



Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Analisi metallurgica di punte di dardi da balestra in epoca medievale

Sessione di laurea Marzo 2021



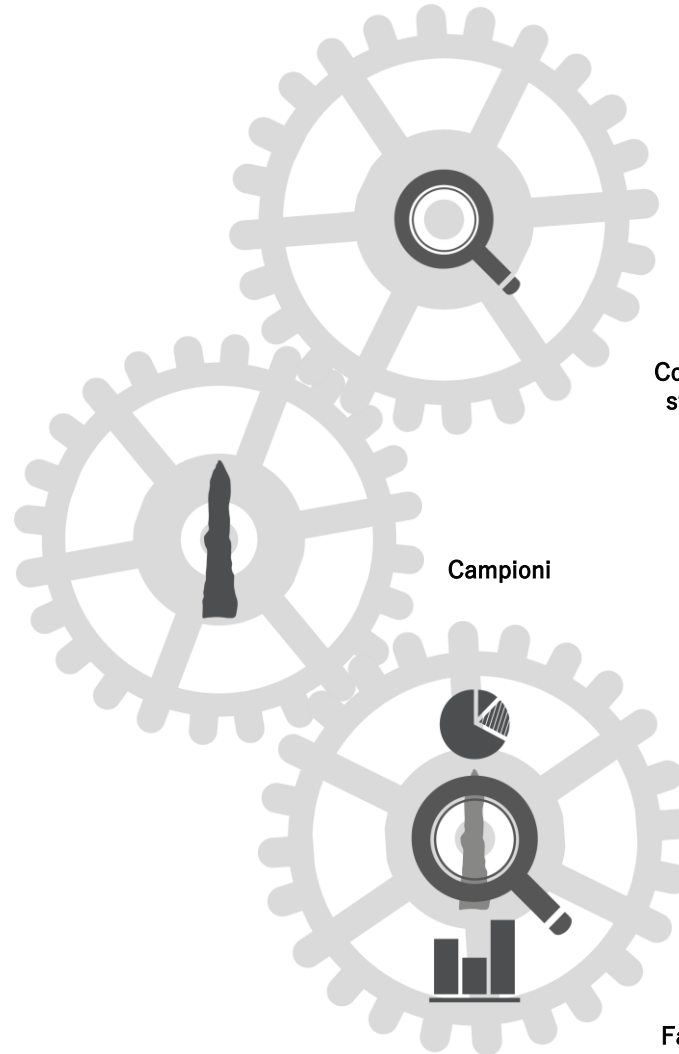
Relatori:
Prof. Matteis Paolo
Prof. Scavino Giorgio

Candidato:
Paiano Angelo



Introduzione

- **Contesto storico:** Dal XIV al XVI le balestre venivano utilizzate sia in ambito militare che durante le battute di caccia. La forma della punta era influenzata dall'ambiente di utilizzo.
- **Manufatti da analizzare:** Il museo «Luigi Marzoli» ha messo a disposizione per l'analisi due punte metalliche morfologicamente differenti.
- **Metodologia (invasiva):** Rilievo dimensionale e ricostruzione CAD; Analisi microscopia ottico; Prova di micro-durezza (cucitura + inclusioni); Analisi microscopia elettronica (SEM).
- **Scopo:** Fornire informazioni sugli acciai utilizzati per le punte metalliche e sui metodi di produzione; Offrire una base di supporto per la branca archeologica in vista di una datazione più precisa di reperti omologhi.



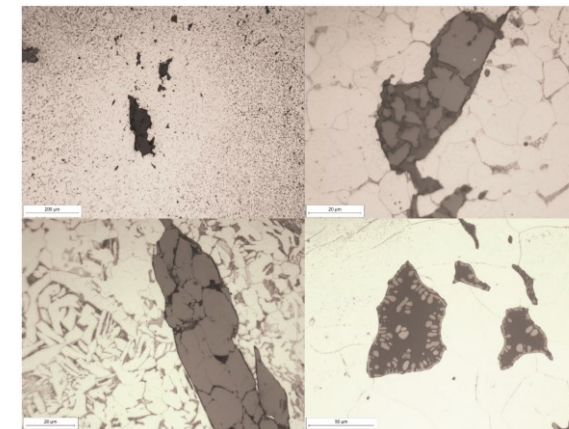
Contesto storico

Campioni

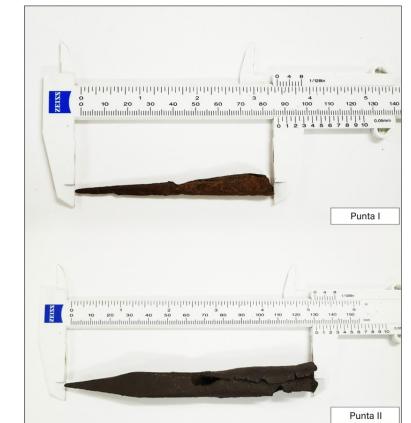
Fase sperimentale

	A Foglia
	A Triangolo
	Blunt

Tipi comuni



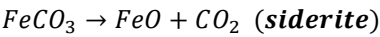
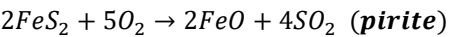
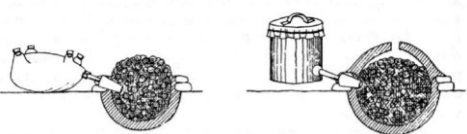
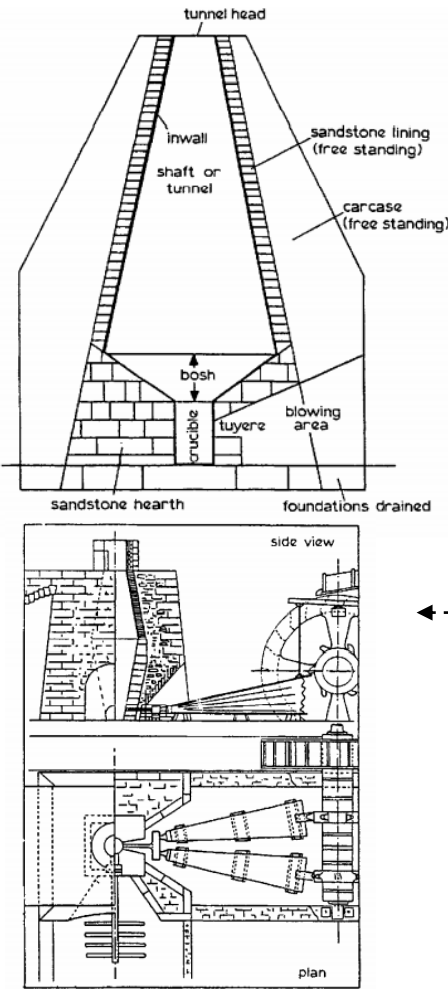
Esempi di scorie



Punte analizzate



Metodi di produzione



Minerale

estrazione

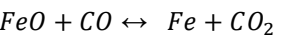
lavaggio

arrostimento

riduzione



NOME	Composizione Chimica	Sistema Cristallino	% Teorica Fe	Tenore medio Fe nel minerale
Magnetite	Fe ₃ O ₄	Cubico	72,4	45÷70
Ematite Rossa	Fe ₂ O ₃	Esagonale	69,9	45÷ 60
Ematite Bruna (limonite)	2Fe ₂ O ₃ · 3H ₂ O	Amorfa	59,8	30÷ 50
Siderite	FeCO ₃	Esagonale	48,2	30 ÷ 40
Pirite	FeS ₂	Cubico	46,5	40



