

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale Ingegneria dei Materiali

# Analisi di meteoriti ferrosi

Candidato: Luca Giromini

Relatori: Paolo Matteis Giorgio Scavino

# Glossario

Di seguito si riportano le lettere e i simboli utilizzati per indicare le microstrutture proposte in questo lavoro:

- K, Kamacite: lega α-(Fe,Ni);
- T, *Taenite*: lega γ-(Fe,Ni);
- P, Plessite: miscela meccanica di Kamacite e Taenite;
- BN, *Bande di Neumann*: linee nella microstruttura prodotte da shock compressivo da onda d'urto dopo ingresso in atmosfera o durante collisioni extraterrestri;
- Wid, Figure di Widmanstatten;
- Sch, Screibersite: (Fe,Ni)<sub>3</sub>P;
- Rh, Rhabdite, per indicare Schreibersite prismatica: (Fe,Ni)3P;

Altre abbreviazioni utilizzate:

- XRD, diffrattometria a raggi X;
- PrAC, pre-attacco chimico;
- PoAC, post-attacco chimico;
- Myr, milione di anni;

# Sommario

Glossario	
1.Introduzione	7
2.Campioni analizzati	
Atacama, Cile	9
Sao Juliao, Portogallo	9
Carlton, Texas	9
3.Metodi sperimentali	
3.1 Osservazione al microscopio ottico a riflessione	
3.2 Analisi XRD	
3.3 Analisi al quantometro	
3.4 Prove di microdurezza	
Atacama, Cile	
Sao Juliao, Portogallo	
Carlton, Texas	
4.Discussione Risultati	
4.1 Atacama, Cile	
4.1.1 Analisi al Quantometro	
4.1.2 Analisi XRD	
4.1.3 Analisi Microstrutturale	
Levigatura e lucidatura	
Ispezione preliminare al Microscopio Ottico a Riflessione	
Zona 1	
Zona 2	
Zona 3	
Zona 4	
Zona 6	
4.2 Sao Juliao, Portogallo	
4.2.1 Analisi al quantometro	
4.2.2 Analisi XRD	
4.2.3 Analisi microstrutturale	
Levigatura e lucidatura	
Ispezione preliminare al Microscopio Ottico a Riflessione	
Zona 1	
Zona 3 e 4	

4.3 Carlton, Texas	
4.3.1 Analisi al quantometro	
4.3.2 Analisi XRD	
4.3.3 Analisi microstrutturale	
Levigatura e lucidatura	
Ispezione preliminare al Microscopio Ottico a Riflessione	
Zona 1	
Zona 2	
Zona 3 e 6	
5.Conclusioni	
Atacama, Cile	
Sao Juliao, Portogallo	
Carlton, Texas	
6.Bibliografia	
6.1 Immagini	
6.2 Grafici	
7.Appendice	
1A: raccolta immagini al microscopio ottico	
2A: Prove Microdurezza	
3A Prove di fitting XRD	

# 1.Introduzione

I meteoriti sono oggetti che da sempre suscitano il fascino delle persone per la loro misteriosità: da dove provengono? Quanti anni hanno? Di cosa sono fatti? Queste sono alcune delle domande che più spesso vengono poste, quindi è utile far chiarezza.

I *meteoroidi* sono corpi con masse che variano da pochi grammi a centinaia di kg che vagano nello spazio fino ad entrare in orbita con qualche pianeta, e in alcuni casi a collidere con esso: il *meteorite* è il corpo che entra l'atmosfera del pianeta e impatta col suolo. I siti di impatto sono casuali, ma come buona regola è possibile affermare che è molto più probabile che avvenga collisione in zone del pianeta molto estese, per questo motivo che è più facile che un meteorite cada in Asia o in Russia piuttosto che in Grecia. Seguendo questo indizio è dunque intuitivo che la maggior parte dei corpi che hanno colliso con il pianeta si trovino negli oceani, ed è per questo anche che quelli che si riescono a recuperare sul suolo sono preziosi, perché contengono informazioni accessibili tramite analisi chimiche e microstrutturali.

Infine, non tutti i corpi che entrano in atmosfera (detti *bolidi*) riescono a raggiungere il suolo, perché le enormi forze d'attrito e le temperature elevate disintegrano quelli meno massivi. I restanti che riescono ad atterrare, lasciano dietro di loro scie luminose (la cosiddetta *meteora*) e di fumo visibili anche a grandi distanze, come successo nel 2013 con il meteorite di Čeljabinsk in Russia, del quale è possibile vedere filmati online<sup>1</sup>. Quelli che riescono ad atterrare sul suolo si definiscono *caduti* e si assegnano di norma due età, quella totale stimata dalla formazione e quella terrestre dall'impatto col pianeta.

L'aspetto del meteorite caduto è di una roccia di colore nero con superficie irregolare di forma vagamente conica<sup>2</sup> dovuta in parte all'ingresso in atmosfera che causa parziale fusione a causa dell'attrito con l'aria e in parte all'impatto violento col suolo. Il colore nero della superficie è la conseguenza della reazione di ossidazione del metallo (che compone il meteorite) con l'ossigeno.

Lo studio dei meteoriti è utile sia da una prospettiva astronomica per meglio comprendere i meccanismi di formazione dei pianeti<sup>3,4</sup>, in quanto i meteoriti sono residui dei cosiddetti *planetesimi*, ossia accrezioni di materiale di qualche km. A causa di collisioni esterne con il planetesimo o insufficienza di materiale per accrezione, nei primi stadi di formazione il protopianeta non raggiunge lo stato embrionale, rimanendo quindi un aggregato di materiale di dimensioni variabili, che forma gli asteroidi<sup>5</sup>. Ciò che giunge sulla Terra (e su altri pianeti del Sistema Solare) è dunque una "capsula del tempo" che permette di interpretare i primi stadi di vita di un pianeta.

Da un punto di vista metallurgico i meteoriti, in particolare quelli ferrosi, permettono una più ampia conoscenza dei meccanismi di lenta solidificazione della lega Fe-Ni, in quanto le microstrutture esaminate dal sezionamento di questi oggetti si rivelano impossibili da replicare sulla Terra, per via dei lunghissimi tempi di solidificazione (si parla infatti di qualche centinaio di gradi ogni milione di anni (Yang,Goldstein<sup>6</sup> [2006]).

