZONA 1 NEI PRESSI DELLA PRINCIPALE DISCONTINUITÀ (A), DETTAGLIO (B)

Come si può vedere dalle immagini acquisite a maggiori ingrandimenti la loro direzione è abbastanza regolare e come anticipato nel paragrafo precedente seguono il profilo della sezione(fig. 4-3a e fig.4-3b).
La discontinuità maggiore è pressoché chiusa sul diametro interno del foro(fig. 4-2a).

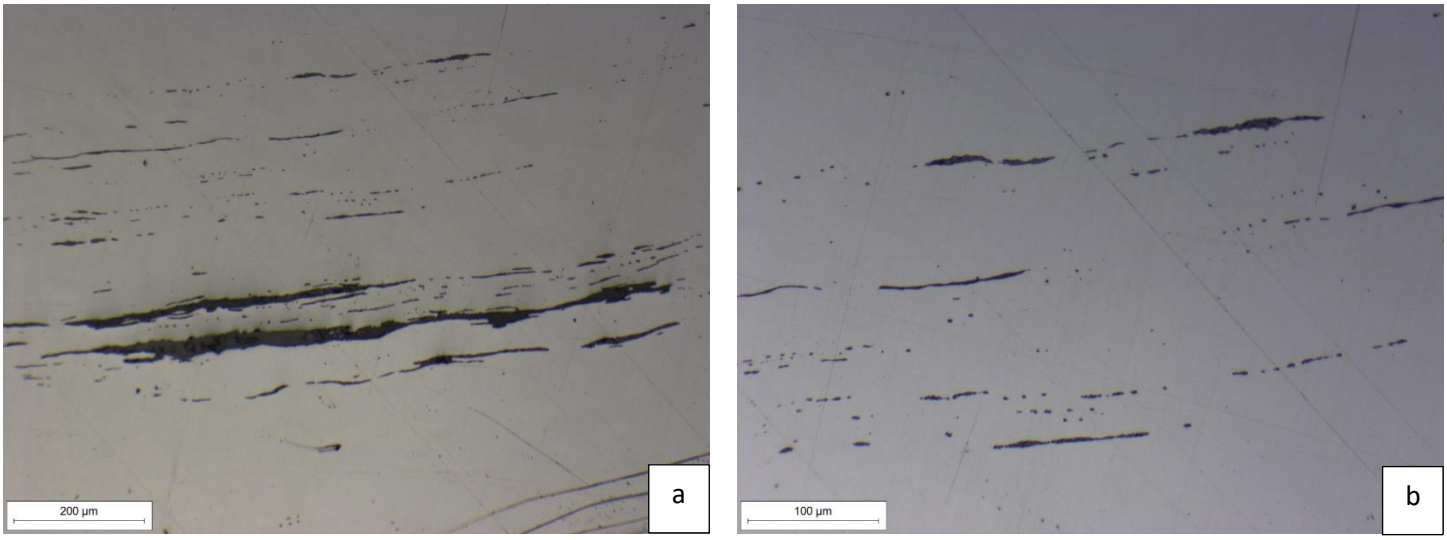
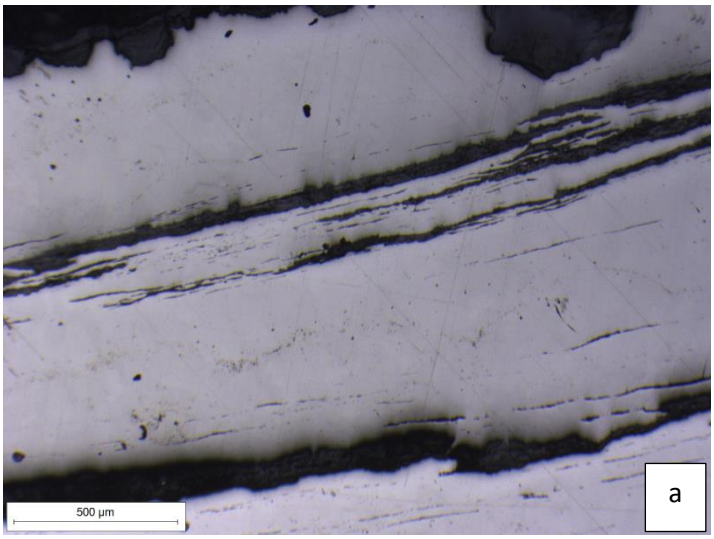
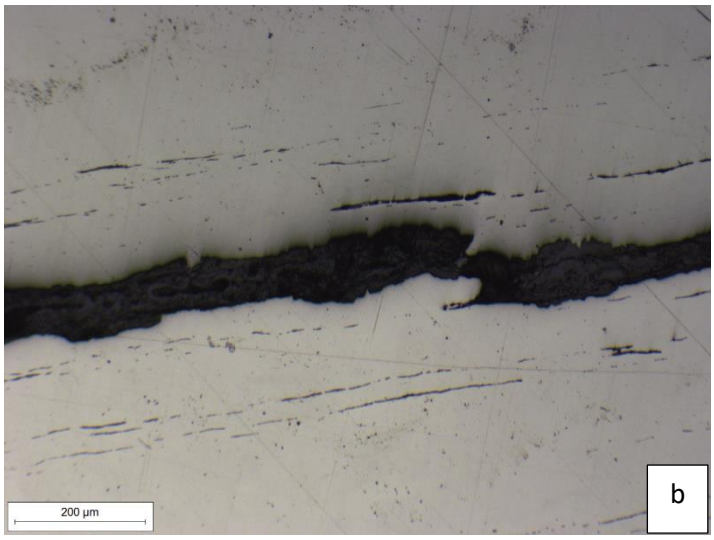



FIGURE 4-3 PIATTELLO DEL CANE, ANALISI AL MICROSCOPIO, DETTAGLIO DIREZIONE INCLUSIONI ZONA 1

## *Zona 2*

La seconda zona analizzata si trova nella parte centrale del campione in questo caso oltre alla discontinuità centrale ne sono riscontrate altre(fig. 4-4a e fig.4-4c), in prevalenza ad essa parallela, che potrebbero essere dovute a ulteriori strati di materiali saldati insieme. La direzione delle inclusioni è nuovamente parallela al profilo della sezione (fig. 4-4b).



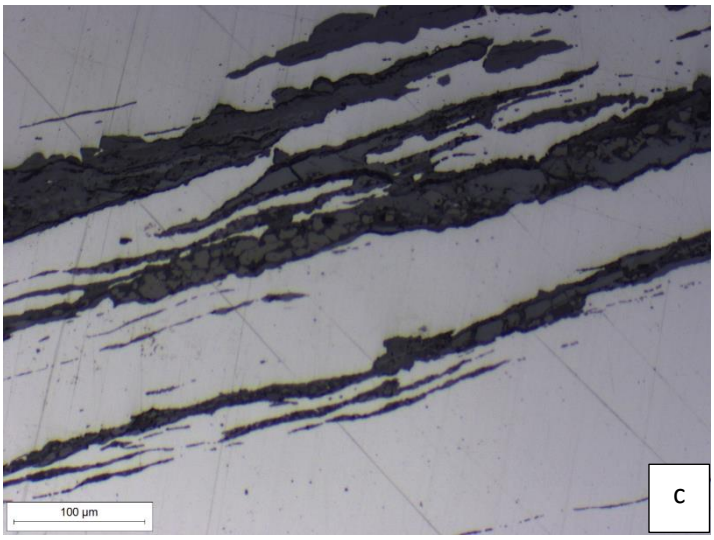




**FIGURE 4-4 PIATTELLO DEL CANE, ANALISI AL MICROSCOPIO, ZONA 2,**

**DETTAGLIO PRESENZA MOLTEPLICI STRATI**

### *Zona 3*

In questa ultima zona la discontinuità principale non è più presente (fig. 4-5a), sono visibili alcune altre sempre in direzione parallela al profilo della sezione; anche la direzione delle inclusioni del materiale rimane pressoché costante(fig. 4-5b).

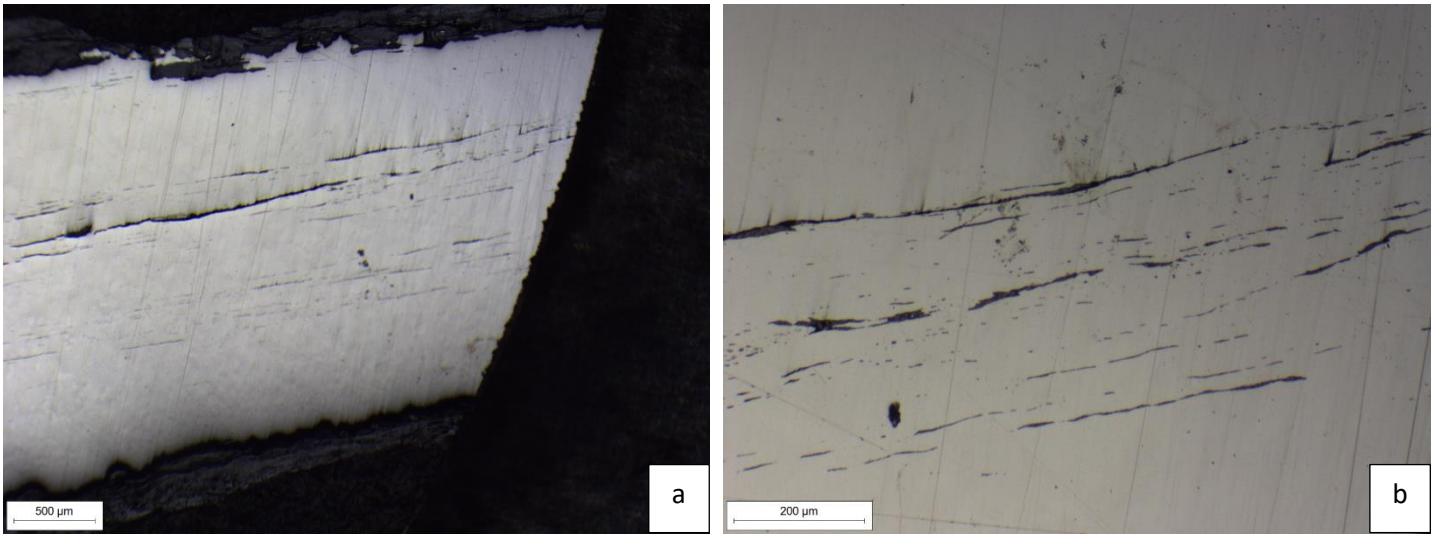



**FIGURE 4-5 PIATTELLO DEL CANE, ANALISI AL MICROSCOPIO, ZONA 3 (A), DETTAGLIO DIREZIONE PREFERENZIALE INCLUSIONI(B)**

## 4.1.3 Analisi microscopio dopo attacco acido

Ipotizzando un componente costituito in ferro e senza trattamento termico ci si aspetta di trovare ferrite come principale costituente.

### *Zona 1*

La microstruttura risulta costituita in prevalenza da ferrite a grani molto grandi (fig. 4-6b), indice di permanenza per lunghi periodi ad alta temperatura durante la sua realizzazione, i grani appaino di dimensione maggiore nella parte alta del profilo (fig. 4-6a).

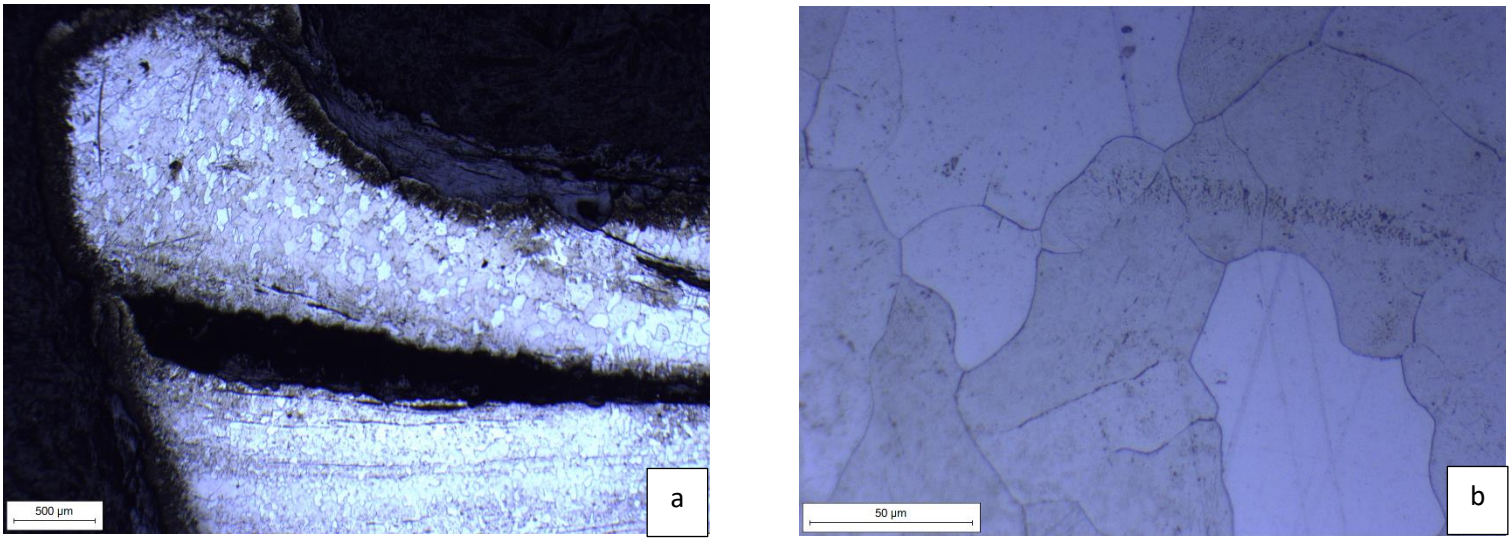



FIGURE 4-6 PIATTELLO DEL CANE, ANALISI AL MICROSCOPIO DOPO ATTACCO ACIDO, ZONA 1, STRUTTURA FERRITICA (A) , DETTAGLIO GRANI(B)

La microstruttura cambia ai bordi della sezione, sia esterni (fig.4-7a) che interni (fig-4-7b), e qui appare simile a quella della perlite. Questo comportamento potrebbe essere spiegato con una parziale carburazione dello strato esterno a causa del prolungato contatto con i carboni ardenti.

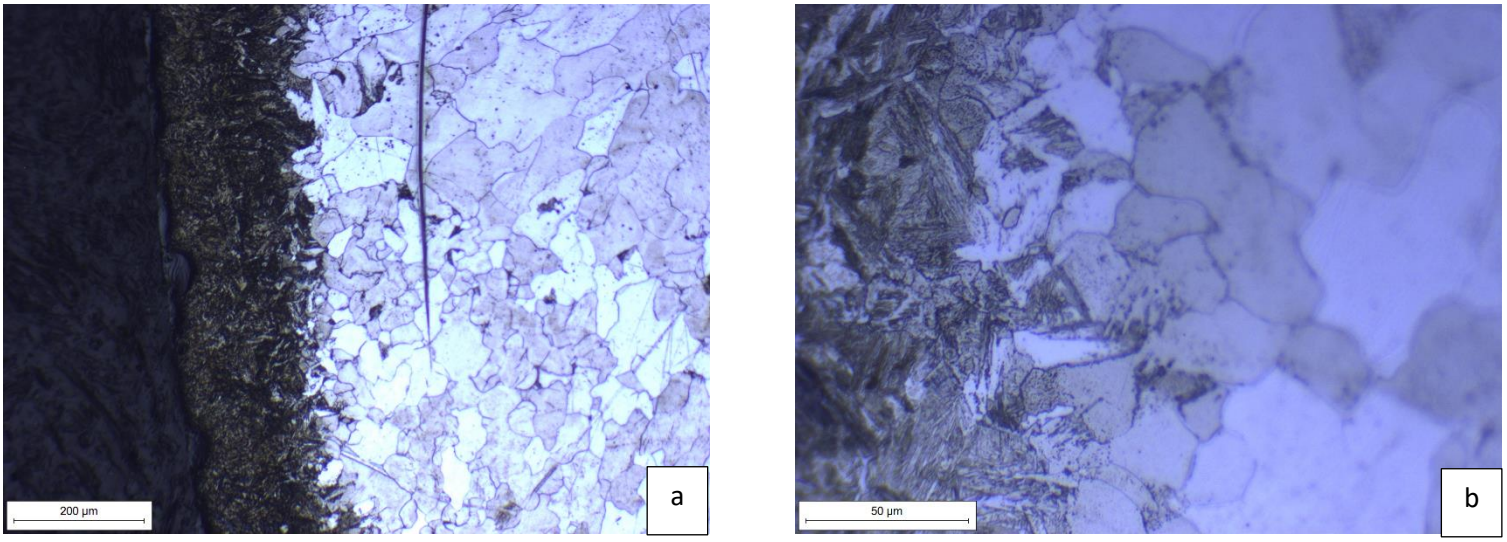



FIGURE 4-7 PIATTELLO DEL CANE, ANALISI AL MICROSCOPIO DOPO ATTACCO ACIDO, ZONA 1, BORDO CON STRUTTURA PERLITICA (A), DETTAGLIO STRUTTURA (B)

## *Zona 2*

Nella zona centrale del campione si nota la stessa microstruttura della zona precedente caratterizzata da grossi grani di ferrite nella parte centrale di ogni strato (fig.4-8a) e un sottile strato di perlite nei pressi del profilo esterno (fig. 4-8b) e delle discontinuità maggiori (fig. 4-8c e fig.4-8d)

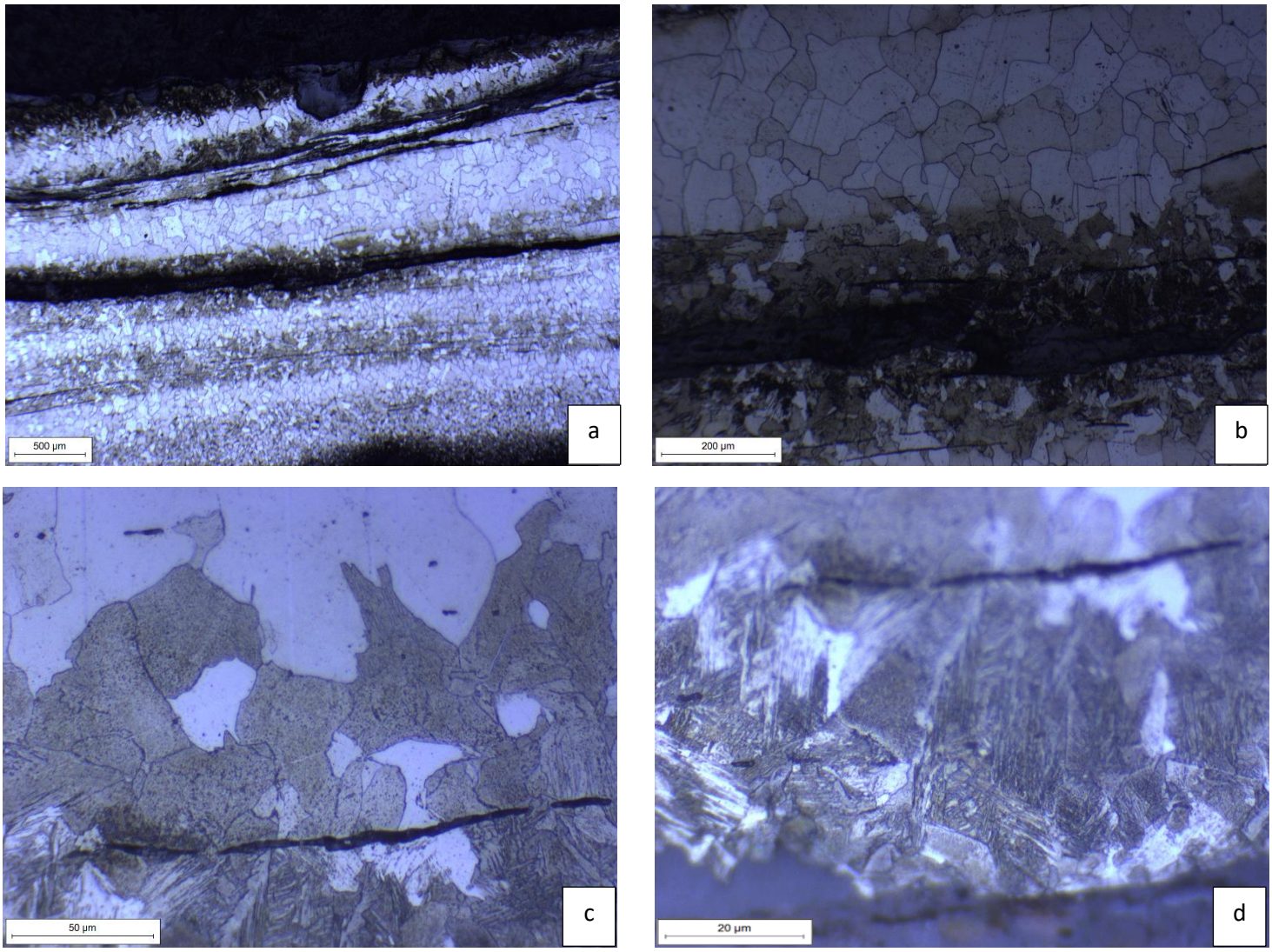



**FIGURE 4-8 PIATTELLO DEL CANE, ANALISI AL MICROSCOPIO DOPO ATTACCO ACIDO, ZONA 2, STRUTTURA FERRITICA CON SOTTILI STRATI DI PERLITE AI BORI**

## *Zona 3*

All’estremità del componente più lontana dal foro la microstruttura non presenta differenze rispetto a quanto visto nelle zone precedenti.