CARBONE

CARBONE DI LEGNA

Metodo Indiretto

Metodo Diretto

altoforno

basso fuoco

ghisa

bluma

affinazione

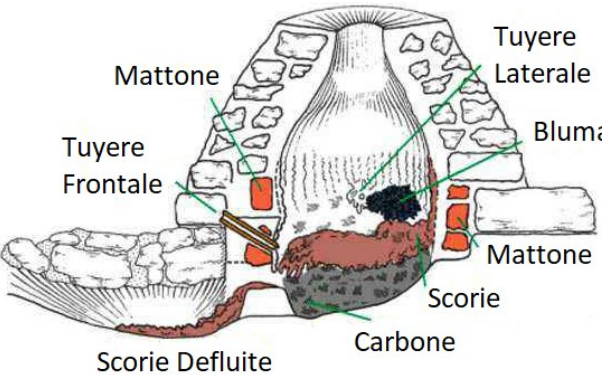
raffinazione

massello

massello

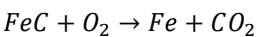
martellatura

Pezzo Finito



SCORIE

SCORIE





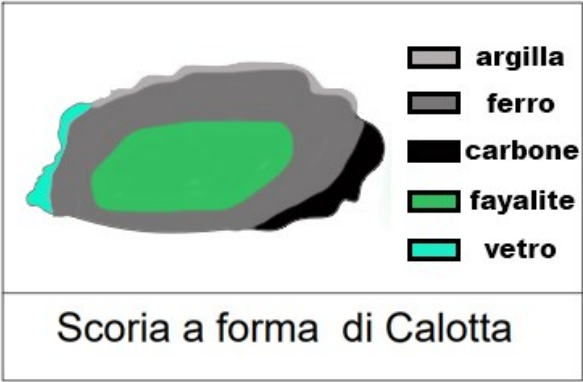
Carbone di legna %												
CaO	SiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Al ₂ O ₃	Cl	P ₂ O ₅	SrO	MgO	BaO	TiO ₂	MnO
11,00	5,58	2,73	1,44	0,64	0,54	0,41	0,38	0,33	0,31	0,25	0,19	0,14

Scorie e Inclusioni

Element	Hematite, Cumberland UK ¹⁰⁴	Magnetite, Japan ¹⁰⁵	Limonite, Forest of Dean ¹⁰⁴	Weathered siderite, Northants UK ¹⁰⁴	Siderite, Kent, UK ¹⁰⁶	Hematite, Sirzi, Turkey ¹⁵	Bog Iron Ore, Jutland ¹⁰⁷
FeO	—	22.89	—	—	42.08	—	1.30
Fe ₂ O ₃	84.47	64.75	90.05	64.62	6.85	68.35	59.70
SiO ₂	6.95	9.14	1.07	13.52	6.46	—	17.90
CaO	0.25	1.18	0.06	0.90	3.87	—	1.60
MnO	0.22	0.96	0.08	3.91	2.32	5.93	14.00
Al ₂ O ₃	—	0.34	—	2.64	—	—	1.00
MgO	0.41	0.69	0.20	0.25	1.76	—	0.20
P ₂ O ₅	0.03	0.02	0.09	2.15	0.65	0.11	2.94
H ₂ O	8.48	—	9.22	—	—	—	—
CO ₂	—	—	—	14.60	32.70	—	—
SO ₃	—	0.07	—	—	0.11	—	0.20
Alkali	—	—	—	—	(FeS ₂)	—	0.37

Scorie di lavorazione

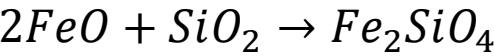
Scorie di produzione



Scorie di Altoforni Svedesi		
%	Vinarhyttan Seming	Lapphyttan Bjorkenstamm
SiO	69,27	53,90
Al ₂ O ₃	10,1	6,20
Fe ₂ O ₃	1,34	-
FeO	4,74	3,50
MnO	1,44	11,80
MgO	4,12	10,00
CaO	4,23	12,10
Na ₂ O	2,63	0,91
K ₂ O	1,86	0,90
TiO	0,27	-

- Scorie di Colata;
- Scorie Interne;
- Scorie a Goccia.

La fayalite fonde ad una temperatura di circa 1205 [° C] alla pressione di 1 [atm] e per questo gran parte di essa poteva essere efficacemente rimossa dall'acciaio durante il processo di riduzione e raffinazione della bluma.



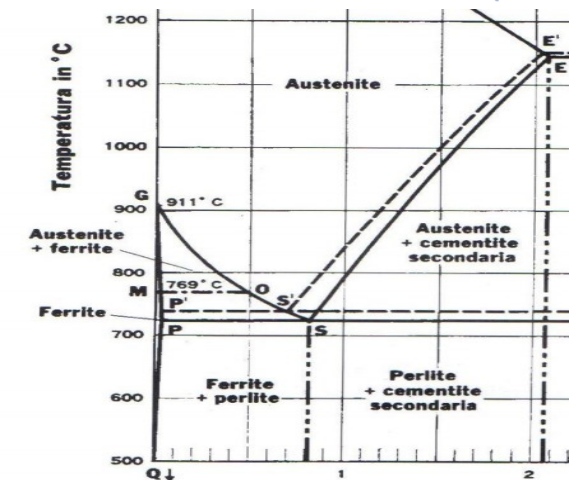
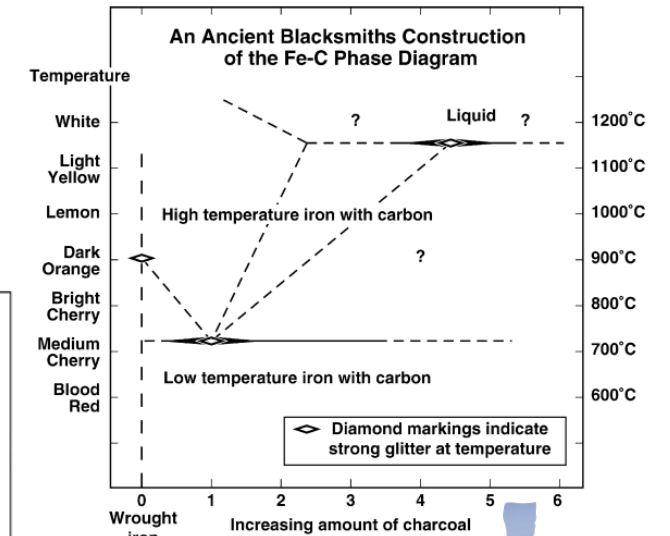
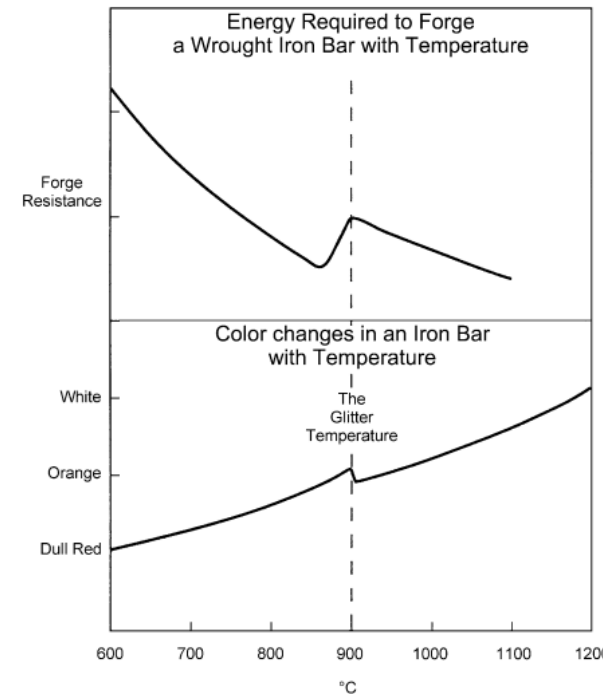
Scorie di Basso Fuochi Europei e non											
%	Francia, Yonne	Praga, Boemia	Polonia, N. Slupia	Austria, Lölling	UK, Ash- wicken	UK, Foresta di Dean	Danimarca, Jutland	Germania, Pfakz	Germania, Aechen	Germania, Scharm beck	Cina, Chung- chou (Han)
SiO ₂	31,8	29,02	25,21	27,3	21,2	27,5	22,7	34,93	17,19	18,9	53,74
Al ₂ O ₃	9,9	2,38	5,32	6,6	3,2	-	1	9,4	4,95	2,1	12,14
Fe ₂ O ₃	4,8	39,29	7,38	3,36	7,7	13,2	3,6	0,44	5,18	16,9	-
FeO	46,9	23,57	52,08	47,7	62,1	40,5	41,2	39,38	65,42	54,3	3,74
MnO	2,2	-	1,84	12,1	0,5	-	16,8	7,08	2,17	0,39	0,63
MgO	0,75	-	tr.	1,08	1,4	-	1,13	1,89	1,68	1,3	2,52
CaO	2,1	2,30	1,05	2,2	0,4	-	1,4	2,26	2,73	1,1	22,7
Na ₂ O	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	1,18	1,18	1,18	1,18	-
K ₂ O	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	1,18	1,18	1,18	1,18	-
TiO ₂	0,35	-	-	-	-	-	-	-	-	0,29	-
S	0,02	-	0,04	0,03	-	-	-	-	0,22	0,1	0,114
P ₂ O ₅	0,25	0,35	0,15	0,16	1,72	0,24	2,2	0,25	1	1,3	-