Storicamente il ferro meteoritico è stato impiegato per la realizzazione di manufatti e utensili, in quanto prima del XX secolo non si era a conoscenza di un metodo efficace per la produzione di ferro, e i meteoriti erano l'unica (rara) risorsa di ferro metallico disponibile. L'esempio più famoso di oggetto in ferro meteoritico è la daga di Tutankhamon (fig.1), ma esistono ulteriori prove di manufatti (Buchwald<sup>7,8</sup> [1992 e 2005], Rickard<sup>9</sup> [1941]).



Figura 1: Daga di Tutankhamon in ferro meteoritico

# 2.Campioni analizzati

Quando un meteorite viene individuato lo si identifica col nome del luogo del ritrovamento o del luogo abitato più vicino e se sono presenti più di un esemplare si assegnano dei numeri ad essi. In questa tesi i meteoriti analizzati sono (in ordine di analisi):

- 1. Atacama, Cile: Olosiderite, anno non specificato, 220.1g
- 2. Sao Juliao, Portogallo: Olosiderite, 1883, 197g
- 3. Carlton, Texas: Olosiderite, 1887, 52.2 g

Questi esemplari hanno in comune che sono tutti meteoriti ferrosi, composti principalmente da una lega di Fe-Ni con percentuali in peso variabili, oltre alla presenza di altri elementi in minor quantità come Co, P e S. Al giorno d'oggi, basandosi sulla massa totale, questa categoria di esemplari supera di gran lunga le altre classi di meteoriti.

Una caratterizzazione<sup>10,11</sup> più precisa di questi campioni è la loro classe di appartenenza: nel 1975 l'ingegner V. F. Buchwald nel suo libro<sup>15</sup> "Handbook of Iron Meteorites, Their History, Distribution, Composition, and *Structure*" catalogò i meteoriti in quattro classi distinte: Condriti, Acondriti, Ferro-rocciosi e Ferrosi. Ciascuna di queste classi presenta ulteriori suddivisioni in base agli elementi presenti all'interno del meteorite (per esempio nei Ferro-rocciosi ci sono le Pallassiti e le Mesosideriti).

Le meteoriti ferrose sono suddivise preliminarmente secondo la loro struttura (Tscherrnak<sup>13</sup> [1872- 1883] e Brezina<sup>14</sup> [1885-1904], successivamente V. F. Buchwald<sup>15</sup> [1977]) che si basa sulla presenza o meno delle figure di Widmanstatten visibili dopo attacco acido:

- Esaedriti, se il tenore di Ni è molto basso (<6%), nessuna figura di Widmanstatten.
- **Ottaedriti** quando il contenuto di Ni è medio-alto (6-17%), dopo attacco acido si evidenziano le figure di Widmanstatten. In base alle dimensioni delle lamelle si distinguono poi da grezze a fini.
- Atassiti, con contenuto di Ni elevato (>17%), e come le esaedriti non sono presenti le figure di Widmanstatten.

Una suddivisione più categorica si basa sulla chimica dei meteoriti, in particolar modo alla presenza di tracce (ppm) di Ga e Ge (Scott and Wasson<sup>11</sup> [1975]) in funzione del tenore di Ni<sup>16</sup>:

- Esaedriti: classi IIAB, ANOM
- Ottaedriti:
  - Molto grosse (Ogg) classi IIAB, IIIF, ANOM
  - Grosse (Og) classi IAB, IC, IIE, IIIAB, IIIE, IIIF, ANOM
  - Medie (Om)- classi IAB, IID, IIE, IIIAB, IIIF, ANOM
  - Piccole (Of) classi IID, IIICD, IIIF, IVA, ANOM

- Molto piccole (Off) classi IIC, IIICD, ANOM
- <u>Plessitiche (Opl)</u> classi IIC
- Atassiti: classi IIICD, ANOM

La suddivisione in classi è eseguita con numeri romani da I a IV che si riferiscono<sup>15</sup> a livelli di Ga e Ge descrescenti: circa 100 parti/10<sup>6</sup> Ga (I), 50 parti/ 10<sup>6</sup> Ga (II), 20 parti/10<sup>6</sup> Ga (III) e meno di 1 parte/10<sup>6</sup> Ga (IV) (Buchwald [1977]).



Grafico 1: il grafico presenta il contenuto di Ga in ppm rispetto al %di Nichel nelle meteoriti ferrose

Per ciascun meteorite si è preliminarmente proceduto ad una ricerca sullo stato dell'arte cercando informazioni riguardanti studi precedenti per meglio comprendere il gruppo di appartenenza e le caratteristiche di formazione della microstruttura dei campioni presi in analisi. Di seguito vengono riportati i dati relativi dei vari campioni.

#### Atacama, Cile

La bibliografia riguardante i ritrovamenti catalogati come Atacama è molto variegata, in quanto essendo una zona di deserto molto ampia, è più probabile la caduta di un bolide in un luogo con vasta superficie. I riferimenti più degni di nota correlabili alla provenienza del campione sono il ritrovamento presso Chañaral<sup>17</sup> (citato anche nel Buchwald pag.1418) di un olosiderite e un articolo<sup>18</sup> (Wasson, Canut de Bon, [1998]) dove sono stati catalogati tre nuovi esemplari di ottaedriti medie provenienti dal Cile settentrionale.

#### Sao Juliao, Portogallo

Questo campione alla consegna era indicato, come tutti gli altri, genericamente come olosiderite. Nel prosieguo di questo lavoro verrà meglio definita la classe di appartenenza, che risulterà essere ben diversa dagli altri due. Una possibile conferma di ciò è stata la preliminare ricerca sul sito della Meteoritical Society<sup>19</sup>, in un articolo (Nolze et Heide<sup>20</sup>, 2019) e su MinDat.org<sup>21</sup>, ulteriore sito di riferimento.