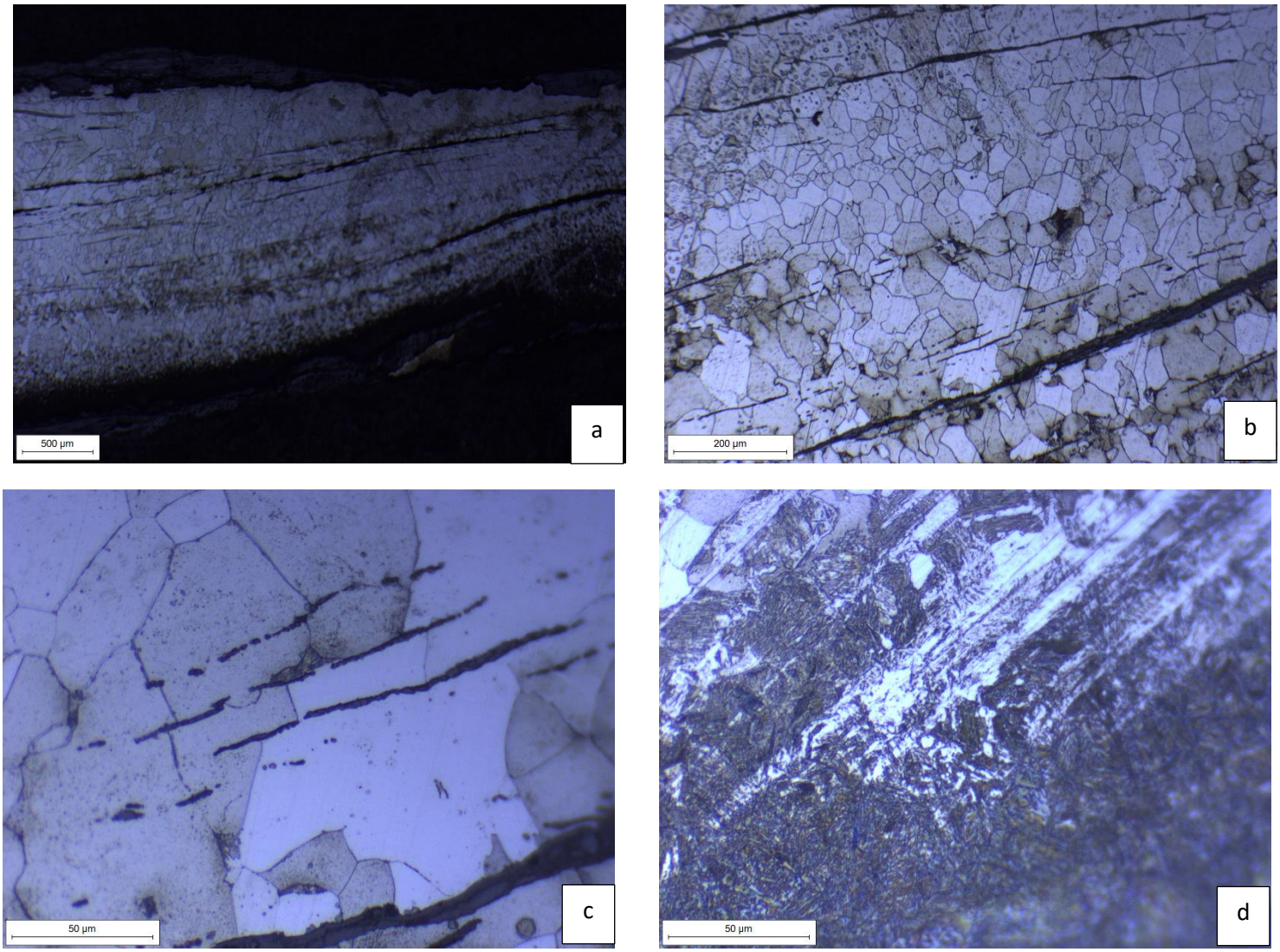



**FIGURE 4-9 PIATTELLO DEL CANE, ANALISI AL MICROSCOPIO DOPO ATTACCO ACIDO, ZONA 3, STRUTTURA FERRITICA CON PERLITE AI BORDI DI OGNI STRATO**

### 4.1.4 Microdurezze

Una cucitura è stata fatta nell'area indicata nell'immagine sottostante, in base alle ipotesi formulate e alla microstruttura evidenziata durante l'analisi al microscopio ci si attende una durezza bassa su tutto il profilo con un leggero incremento ai bordi e in prossimità delle discontinuità.

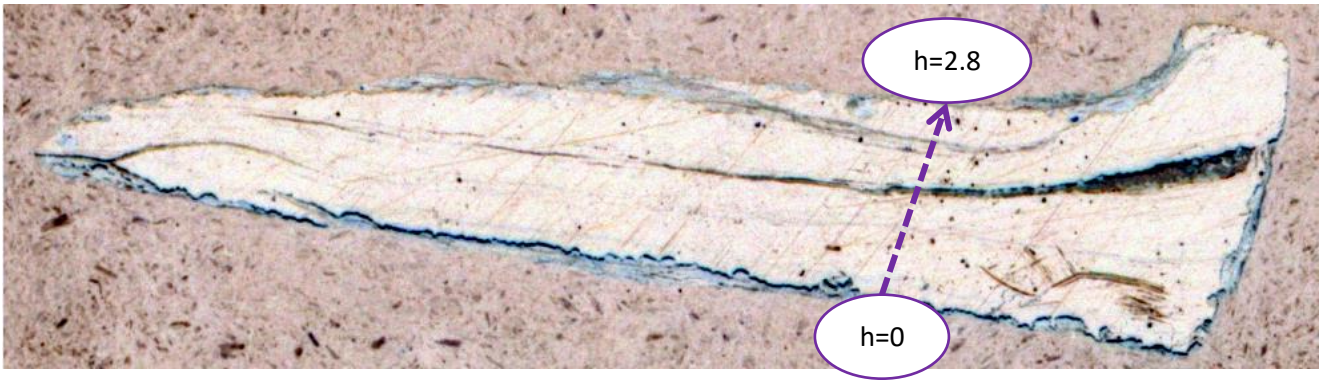



FIGURE 4-10 PIATTELLO DEL CANE, POSIZIONE CUCITURA DI MICRODUREZZA

| h | HV03 |
|---|---|
| 0 | 144,8 |
| 0,2 | 154,9 |
| 0,4 | 122,7 |
| 0,6 | 154,9 |
| 0,8 | 149,8 |
| 1 | 125,8 |
| 1,2 | 150,8 |
| 1,4 | 126,6 |
| 1,6 | 108,3 |
| 1,8 | 98 |
| 2 | 115,5 |
| 2,2 | 129,7 |
| 2,4 | 105,8 |
| 2,6 | 124,2 |
| 2,8 | 103,5 |

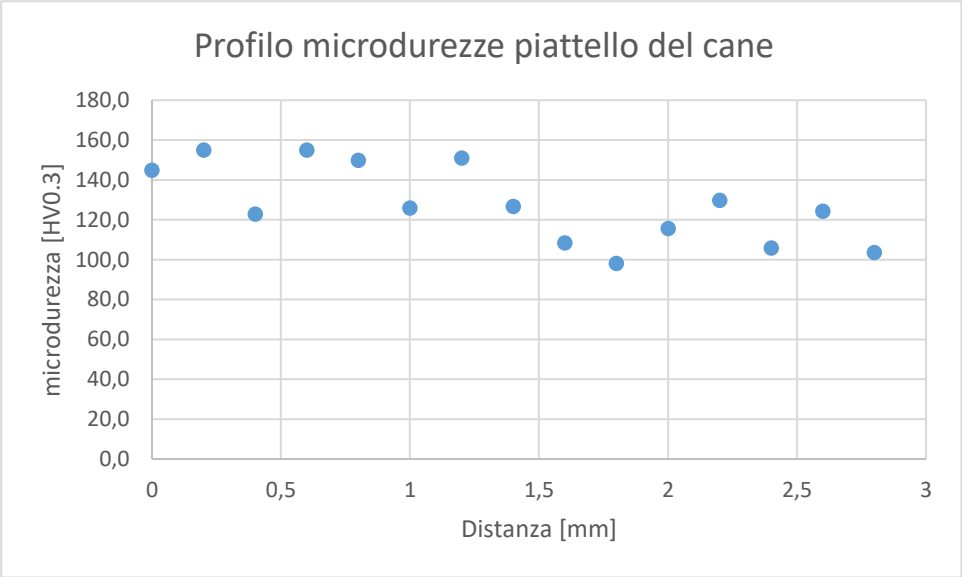



TABLE 1 PIATTELLO DEL CANE, RIEPILOGO MICRODUREZZE HV0.3

Il profilo di durezza risulta pressappoco costante, con durezza bassa compatibile con quella del ferro non indurito tramite trattamento termico. Verificando alcuni dei punti a durezza maggiore si vede come essi sia in prossimità di uno degli strati di perlite (fig. 4-11a e fig.4-11b).

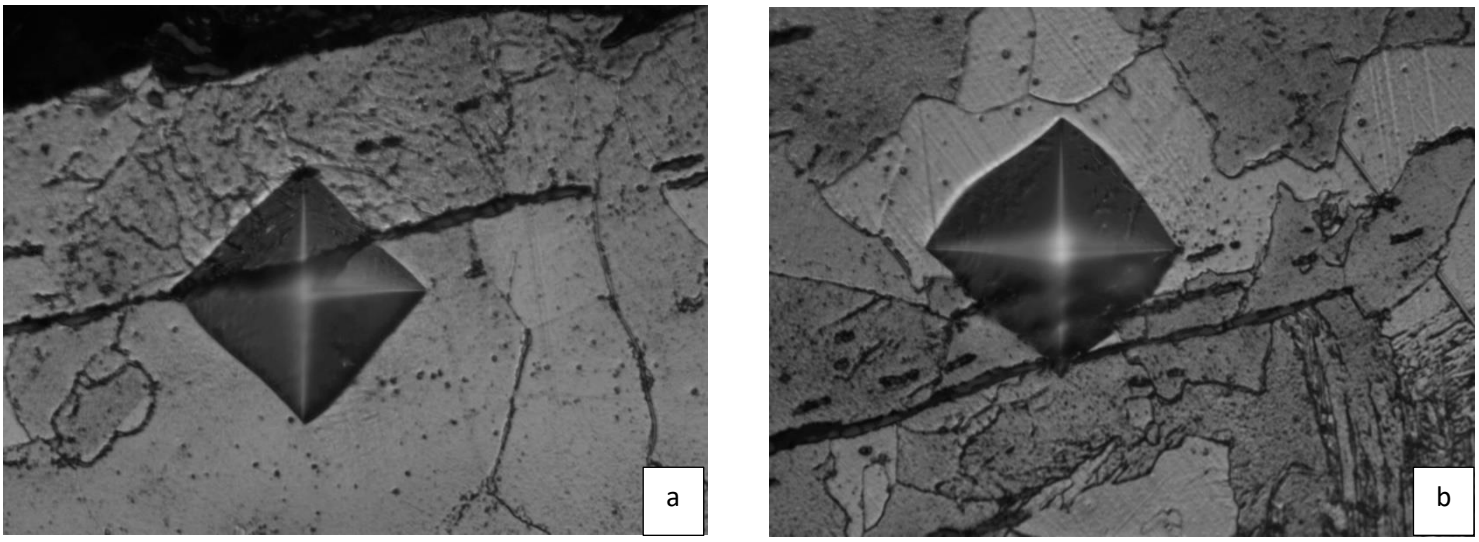



**FIGURE 4-11 PIATTELLO DEL CANE, DETTAGLIO IMPRONTE MICRODUREZZA, BORDO TRA STRUTTURA FERRITICA E PERLITICA**

Il punto di minimo di durezza invece si trova al all'interno di uno dei due segmenti ed è stato misurato in pieno grano ferritico (fig. 4-12) .

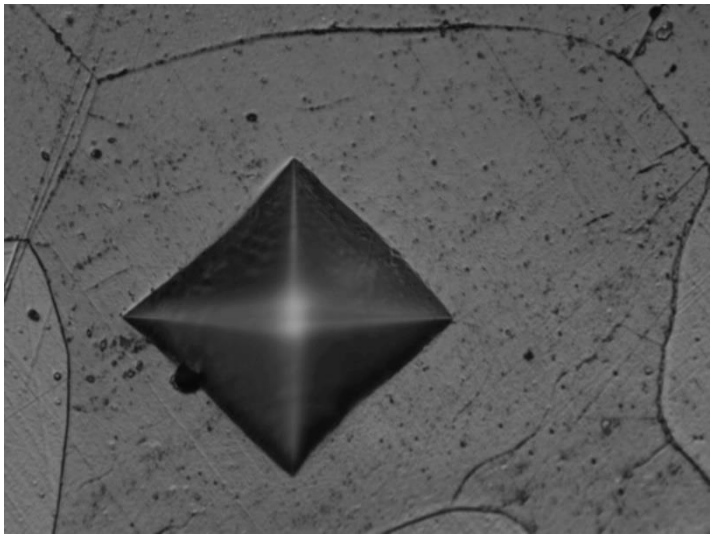


**FIGURE 4-12 PIATTELLO DEL CANE, DETTAGLIO IMPRONTE MICRODUREZZA, GRANO FERRITICO**

### 4.1.5 Risultati

Sia l'analisi al microscopio ottico dopo attacco acido che i valori di microdurezza confermano l'ipotesi che il piattello del cane sia stato realizzato in ferro e non sottoposto a trattamento termico per aumentarne le prestazioni. Il sottile strato superficiale di perlite è molto probabilmente una conseguenza involontaria del processo manifatturiero e non una caratteristica voluta. L'elevata dimensione dei grani fa pensare a un tempo di permanenza abbastanza lungo ad alta temperatura durante la realizzazione del componente.
La discontinuità al centro del componente sembra dovuta all'utilizzo di due differenti segmenti di ferro più che ad una cricca creatasi successivamente. Ipotesi convalidata sia dal fatto che la microstruttura appare leggermente differente per quanto riguarda la dimensione dei grani sui due lembi (vedi immagini micrografia zona 1 dopo attacco acido) sia dal fatto che lo strato di perlite che circonda il profilo esterno sia presente anche su entrambi i bordi della discontinuità.
Nel complesso il complesso i risultati dell'analisi concordano con le ipotesi fatte di un componente per cui non erano ricercate alte proprietà meccaniche e si preferiva la facilità di lavorazione e il basso costo del materiale. Sebbene non fosse stato previsto l'utilizzo, di differenti spezzoni di materiale è in accordo con l'economicità del componente; si utilizzava il materiale disponibile e se non lo fosse stato nello spessore ricercato si sarebbero saldati insieme più frammenti.
In questo caso due strati sarebbero stati prima separatamente scaldati a contatto con i carboni ardenti, e ciò spiegherebbe lo strato carburato, e successivamente saldati insieme.

## 4.2 Molla del cane

### 4.2.1 Analisi macroscopica

Dal campione MI-1, realizzato in direzione longitudinale si evidenzia una profonda discontinuità a metà della sezione, si ipotizza quindi che il componente sia stato realizzato ripiegandone su sé stessa una lamina oppure unendo due lamine metalliche. Non si hanno evidenze dell'utilizzo della prima tecnica per realizzare le molle, la seconda al contrario, sebbene non fosse la norma, era utilizzata per far fronte all'indisponibilità del materiale nello spessore voluto.
Dal campione MI-2 ottenuto con una sezione in direzione trasversale, perpendicolare al precedente, si può vedere come la divisione lungo lo spessore presente nella zona centrale scompaia invece all'esterno. Si sono identificate alcune aree da analizzare più in dettaglio al microscopio:

- MI-1
    1. A un estremo del campione corrispondente all'apice della molla
    2. Zona centrale dove la discontinuità tra le lamine appare minore
    3. All' estremo opposto del campione rispetto alla zona 1
- MI-2
    1. Su un fianco, in una zona esente da cricche
    2. Sul fianco opposto in prossimità di una discontinuità
    3. Al centro della sezione presso l'apice della discontinuità maggiore
    4. In un angolo in cui è presente una discontinuità

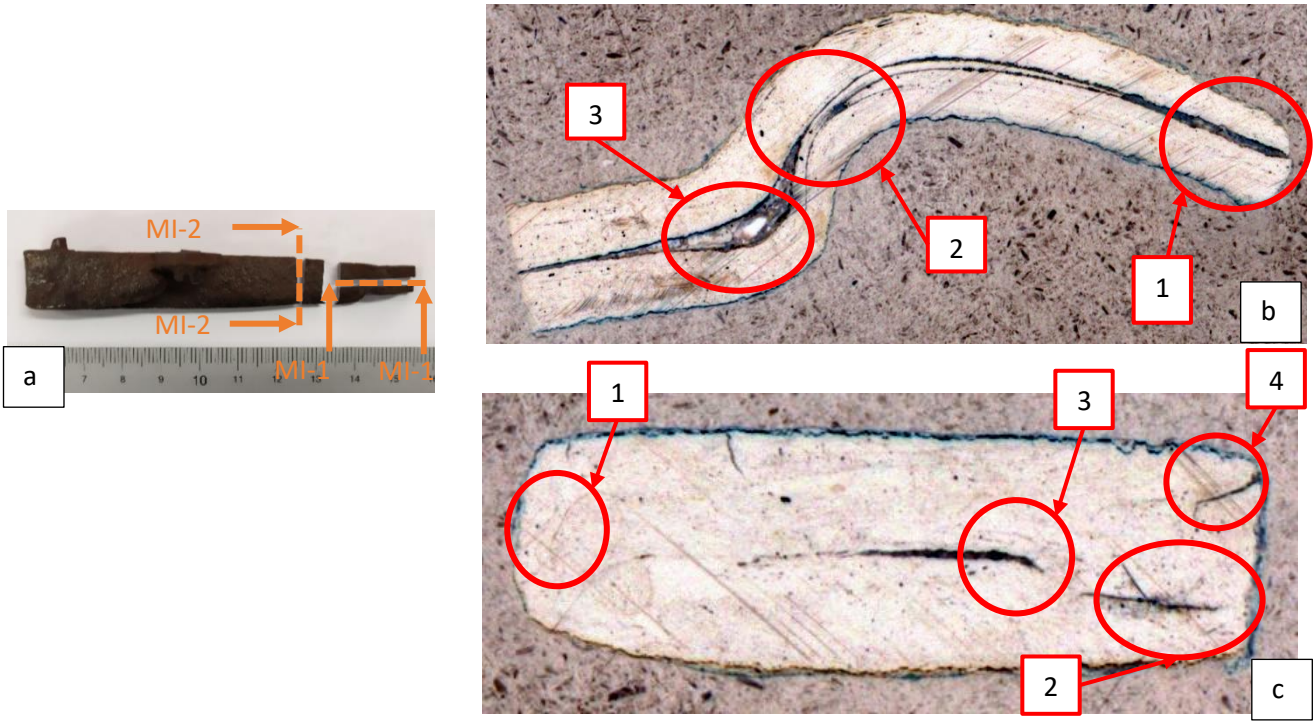



FIGURE 4-13 MOLLA DEL CANE, POSIZIONE DELLE AREE ANALIZZATE (A), SEZIONE MI-1(B) E MI-2(C)

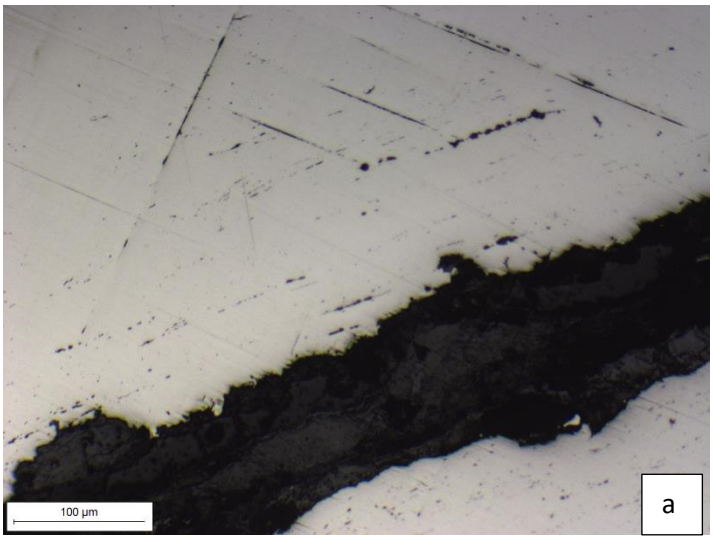
Il componente è stato supposto in acciaio ad alto tenore di carbonio soggetto a trattamento di tempra e rinvenimento.