Lavorazione dell'acciaio

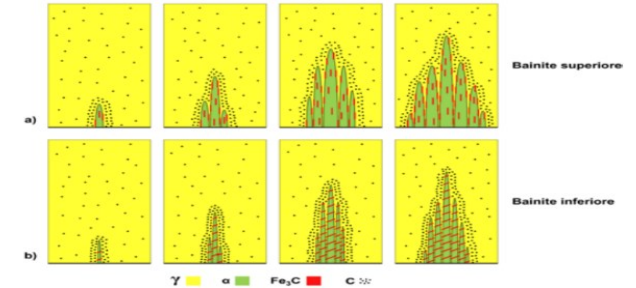
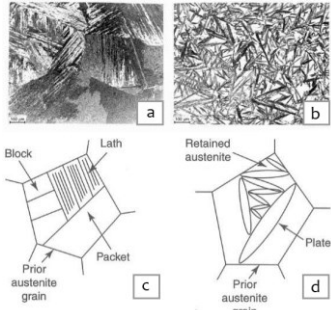
E' stato dimostrato che gli antichi fabbri possedessero una conoscenza sul comportamento del ferro sufficiente a poter interpretare alcune parti del diagramma Fe-C dell'epoca moderna. Tale conoscenza era basata, in ordine di importanza, su:

1. L'osservazione del colore del ferro quando veniva arroventato per forgiarlo oppure durante un trattamento termico;
2. La determinazione della resistenza del ferro in base alla facilità con cui si lasciava forgiare;
3. La determinazione di resistenza e durezza a temperatura ambiente mediante rudimentali prove antigraffio (graffio o piegatura del ferro);
4. L'uso di calamite per determinare le qualità magnetiche del ferro;
5. L'ipotesi, data dall'esperienza, che il ferro possedesse due microstrutture interne distinte, una meno compatta dell'altra.





Trattamenti termochimici e assemblaggi



Tempra

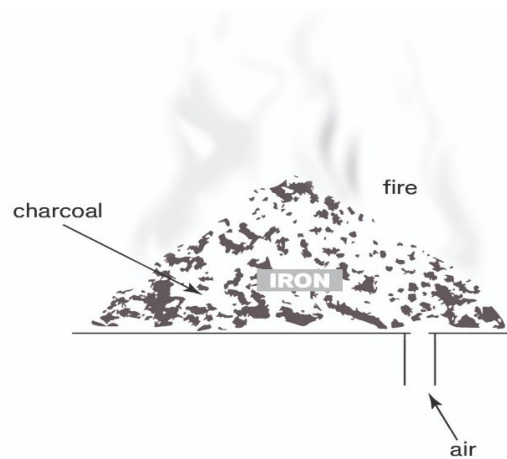
Cementazione

Ricottura
(subcritica)

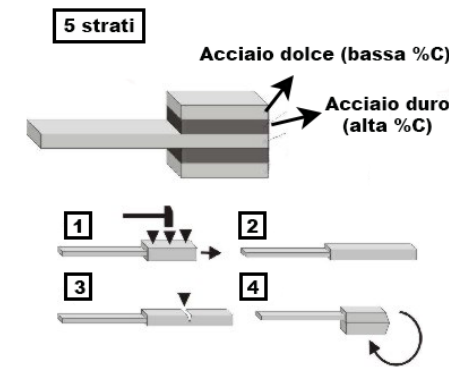
Bollitura

Rivettatura

- Tempra Completa;
- Tempra Lenta;
- Tempra Interrotta;
- Tempra Con rinvenimento;
- Tempra a tempo.



- Ricottura di Lavorabilità;
- Ricottura di Distensione;
- Ricottura di Ricristallizzazione.



Utile per assemblare due pezzi di acciaio insieme. Sulle parti da collegare era ricavato un foro attraverso il quale veniva fatta passare una piccola barra di metallo le cui estremità venivano deformate martellandole a caldo o a freddo.



Analisi delle punte



Rilievo Dimensionale

RAPPRESENTAZIONE PUNTA	NUMERO IDENTIFICATIVO	DIMENSIONI			PROVENIENZA	DATAZIONE
		Lunghezza [mm]	Diametro gorbia [mm]	Peso Stimato [g]		
	I	86.75	10	10	?	?
	II	131	15.5	94	?	?

Tipo



Tipo





Disegno CAD

Stima del Peso

Comando
PropMass

$$V_I = 1277.2145 [mm^3]$$
$$V_{II} = 11916.0007 [mm^3]$$

$$\rho_{ferro} = 0.00787 [g/mm^3] \quad T=20 [^{\circ} C]$$

$$m_I = V_I \cdot \rho_{ferro} = 1277.2145 \cdot 0.00787 = 10,052 [g]$$
$$m_{II} = m_{II} \cdot \rho_{ferro} = 11916.0007 \cdot 0.00787 = 93,78 [g]$$





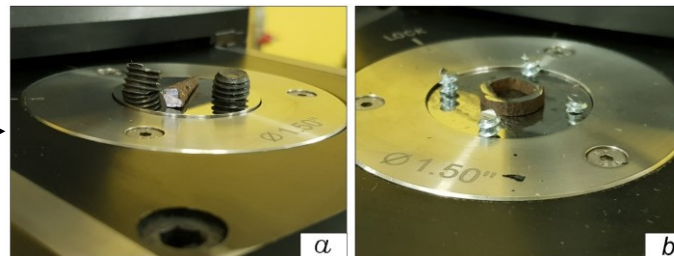
Preparazione Campione

Taglio
↓
Inglobamento in resina
↓
Levigatura e lucidatura
↓
Attacco metallografico