#### Carlton, Texas

Tramite le analisi effettuate sul campione, che verranno successivamente trattate, e anche tramite il consulto della letteratura si è confidenti che si tratti di un'ottaedrite medio-fine facente parte del gruppo IAB-IIICD. A questo proposito conviene specificare il dualismo sull'etichetta del gruppo riguardante questo meteorite: un articolo (Wasson, Kallemeyn<sup>22</sup>, [2002]) propone come gruppo principale IAB e come sottogruppo IIICD, e questa informazione è importante perché altri frammenti provenienti da Carlton sono

stati etichettati<sup>23,24,25</sup> sia come IAB che come IIICD in base alla catalogazione precedente/antecedente l'articolo, ma, di fatto, si intende la medesima classe.

# 3. Metodi sperimentali

Lo scopo di questo lavoro è stato di esaminare tre diversi campioni di meteoriti ferrosi tramite analisi metallografica per risalire alla loro composizione chimica e alla loro struttura cristallografica e microstruttura, presso i laboratori del dipartimento DISAT del Politecnico di Torino. Tramite confronto dei dati raccolti con la letteratura appropriata i risultati ottenuti dalle analisi di laboratorio hanno trovato congruenze con i valori proposti negli articoli dedicati. La selezione della letteratura è stata eseguita secondo criteri che tenessero conto principalmente della provenienza geografica e della similitudine microstrutturale come primo fattore vagliante. Di seguito si è proceduto al confronto con la chimica del materiale per l'ottenimento di informazioni più accurate. I reperti analizzati sono stati gentilmente concessi dal dipartimento di geomineralogia del DIATI del Politecnico di Torino, dove precedentemente erano conservati e catalogati.

Il procedimento di analisi svolto per ogni campione analizzato è il seguente:

- Lucidatura: con carta abrasiva e panni con slurry micrometrico di una faccia selezionata per analisi ottiche, microdurezza e XRD e lucidatura con carta abrasiva grana 60/80 su altra faccia selezionata per analisi al quantometro.
- **Osservazione**: al microscopio ottico a riflessione della struttura post lucidatura a specchio.
- Attacco chimico: con Nital 3,5% per evidenziare la presenza di altre fasi.
- **Osservazione**: al microscopio ottico a riflessione.
- Analisi XRD: per determinare la struttura cristallografica, eseguita sul campione monolitico.
- Analisi al Quantometro: con standard scelto (Acciaio al carbonio) per evidenziare la percentuale in peso degli elementi presenti, eseguita sei volte per ciascun campione.
- Microdurezza: eseguita con microdurometro con scala Vickers.

Vengono riportate di seguito, in ordine di esecuzione, le procedure dettagliate svolte presso il laboratorio del dipartimento DISAT del Politecnico di Torino per ogni campione.

## 3.1 Osservazione al microscopio ottico a riflessione

La procedura di osservazione è stata svolta con il microscopio metallografico Reichert-Jung MeF3. Lo strumento è composto da un portacampioni rovesciato adatto all'osservazione metallografica e lavora in riflessione. Gli ingrandimenti ottenibili con gli obiettivi vanno da 2X a 100X, sono presenti ruote moltiplicatrici che permettono di variare l'ingrandimento dell'obiettivo (0.8X, 1.0X, 1.25X e 2.5X) e monta oculari con ingrandimento 10X. Lo strumento è inoltre dotato di filtri polarizzanti.

Previa osservazione è stata effettuata una preliminare scannerizzazione del campione per segnalare i punti di interesse che sono stati numerati e riportati sull'immagine scannerizzata per tenere traccia del lavoro anche post attacco chimico; la procedura di numerazione è stata ripetuta per ogni campione.

La selezione dei punti di interesse sulla superficie del campione è stata eseguita tenendo conto di ricoprire l'intera area del frammento di meteorite per ottenere il maggior numero di informazioni, e valutare se il campione fosse omogeneo o presentasse zone a diversa composizione.

L'analisi al microscopio metallografico ha avuto lo scopo di determinare quante e quali fasi fossero presenti e la loro distribuzione spaziale (valutando possibile omogeneità). A seguito dell'attacco chimico le stesse zone sono state riesaminate a vari ingrandimenti, e nel capitolo di elaborazione dei risultati sono state riportate quelle più interessanti per ogni campione, mentre il restante gruppo di immagini è disponibile in appendice 1A.

L'identificazione delle fasi è stata eseguita con l'aiuto di vari testi<sup>26,15</sup> e siti<sup>27,28</sup> di riferimento, tenendo in considerazione anche i risultati delle analisi chimiche per il corretto riconoscimento. Tutte le immagini inerenti ai tre campioni analizzati che verranno mostrate sono state scattate dall'autore di questo lavoro. Non è stato possibile condurre osservazioni più dettagliate di microscopia, in particolare al SEM, poiché i campioni risultano troppo massivi per i portacampioni degli strumenti disponibili in dipartimento.

## 3.2 Analisi XRD

Lo scopo dell'analisi XRD è stato di identificare il contenuto del materiale analizzato tramite l'invio di una radiazione X sulla superficie del campione e la lettura della radiazione che interagisce costruttivamente coi piani reticolari secondo la legge di Bragg:  $n\lambda = 2d \sin \theta$ . Ciò che viene letto dallo strumento è l'intensità della radiazione diffratta: la sorgente X ruota nel tempo assieme al detector, in modo che solo per certi  $\theta$  il reticolo cristallino sia in grado di dare interferenza costruttiva. Si esprimono i picchi trovati come Intensità (in cps, unità arbitraria) in funzione dell'angolo 2 $\theta$  che è quello tra raggio incidente e raggio diffratto.



Figura 2: rappresentazione schematica di uno strumento per XRD

L'analisi in diffrattometria a raggi X è stata svolta utilizzando lo strumento Rigaku D/MAX B, le misure sono state ottenute grazie all'aiuto del prof. Ubertalli Graziano, docente di Ingegneria industriale e dell'informazione presso il dipartimento DISAT.

I campioni sono stati inseriti nel dispositivo mediante l'utilizzo di un puddy polimerico per fissarli al portacampioni: sono state eseguite due misure per il primo meteorite (Atacama) in due orientazioni diverse (denominate "verticale" ed "orizzontale"), mentre per gli altri due campioni è stata eseguita una sola prova ciascuno.