## 4.2.2 Analisi microscopio

Sulla base dell'ipotesi che il componente sia stato realizzato sovrapponendo più lamine metalliche ci si aspetta le direzioni preferenziali delle inclusioni più o meno uniforme in tutti gli strati e orientate secondo il profilo della sezione in MI-1, al contrario in MI-2 si potrebbe assistere ad una variazione di direzione sui due lati delle discontinuità.

### *MI-1 Zona 1*

Le due immagini sono state realizzate nella zona della discontinuità principale (fig. 4-14a) e subito al di sotto di essa (fig.4-14b) come si può vedere la direzione delle inclusioni segue il profilo della sezione sia sopra che sotto la discontinuità.



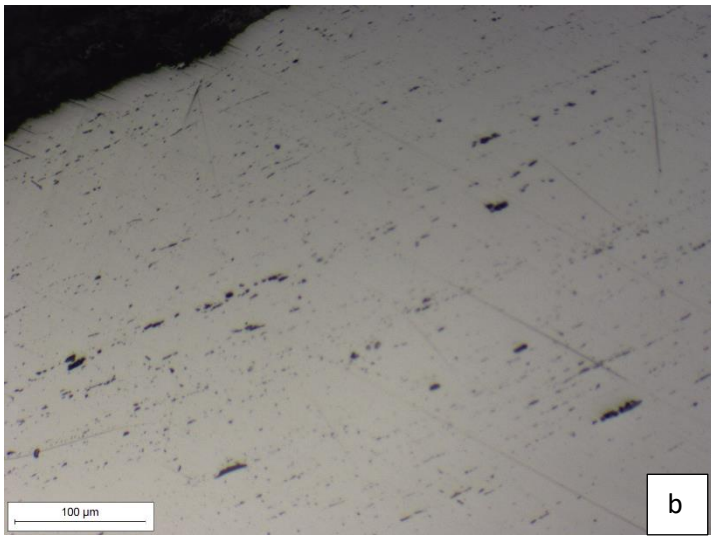




**FIGURE 4-14 MOLLA DEL CANE, ANALISI AL MICROSCOPIO, MI-1 ZONA 1, NEI PRESSI DELLA DISCONTINUITÀ PRINCIPALE**

### *MI-1 Zona 2*

Nella zona centrale del campione, corrispondente all'inizio del raggio di contatto tra molla e noce del cane, la discontinuità principale va a ridursi fino quasi a chiudersi (fig.4-15a) ma sono osservabili più strati sovrapposti oltre ai due osservati nella scansione a basso ingrandimento (fig. 4-15b). Le inclusioni presenti nel materiale appaiono orientate prevalentemente lungo il profilo della sezione in ogni strato.

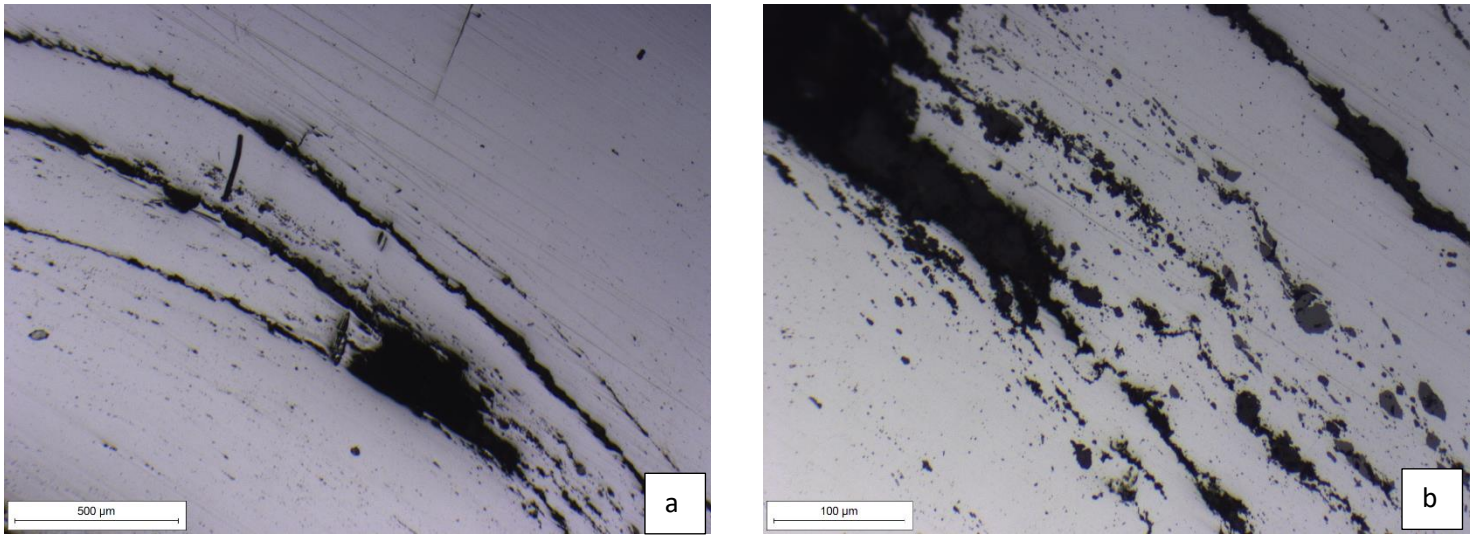
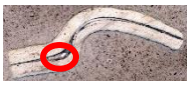



**FIGURE 4-15 MOLLA DEL CANE, ANALISI AL MICROSCOPIO, MI-2 ZONA 2, DETTAGLIO MOLTEPLICI STRATI**

## *MI-1 Zona 3*



In corrispondenza di una raggiatura sulla forma della molla, si può osservare come la direzione delle inclusioni all'interno segua il profilo di raggiatura esterno, questo andamento è caratteristico di un componente realizzato tramite deformazione platica.

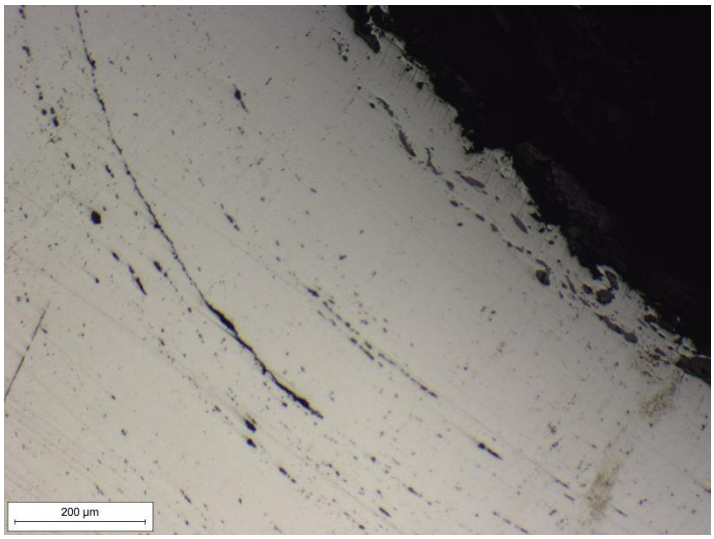
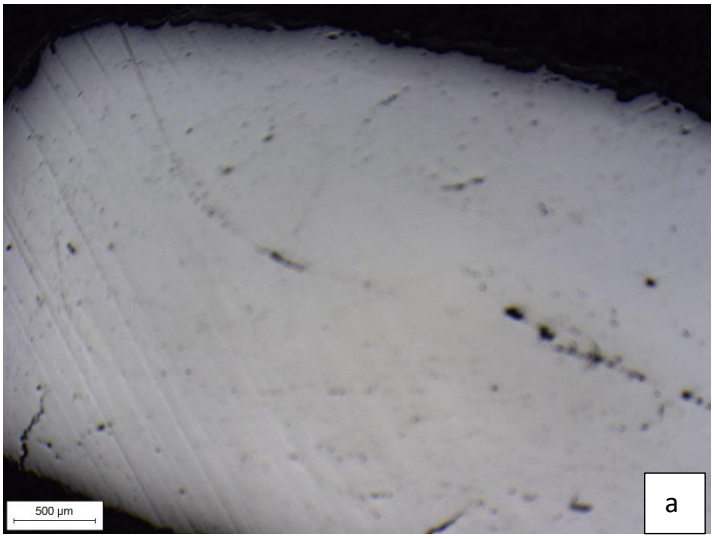



**FIGURE 4-16 MOLLA DEL CANE, ANALISI AL MICROSCOPIO, MI-1 ZONA 3**

## *MI-2 Zona 1*

Lungo la sezione trasversale della molla la direzione delle inclusioni a differenza di quanto accadeva nel precedente campione realizzato lungo la sezione longitudinale non appare costante (fig.4-17a e fig.4-17b) .



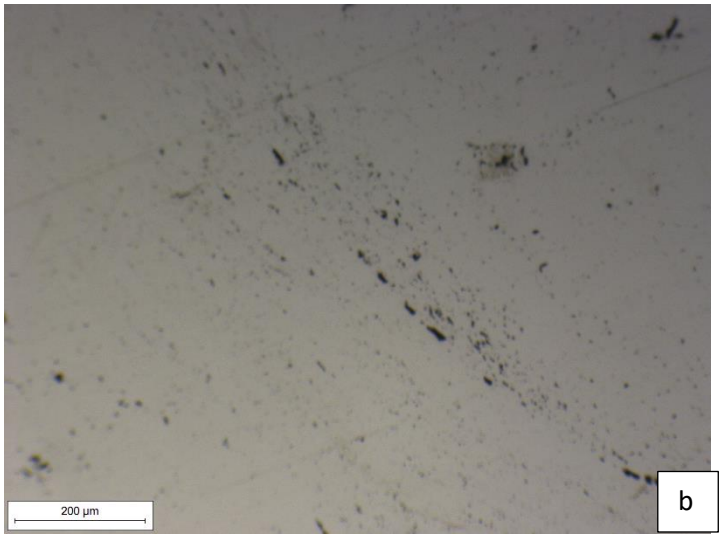




**FIGURE 4-17 MOLLA DEL CANE, ANALISI AL MICROSCOPIO,** MI-2 ZONA 1

### *MI-2 Zona 2*

Nell'intorno di una discontinuità interna della sezione (fig. 4-18a) non si riscontrano particolari variazioni della direzione delle inclusioni(fig. 4-18b e fig.4-18d), come per la zona precedente non è visibile una loro direzione preferenziale (fig.4-18c)

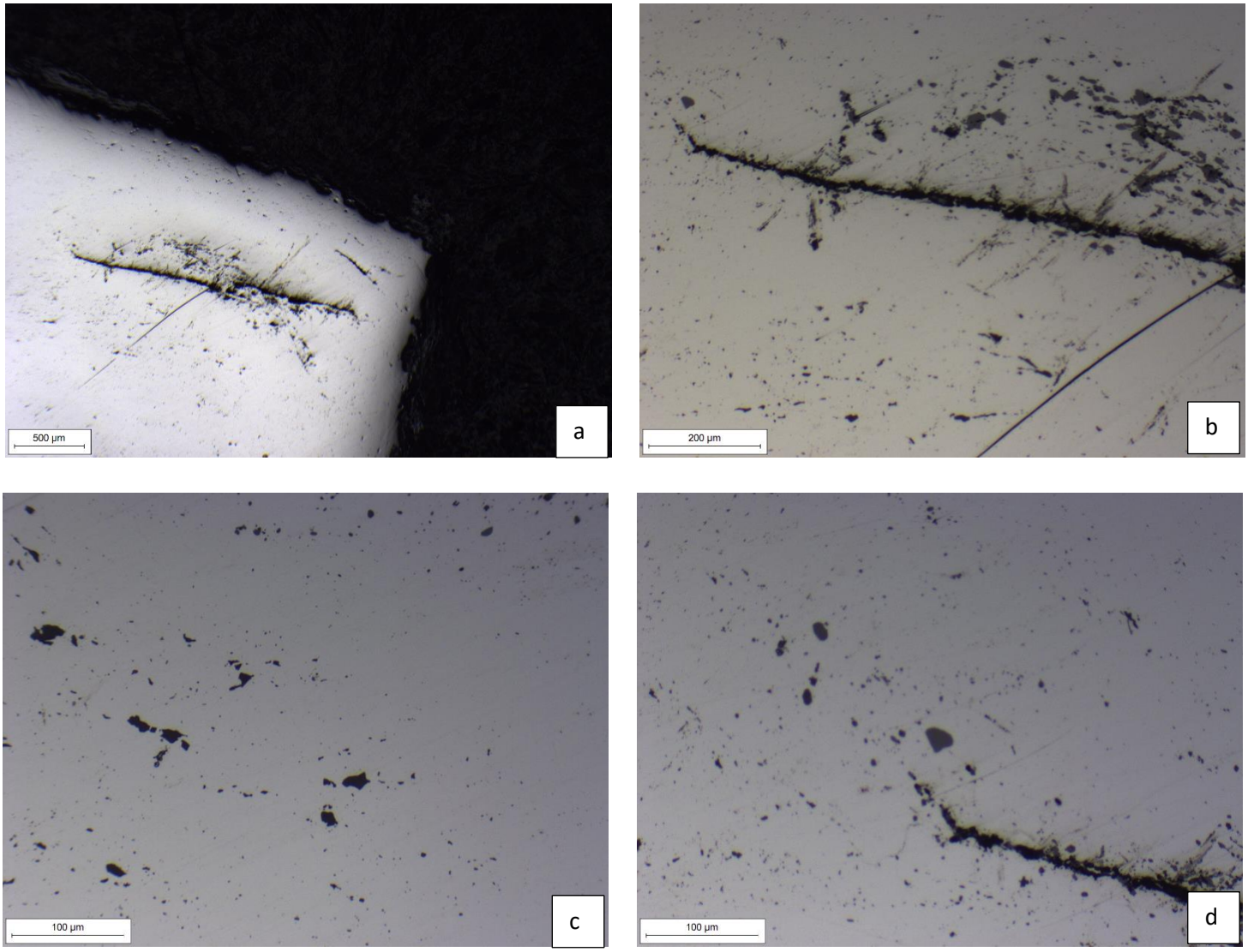



**FIGURE 4-18 MOLLA DEL CANE, ANALISI AL MICROSCOPIO,** MI-2 ZONA 2

### *MI-2 Zona 3*

La distribuzione delle inclusioni nei presso della discontinuità al centro del componente sembra avere direzioni differenti ai due lati della discontinuità (fig. 4-19a) per poi tendere ad avere direzione casuale alla sua estremità (fig. 4-19a e 4-19b). Questo comportamento è in linea con l'ipotesi dei due strati sovrapposti e saldati.

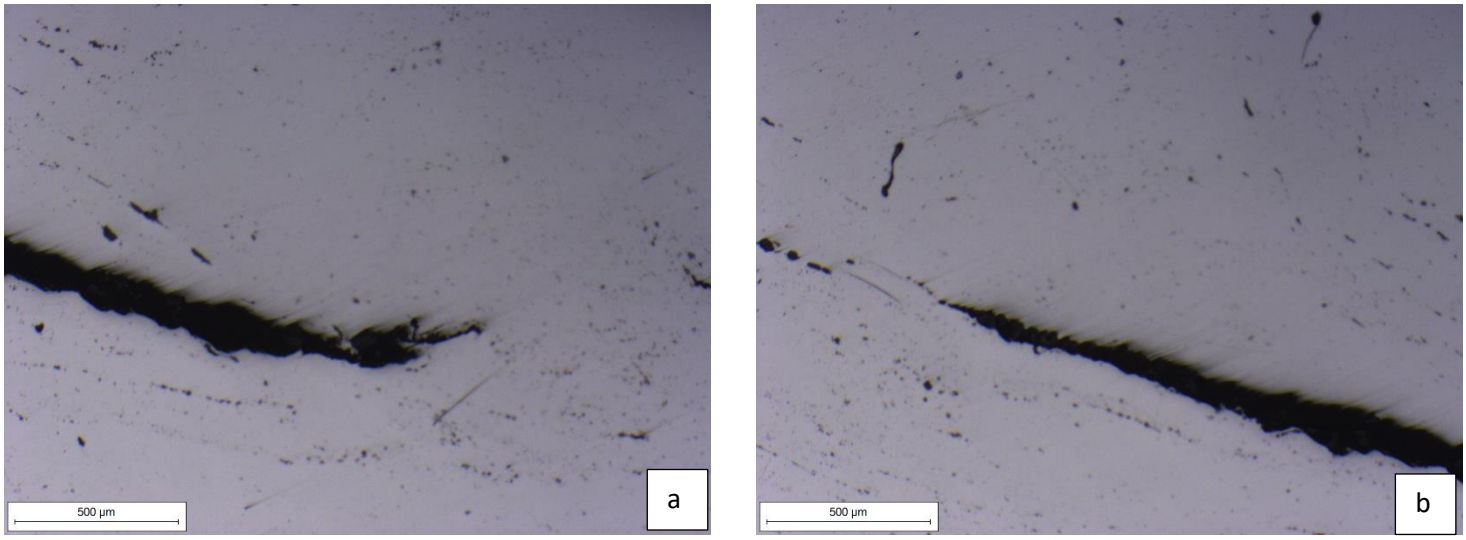



**FIGURE 4-19 MOLLA DEL CANE, ANALISI AL MICROSCOPIO, MI-2 ZONA 3 , DISCONTINUITÀ CENTRO SEZIONE**

### *MI-2 Zona 4*

Immagini, realizzate con ingrandimento crescente, relative a una discontinuità aperta verso l'esterno del campione. Differenza di quanto accadeva nei casi analizzati in precedenza, in questo si può notare quello che sembra l'inizio di propagazione di una cricca originatasi all'estremità interna della discontinuità e in propagazione verso l'interno del componente, forse a causa di un fenomeno di fatica oligociclica.

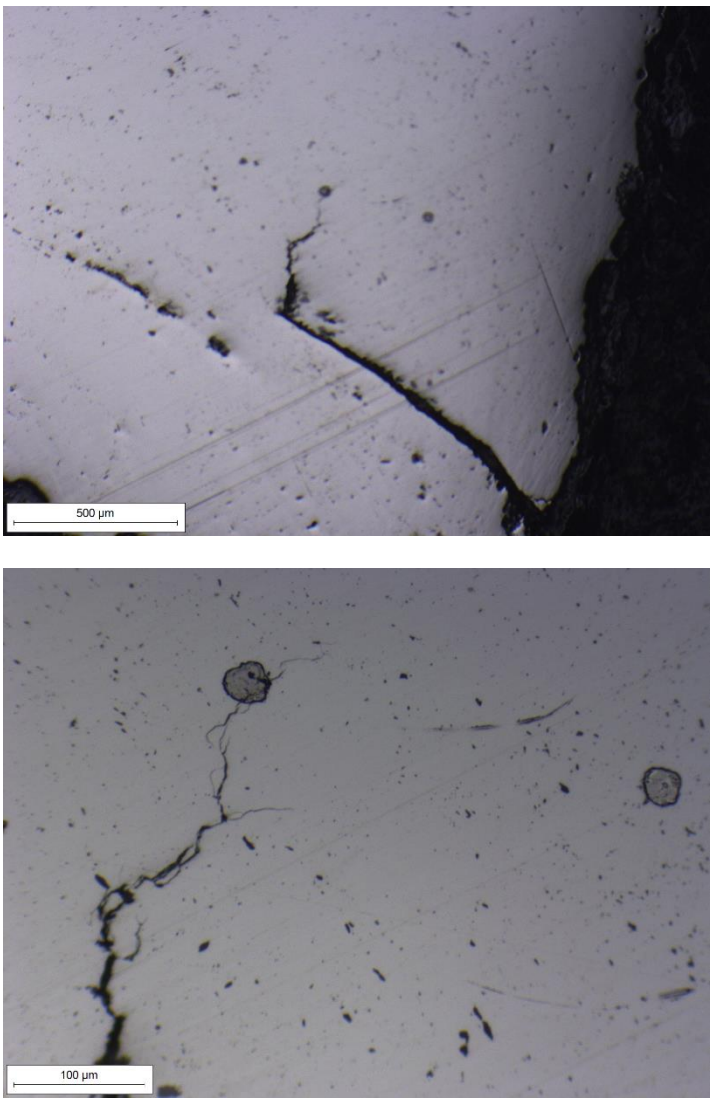



**FIGURE 4-20 MOLLA DEL CANE, ANALISI AL MICROSCOPIO, MI-2 ZONA 4, DISCONTINUITÀ AL BORDO E CRICCA**

### 4.2.3 Analisi microscopio dopo attacco acido

La molla del cane vista la sua funzione elastica è stata supposta realizzata in acciaio ad alto tenore di carbonio e soggetta a trattamento di tempra e possibile rinvenimento. Ci si aspetta quindi una microstruttura costituita prevalentemente da martensite rinvenuta.

#### *MI1 – zona 2*

Microstruttura abbastanza omogenea e a grani fini di martensite rivenuta.