Punta I



Accorgimento
per favorire la
planarità

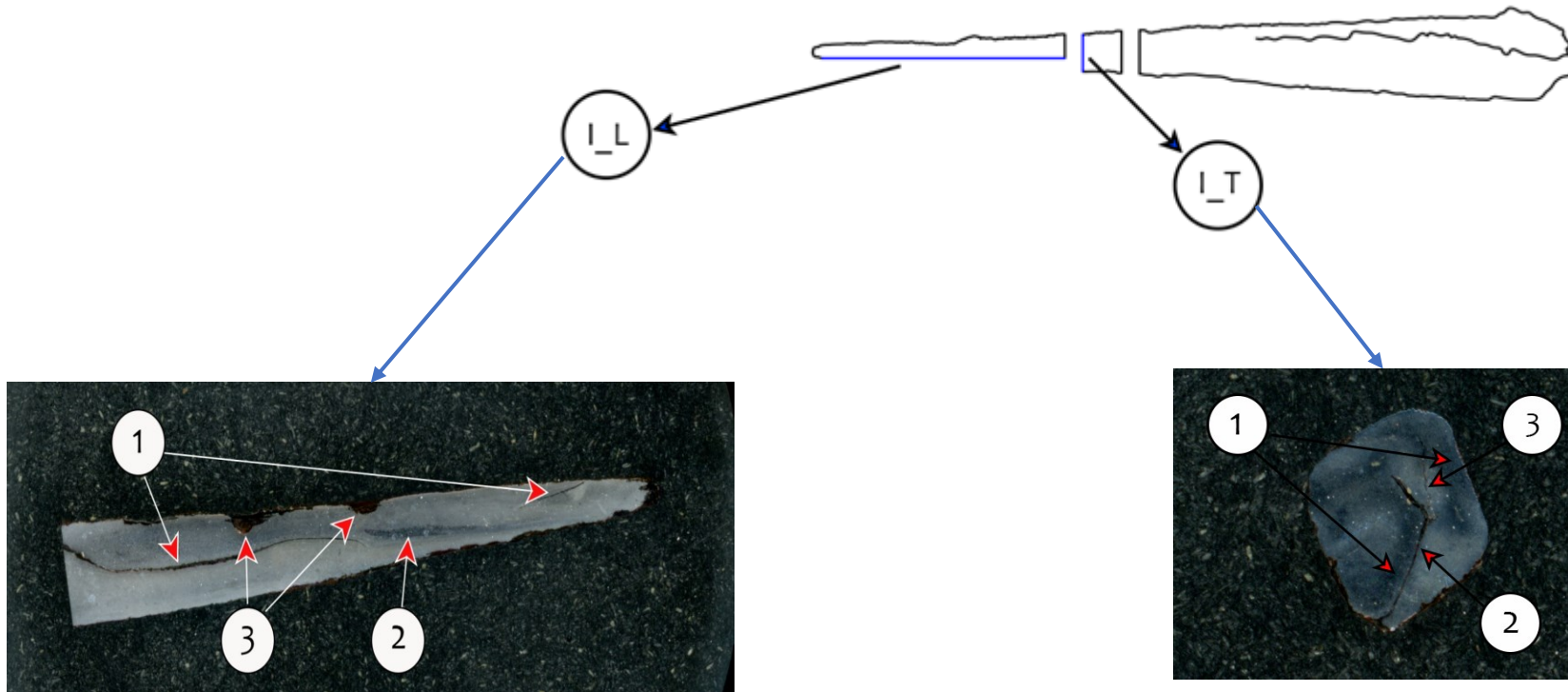


Punta II

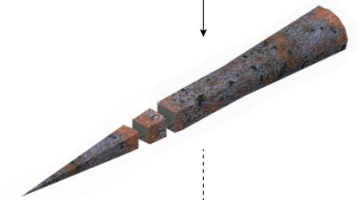




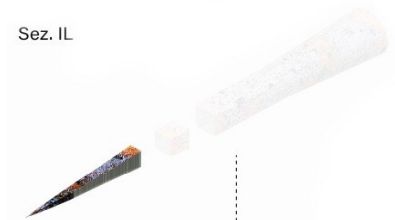
Microscopia Punta I



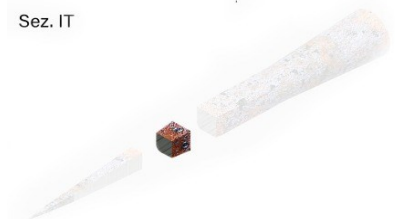
Punta I



Sez. IL



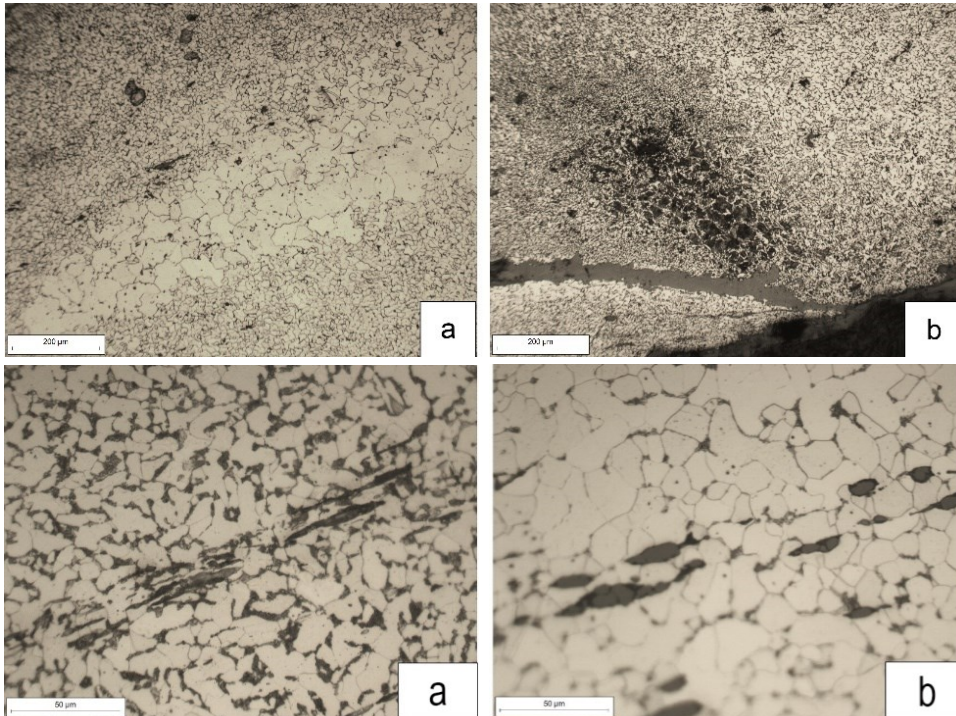
Sez. IT