I parametri dello strumento sono i seguenti:

- Sorgente raggi X: catodo Co-K<sub> $\alpha$ </sub>  $\lambda$  = 1,78897Å;
- 2θ: 35.0° 109.94°;
- θ step: 0.06°;
- numero conteggi: 1250;

Il tempo di ciascuna acquisizione è stato di circa 2 ore, sono stati utilizzati i campioni monolitici e non le loro polveri. Successivamente si è passati all'identificazione dei picchi trovati, andando ad evidenziarli tramite la procedura di *peak finding* e sono stati inseriti manualmente quelli non riconosciuti dal software. Si è poi passati all'individuazione dei composti che fornivano lo spettro dei picchi evidenziati utilizzando i database disponibili contenuti nel software dello strumento, che permette la selezione preliminare degli elementi che si sospetta essere contenuti nel materiale: sono stati considerati Fe, Ni, Co, P e S. Tramite *matching* dei materiali forniti dal database e considerando la letteratura sui meteoriti ferrosi (che propone Taenite e Kamacite come minerali principali) sono stati assegnati i rispettivi composti ai rispettivi picchi.

# 3.3 Analisi al quantometro

Le misurazioni sono state eseguite con un quantometro, uno strumento comune in analisi metallografica che permette di rilevare quantitativamente la composizione in percentuale in peso degli elementi presenti nei primi millimetri di superficie, con la premessa che il campione sia omogeneo di composizione. Lo strumento viene tarato prima della misura andando a selezionare all'interno del suo database i campioni di riferimento di un particolare metallo o lega.

Lo strumento di laboratorio è un quantometro GNR S7-MLP composto da due elettrodi, uno esterno che di norma viene collegato al campione ed uno interno alla camera di analisi che genera un arco elettrico quando è in funzione. La camera di analisi viene flussata con gas inerte, di norma Ar, per evitare che il substrato si ossidi e comprometta l'acquisizione dei risultati. La lettura degli elementi avviene per spettrometria di emissione ottica, ossia che la radiazione emessa dagli atomi del materiale vaporizzato viene letta dall'ottica dello spettrometro<sup>29</sup>. Il raggio ottico viene scomposto in singole componenti spettrali, le cui lunghezze d'onda vengono rilevate da dei CCD (lo strumento utilizzato ne possiede 12) e l'intensità della radiazione è proporzionale alla concentrazione dell'elemento. La durata di ogni singola misura è di circa 20 secondi.

Prima di eseguire l'analisi è stato posto come riferimento un acciaio al carbonio normato come base di analisi, questa scelta è stata eseguita perché i campioni misurati non possiedono caratteristiche specifiche, e quindi si è scelto un riferimento generico per la lettura delle concentrazioni.

Per ogni campione analizzato sono state eseguite sei misurazioni in sei punti diversi dal lato selezionato in fase di lucidatura, il quale è stato levigato e lucidato con carta abrasiva fino a grana 80.

Tra una misura e quella successiva è stato dato modo al campione di raffreddarsi, e il macchinario è stato pulito nella sua interezza (camera, piastra ceramica ed elettrodo).

L'analisi chimica svolta ha lo scopo di collocare i meteoriti nelle loro rispettive classi di appartenenza almeno qualitativamente, in quanto servirebbero ulteriori analisi sulla percentuale di Ga o Ge presenti in ppb per avere una suddivisione più precisa. In ogni caso, (secondo Buckwald<sup>12</sup> cap.8 pag. 86) gli elementi chiave per una classificazione precisa nel 90% dei casi sono Ni e P.

I meteoriti presi in analisi in questo lavoro sono ferrosi, quindi il diagramma di stato di riferimento sarà della lega Fe-Ni, riportato di seguito:



Figura 3: Yang, Goldstein, diagramma di stato Fe-Ni

Il grafico rappresenta, in funzione del tenore di Ni in percentuale di peso, le fasi che si formano al raffreddamento, che devono dunque essere presenti sul campione che viene analizzato. Come ulteriore strumento per l'individuazione della classe di appartenenza dei meteoriti analizzati, si riportano grafici che correlano il contenuto di P in funzione di quello di Ni. Il primo grafico (fig.4) proviene dal Buchwald<sup>15</sup> che mostra delle aree dove il rapporto Ni/P è simile per determinate famiglie di meteoriti, suddividendo quindi in base a questo rapporto le varie classi. Il secondo grafico di riferimento (fig.5) è relativo a un articolo sul meccanismo di formazione delle figure di Widmanstatten<sup>30</sup> (J. Yang e J. I. Goldstein, [2005]) che suddivide i cinque possibili meccanismi di formazione in base sempre al rapporto Ni/P.





Figura 5: Yang, Goldstein. Diagramma P vs Ni in funzione del meccanismo di formazione delle figure di Widmanstatten

Questo dato è il primo passo per conoscere la storia termica del campione, perché individuando il meccanismo di formazione delle figure di Widmanstatten è possibile risalire alla sua velocità di raffreddamento: la ricerca di questo dato ha prodotto come risultato un interessante articolo<sup>31</sup> che vaglia varie metodologie di datazione dei tempi di raffreddamento dei meteoriti presi in analisi (tramite correlazione tra elementi in ppb come Ga, Ge, Ir e Au, ma anche Os Re e Mn per citarne alcuni) utilizzando dei modelli accurati. I risultati di questo articolo verranno citati per il rispettivo meteorite.

In (fig.4) compaiono distinti i gruppi IIIA e IIIB mentre in (fig.5) compare il gruppo IIIAB, questo perché i gruppi definiti con A presentano minor contenuto in Ni rispetto a quelli in B, ma generalmente si tende a definire una famiglia "composita" AB per ciascun gruppo di appartenenza (Scott, Wasson<sup>11</sup> pg.529). Quest'ultimo dato è di particolare interesse perché permette di avere un ulteriore riscontro, conoscendo la struttura cristallina analizzata e le percentuali di elementi trovate, per determinare la classe di appartenenza del campione e spiegarne il meccanismo di solidificazione, che verranno ripresi nel capitolo successivo di analisi dei risultati.