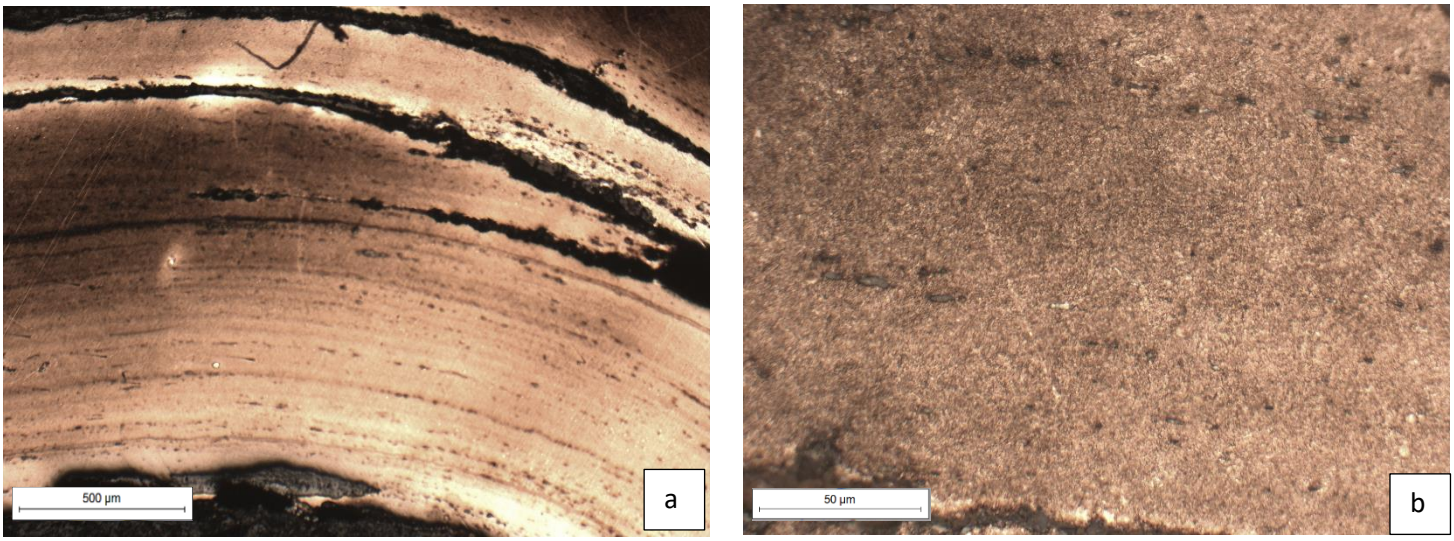
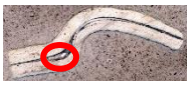



FIGURE 4-21 MOLLA DEL CANE, ANALISI AL MICROSCOPIO DOPO ATTACCO ACIDO, MI-1 ZONA 2, STRUTTURA MARTENSITICA

### *MI1 – zona 3*



La microstruttura è prevalentemente martensitica (fig.4-22a e fig.4-22b). Sono visibili delle zone caratterizzate da lamelle alternate chiare, martensite, e scure che si è ipotizzato essere costituite da bainite (fig. 4-22c e fig.4.22d). Questo tipo di struttura è spiegabile con un raffreddamento non sufficientemente veloce in fase di tempra oppure una composizione non perfettamente omogena dell'acciaio di partenza. Entrambe le teorie sono in linea con i processi in uso all'epoca di realizzazione del componete.

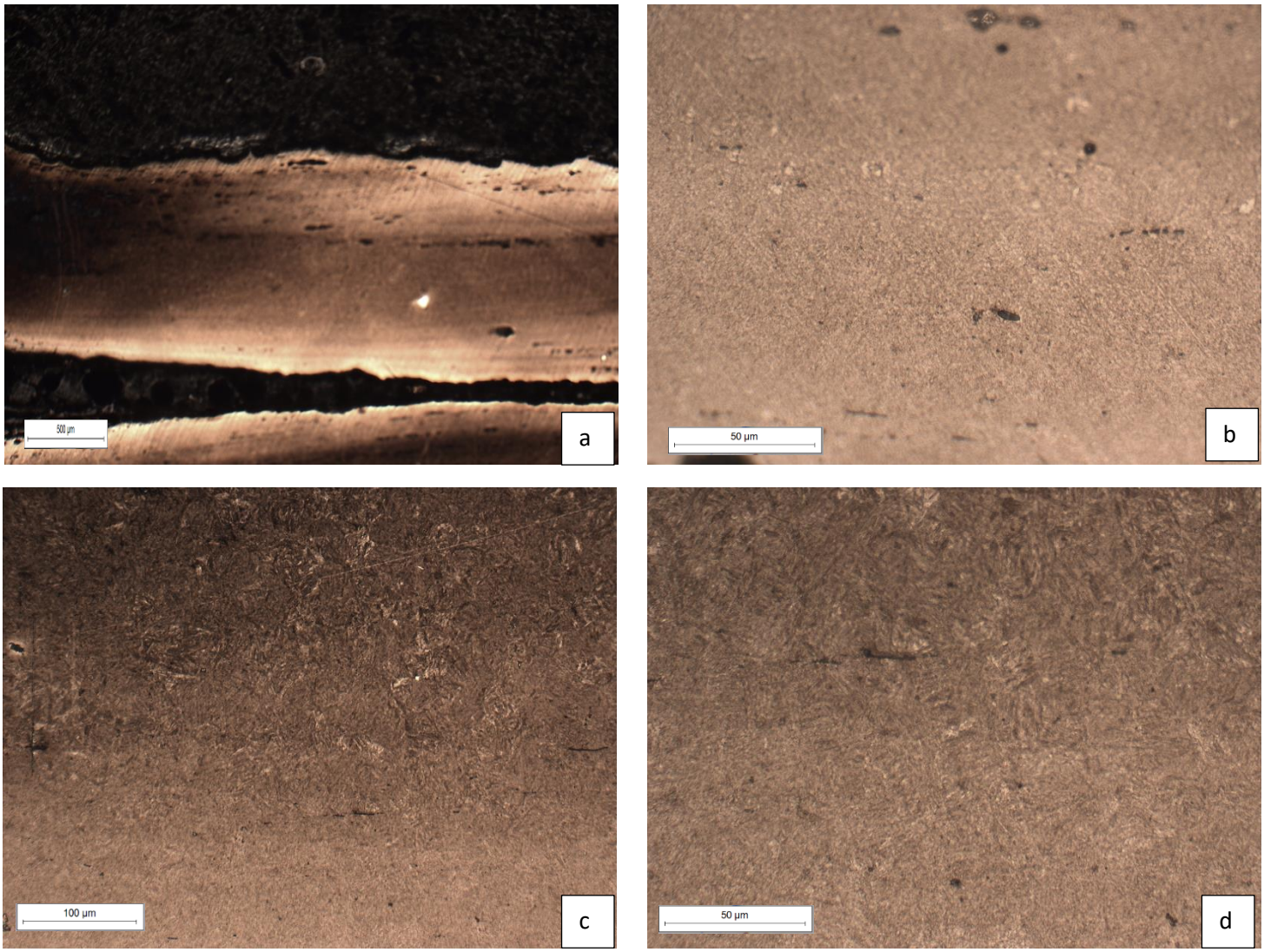



**FIGURE 4-22 MOLLA DEL CANE, ANALISI DOPO ATTACCO ACIDO, MI-1 ZONA 3, STRUTTURA MARTENSITICA**

### *MI2 – zona 1*

La microstruttura presente ad un angolo della sezione trasversale della molla (fig. 4-23a) è caratterizzata da zone alternate di martensite e bainite (fig. 4-23b, fig.23-c e fig. 4.23d)

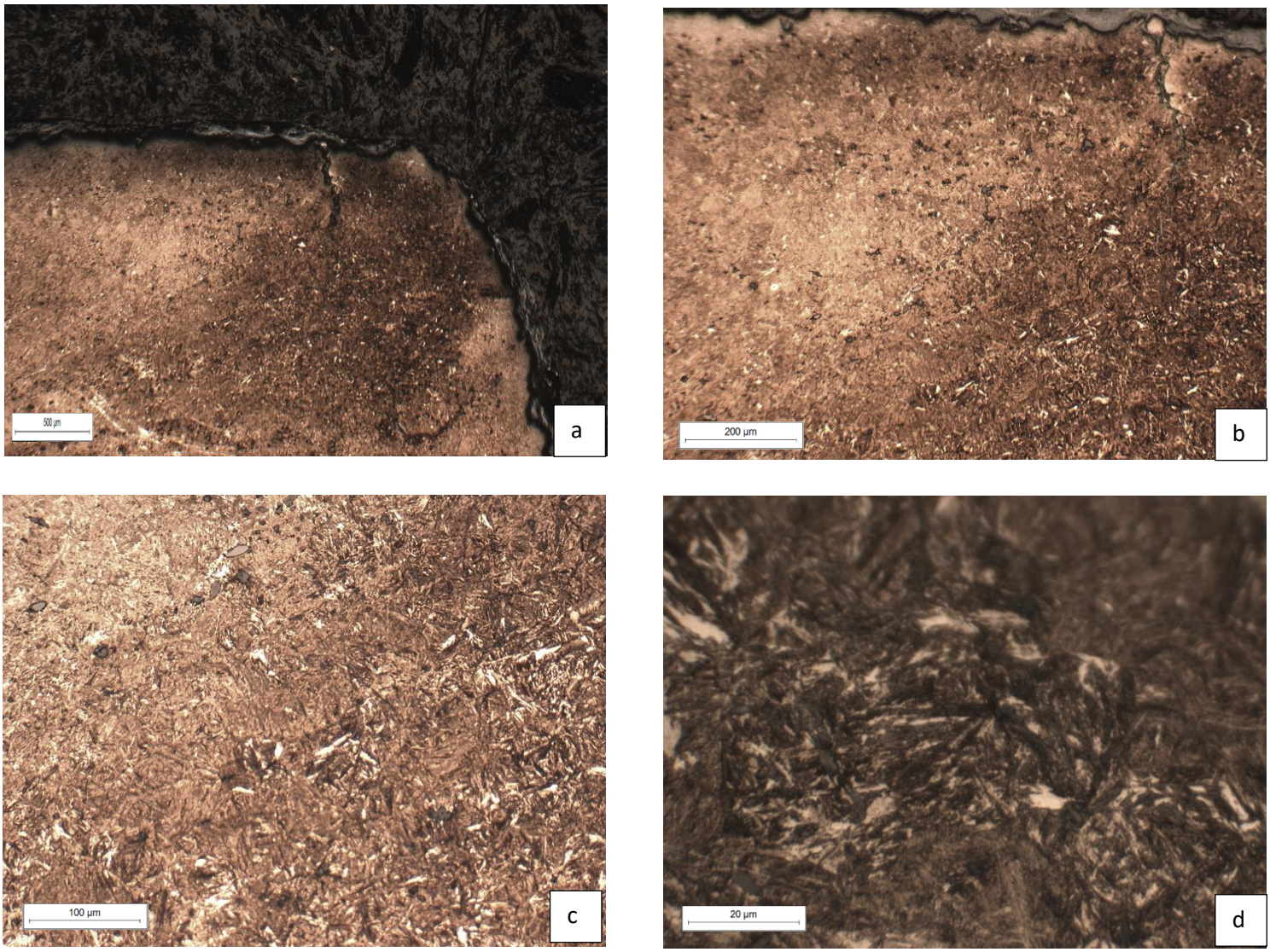



**FIGURE 4-23 MOLLA DEL CANE, ANALISI DOPO ATTACCO ACIDO, MI-2 ZONA 1, STRUTTURA MISTA MARTENSITE BAINITE**

### *MI2 – zona 2*

La microstruttura di questa zona appare la medesima presente nella precedente con l'alternanza di martensite e bainite (fig. 4-24° e fig.4-24b)

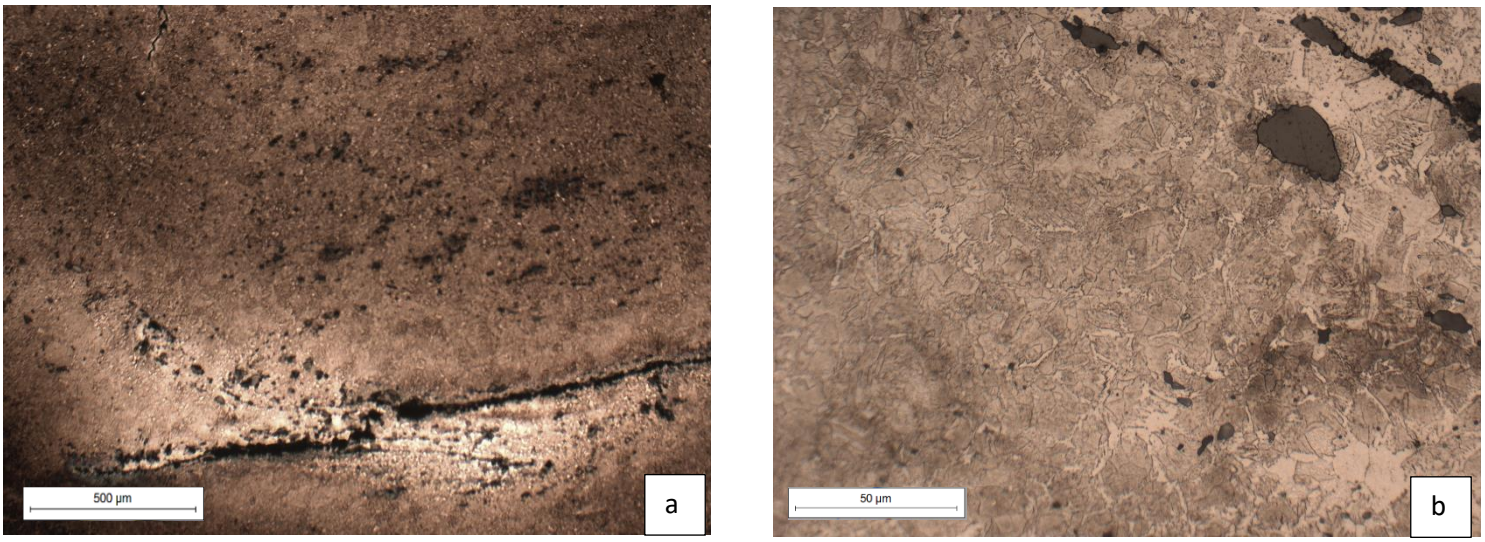



**FIGURE 4-24 MOLLA DEL CANE, ANALISI DOPO ATTACCO ACIDO,** MI-2 ZONA 2, **STRUTTURA MISTA MARTENSITE BAINITE**

### *MI2 – zona 4*

Anche la microstruttura all'angolo opposto della sezione rispetto alla zona 1 appare la stessa vista nei casi precedenti. Si può concludere che il componente sia stato realizzato con due lamine di materiale di composizione non troppo dissimile una dall'altra.

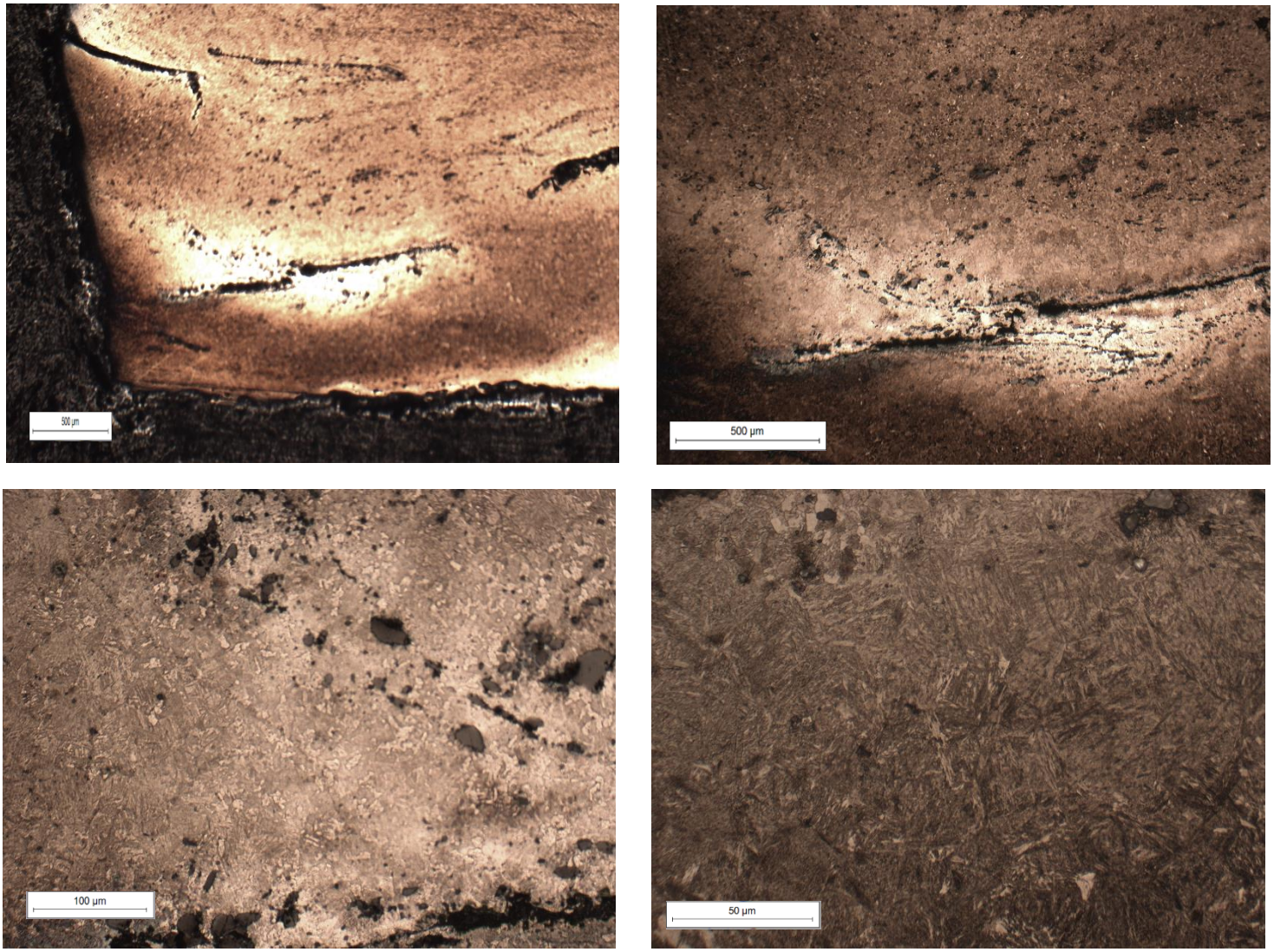



**FIGURE 4-25 MOLLA DEL CANE, ANALISI DOPO ATTACCO ACIDO,** MI-2 ZONA 4, **STRUTTURA MISTA MARTENSITE BAINITE**

## 4.2.4 Microdurezze

Una cucitura di durezza è stata effettuata nella zona evidenziata nell' immagine sottostante. Sulla base delle ipotesi fatte e dei risultati delle precedenti analisi condotte al microscopio ottico ci si attende una durezza alta e uniforme su tutta la sezione.