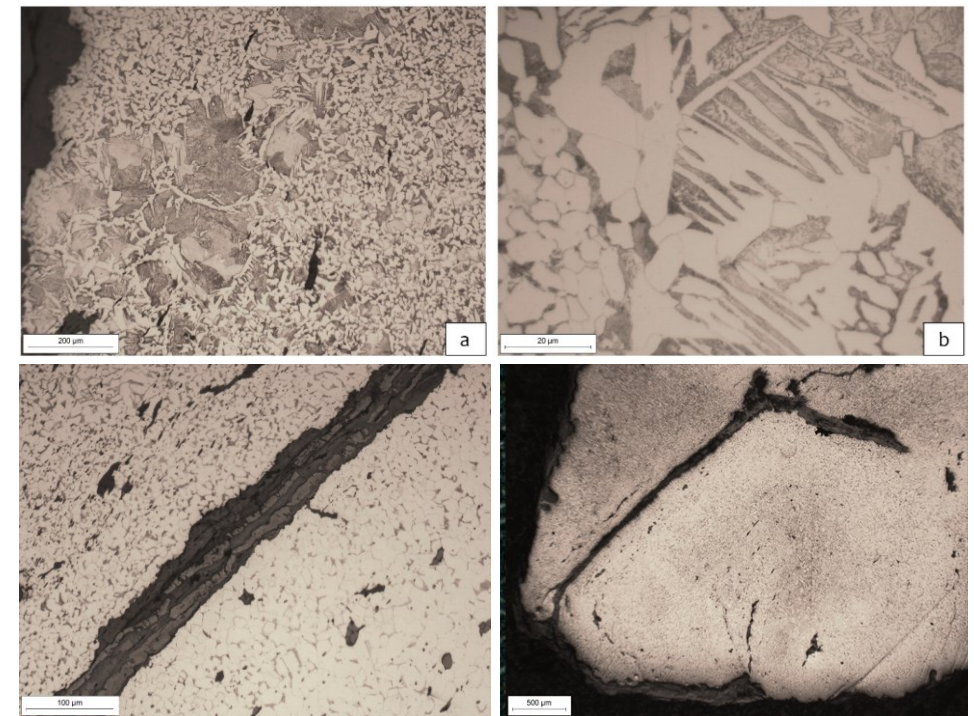


• Punta I •

Sezione I_L

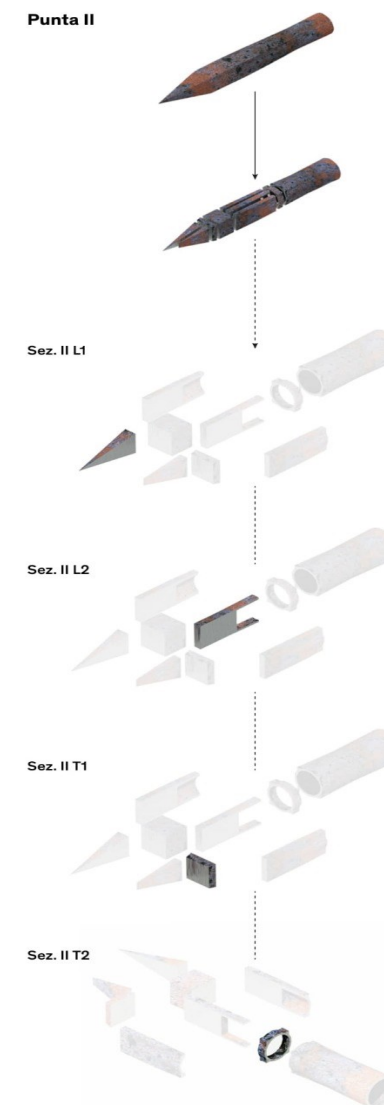
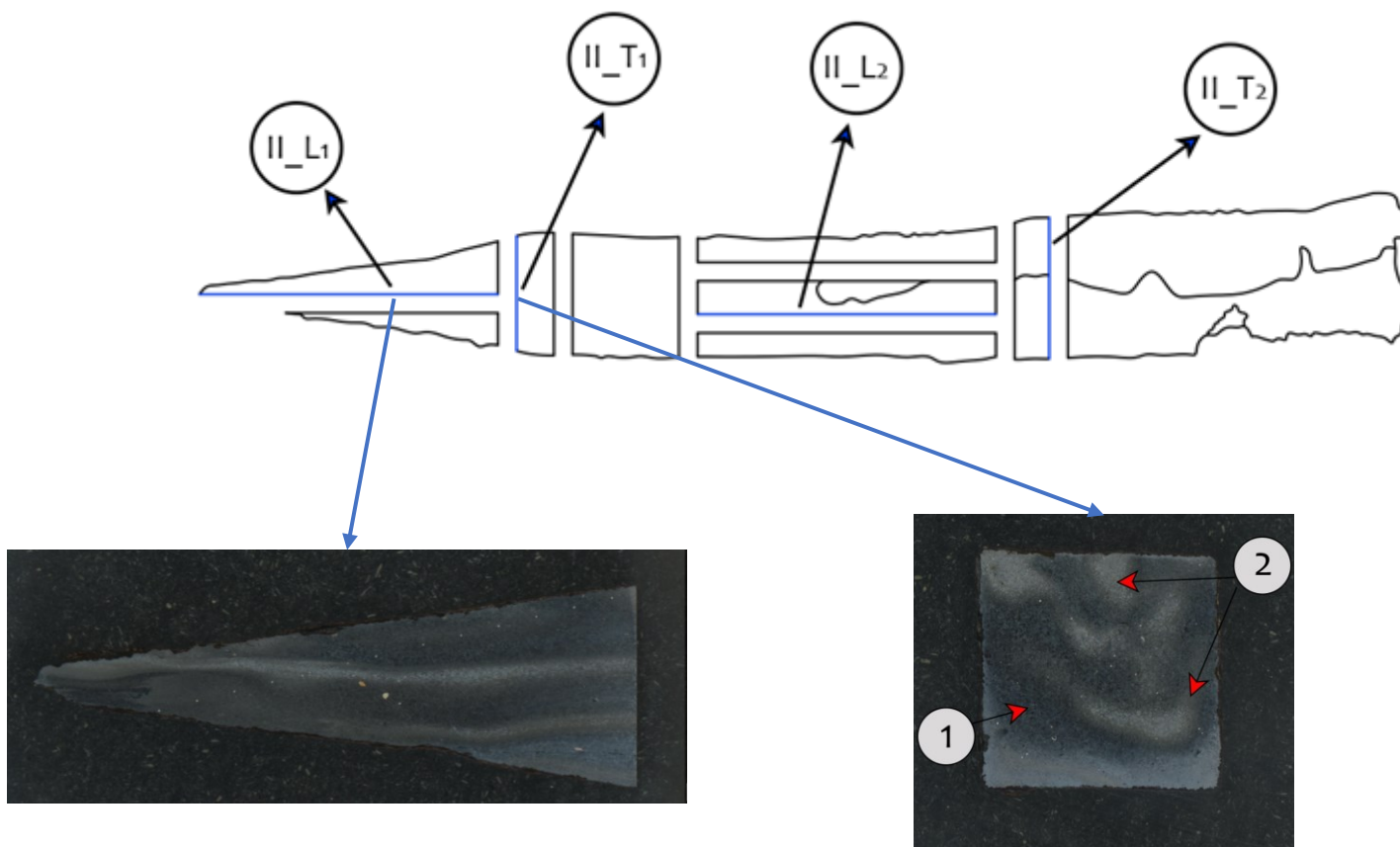


Sezione I_T





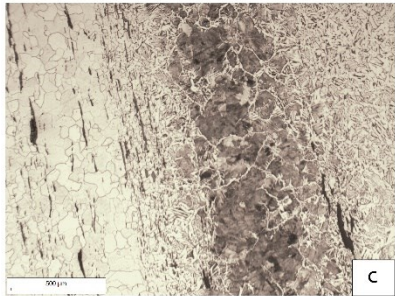
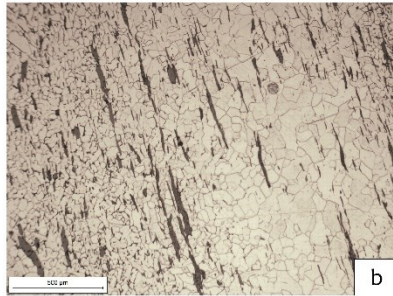
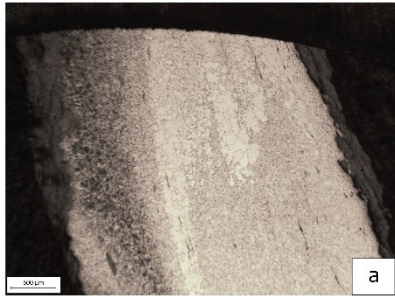
Microscopia Punta II