## 3.4 Prove di microdurezza

L'analisi ha lo scopo di valutare la durezza del materiale e correlarla alla sua deformabilità. Lo strumento di prova in laboratorio è il microdurometro Tecnimetal CV400AAT composto da:

- piatto portacampioni con viti micrometriche
- morsa di afferraggio
- manovella per regolare la messa a fuoco del campione
- torretta mobile sulla quale sono montati due obiettivi (10X e 40X) ed un penetratore Vickers normato
- regolatore con carichi di prova variabili: 10 25 -50 -100 200 300 300 500 1000 gf

le immagini della superficie del campione sono visualizzate sul monitor collegato allo strumento. La preparazione dei campioni di Atacama e Sao Juliao è stata eseguita utilizzando una morsa da banco per via della limitata apertura della morsa fornita dal produttore, che invece per l'ultimo campione è risultata sufficiente. I campioni sono stati fissati in modo tale da presentare la superficie di analisi parallela alle ganasce della morsa per la corretta esecuzione della prova (fig.6).



Figura 6: campione Carlton, Texas inserito nella morsa dello strumento

Per ciascun campione sono state eseguite diverse prove di durezza e alcune delle immagini sono riportate in appendice 2A.

#### Atacama, Cile

Sono state eseguite delle prove iniziali scegliendo zone diverse per prendere dimestichezza con lo strumento, in tutto sono state fatte 15 acquisizioni con carico di 500gf. Successivamente si è passati alla misura di tre zone diverse scelte in maniera casuale denominate "matrice", con lo scopo di ottenere una media complessiva di valori della fase Kamacite. Per ognuna di queste zone sono state eseguite tre acquisizioni a 300 gf.

Dopo la misura della fase principale si è proceduto a misurare le fasi secondarie, con cinque prove ciascuna: la fase Plessite è stata acquisita a 300 gf e la fase Schreibersite a 50 gf.

#### Sao Juliao, Portogallo

Come nel caso del primo campione, anche in questo è stata eseguita una prova denominata "matrice" dove sono state acquisite cinque misurazioni in punti casuali della superficie con carico di 300gf. Successivamente è stata misurata l'unica seconda fase presente, Schreibersite, con un carico di 300 gf per un totale di cinque misurazioni.

#### Carlton, Texas

Per questo campione si è voluta valutare la variazione di durezza in direzione perpendicolare alle lamelle, in modo da poter correlare i dati di durezza con la variazione di concentrazione di Ni tra Kamacite e Taenite. Sono state selezionate tre zone in maniera casuale ed è stata eseguita la cosiddetta "cucitura", ossia una serie di prove dove un asse viene mantenuto costante e ci si sposta di un incremento determinato lungo l'altro. Tutte le cuciture sono state effettuate con carico di 50gf.

- La prima cucitura è stata di 9 acquisizioni con incremento di 0.04 mm;
- La seconda cucitura è stata di 10 acquisizioni con incremento di 0.05 mm;
- La terza cucitura è stata di 15 acquisizioni con incremento di 0.05 mm;

# 4. Discussione Risultati

Per ciascun campione si dedicherà un sottocapitolo comprendente di tutte le prove eseguite con i rispettivi risultati, seguendo per ognuno il seguente iter di discussione:

- Si partirà dall'analisi chimica eseguita al quantometro per conoscere gli elementi che compongono il campione in esame per determinare la rispettiva classe di appartenenza, aiutandosi coi grafici rappresentati in (fig.4) e (fig.5) e tramite letteratura di riferimento.
- Verranno analizzati i dati relativi alle prove effettuate con XRD con lo scopo di stabilire la composizione cristallografica del singolo meteorite, verificando tramite dati presi in letteratura la corrispondenza dei picchi trovati e la corretta assegnazione del minerale.
- Analisi micrografica correlata con immagini di zone selezionate e distinzione delle varie fasi prima e dopo attacco chimico, descrivendone le caratteristiche di formazione e durezza.

## 4.1 Atacama, Cile

#### 4.1.1 Analisi al Quantometro

Canale	1	2	3	4	5	6	media
С	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Si	0.028	0.028	0.028	0.031	0.028	0.028	0.0285
Mn	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.007	0.007833
Р	0.09	0.098	0.098	0.103	0.108	0.113	0.101667
S	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001333
Cr	0.014	0.011	0.014	0.016	0.013	0.014	0.013667
Мо	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Ni	8.586	7.943	7.527	7.661	8.122	7.73	7.928167
Al	0.005	0.004	0.005	0.005	0.004	0.004	0.0045
Cu	0.022	0.02	0.018	0.019	0.02	0.019	0.019667
Со	0.435	0.452	0.472	0.461	0.454	0.46	0.455667
Nb	0.009	0.01	0.01	0.01	0.01	0.009	0.009667
Ti	0.005	0.003	0.005	0.006	0.004	0.004	0.0045
V	0	0	0	0	0	0	0
W	0.007	0.003	0.012	0.016	0.007	0.009	0.009
В	0.0006	0.0006	0.0007	0.0007	0.0008	0.0008	0.0007
Pb	0.006	0.005	0.006	0.004	0.005	0.005	0.005167
Sn	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
Zn	0.045	0.042	0.041	0.041	0.044	0.042	0.0425
Zr	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Са	0.001	0.0013	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	0.00115
As	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Bi	0.007	0.006	0.007	0.006	0.007	0.007	0.006667
Fe	90.726	91.361	91.741	91.606	91.157	91.543	91.35567

Tabella 1: risultati al quantometro per meteorite Atacama, Cile

Dalla raccolta dei risultati del primo campione a seguito di una media tra le varie misure, otteniamo valori di Ni di circa 8% e di Fe circa il 91.3%, la restante parte che compone lo 0,7% è prevalentemente Co (0,45%) e P (0,1%).