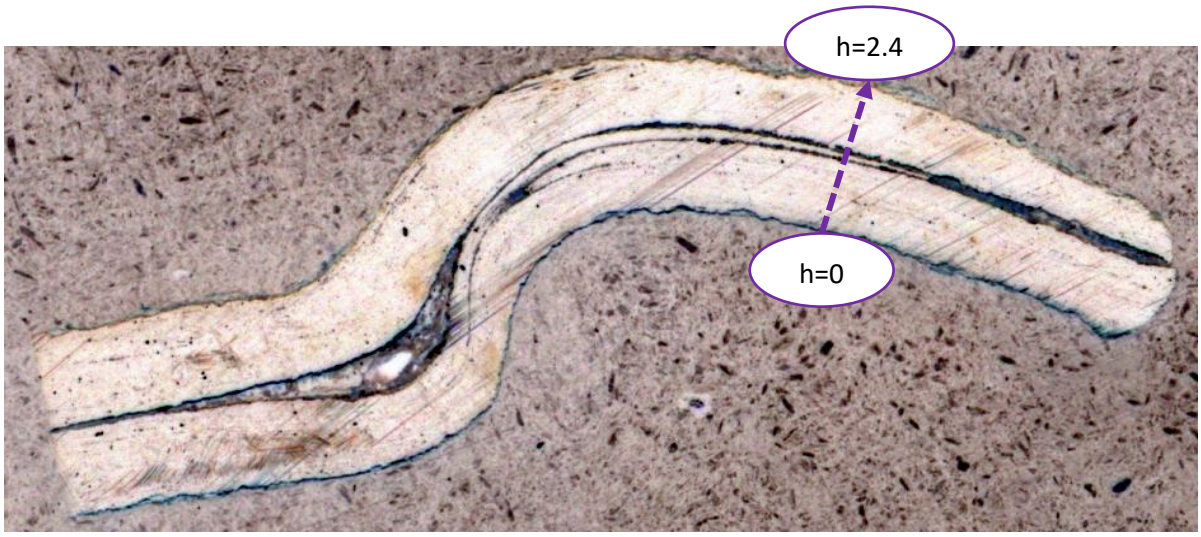



FIGURE 4-26 MOLLA DEL CANE, POSIZIONE CUCITURA DI MICRODUREZZE

La tabella sottostante riassume i valori di microdurezza misurati.

| h | HV03 | Elemento interessato |
|---|---|---|
| 0 | 475,8 | Lamina superiore |
| 0,3 | 479,4 | |
| 0,6 | 499,0 | |
| 0,9 | 453,4 | |
| 1,2 | 53,1 | Cavità tra le due lamine |
| 1,5 | 508,9 | Lamina inferiore |
| 1,8 | 492,2 | |
| 2,1 | 463,0 | |
| 2,4 | 397,6 | |

TABLE 2 MOLLA DEL CANE, RISULTATI MICRODUREZZE HV03

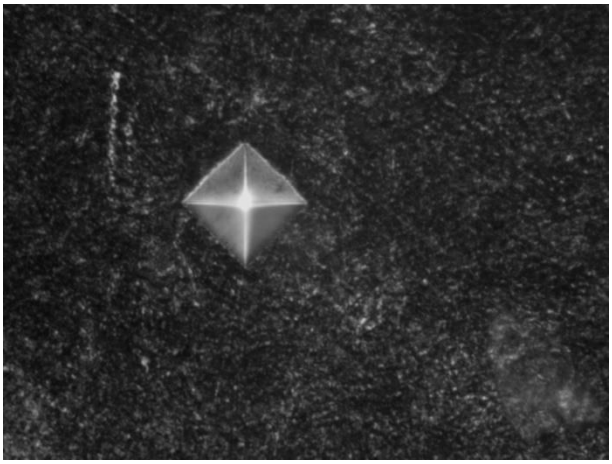


FIGURE 4-27 MOLLA DEL CANE, DETTAGLIO IMPRONTE MICRODUREZZE IN ZONA MARTENSITICA

I risultati sono in linea con le attese, il materiale risulta essere stato completamente temprato (fig. 4-27) e la durezza è quella caratteristica di un acciaio a medio alto tenore di carbonio, non si notano sostanziali differenze di durezza tra le due lamine.

### 4.2.5 Risultati

A seguito di sezionamento e inglobatura si è riscontrato che, come già accaduto per il piattello del cane anche la molla del cane, è stata realizzata a partire da almeno due lamine differenti. In questo caso ciò non è però spiegabile come tentativo risparmiare sul costo del componente. Due altre potrebbero essere invece le spiegazioni: la difficoltà di reperire acciaio adatto alla realizzazione della molla nello spessore necessario oppure l'utilizzo di un processo di cementazione per ottenere l'acciaio necessario a partire da ferro. Nel primo caso pur non trattandosi di una tecnica comune essa poteva essere utilizzata se non era disponibile materiale nello spessore voluto. Nel secondo caso l'utilizzo di lamine sottili o pezzi di piccole dimensioni, essendo la cementazione un trattamento basato sulla diffusione superficiale, permette di accorciare i tempi necessari al processo stesso.
Considerando la sezione trasversale (M1) i diversi strati appaiono separati principalmente nella parte centrale del componente, risultano invece ben saldati insieme alla estremità laterali.
La distribuzione delle inclusioni ricalca bene la forma del profilo del componente, ciò avvalla l'ipotesi che esso sia stato sagomato prevalentemente tramite deformazione plastica.
L'analisi al microscopio dopo attacco acido e il profilo di durezza evidenziano una microstruttura uniforme e l'utilizzo di un acciaio ad alto tenore di carbonio, sottoposto a tempra e forse anche a rinvenimento.
A parte per la realizzazione a partire da lamine sovrapposte i risultati delle analisi sulla molla del cane sono in linea con le ipotesi iniziali.

## 4.3 Batteria

### 4.3.1 Analisi macroscopica

Il componente a differenza dei precedenti si presenta esente da evidenti discontinuità in entrambe le sezioni, non ci sono tracce di uno strato di materiale più duro, unito tramite saldatura al corpo principale sulla faccia di impatto. Esclusa questa possibilità esso è stato supposto realizzato completamente in acciaio e soggetto a trattamento termico di tempra e rinvenimento almeno sulla faccia su cui avveniva il contatto con la pietra focaia. La posizione delle aree analizzate in ognuna delle sezioni è stata scelta anche per verificare questa ipotesi.

- M-1
  1. Estremità della sezione corrispondente all'apice della faccia di impatto della batteria
  2. Zona centrale sulla faccia opposta a quella di impatto
  3. Zona centrale sulla faccia di impatto
  4. Estremità della sezione sulla faccia di impatto corrispondente circa al centro del componente
- M-2
  1. Uno degli angoli della sezione corrispondente a uno spigolo tra la faccia su cui impatta la pietra e quella opposta
  2. Zona centrale sulla faccia di impatto
  3. Zona centrale sulla faccia opposta a quella di impatto

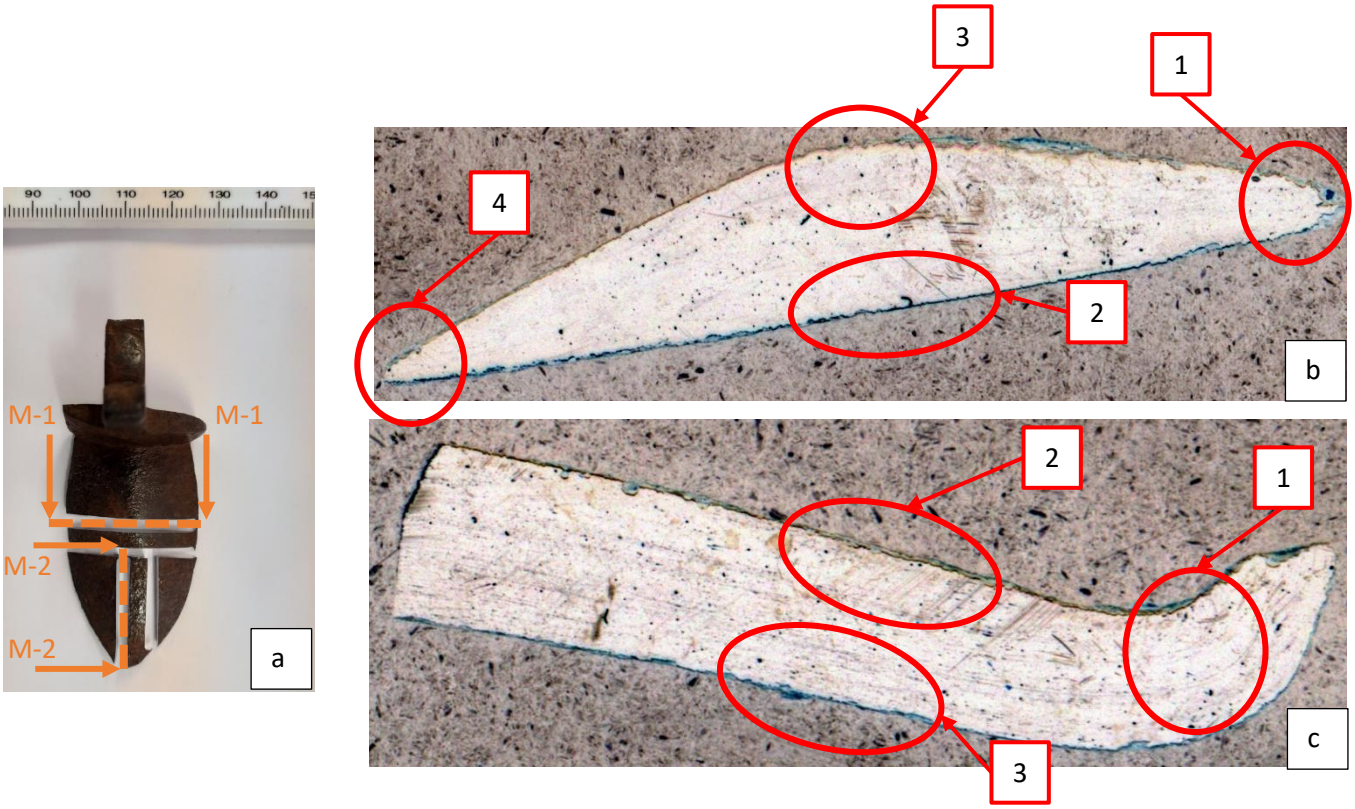



FIGURE 4-28 BATTERIA, POSIZIONE AREE ANALIZZATE (A), SEZIONE M-1(B) E SEZIONE M-2(C)

## 4.3.2 Analisi microscopio

Sulla base delle ipotesi fatte ci si aspetta una direzione delle inclusioni prevalentemente uniforme e di non trovare segni di discontinuità.

### *M1 zona 1*

La direzione inclusioni segue li profilo esterno della sezione sulle due facce, inferiore e superiore (fig. 4-29a), e appare meno evidente nella parte centrale. Come già anticipato nella scansione a basso ingrandimento non si evidenziano discontinuità interne al componente che potrebbero far pensare a realizzazione con differenti strati di materiale.

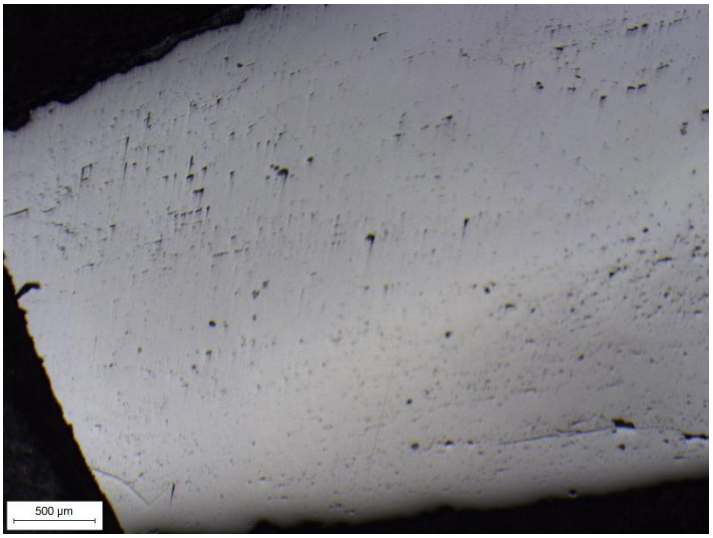



**FIGURE 4-29 BATTERIA, ANALISI AL MICROSCOPIO,** M1 ZONA 1

## *M1 zona 2*

La  distribuzione delle inclusioni segue prevalentemente il contorno della sezione (fig.4-30b) e non si evidenziano discontinuità o cricche (fig. 4-30a).

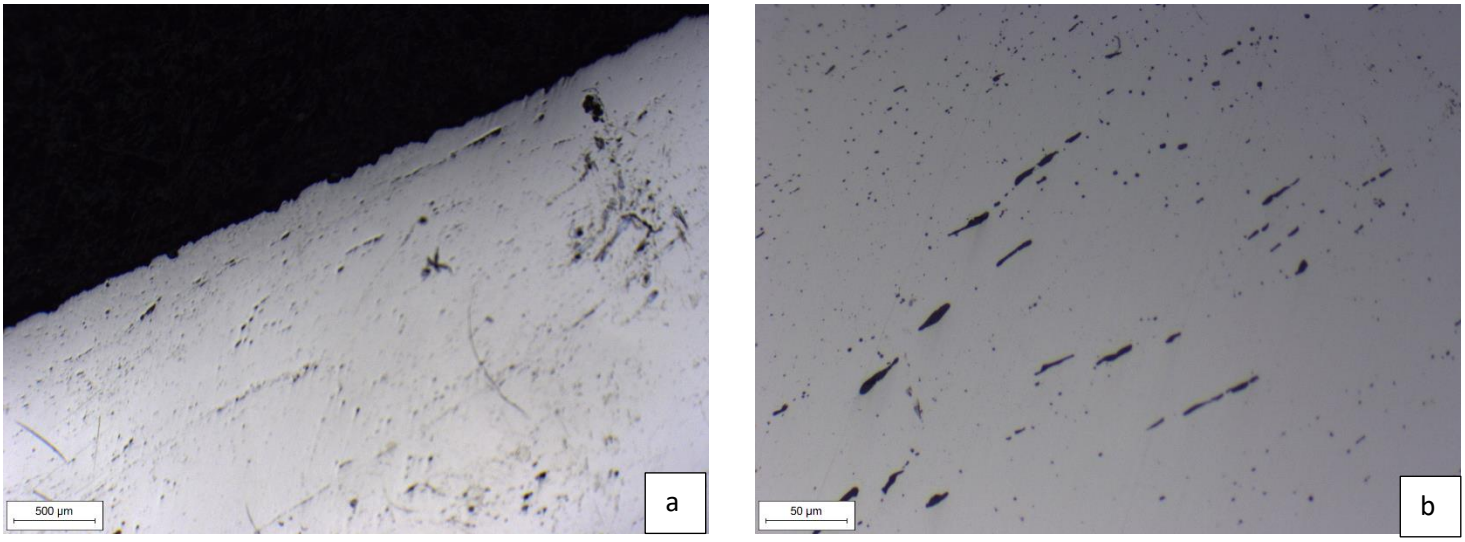



**FIGURE 4-30 BATTERIA, ANALISI AL MICROSCOPIO,** M1 ZONA 2

## *M1 zona 3*

Un andamento della distribuzione delle inclusioni simile a quanto visto nella zona precedente si ritrova anche sull'altro lato del provino, sulla faccia opposta a quella su cui impatta la pietra focaia. La direzione delle inclusioni è abbastanza uniforme (fig. 4-31b) e ricalca il contorno della sezione (fig.4-31a).

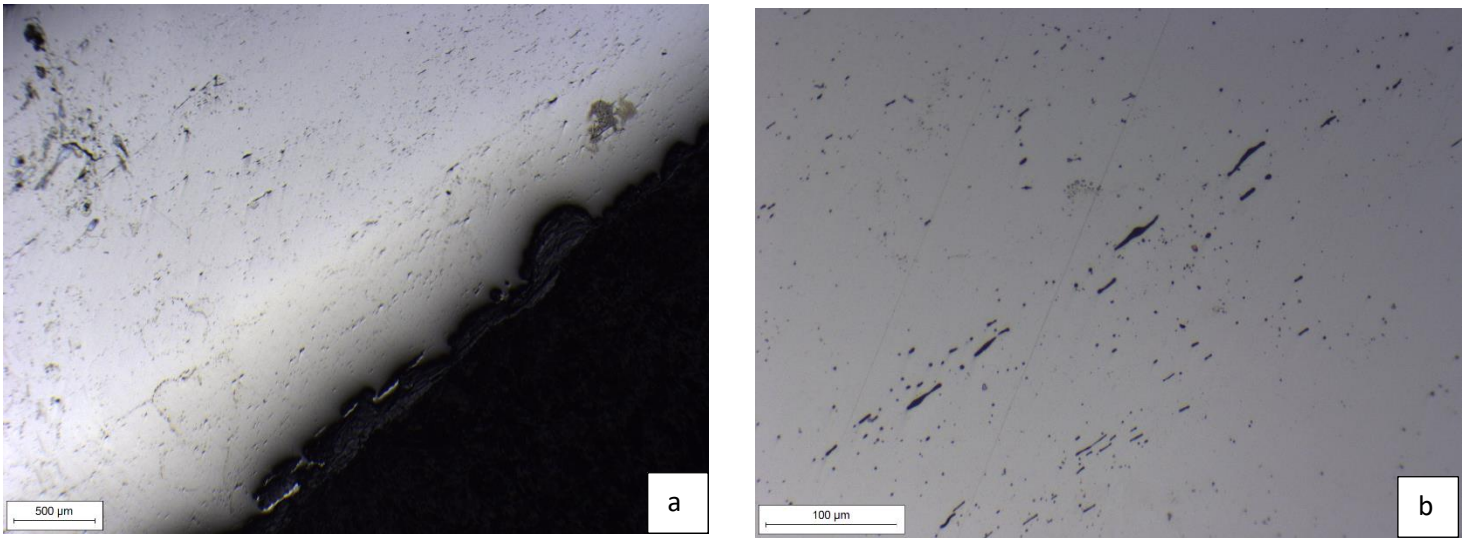
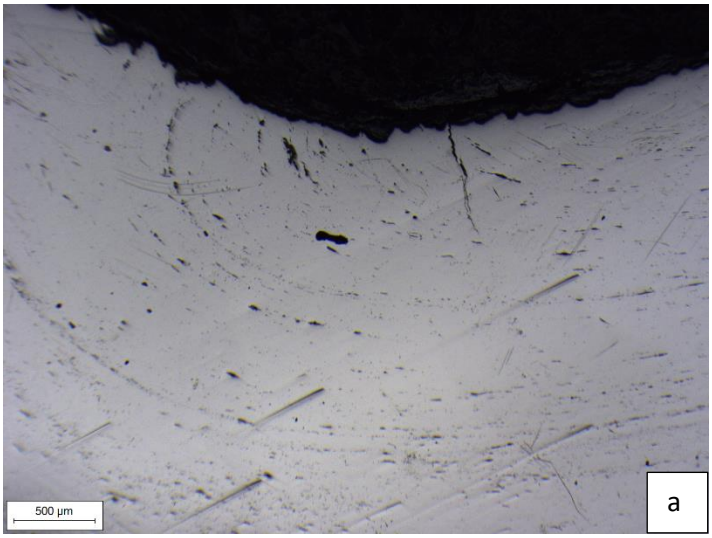
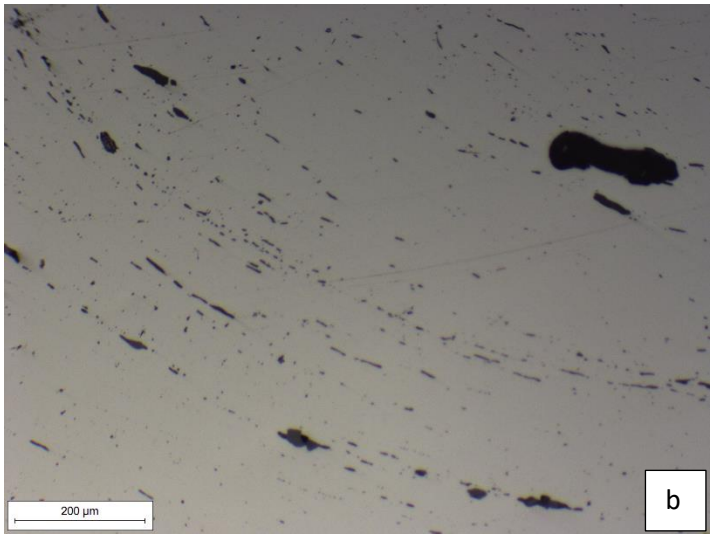



**FIGURE 4-31 BATTERIA, ANALISI AL MICROSCOPIO,** M1 ZONA 3

## *M2 zona 1*

L'andamento delle inclusioni segue il profilo di curvatura del componente (fig. 4-32a e fig-4-32b) , ciò è in linea con la realizzazione della curvatura tramite deformazione plastica. All'inizio della zona di piega è stata vista una piccola discontinuità che ad ingrandimento maggiore (fig. 4-32c) è risultata essere una cricca aperta verso l'esterno e in corso di propagazione verso l'interno, probabilmente dovuta a fatica oligociclica.