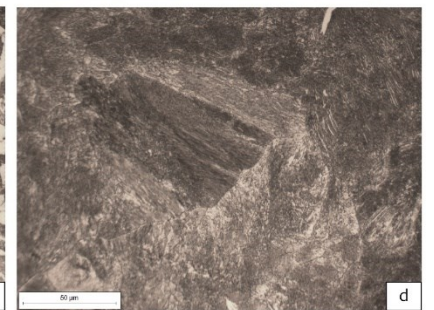
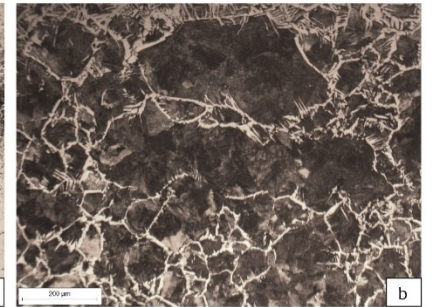
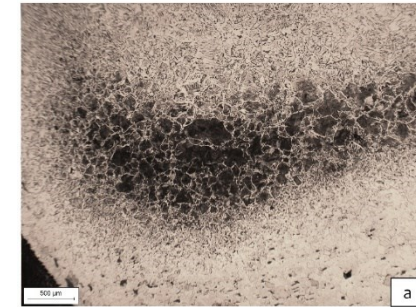
• Punta II •

Sezione II_L1



Si potrebbe pensare ad un tentativo di cementazione della cuspide ottenuto procedendo come rappresentato in *figura*, sottoponendo quindi per qualche ora la punta ad atmosfera cementante di CO modulata dal fuoco di forgia, ma l'eccessivo spessore dello strato cementato (circa 5[mm]) e il suo caratteristico sviluppo longitudinale porta alla conclusione che il carbonio presente sia frutto della disomogeneità del blumo di partenza

Sezione II_T1



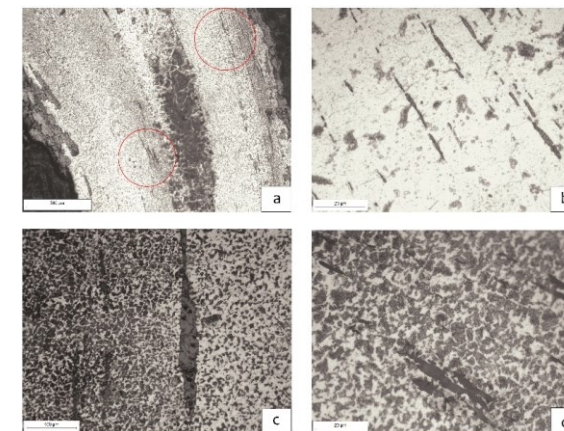
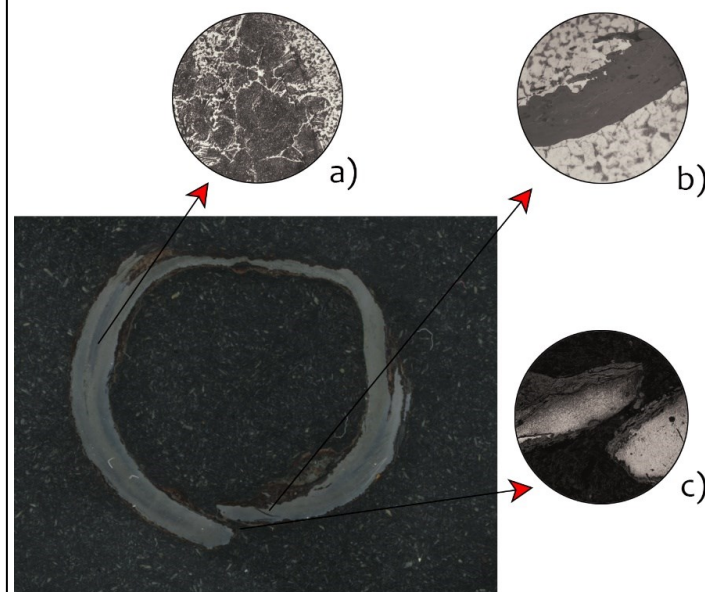
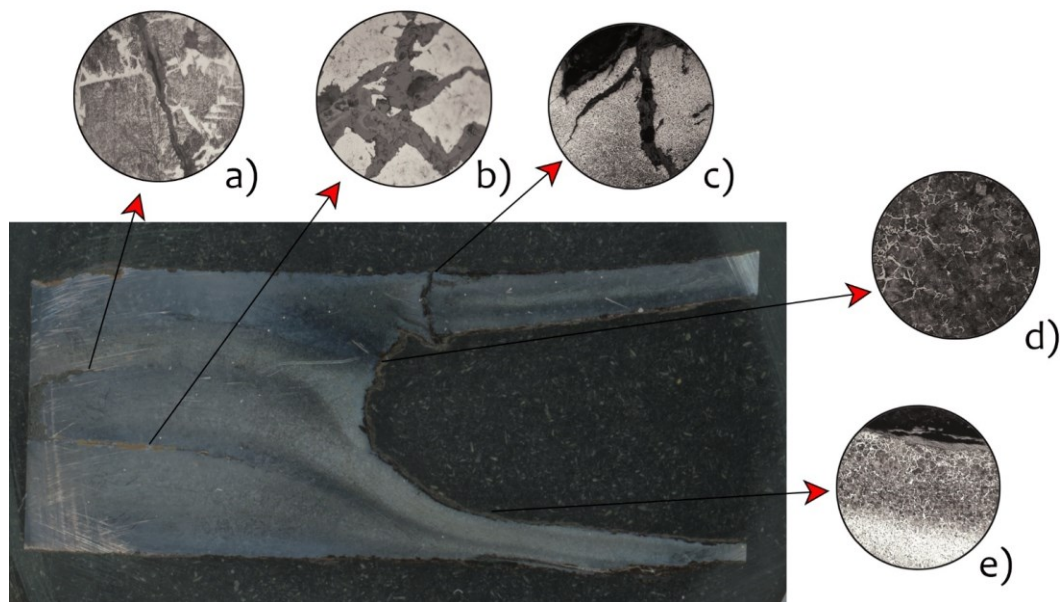


• Punta II •

Sezione II_L2



Sezione II_T2



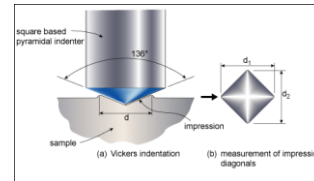
Inclusioni allungate nella direzione circonferenziale imposta dalla formatura della gorbia, traccia di martellamento a caldo dell'acciaio su un'anima cilindrica o conica.