Come spiegato nel sottocapitolo 3.3, i valori di maggior interesse sono il contenuto di Ni e P che, confrontando i dati ottenuti dall'analisi coi grafici in (fig.4) e (fig.5), collocherebbero il campione di Atacama nel gruppo IIIAB, di cui fanno parte la maggior parte dei meteoriti ferrosi della classe delle ottaedriti. Si scopre inoltre che la formazione delle figure di Widmanstatten segue il meccanismo "V", il quale prevede la trasformazione:  $\gamma \rightarrow \alpha_2 + \gamma \rightarrow \alpha + \gamma$  dove  $\alpha$  è Kamacite,  $\gamma$  è Taenite e  $\alpha_2$  è fase  $\alpha$  supersaturata (martensite).

Ciò implica che al raffreddamento, raggiunta la temperatura  $M_s$ , la fase Taenite si trasforma in martensite e col procedere della diminuzione di temperatura, si ha un'ulteriore trasformazione in Kamacite + Taenite. Con riferimento a (Goldstein et al. [2009]<sup>31</sup>) si stima che con questo meccanismo i tempi di raffreddamento indicativi sono dell'ordine di 60 – 300°C / Myr.

Una conferma ulteriore di appartenenza al gruppo IIIAB, seppure i valori riportati siano soltanto indicativi, la si può trovare nel Buchwald<sup>15</sup>(1977) nella tabella a pag. 461 che mostra tenori degli elementi in bulk: per il Ni si indicano valori di 7,9% e per il P di 0.08%, che risultano prossimi a quelli individuati con l'analisi al quantometro.

### 4.1.2 Analisi XRD

Come precedentemente annunciato nel capitolo 3.2, questo campione è stato analizzato due volte con la tecnica XRD, prima in una configurazione "orizzontale" ossia col lato maggiore della superficie di analisi appoggiato al portacampioni e successivamente in configurazione "verticale" col lato minore appoggiato. Gli spettri ottenuti sono i seguenti:



Grafico 2: XRD Atacama "orizzontale"



Grafico 3: XRD Atacama "verticale"

Com'è possibile notare alcuni picchi non sono stati identificati, in particolare quelli corrispondenti a  $2\theta$  = 77.6° e 91.4° per lo spettro orizzontale e  $2\theta$  = 48.4° e 77.2° per lo spettro verticale. Questi valori sono stati presi in considerazione e confrontati con picchi XRD provenienti da studi effettuati su altri materiali cristallini, scelti con il criterio che contenessero Fe e Ni principalmente e come ulteriori elementi P,S e Co per restringere la ricerca.

Come database di ricerca sono stati utilizzati vari siti<sup>21,27,30</sup>, in particolare il sito www.crystallography.net, da cui sono stati presi file .cif e convertiti sul programma Vesta. Infine, tramite quest'ultimo è stato cambiato il catodo da Cu (standard fornito dalle misure di altri ricercatori) a Co (catodo del macchinario in laboratorio).

Come ulteriore ricerca sono stati isolati i picchi incogniti e convertiti gli angoli da Co a Cu con l'equazione:

$$\sin\theta_{Cu} = \frac{\sqrt{3}}{2}\sin\left(\frac{2\theta_{Co}*\pi}{2\pi*180}\right)$$

Trovando come nuovi valori di 2θ:

Со	Cu
77.6°	65.31°
91.4°	76.09°
48.4°	41.34°
77.2°	65°

Tabella 2: conversione da Co a Cu

Questi nuovi valori sono stati utilizzati, assieme a quelli noti, per il riconoscimento di picchi caratteristici ma non sono stati identificati. La causa non è ancora nota, e servirebbero ulteriori analisi per individuare questi picchi incogniti.

I picchi individuati corrispondono a Kamacite, una lega  $\alpha$ (Fe,Ni) BCC povera di Ni e a Taenite,  $\gamma$ (Fe,Ni), FCC, ricca in Ni. Confrontando i picchi noti con la letteratura, in particolare un articolo di Idzikowski<sup>32</sup> et al. (2010), quelli relativi alla Kamacite combaciano coi dati riportati nel report.

# 4.1.3 Analisi Microstrutturale

#### Levigatura e lucidatura

Il primo meteorite analizzato è un esemplare di peso iniziale di 220,11g di geometria irregolare, con una vasta area di crosta superficiale ossidata e due superfici che chiameremo A1 e A2 sulle quali sono state eseguite le operazioni di lucidatura e successivamente di analisi.

La superficie A1 (fig.8) essendo la più ampia è stata scelta come candidata per ispezione al microscopio metallografico, analisi XRD e microdurezza, mentre A2 è stata utilizzata per analisi al quantometro.

A1 presentava inizialmente una curvatura piuttosto pronunciata ed è stata dapprima spianata e successivamente lucidata a specchio tramite l'utilizzo di carte fino a grana 2500/4000 e panni con sospensione colloidale micrometrica di 3µm.

La superficie A2 è stata anch'essa spianata e lucidata fermandosi ad una carta abrasiva di grana 80.



Figura 7: Campione di Atacama pre-lucidatura



Figura 8: Campione di Atacama post lucidatura

Nella (fig.8) è possibile notare ad occhio nudo la presenza di quelle che sembrerebbero essere lunghe cricche vicino al confine col bordo esterno (punto 1) e un foro (punto 2). La figura inoltre mostra la presenza di parte della crosta esterna di colore nero scuro che si vede in alto a sinistra.

L'analisi di microdurezza della "matrice", ossia la fase principale Kamacite è stata eseguita in tre zone selezionate casualmente, sulle quali sono state prese tre impronte ciascuna con carico di 300gf, come già citato nel capitolo 3.4. Di seguito si riporta una tabella dei valori acquisiti:

zona	Durezza HV	Media zona HV	Media complessiva HV	
	247.5			
Zona 1	236.4	243.2		
	245.8			
	206.7			
Zona 2	215	210.7	231.2	
	210.5			
	231.9			
Zona 3	239.5	239.6		
	247.5			

Tabella 3: durezze calcolate di fase Kamacite, meteorite di Atacama

Per le seconde fasi si riporta una tabella complessiva dei valori letti e la loro relativa media. La fase Plessite è stata acquisita con carico 300gf e la fase Schreibersite con carico 50gf:

Fase	Durezza HV	Media complessiva HV
	291.9	
	331.1	
Plessite	321.2	322.8
	306.1	
	363.8	
	481.9	
	359.2	
Schreibersite	436.4	486
	547.8	
	604.7	

Tabella 4: durezze calcolate di seconde fasi, meteorite di Atacama

Basandosi sul testo di Buchwald<sup>12</sup>(pag.91 vol.1, [1975]), i valori di durezza riportati nel testo (170 – 250 HV) per la fase Kamacite per i quali è verificata la corrispondenza con quelli sperimentali raccolti dall'analisi in laboratorio coincidono per Kamacite contenente 7% Ni e che presenta bande di Neumann prodotte da collisione (precedente l'impatto col pianeta), che incrudiscono il materiale. Un'ulteriore conferma del risultato è proprio la presenza di bande di Neumann nella microstruttura, indicate nelle micrografie del sottocapitolo seguente.