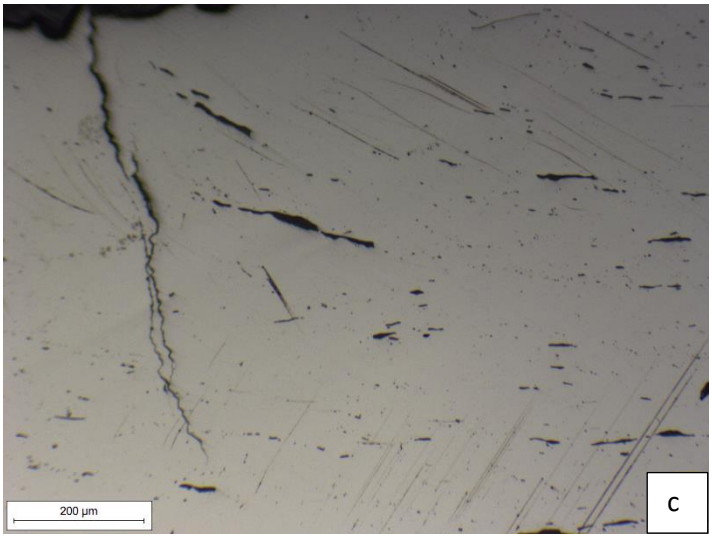



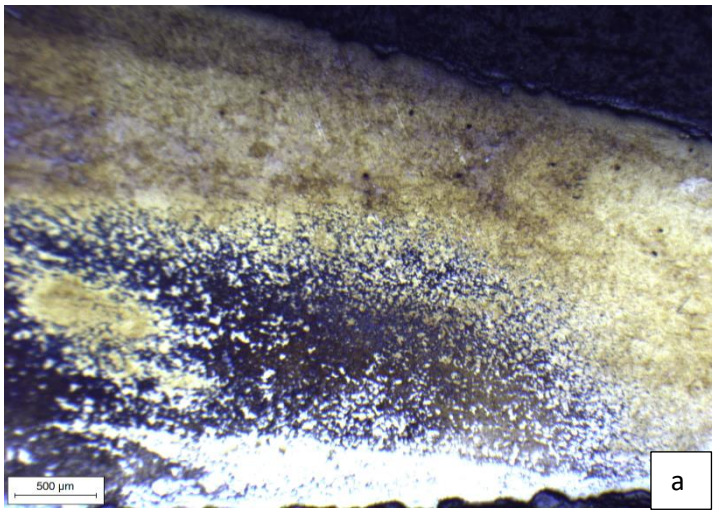

**FIGURE 4-32 BATTERIA, ANALISI AL MICROSCOPIO, M2 ZONA 1, ZONA CURVATURA PROFILO E CRICCA**

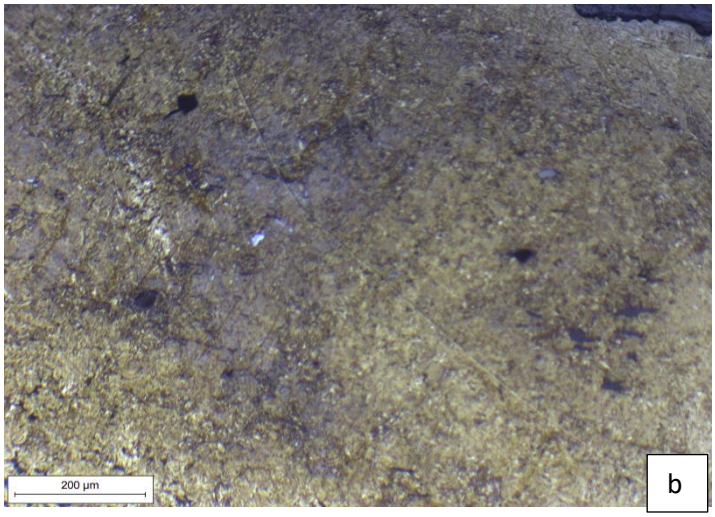
## 4.3.3 Analisi microscopio dopo attacco acido

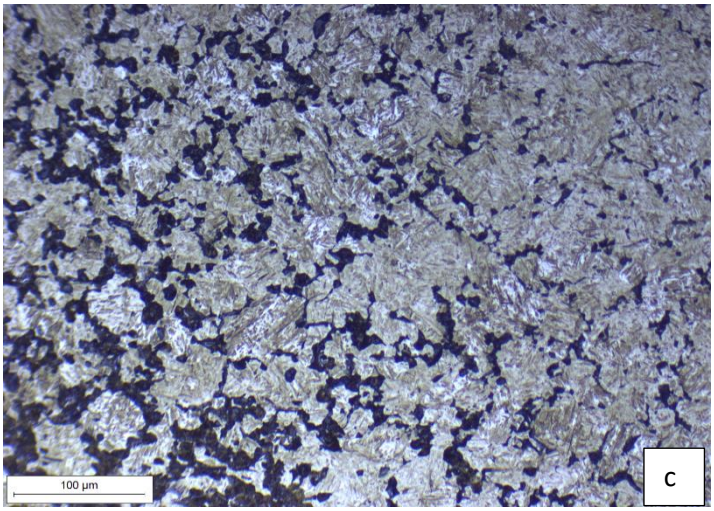
Il componente è stato ipotizzato costituito da acciaio e sottoposto a trattamento termico di tempra e rinvenimento almeno sulla faccia su cui va ad impattare la pietra focaia. Ci si aspetta quindi una microstruttura martensitica o bainitica sulla faccia di impatto mentre su quelle opposta potrebbe essere costituita da perlite e cementite.

### *M1 zona 1*

La microstruttura del componente si presenta molto varia movendosi da un bordo all'altro della sezione di riscontrano almeno tre differenti microstrutture (fig. 4-33a). Con riferimento alla figura 4-33a, nella parte alta della sezione, corrispondente alla faccia del componente opposta a quella su cui impatta la pietra focaia, è presente una vasta zona a microstruttura più chiara, identificabile come martensite (fig. 4-33-b). Muovendosi verso il basso si incontra una zona via via più scura a causa della comparsa di perlite mista a martensite (fig. 4-33c). Nella parte inferiore della sezione corrispondente alla faccia su cui avveniva l'impatto della pietra focaia si riscontra nuovamente una sottile zona chiara costituita in prevalenza da martensite con alcune zone di perlite (fig. 4-33d). La microstruttura è differente da quanto ipotizzato in base ai requisiti funzionali del pezzo.



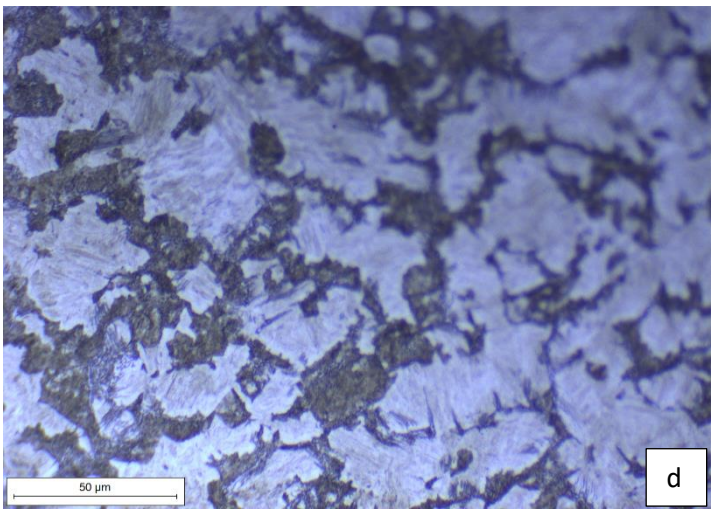




FIGURE 4-33 BATTERIA, ANALISI DOPO ATTACCO ACIDO, M1 ZONA 1, STRUTTURA MISTA A STRATI MARTENSITE E PERLITE

## *M1 zona 2*

La microstruttura vista nella zona precedente si ritrova anche in quest'area, si presenta una zona più chiara a prevalenza martensite vicino al bordo della faccia di impatto della pietra focaia (fig. 4-34a) e una maggiore concentrazione di perlite muovendosi verso il centro della sezione (fig. 4-34b)

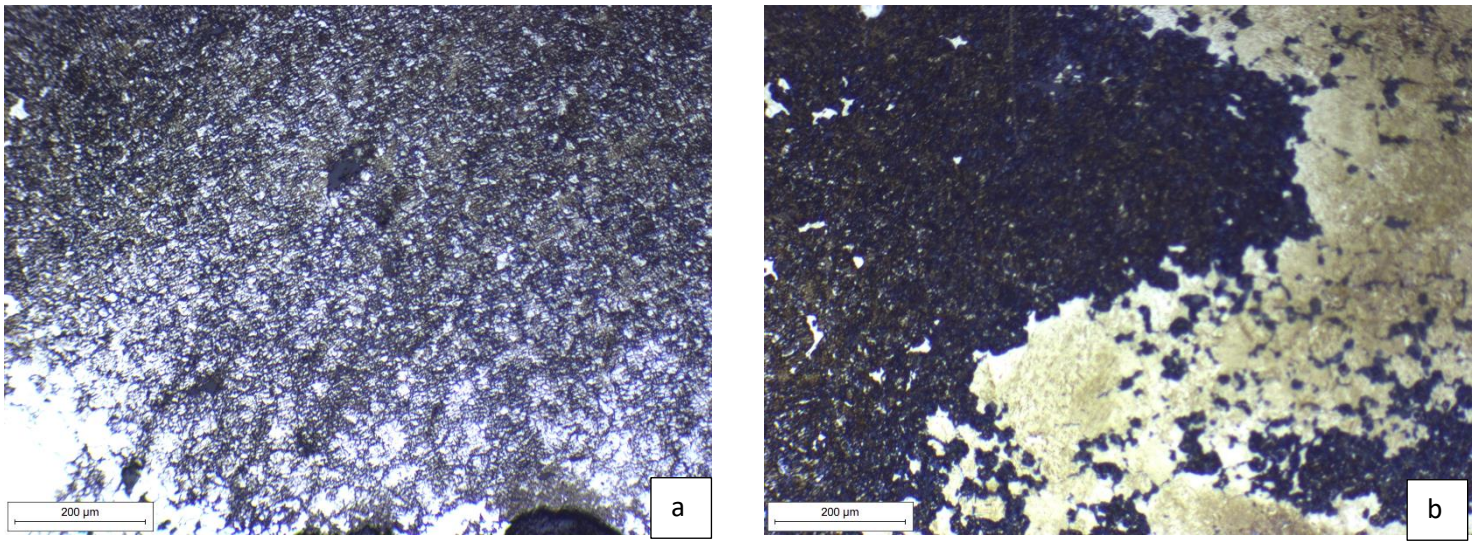



FIGURE 4-34 BATTERIA, ANALISI DOPO ATTACCO ACIDO, M1 ZONA 2, STRUTTURA MISTA PERLITE E MARTENSITE

## *M1 zona 3*

La microstruttura è in prevalenza martensitica sul profilo superiore della sezione (fig. 4-35a), corrispondente alla faccia opposta a quella di impatto della pietra focaia; mentre muovendosi il basso si passa a una microstruttura costituita da perlite, nella figura 4-35b un dettaglio della zona di transizione. Sul bordo esterno è visibile un piccolo strato più chiaro dovuto a decarburazione.

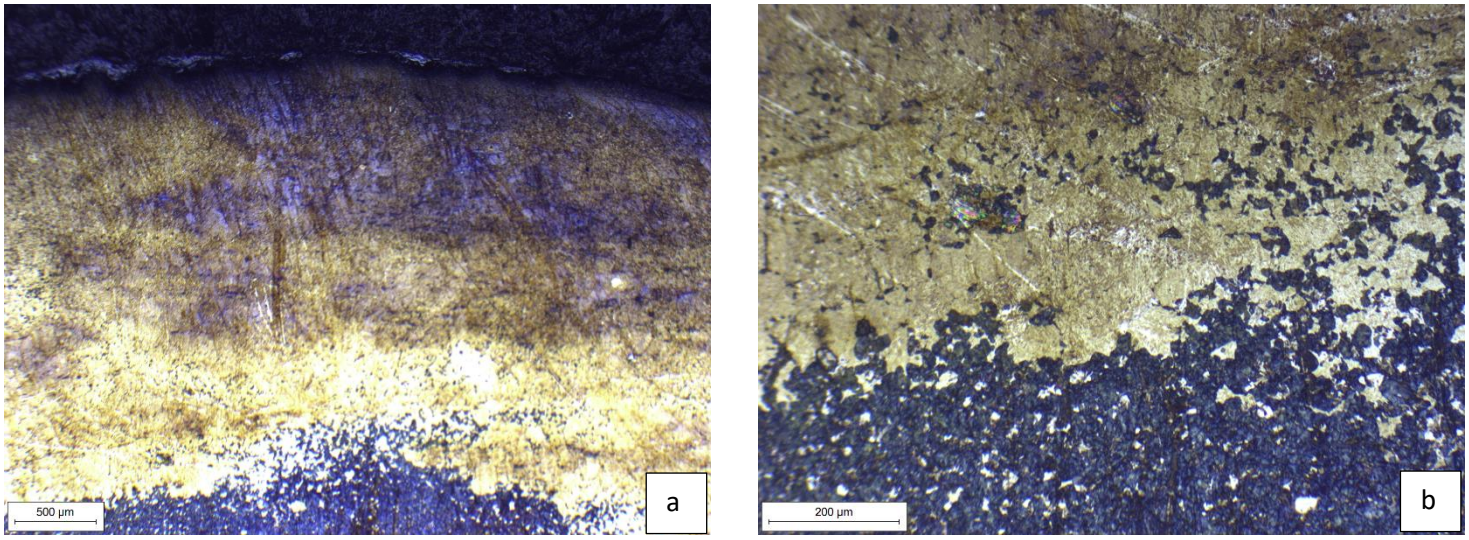



FIGURE 4-35 BATTERIA, ANALISI DOPO ATTACCO ACIDO, M1 ZONA 3, STRUTTURA CON UNA FASCIA MARTENSITICA E UNA PERLITICA

### *M1 zona 4*

La microstruttura si presenta con la suddivisione in strati già osservata nelle altre zone (fig. 4-36a). Le aree più chiare a prevalenza martensitica presentano al loro interno molteplici isole di perlite (fig. 4-36b e fig. 4-36c), allontanandosi dal bordo della sezione di presenta una fascia a prevalenza perlite con all'interno alcune aree di martensite (fig. 4-36d).

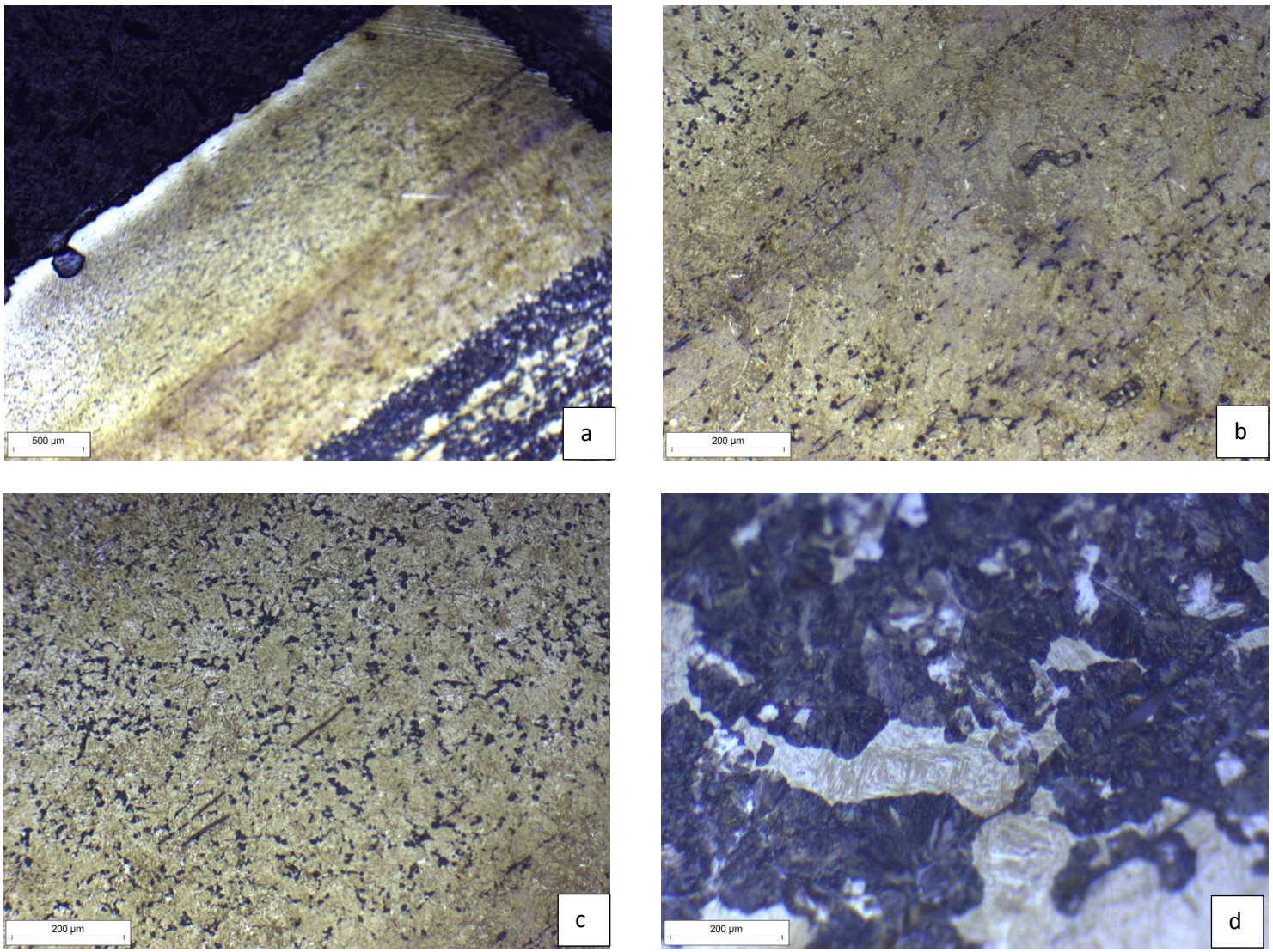



**FIGURE 4-36 BATTERIA, ANALISI DOPO ATTACCO ACIDO , M2 ZONA 4, STRUTTURA A BANDE ALTERNATE MARTENSITE E PERLITE(A), DETTAGLI CON ISOLE DI PERLITE IN MARTENSITE (B,C) E ISOLE DI MARTENSITE IN PERLITE (D)**

### *M2 zona 1*

La microstruttura è a prevalenza martensitica su entrambi i lati (fig. 4-37a), questo porta a ipotizzare che nelle intenzioni del fabbricante tutto il componente avrebbe dovuto avere questa struttura. Muovendosi verso destra si osserva una zona più chiara probabilmente costituita sempre da martensite ma a più basso tenore di carbonio. Nella figura 4-37b un dettaglio della zona centrale della sezione in cui sono visibili alcune aree più scure dovute alla presenza di perlite.

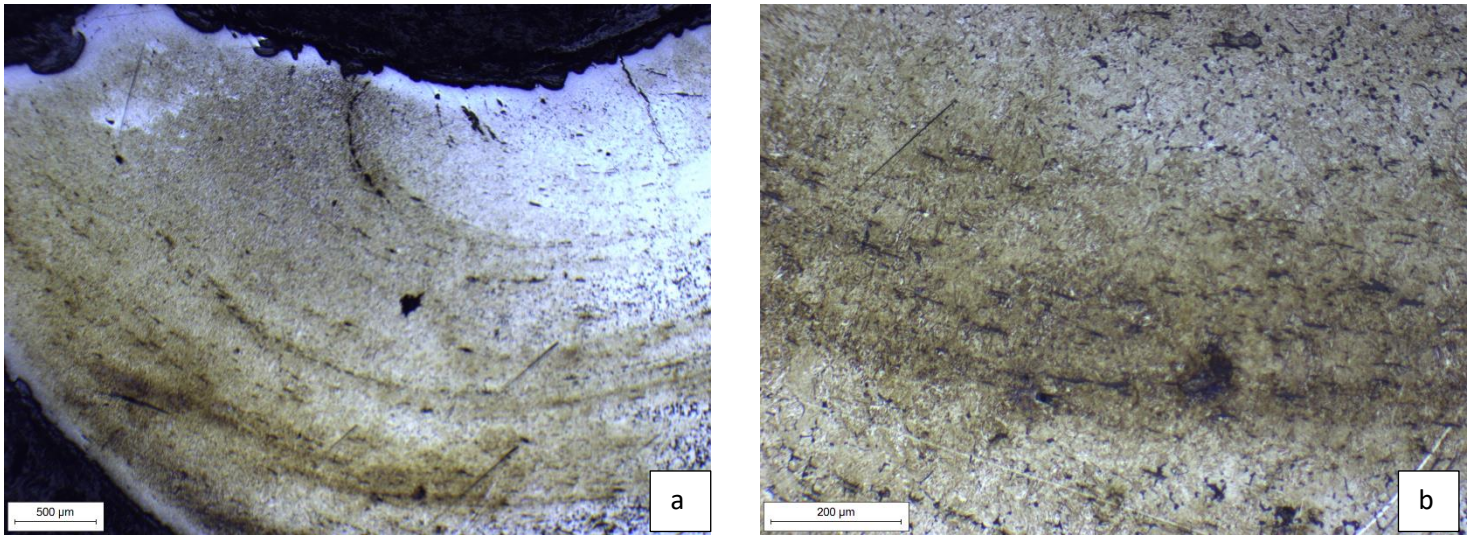



**FIGURE 4-37 BATTERIA, ANALISI DOPO ATTACCO ACIDO, M2 ZONA 1, STRUTTURA MARTENSITICA CON ISOLE DI PERLITE**

### *M2 zona 2*

La microstruttura appare costituita in prevalenza da martensite in cui si vedono molte aree più scure dovute a perlite (fig. 4-38a), nella figura 4-38b un dettaglio a maggiore ingrandimento.