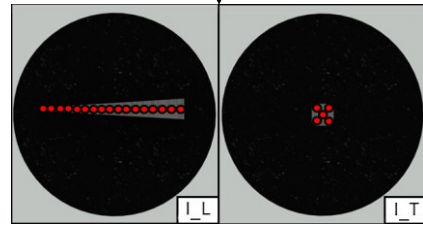
Punta I

Microdurezza Vickers

Punta II



$$HV = 1.854 \frac{F}{A}$$



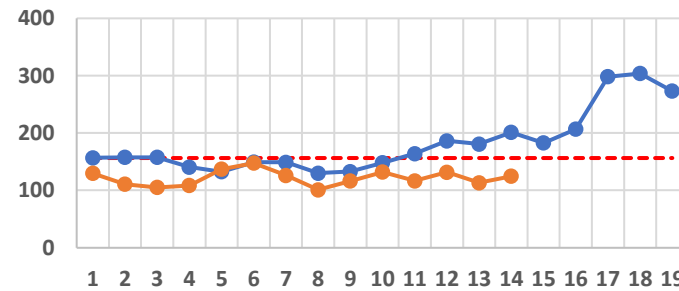
Durezza [HV] Punta I

Cucitura	I_L	I_T
1	156,8	129,6
2	157,6	110,6
3	157,6	105,0
4	140,5	108,4
5	132,4	137,0
6	149,3	147,4
7	148,9	126,0
8	129,9	101,0
9	132,8	116,2
10	148,1	131,8
11	164,1	116,4
12	186,4	131,5
13	180,7	113,3
14	201,2	124,5
15	182,8	
16	206,7	
17	298,3*	
18	303,8*	
19	273,0*	
Media	181,6	121,3

Durezza Punta I [HV]

156,1

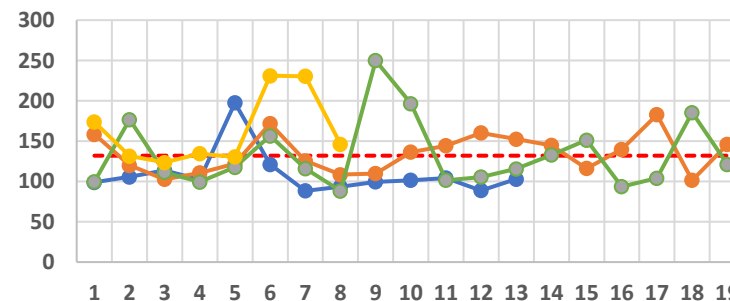
Punta I



Media

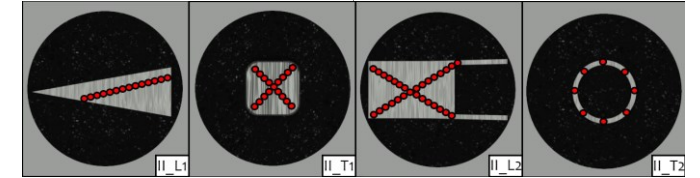
$M_a = 156,1$
 $\sigma^* = 51,3$
 $\sigma = 28$
 $cov^* = 32,8\%$
 $cov = 18\%$

Punta II



Media

$M_a = 132,1$
 $\sigma = 37,5$
 $cov = 28,4\%$



Durezza [HV] Punta II

Cucitura	II_L1	II_L2	II_T1	II_T2
1	98,9	158,5	99,7	173,8
2	105,6	119,9	176,7	131,5
3	113,8	102,7	111,3	123,6
4	102,3	110,6	99,3	134,4
5	197,6	121,9	117,5	130,5
6	121,1	171,8	156,4	231,1
7	88,3	125,4	115,9	230,4
8	93,4	108,4	88,1	146,2
9	99,5	109,9	249,9	
10	101,4	136,4	196,5	
11	104,3	144,4	101,4	
12	88,8	160,2	105,4	
13	102,9	152,4	115,6	
14		144,8	132,8	
15		116,2	151,2	
16		139,8	93,5	
17		182,8	104,1	
18		101,4	185,4	
19		145,9	121,1	
Media	109,1	134,4	132,7	162,7

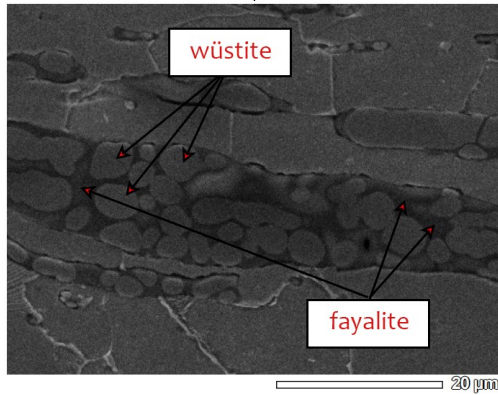
Durezza Punta II [HV]

132,1



Analisi delle Scorie

SEM-EDS



Analisi Chimica campione II_L1										
%Ar ea	Scoria 1			Scoria 2			Scoria 3			
	002 (Fase Chiara)	003 (Fase Scura)	004 (Fase Scura)	005 (Fase Scura)	006 (Fase Chiara)	007 (Fase Scura)	009 (Fase mista)	010 (Fase mista)	11 (Fase Chiara)	
C	2,85	6,37	6,90	3,15	4,80	5,09	3,87	6,91	4,48	
O	26,60	34,18	36,81	42,01	25,90	36,00	23,27	27,47	20,80	
Mg	1,01	1,07	0,65	0,78	0,93	0,66	1,46	2,22	1,01	
Al	0,13	1,57	1,50	1,93	-	2,81	0,60	0,33	0,71	
Si	0,13	11,22	11,01	11,42	0,24	11,79	3,24	3,19	3,28	
P	-	1,20	1,42	1,48	0,08	0,43	0,89	1,04	1,33	
K	0,04	1,97	2,09	3,34	-	1,40	0,67	0,40	0,29	
Ca	0,31	10,29	10,58	12,63	0,32	12,16	2,52	4,08	3,26	
Mn	6,59	4,06	5,08	4,50	2,93	3,91	3,27	3,68	2,95	
Fe	62,35	28,07	23,96	18,76	64,79	25,76	60,20	50,67	61,88	

Composizione Estesa Scoria 1

% CaO	% SiO ₂	% K ₂ O	% Fe ₂ O ₃	% Al ₂ O ₃	% P ₂ O ₅	% MgO	% MnO
6,21	9,88	0,94	65,87	1,28	0,73	1,55	8,11

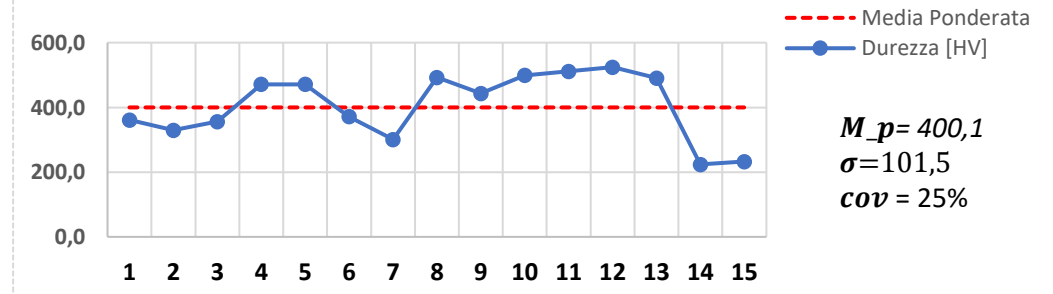
La durezza della **Fayalite** è espressa in un range di $6,5 \div 7$ [HM]. I valori in tabella non raggiungono i 5 [HM] e presentano, a esclusione dei valori non attendibili, un valore di media pesata di circa 4,4 [HM]. I motivi possono essere due: Si tratta di scorie a base di silicati di altro tipo, come il silicato di calcio **Larnite** ($Ca_2SiO_4 \rightarrow 5 \div 6$ [HM]), oppure di scorie ad alto contenuto di ossidi di ferro come la **Wüstite** ($FeO \rightarrow 5 \div 5,5$ [HM]), dovuto ad un cattivo controllo di scorificazione.