Seguendo lo stesso iter per le seconde fasi, si è trovata congruenza con i valori di durezza di Plessite (300-325 HV) *shock hardened*, ossia indurita da impatto, che coincidono col fatto che i valori di Kamacite sono relativi ad elementi che hanno subito collisioni. Per la Schreibersite invece i valori proposti sono elevati (800-950) che sono quasi il doppio del valor medio trovato, che risulta quindi anomalo. Sono state effettuate altre prove per la verifica di tali valori ma le acquisizioni trovate sono mediamente di 611 HV (575.9, 639.1, 578.1 e 647.1), che superano il valor medio precedente ma sono ancora distanti da quelli forniti da Buchwald: questo fenomeno è spiegabile col fatto che in alcuni casi il P presente nella Schreibersite tende a dissolversi lungo il bordo di grano causando la sferodizzazione di essa, rendendo la fase più duttile, a seguito di shock da impatto, che ancora una volta coincidono con gli altri valori di durezza trovati per le fasi Kamacite e Plessite. Un esempio di questo fenomeno è osservabile nel meteorite di Raghunathpura<sup>33</sup>.

#### Ispezione preliminare al Microscopio Ottico a Riflessione

Dopo la lucidatura si è proceduto all'osservazione al microscopio ottico. Il campione in (fig.9) risulta a colori invertiti per più facile comprensione dei punti che sono stati analizzati.



Figura 9: superficie A1 coi vari punti analizzati all'OM

Si è eseguita una selezione di 6 punti di interesse che ricoprissero l'intera area di analisi per ottenere il maggior numero di informazioni e valutare se il campione fosse omogeneo o presentasse zone a diversa composizione. L'acquisizione di immagini è stata eseguita nelle medesime zone anche post attacco chimico (fig.110) individuando e caratterizzando la comparsa di eventuali fasi.

Il campione è stato attaccato chimicamente con Nital al 3,5% per due volte: il primo attacco è durato 27,3 secondi e il successivo 42,5 secondi. Il secondo attacco è stato effettuato perché le lamelle apparivano poco definite. Una prima distinzione basata sulla dimensione di tali lamelle colloca il campione all'interno del gruppo di ottaedriti grezze (1,3 – 3,3 mm).



Figura 10: superficie A1 post attacco chimico, è possibile notare la comparsa delle figure di Widmanstatten

Di seguito vengono proposte le micrografie ritenute più interessanti, paragonando le zone d'interesse prima e dopo etching.

#### Zona 1

La micrografia presentata in (fig.11) è del campione post lucidatura: In questa area analizzata è possibile osservare prima dell'attacco chimico che quelle che apparivano inizialmente come cricche in (fig.11) sono in realtà delle fasi distinte: è stata individuata una venatura di un ossido del ferro (probabilmente FeO(OH) )

attorno ad un grano allungato di Schreibersite, immerso in matrice di Kamacite con segni di corrosione intergranulare per pitting dovuti probabilmente all'esposizione ad un ambiente umido. La corrosione è localizzata preferenzialmente lungo il bordo di grano fra Schreibersite e Kamacite, che suggerisce la possibile presenza di una variazione della chimica locale tale da rendere più sensibile il materiale alla corrosione. Le inclusioni sono state identificate con Rhabdite (Schreibersite micrometrica). In (fig.12) è riportato un dettaglio di Plessite aciculare, miscela di Taenite e Kamacite.



Figura 11: micrografia PrAC



Figura 12: plessite aciculare



Figura 13: le frecce indicano le bande di Neumann

In (fig.13) sono visibili alcune Bande di Neumann in Kamacite inclinate in due direzioni differenti, presenza di FeO(OH) e Schreibersite, segni di pitting. Si nota che, come in (fig.11), anche questa zona di corrosione è preferenziale al confine tra Kamacite e Schreibersite.

Nell'intorno della zona 1 dopo attacco chimico sono state inoltre individuate altre zone interessanti, come mostrato in (fig.14) dove è possibile notare una zona di Kamacite con precipitati di Rhabdite e Bande di Neumann sulla sinistra (freccia rossa), un grano piuttosto grande (circa 550 µm) di Schreibersite con bande di Taenite da precipitato intergrano, e sulla destra un gruppo di grani di Kamacite di varie dimensioni circondati da Taenite. La Plessite in basso al centro è quella della (fig.12).



Figura 14: tipica struttura alternata Kamacite/Taenite

#### Zona 2

Il foro già individuabile ad occhio nudo (fig.8) è un pit piuttosto esteso, mostrato in (fig.15): si intravede sulla destra vicino al foro una zona con un colore perlaceo (freccia in figura), che suggerisce la presenza di una fase di Taenite, individuata successivamente dopo l'attacco chimico in (fig.16). Altri segni di corrosione si manifestano attorno al bordo di grano sulla sinistra dell'immagine.



Figura 15: segni di pitting

È ancora possibile notare presenza di bande di Neumann, pitting esteso attorno al grano centrale nell'immagine (zona A) che va a coprire Schreibersite situata lungo la zona superiore del medesimo grano. Nella zona B si trovano ancora porzioni di Taenite attorno a grani di Kamacite di dimensioni variabili.



Figura 16: pit e microstruttura PoAC

Nella zona C, composta da Kamacite, è interessante notare la presenza di piccole inclusioni di Rhabdite di forma poligonale (ingrandimento in fig.17) sia a bordo di grani adiacenti che all'interno di essi. Il cerchio in figura evidenzia la presenza di un ossido di Fe non identificato.