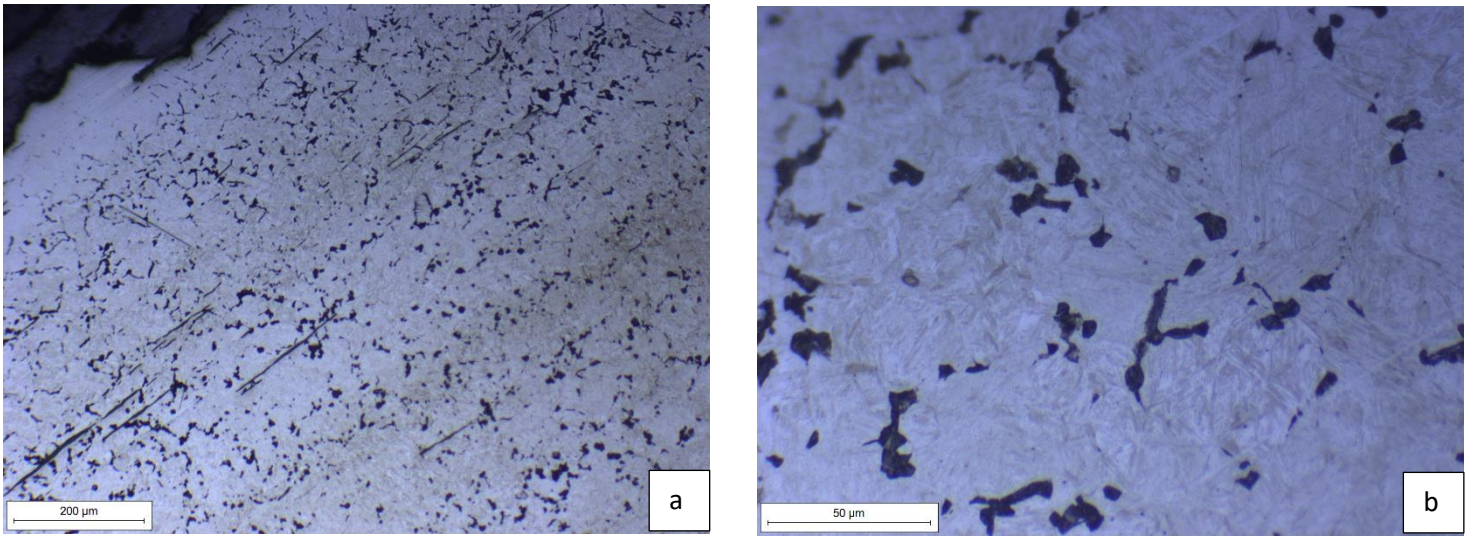
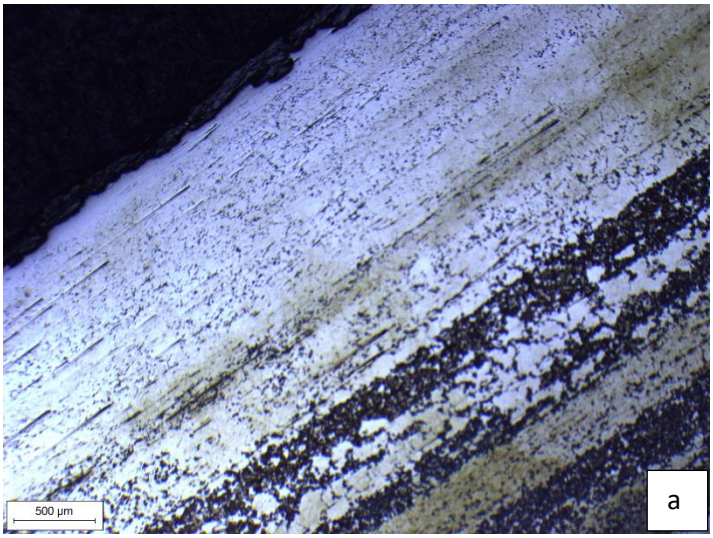
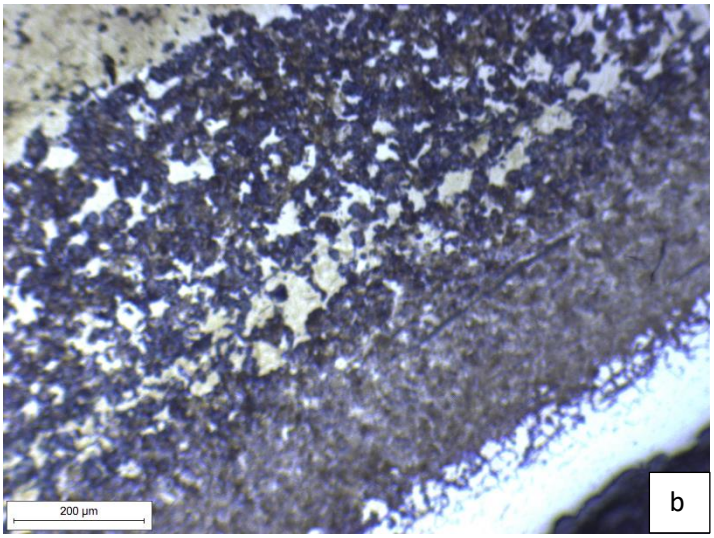



**FIGURE 4-38 BATTERIA, ANALISI DOPO ATTACCO ACIDO, M2 ZONA 2, STRUTTURA MARTENSITICA CON ISOLE DI PERLITE**

### *M2 zona 3*

La microstruttura in questa zona si presenta a strati (fig. 4-39a). Partendo dal bordo esterno, corrispondente alla faccia opposta a quella su cui avveniva l'impatto della pietra focaia si incontra una zona martensitica, una zona in cui si alternano fasce prevalentemente perlitica con isole di martensite e altre prevalentemente martensitica con isole di perlite e infine nuovamente un sottile strato chiaro dovuto nuovamente a martensite sulla faccia su cui avveniva l'impatto della pietra focaia (fig. 4-39b e fig. 4-39c).



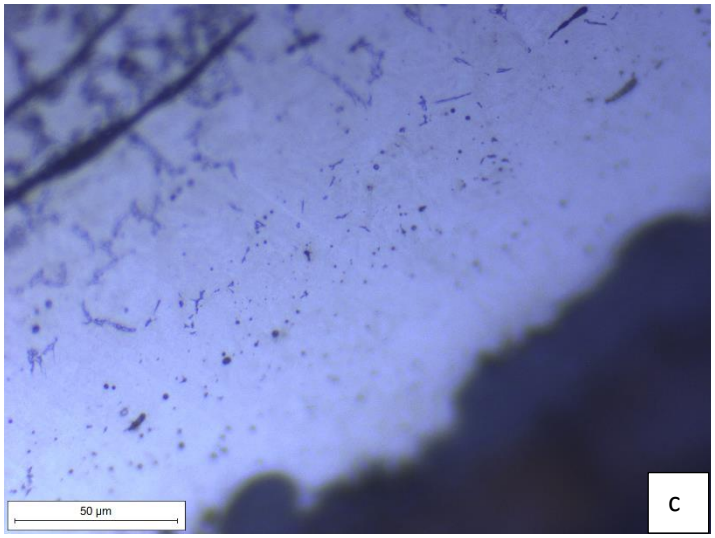




**FIGURE 4-39 BATTERIA, ANALISI DOPO ATTACCO ACIDO, M2 ZONA 3, STRUTTURA A BANDE ALTERNATE MARTENSITE E PERLITE(A,B) E DETTAGLIO STRATO ESTERNO MARTENSITICO ©**

## 4.3.4 Microdurezze

Secondo le prime ipotesi fatte su questo componente ci si sarebbe aspettati un profilo di durezza costante oppure decrescente a partire dalla faccia di impatto verso la faccia opposta. A seguito degli inaspettati risultati dell'analisi effettuata tramite microscopio ottico il profilo atteso è invece di durezza variabile nella prima metà della sezione, a seconda di quale microstruttura sarà indentata e poi durezza generalmente alta vicino alla faccia opposta a quella di impatto. A causa di questa variabilità attesa nella durezza del componente si è deciso di effettuare tre cuciture distinte, la prima al centro della sezione e le altre due in zone laterali, tutte sono state effettuate attraverso l'intero profilo.

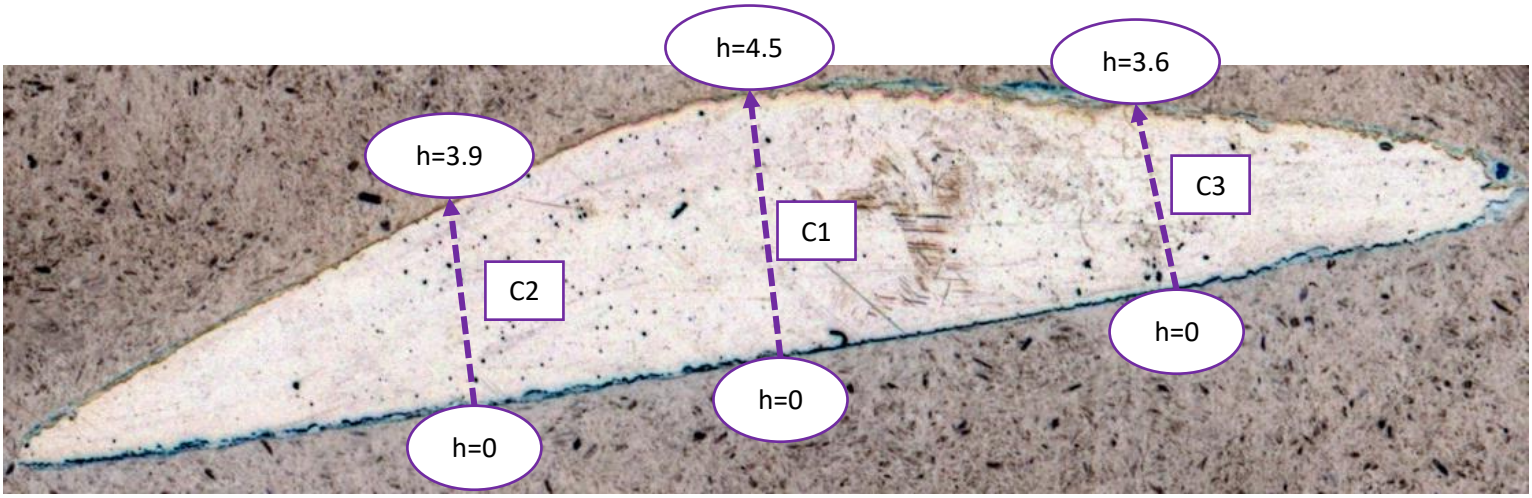



FIGURE 4-40 BATTERIA, POSIZIONE CUCITURE DI DUREZZA

La tabella sottostante riassume i valori di microdurezza HV calcolati.

| C1 | HV03 | C2 | HV03 | C3 | HV03 |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 326,8 | 0 | 384,3 | 0 | 395 |
| 0,3 | 359,1 | 0,3 | 495,7 | 0,3 | 307,2 |
| 0,6 | 601,3 | 0,6 | 423,6 | 0,6 | 700,5 |
| 0,9 | 332,5 | 0,9 | 353,5 | 0,9 | 675,6 |
| 1,2 | 349,4 | 1,2 | 325,9 | 1,2 | 322,7 |
| 1,5 | 309,3 | 1,5 | 349,4 | 1,5 | 349,6 |
| 1,8 | 404,4 | 1,8 | 382,9 | 1,8 | 477,3 |
| 2,1 | 404,4 | 2,1 | 734,6 | 2,1 | 448,7 |
| 2,4 | 680,2 | 2,4 | 542,1 | 2,4 | 418 |
| 2,7 | 757,9 | 2,7 | 632 | 2,7 | 477,1 |
| 3 | 778,5 | 3 | 685,7 | 3 | 449,7 |
| 3,3 | 759,3 | 3,3 | 627,8 | 3,3 | 466,6 |
| 3,6 | 766 | 3,6 | 549,6 | 3,6 | 475 |
| 3,9 | 744,1 | | | 3,9 | 680,6 |
| 4,2 | 671,4 | | | | |
| 4,5 | 737,1 | | | | |

TABLE 3 BATTERIA, RISULTATI MICRODUREZZE HV03

Graficando i risultati per le tre cuciture si ottiene:

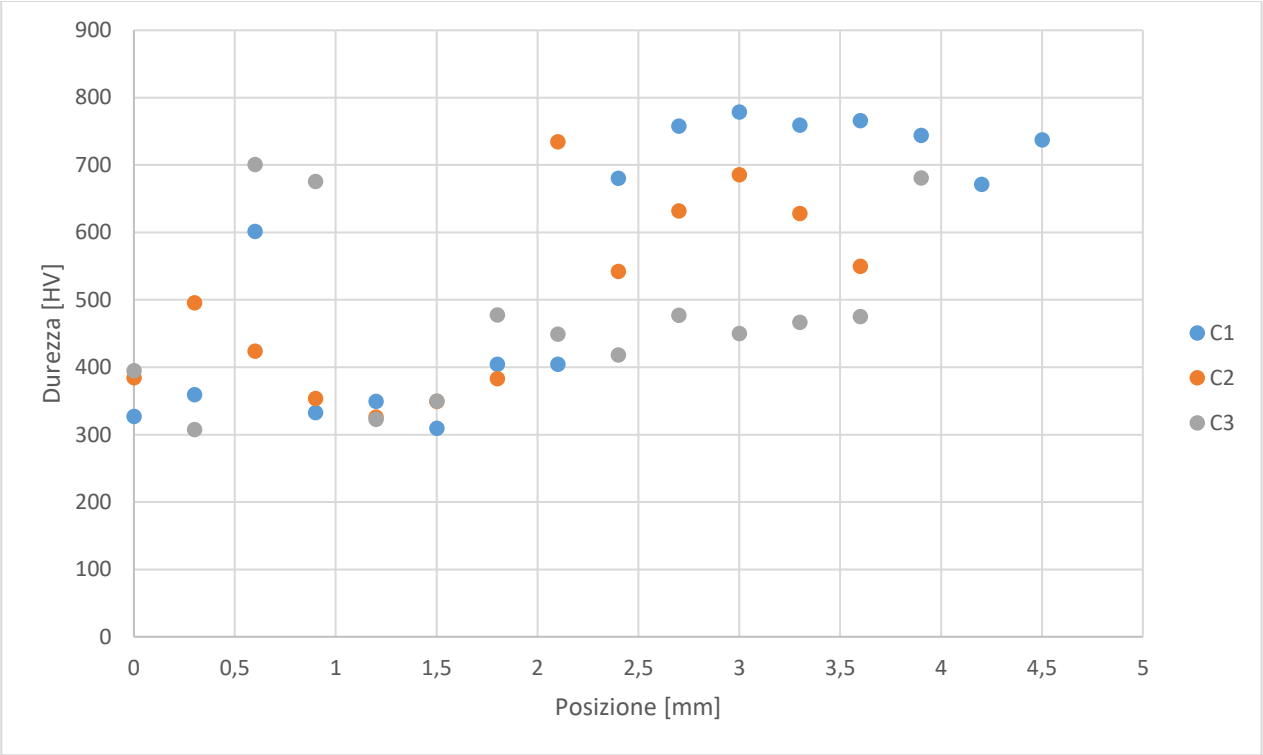
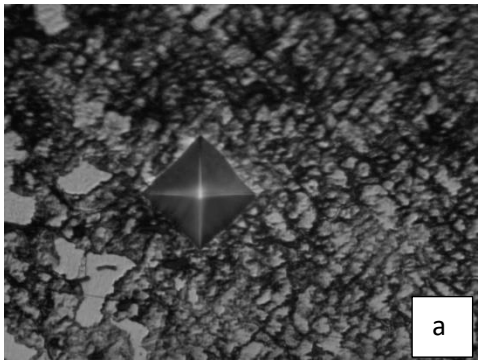
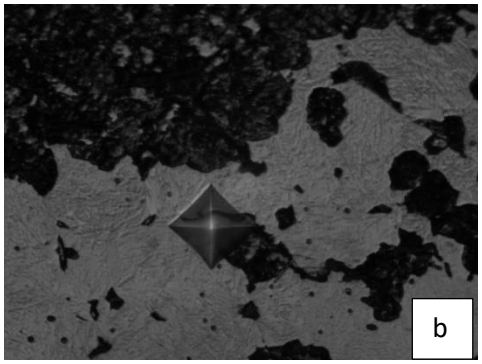



FIGURE 4-41 BATTERIA, DISTRIBUZIONE MICRODUREZZE LUNGO LO SPESSORE

Per ciascuna delle tre cuciture sono presenti punti aventi durezza apparentemente anomala, maggiore di quella circostante. Andando a rianalizzare le immagini delle aree in questione si nota come l'impronta in questo caso sia caduta su una delle isole di martensite presente nel reticolo di perlite. Nelle tre immagini sotto da sinistra a destra i punti a posizione 0.3, 0.6 e 0,9 della cucitura centrale, si può vedere come l'impronta ricada a seconda dei casi su perlite (fig. 4-44a e fig.4-44c) oppure su martensite (fig. 4-42b).



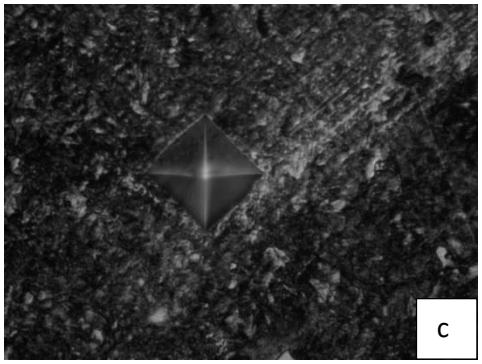




FIGURE 4-42 BATTERIA, DETTAGLIO IMPRONTE MICRODUREZZE SU PERLITE (A,C) E MARTENSITE(B)

Due misurazioni effettuate una su martensite e una sulla perlite subito adiacente, a distanza di 0,1mm, fornisce ulteriore conferma di questo fatto, di seguito l'immagine con le due impronte e le durezze calcolate

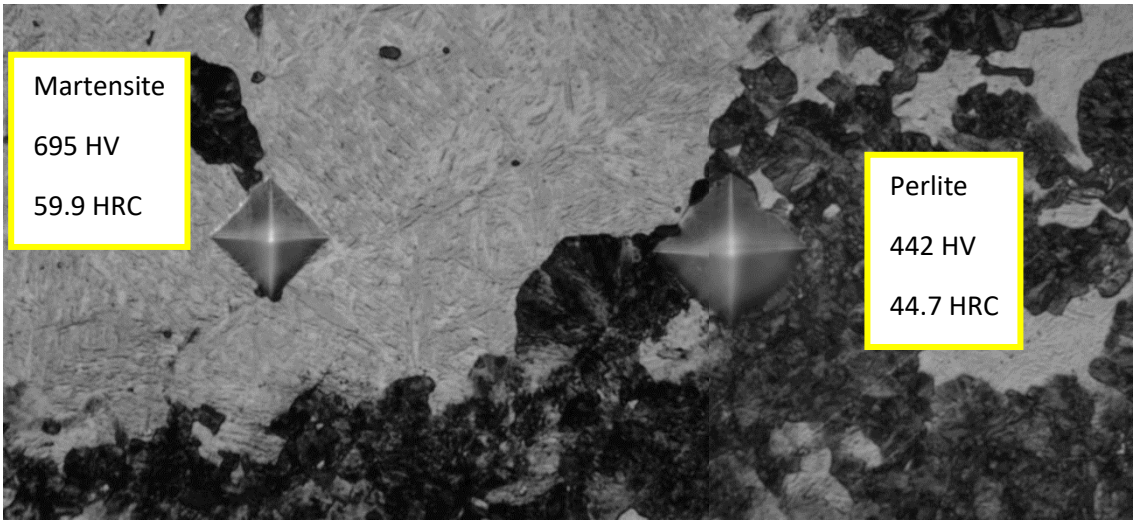



**FIGURE 4-43 BATTERIA, IMPRONTE MICRODUREZZA CONFINE MARTENSITE/PERLITE**

### 4.3.5 Risultati

L'analisi al microscopio ottico ha evidenziato un componente esente da vistose discontinuità, a differenza di quanto accaduto per il piattello del cane e dalla molla del cane, la batteria appare realizzata da un unico pezzo di metallo. A seguito di questo risultato si esclude la possibilità che la faccia su cui impatta la pietra focaia sia stata indurita tramite la saldatura di uno strato di acciaio ad alto tenore di carbonio. In entrambe le sezioni la direzione delle inclusioni presenti ricalca bene il profilo del componente, tutto ciò porta a concludere che esso sia stato ricavato per deformazione plastica da un unico pezzo di acciaio.
L'analisi al microscopio dopo attacco acido rivela una struttura cristallografica molto differente da quella attesa. Vista l'assenza di materiale di riporto ci si aspettava una struttura quasi totalmente martensitica sulla faccia di impatto. Il resto del componente avrebbe potuto essere o anche esso completamente composto da martensite in caso di trattamento di tempra completa oppure con una microstruttura in cui man mano che ci si allontana dalla faccia di impatto la martensite lasciava il posto a perlite.
La struttura che si riscontra è invece costituita da uno strato di martensite più duro e spesso sulla parte lontana dalla faccia di impatto una fascia centrale costituita da isole di martensite in perlite e infine un sottile strato di martensite a durezza più bassa. La microstruttura presente nel componente non ricalca i requisiti funzionali del componente. La durezza più bassa sulla zona di contatto con la pietra focaia potrebbe addirittura pregiudicarne la funzionalità non permettendo la generazione di scintille all'impatto della pietra focaia. L'elevata durezza sul lato opposto seppur non dannosa non è necessaria. La struttura riscontrata potrebbe essere dovuta a una minore percentuale di carbonio nel materiale di partenza nella zona del componente corrispondente alla faccia di contatto con la pietra focaia, che pur permettendo la tempra risulta in una minore durezza rispetto al resto del componente, oppure a un'eccessiva decarburazione durante il trattamento termico. Il profilo di microdurezza è in linea con la microstruttura trovata, più bassa nella zona a maggioranza perlitica, con picchi più elevati nelle isole di martensite, e più alta nella zona martensitica. Dati gli elevati valori di durezza riscontrati nella zona martensitica si può concludere che l'acciaio utilizzato per la batteria è ad alto contenuto di carbonio e successivamente sottoposto a trattamento di tempra, forse senza successivo rinvenimento.