L'analisi SEM-EDS rileva scorie di produzione con composizione tipica di quelle provenienti dai basso fuochi, con elevata percentuale di ferro perso e limitata presenza di calce viva. Sono aggregati multifase composti da ossidi di ferro dispersi in una matrice di fayalite.

Microdurezza

		N° Scoria	Durezza [HV]	Forza [gf]	Stima Durezza [HM]
Punta I	I_L	1	361,5	100	4,2
		2	172*	100	3,1
	I_T	3	329,9	300	4,1
		4	356,6	300	4,2
		5	181,2*	300	3,2
Punta II	II_L1	6	471,7	100	4,7
		7	371,7	100	4,3
		8	300,9	50	3,9
		9	492,9	50	4,8
		10	443,2	100	4,6
		11	498,9	100	4,8
	II_T1	12	511,3	100	4,9
		13	524,2	100	5
		14	490,9	100	4,8
	II_L2	15	224,2*	100	3,5
		16	233*	100	3,5

Durezza Inclusioni





Conclusioni

La Punta I appartiene al Gruppo B2, rappresentativo di dardi lunghi e affusolati, realizzati per penetrare la cotta di maglia nemica;

La Punta II appartiene al Gruppo Q, rappresentativo dei classici “verrettoni” o “quadrelli” con massa importante, realizzati per danneggiare le armature pesanti difensive.

Entrambe le punte metalliche esaminate presentano una microstruttura prevalentemente ferritico-perlitica a basso tenore di carbonio (0,1% ÷ 0,2%) con zone a diversa dimensione media del grano, dovute a differenti tempi di raffreddamento e/o a martellamenti più spinti in superficie e meno spinti a cuore.

La bluma di partenza è stata ottenuta attraverso il metodo di produzione diretto. La parte più omogenea è stata destinata alla realizzazione di prodotti più accurati (come le spade), mentre la parte di scarto alla produzione delle punte (questo spiega gli addensamenti di carbonio).

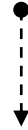
Non sono state rilevate evidenti tracce di trattamenti termici intenzionali in prossimità delle cuspidi allo scopo di favorirne la durezza, come cementazioni o presenza di bainite/martensite da tempra. Il potere penetrante dei due dardi era affidato unicamente alla loro forma e al loro peso.

La mancanza di saldatura dei due lembi di metallo, in prossimità della gorgia lacunosa della Punta II, e l'assenza di una operazione di limatura dei due lembi sovrapposti, conferma la rapidità di lavorazione tipica delle produzioni in serie e la scarsa minuziosità del fabbro nella realizzazione di tali punte.

Le scorie intrappolate nella matrice metallica si presentano povere di fayalite e proprio per questo non è stato possibile rimuoverle durante le operazioni di raffinazione della bluma o durante l'iniziale processo di riduzione. Le scorie esaminate al microscopio elettronico sono scorie di produzione, originate durante la fase di riduzione e composte da aggregati di ossidi di ferro e fayalite, con alta percentuale di ferro perso e bassa quantità di calce viva, non attribuibile ad una sua eventuale introduzione come additivo.



Conclusioni

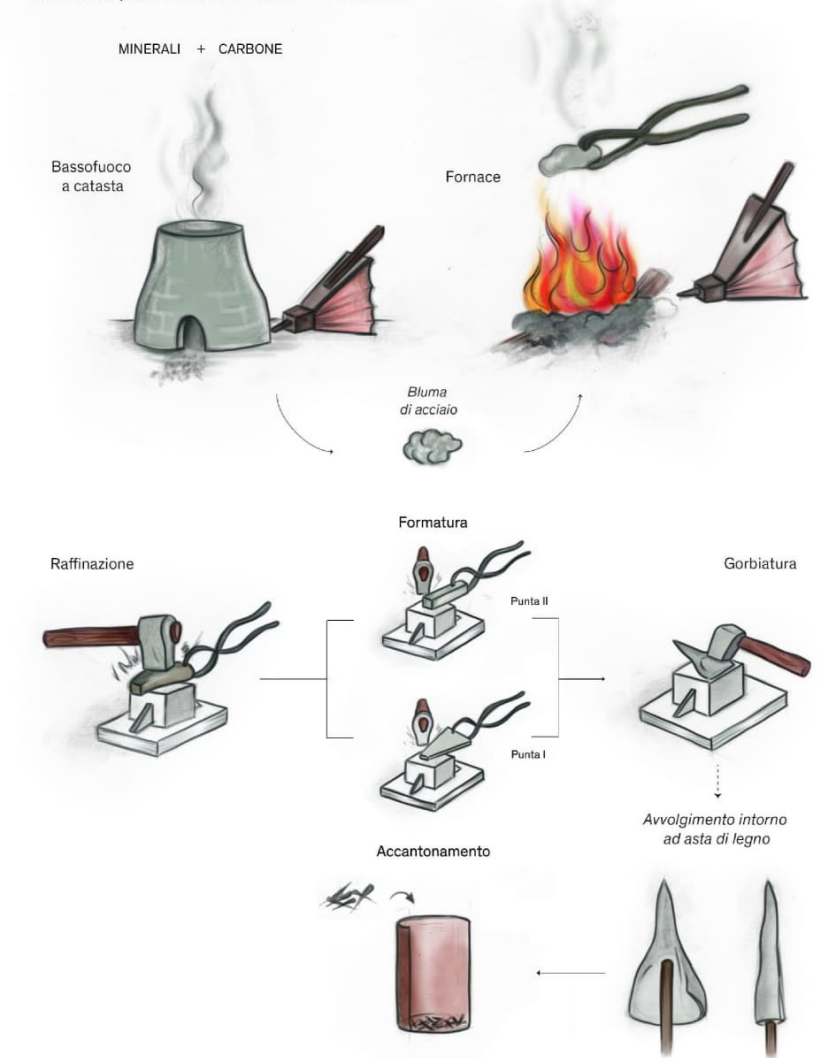


Il fabbro ha ottenuto la Punta I martellando una lamina sottile di forma triangolare, riavvolgendola su se stessa e formando la sezione piramidale a base quadrata. A rigor di prova, nella sezione I_T è possibile notare una linea di ossido circondata da scorie allungate nella sua direzione, dovuta alla saldatura per bollitura dei due lembi. L'incavo della gorbia è stato ricavato deformando, per martellatura, una superficie precedentemente appianata attorno ad un cuneo di ferro, senza particolare attenzione per il risultato finale.



Il fabbro ha ottenuto la Punta II lavorando su un acciaio di partenza di pezzatura unica, presumibilmente un lingotto di forma cilindrica o un piccolo massello, che è stato schiacciato e appuntito tramite martellatura a caldo. L'incavo della gorbia è stato ricavato allo stesso modo della punta precedente ed è ragionevole ipotizzare che abbia subito un lento raffreddamento con una permanenza più o meno lunga ad una temperatura a cavallo dell' A_{c1} (color rosso ciliegia), provocata dal contatto prolungato con il cuneo di ferro caldo grazie al quale è stato ricavato.

Processo di produzione dei verrettoni nel Medioevo





Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Analisi metallurgica di punte di dardi da balestra in epoca medievale

Sessione di laurea Marzo 2021

GRAZIE PER L'ATTENZIONE

Relatori:
Prof. Matteis Paolo
Prof. Scavino Giorgio



Candidato:
Paiano Angelo