# Conclusioni

L'analisi dei componenti del meccanismo di accensione del fucile messo a disposizione dalla "Fondazione Brescia Musei" seppur riservando alcune sorprese ha evidenziato come la maggior parte delle ipotesi formulate in sede di analisi preliminare fossero corrette, solo nel caso della batteria ci si è trovati di fronte ad un' incongruenza. Se per quanto riguarda la storia dei meccanismi di accensione e la loro meccanica è possibile trovare in letteratura molte trattazioni, le informazioni riguardo alle tecniche di realizzazione e ai materiali impiegati sono piuttosto scarne. Questa mancanza di informazioni si spiega con la tendenza degli antichi maestri armaioli a tramandare solo ai propri apprendisti i dettagli delle tecniche produttive e prevalentemente in forma orale. Tutt'oggi esiste una piccola produzione di armi ad avancarica realizzate con tecniche vicine a quelle tradizionali, legata agli eventi di ricostruzione storica, ma da essa non necessariamente si possono ricavare informazioni sui processi antichi. Occorre considerare sia che la trasmissione del sapere rimane prevalentemente in forma orale e sia che l'acciaio utilizzato oggi è di produzione industriale e quindi di qualità differente da quello antico. Il presente lavoro, lungi dall' essere completo ed esaustivo, ha permesso avere un ulteriore conferma della validità di alcune teorie riguardo a materiali e trattamenti utilizzati per componenti del meccanismo di accensione. Sono state confermate le ipotesi sia riguardo al piattello del cane sia riguardo alla molla del cane, ferro povero, basso costo, e nessun trattamento termico volontario per il primo, al contrario, acciaio ad alto tenore di carbonio, materiale raro e pregiato, e trattamento di tempra e forse rinvenimento per un componente delicato e sofisticato come la molla a lamina. In entrambi i casi si è riscontrata la presenza di più strati di materiale sovrapposti, tecnica questa seppur non frequente, certamente non sconosciuta né fuori dalla portata degli antichi armaioli. Una vera sorpresa è stata invece il risultato dell'esame del trattamento termico della batteria, riguardo ad esso erano stati trovati alcuni riferimenti in letteratura soprattutto riguardo alla possibilità che il componente fosse realizzato tramite riporto di materiale duro su di uno più duttile [35]. L'analisi ha invece rivelato una componente a trattamento disomogeneo e che presenta una durezza più bassa laddove sarebbe invece stata funzionale una durezza molto elevata.

Come anticipato all'inizio di questo capitolo, questo lavoro non abbraccia l'analisi completa del meccanismo messo a disposizione ma solamente di alcuni dei componenti ritenuti di maggiore rilevanza, ulteriori indagini potranno essere condotte in altri lavori sulle rimanenti parti.

Possibili soggetti per future indagini su questo meccanismo potrebbero essere:

- le viti e le corrispettive filettature, per verificare le informazioni note riguardo alla tecnica di realizzazione;
- il cane per controllare se vista la mancanza di rinforzo a livello di forma esso sia stato applicato tramite trattamento termico:
- la cartella per analizzare un componente soggetto a tempra drastica per elevarne il più possibile la durezza e aumentarne la resistenza all'usura.

Riguardo ai componenti già analizzati invece ulteriori Informazioni riguardo ai materiali utilizzati potrebbero essere ricavate da analisi condotta con microscopio elettronico e tecnica a raggi X, ciò permetterebbe di identificare i principali costituenti della lega metallica utilizzata e le loro percentuali.

# Indice delle citazioni e fonti


[1] H. Schubert, History of the British iron and steel industry from 450Bc to Ad1775, Routledge & Kegan Paul, 1957.

[2] R. Pleiner, Iron in archaeology the European bloomery smelters, Praha: Archeologicky ustav av, 2000.

[3] "https://it.wikipedia.org/wiki/Ferro".

[4] "UNI EN 10020 - Definizione e classificazione dei tipi di acciaio," 2001.

[5] M. Rosso , "Appunti corso “Materiali metallici”," 2018.

[6] G. Agricola, De re metallica, Dover publication (1950) ed. traduzione inglese dal latino,ed originale Basilea, 1556.

[7] V. Biringuccio, De la pirotechnia, Siena: 1540, 1540.

[8] D. Starley, "Determining the Technological Origins of Iron and Steel," *Journal of Archaeological Science,* p. 1127–1133, 1999 n°26.

[9] M. Cavallini, "L'impresa Monteleone," associazione “ArcheoAmbiente” O.N.L.U.S. , Monteleone di Spoleto.

[10] C. k. Hyde, "Technological Change in the British Wrought Iron Industry, 1750-1815: A Reinterpretation'," *Economic History Review,* pp. 190-206 (vol 27), Maggio 1974.

[11] W. Cline, Afrian mining and metallurgy, Governement of india department of Archaeology , 1937.

[12] N. David, R. Heimann, D. Killick and M. Wayman , "Between bloomery and blast furnace Mafa iron smelting," *The African Archaeological Review,* vol. 7, pp. 183-208, 1989 .

[13] R. Haalaand, "Iron smelting a vanishing tradition: Ethnographic study of this craft in south-west Ethiopia," *Journal of African Archaeology ,* vol. 2, pp. 65-79, 2004.

[14] S. Chirikur and T. Rehren, "Iron Smelting in Pre-Colonial Zimbabwe: Evidence for Diachronic Change from Swart Village and Baranda, Northern Zimbabwe," *Journal of African archaeology ,* vol. 4, pp. 37-54, 2006.

[15] S. Chirikure and F. Bandama, "Indigenous African furnace types and slag composit - is there a correlation," *Archaeometry,* vol. 56, no. 2, pp. 296-312, 2014.

[16] F. W. J. McCosh, "Traditional iron-worlking in central Africa with some reference to the ritualistic and scientific aspects of the industry," Michigan state university library.

[17] J. Bayley, D. Dungworth and S. Paynter, "Archaeometallurgy," Historical Metallurgy Society’s Archaeology Committee, 2001.

[18] R. B. Gordon, "Process Deduced From Ironmaking Wastes and Artefacts," *Journal of Archaeological Science,* vol. 24, p. 9–18, 1997.

[19] P. Crew and M. Charlton, "The anatomy of a furnace ... and some of its ramifications," *Metals and Mines: Studies in Archaeometallurgy,* pp. 219-225, 2007.

[20] J. le Coze, "Purification of Iron and steel a continous effort from 2000BC to AD 2000," *Materials transactions,* vol. 41, no. 1, pp. 219-232, 2000.

[21] E. Imiołczyk, G. Żabiński, T. Goryczka, K. Aniołek, A. Balińska and E. Miśta-Jakubowska, "An armour from a finery? - A late medieval couter from Ogrodzieniec Castle in the Kraków-Częstochowa Jura," *Archaeological and Anthropological Sciences,* pp. 12-61, 2020.

[22] R. Tylecote, History of metallurgy, CRC Press, 2002.

[23] G. Marchesi and L. Mura, "Il forno fusorio di Levemmo," *Archeologia medievale,* vol. XXXIII, pp. 455-470, 2006.

[24] P. Dillmann, E. Vega, R. Aranda and M. L'Héritier, "Understanding the Walloon method of iron refining: Archaeological and," *The journal of the Historical Metallurgy Society,* vol. 46, no. 1, 2012.

[25] A. Williams, The Knight and the blast furnace, Boston: Brill, 2002.

[26] R. Pleiner, Iron in archaeology early European blacksmiths, Praga: Archeologicky ustav av , 2000.

[27] J. Verhoeven, "Did the First Iron Blacksmiths Learn to Carburize Iron? Part I: Can Iron be Carburized in a Charcoal-Fired Furnace?," *JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society,* 2016.

[28] A. M. Feuerbach, "Crucible Steel in Central Asia:Production, Use, and Origins," University College London Institute of Archaeology, Londra.

[29] R. Alipour, T. Rehren and M. Martin´on-Torres, "Chromium crucible steel was first made in Persia," *Jornal of archeological science.*

[30] S. Srinivasan, "Wootz crucible steel: a newly discovered production site in South india," *Papers from the Institute of Archaeology,* vol. 5, pp. 49-59, 1994.

[31] C. Panseri, "Damascus steel in legend and reality," *Gladius,* vol. IV, pp. 5-66, 1965 .

[32] J. Part, K. Rajan and R. Ramesh, "High-carbon steel and ancient sword-making as observed in a double-edged sword from an iron age megalithic burial in Tamil Nadu, India," *Archaeometry,* vol. 62, no. 1, pp. 68-80, 2020.

[33] A. Feuerbach, "Crucible Damascus Steel: A Fascination for Almost 2,000 Years," *Archaelometallurgy,* 2006.

[34] C. Calamandrei, Meccanismi di accensione - Storia illustrata dell'acciarino dal serpentino alla retrocarica, Olimpia, 2003.

[35] H. R. Peterson, Armi da fuoco nei secoli, Arnoldo Mondadori, 1973.

[36] E. Oakeshott, European Weapons and Armour From the Renaissance to the Industrial Revolution, Suffolk: The Boydell Press, 2000.

[37] M. Morin, Armi antiche, Arnoldo mondadori, 1982.

[38] H. L. Blackmore, Gun and rifles of the world, Chancellor, 1965.

# Indice delle illustrazioni

Figure 1-1 Limonite ..... 10
Figure 1-2 Goethite ..... 10
Figure 1-3 Ematite ..... 10
Figure 1-4 magnetite ..... 11
Figure 1-5 Siderite ..... 11
Figure 1-6 Carbone di legna ..... 12
Figure 1-7 Esempio del metodo a Catasta per la produzione di carbone [7] ..... 13
Figure 1-8 Esempio del metodo a Fossa per la produzione di carbone [7] ..... 14
Figure 1-9 Vista in sezione di una fornace a tazza [2] ..... 16
Figure 1-10 Vista in sezione di una fornace a fossa per la scoria, prima(a) e dopo(b) la campagna [2] ..... 17
Figure 1-11 vista dall'alto(a), in sezione(b) e laterale(c) di un bassoforno a pareti spesse [2] ..... 18
Figure 1-12 Vista in semisezione di un forno catalano [22] ..... 19
Figure 1-13 Stückofen, vista dall'alto(a) e in sezione(b) [22] ..... 19
Figure 1-14 Schizzo di Bassoforno a Akpafu (Ghana) [11] ..... 20
Figure 1-15 Esempio di Fornace a fossa di scoria contemporanea (Etiopia) [12] ..... 20
Figure 1-16 Diagramma ferro/carbonio ..... 21
Figure 1-17 Schema riassuntivo delle reazioni nel processo diretto [2] ..... 22
Figure 1-18 Diagramma di Ellingham ..... 23
Figure 1-19 vista in pianta (b) e laterale(a) di un altoforno [22] ..... 25
Figure 1-20 Sezione di altoforno con avancrogiuolo [1] ..... 27
Figure 1-21 forno di affinamento, vista in pianta(a), frontale(b) e laterale(c) [1] ..... 28
Figure 1-22 Ganci utilizzati per le operazioni in altoforno [1] ..... 29
Figure 1-23 Sezione altoforno, zone e temperature [1] ..... 30
Figure 1-24 Forno di affinamento, vista frontale(a) e in sezione(b) ricostruzione da rovine di Stony Hazel (Inghilterra) [22] ..... 32
Figure 1-25 Fornace per cementazione in cassetta, Sheffield (Inghilterra) [1] ..... 33
Figure 1-26 Sezione di un crogiolo [29] ..... 35
Figure 2-1 Roger bacon ..... 36
Figure 2-2 Berthold Schwarz ..... 36
Figure 2-3 Bombardella di Frankenburg, historishes museum (Berna), 1460 circa [37] ..... 37
Figure 2-4 Bombardella di Tannenberg,Germ. Nationalmuseum (Norimberga), 1390 circa [37] ..... 37
Figure 2-5 Archibugio a miccia, Landeszeughaus (Graz), 1560 circa - Meccanismo a scatto [37] ..... 38
Figure 2-6 Archibugio a retrocarica appartenuto a Enrico xviii, Torre di Londra, 1537 circa - Meccanismo a stanghetta [37] ..... 38
Figure 2-7 elementi costitutivi di un meccanismo a stanghetta [37] ..... 39
Figure 2-8 Elementi costitutivi di un meccanismo a scatto [34] ..... 40
Figure 2-9 Moschetto a miccia, Armèmuseum (Stoccolma), 1688 [37] ..... 40
Figure 2-10 Pistola a ruota costruita per l'imperatore Carlo V ..... 42
Figure 2-11 Meccanismo a ruota, Codice atlantico ..... 42
Figure 2-12 meccanismo a ruota, Codice Luffelholz ..... 42
Figure 2-13 Elementi costitutivi di un meccanismo a ruota [37] ..... 43
Figure 2-14 Archibugio a ruota, Real armeria (Madrid), 1546 [37] ..... 44
Figure 2-15 Pistola a ruota, real armeria (Madrid), 1545 circa [37] ..... 44
Figure 2-16 sequenza di caricamento di un'arma a ruota [37] ..... 45

Figure 2-17 Carabina a ruota, Museo nazionale d'artiglieria (Torino), 1630 circo [37] ..... 46
Figure 2-18 Pistole snaphance, Sale d'armi del consiglio dei dieci (Venezia), 1620 circa [37]..... 47
Figure 2-19 Elementi costitutivi di un meccanismo ad acciarino [37]..... 48
Figure 2-20 Elementi costitutivi di un meccanismo snaphaunce (a)(B) [37] [35] ..... 49
Figure 2-21 Petrinale a Snaphance, Nationalmuseet (Copenhagen), fine xvi secolo [37] ..... 50
Figure 2-22 Pistola a micheletto, Metropolitan museum of art (New York), 1687 [37] ..... 50
Figure 2-23 Elementi costitutivi di un meccanismo Miquelet [37] ..... 51
Figure 2-24 Elementi costitutivi di un meccanismo moderno [37] ..... 52
Figure 2-25 Meccanismo con cane a doppio collo ..... 53
Figure 2-26 Coppia di pistole a pietra focaia, Musée d'armes (Liegi), 1775 circa [37]..... 53
Figure 2-27 sequenza di caricamento di un meccanismo ad acciarino moderno [37]..... 54
Figure 3-1 Componente analizzato, elementi costituitivi, recto (a) e verso (b)..... 55
Figure 3-2 Componenti meccanismo dopo la prima fase di smontaggio..... 59
Figure 3-3 Componenti meccanismo dopo la seconda fase di smontaggio..... 60
Figure 3-4 piattello del cane, posizione tagli (a) e sezione (b) ..... 61
Figure 3-5 Molla del cane, posizione tagli(a) e sezioni(b) ..... 62
Figure 3-6 Batteria, posizione tagli(a) e sezioni(b) ..... 63
Figure 3-7 Piattello del cane, posizione(a) e scansione della sezione(b) ..... 64
Figure 3-8 Molla del cane, posizione delle sezioni (a) e scansione delle sezioni: MI-1(c) e MI-2(b)..... 64
Figure 3-9 Batteria, posizione delle sezioni (a) e scansioni delle sezioni: M-1(b) e M-2(c) ..... 65
Figure 4-1 Piattello del cane, posizione delle aree analizzate(a) e sezione C(b)..... 66
Figure 4-2 piattello del cane, analisi al microscopio, zona 1 nei pressi della principale discontinuità (a), dettaglio (b) ..... 67
Figure 4-3 Piattello del cane, analisi al microscopio, dettaglio direzione inclusioni zona 1..... 67
Figure 4-4 Piattello del cane, analisi al microscopio, zona 2, ..... 68
Figure 4-5 Piattello del cane, analisi al microscopio, zona 3 (a), dettaglio direzione preferenziale inclusioni(b) ..... 69
Figure 4-6 Piattello del cane, analisi al microscopio dopo attacco acido, zona 1, struttura ferritica (a) , dettaglio grani(b) ..... 70
Figure 4-7 Piattello del cane, analisi al microscopio dopo attacco acido, zona 1, bordo con struttura perlitica (a), dettaglio struttura (b)..... 70
Figure 4-8 Piattello del cane, analisi al microscopio dopo attacco acido, zona 2, struttura ferritica con sottili strati di perlite ai bori ..... 71
Figure 4-9 Piattello del cane, analisi al microscopio dopo attacco acido, zona 3, struttura ferritica con perlite ai bordi di ogni strato ..... 72
Figure 4-10 Piattello del cane, posizione cucitura di microdurezza..... 73
Figure 4-11 piattello del cane, dettaglio impronte microdurezza, bordo tra struttura ferritica e perlitica.... 74
Figure 4-12 piattello del cane, dettaglio impronte microdurezza, grano ferritico..... 74
Figure 4-13 Molla del cane, posizione delle aree analizzate (a), sezione MI-1(b) e MI-2(c) ..... 76
Figure 4-14 Molla del cane, analisi al microscopio, Mi-1 zona 1, nei pressi della discontinuità principale.... 77
Figure 4-15 Molla del cane, analisi al microscopio, MI-2 zona 2, dettaglio molteplici strati ..... 78
Figure 4-16 Molla del cane, analisi al microscopio, MI-1 zona 3..... 79
Figure 4-17 Molla del cane, analisi al microscopio, MI-2 zona 1..... 79
Figure 4-18 Molla del cane, analisi al microscopio, MI-2 zona 2..... 80
Figure 4-19 Molla del cane, Analisi al microscopio, MI-2 zona 3 , discontinuità centro sezione..... 81
Figure 4-20 Molla del cane, Analisi al microscopio, MI-2 zona 4, discontinuità al bordo e cricca..... 82
Figure 4-21 Molla del cane, analisi al microscopio dopo attacco acido, MI-1 zona 2, struttura martensitica 83

Figure 4-22 Molla del cane, analisi dopo attacco acido, MI-1 zona 3, struttura martensitica ..... 84
Figure 4-23 Molla del cane, analisi dopo attacco acido, MI-2 zona 1, struttura mista martensite bainite .... 85
Figure 4-24 Molla del cane, analisi dopo attacco acido, MI-2 zona 2, struttura mista martensite bainite .... 86
Figure 4-25 Molla del cane, analisi dopo attacco acido, MI-2 zona 4, struttura mista martensite bainite .... 87
Figure 4-26 Molla del cane, posizione cucitura di Microdurezze ..... 88
Figure 4-27 Molla del cane, dettaglio impronte Microdurezze in zona martensitica ..... 88
Figure 4-28 batteria, posizione aree analizzate (a), sezione M-1(b) e sezione M-2(c)..... 90
Figure 4-29 Batteria, analisi al microscopio, M1 zona 1..... 91
Figure 4-30 batteria, analisi al microscopio, M1 zona 2..... 92
Figure 4-31 Batteria, Analisi al microscopio, M1 zona 3 ..... 92
Figure 4-32 Batteria, Analisi al microscopio, M2 zona 1, zona curvatura profilo e cricca ..... 93
Figure 4-33 Batteria, analisi dopo attacco acido, M1 zona 1, struttura mista a strati martensite e perlite... 94
Figure 4-34 Batteria, analisi dopo attacco acido, M1 zona 2, struttura mista perlite e martensite ..... 95
Figure 4-35 Batteria, analisi dopo attacco acido, M1 zona 3, struttura con una fascia martensitica e una perlitica ..... 95
Figure 4-36 Batteria, analisi dopo attacco acido , M2 zona 4, struttura a bande alternate martensite e perlite(a), dettagli con isole di perlite in martensite (B,C) e isole di martensite in perlite (d)..... 96
Figure 4-37 Batteria, analisi dopo attacco acido, M2 zona 1, struttura martensitica con isole di perlite ..... 97
Figure 4-38 Batteria, analisi dopo attacco acido, M2 zona 2, struttura martensitica con isole di perlite ..... 97
Figure 4-39 Batteria, analisi dopo attacco acido, M2 zona 3, struttura a bande alternate martensite e perlite(a,b) e dettaglio strato esterno martensitico © ..... 98
Figure 4-40 Batteria, posizione cuciture di durezza ..... 99
Figure 4-41 Batteria, distribuzione Microdurezze lungo lo spessore..... 100
Figure 4-42 Batteria, dettaglio impronte Microdurezze su perlite (A,C) e martensite(B)..... 100
Figure 4-43 Batteria, impronte microdurezza confine martensite/perlite ..... 101

# Indice delle tabelle

Table 1 Piattello del cane, riepilogo Microdurezze HV0.3 ..... 73
Table 2 Molla del cane, risultati Microdurezze HV03..... 88
Table 3 Batteria, risultati Microdurezze HV03 ..... 99