Figura 17: inclusioni di Rhabdite in Kamacite

#### Zona 3

Questa zona e il suo intorno (cerchio in fig.18, ingrandimento della fig.8) risulta piuttosto isotropa a livello di fasi trovate: matrice di Kamacite con presenza di striature perlacee di Taenite e venature di Schreibersite (fig.19).



Figura 18: ingrandimento zona 3



Figura 19: zona 3 PrAC



Figura 20: : zona 3 PoAC, , Schreibersite e Kamacite, piccole inclusioni di Rhabdite

#### Zona 4

Siccome il campione presentava una zona di superficie ossidata sulla faccia lucidata, si è voluto indagare come fosse la struttura in tale punto (fig.21). Essa è risultata simile come tonalità di grigio a quella degli ossidi di Fe individuati in precedenza. l'irregolarità di forma di tale fase (simile ad una spirale) rispetto a quanto osservato nelle zone più interne della superficie di indagine presuppone un riscaldamento elevato durante l'ingresso in atmosfera che ha portato alla parziale fusione di questa zona, e la pressione dell'aria può aver causato turbolenza nel fuso, che si è poi solidificato.



Figura 21: superficie ossidata zona 4

Si possono inoltre notare cricche dovute o all'impatto o al taglio della sezione medesima. Dopo etch non si è notato alcun cambiamento cromatico né son state rivelate altre fasi.

#### Zona 6

Prima dell'attacco chimico è stata individuata una zona dove quella che sembrerebbe Rhabdite ha assunto forme simili a piccoli arcipelaghi, e confrontando con un'immagine trovata sul testo di Buchwald<sup>15</sup> (Vol.1, cap 9, pg.104, fig.149A) si notano parecchie somiglianze: l'immagine tratta dal testo cita che il meteorite (Roebourne) con questa fase è stato ricotto cosmicamente e dalla Rhabdite si è separata della Carlsbergite (CrN) sottoforma di piccoli sferoidi. Anche se non si ha la completa certezza di trovarsi di fronte a questa fase in quanto i tenori di Cr ritrovati con l'analisi al quantometro sono scarsi, non è da escluderne la sua presenza.

Dopo l'attacco chimico è possibile notare la presenza di Rhabdite poligonale prevalentemente all'interno di grani di Kamacite, quest'ultima che presenta grani di diverse tonalità di grigio (in particolare in (fig.22a) è visibile un grano quasi nero. Questo grano durante l'osservazione al microscopio ottico è risultato essere l'unico ad avere una tonalità così scura, e sarebbero necessarie ulteriori analisi con SEM per conoscerne la composizione. È presente anche una venatura di Schreibersite attorno al grano più scuro.





Figura 22: (sopra) possibile fase di Carlsbergite e ingrandimento 100x della medesima fase. (sotto) **a**) PoAc, grano di Kamacite molto scuro e venatura di Schreibersite, **b**) interno del grano scuro, presenza di Rhabdite e **c**) Rhabdite poligonale







# 4.2 Sao Juliao, Portogallo

## 4.2.1 Analisi al quantometro

Canale	1	2	3	4	5	6	Media
С	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.098	<0.001	0.098
Si	0.028	0.029	0.029	0.029	0.05	0.029	0.032333
Mn	0.007	0.007	0.007	0.007	0.017	0.008	0.008833
Р	0.166	0.157	0.177	0.159	0.259	0.179	0.182833
S	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.024	<0.001	0.024
Cr	0.013	0.012	0.015	0.02	0.342	0.011	0.068833
Mo	<0.001	<0.001	<0.001	0.002	0.279	<0.001	0.1405
Ni	5.87	5.199	5.308	5.025	8.215	4.638	5.709167
Al	0.003	0.005	0.004	0.006	0.618	0.003	0.1065
Cu	0.016	0.015	0.016	0.016	0.103	0.015	0.030167
Со	0.466	0.479	0.476	0.487	0.774	0.482	0.527333
Nb	0.01	0.011	0.011	0.01	0.051	0.01	0.017167
Ti	0.004	0.005	0.005	0.008	0.345	0.003	0.061667
V	0	0	0	0	0.014	0	0.002333
W	0.007	0.011	0.002	0.01	0.728	0.017	0.129167
В	0.0007	0.0007	0.0009	0.0008	0.0068	0.0007	0.001767
Pb	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Sn	0.004	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005	0.004333
Zn	0.028	0.025	0.025	0.024	>0.050	0.024	0.0252
Zr	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	0.011	0.001	0.004333
Са	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	0.0469	<0.0010	0.0469
As	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Bi	0.006	0.003	0.003	0.004	0.004	0.003	0.003833
Fe	93.367	94.034	93.914	94.187	87.77	94.567	92.97317

Tabella 5: risultati al quantometro meteorite Sao Juliao

Dall'analisi al quantometro del secondo campione si ottengono valori di Ni di 5,7% e di Fe di circa il 93%, il restante è dato da Co con 0,52% e P con 0,18%.

Il campione risulta essere un'esaedrite secondo il diagramma di Yang (fig.5) con meccanismo di solidificazione  $\gamma \rightarrow \alpha$  perché il range di valori di Ni non permette la formazione di figure di Widmanstatten per basso contenuto di P, che è in linea con quanto è stato trovato tramite attacco chimico (nessuna comparsa di figure di Widmanstatten).

Confrontando coi dati forniti sulla velocità di raffreddamento in (Goldstein et al.,  $[2009]^{31}$ ) si ha che per le esaedriti le velocità sono ancora in fase di ricerca, in quanto la loro storia termica è dipendente da numerose variabili. Tuttavia, un articolo<sup>34</sup> precedente (Randich, Goldstein [1978]) propone, tramite lo studio di sette diverse esaedriti, valori di 2 – 10 °C /Myr.

# 4.2.2 Analisi XRD

Per questo campione è stata effettuata una singola scansione della superficie, ottenendo lo spettro mostrato in figura:



Grafico 4: XRD Sao Juliao

I tre picchi evidenziati corrispondono a Kamacite, che presuppone che il campione sia monocristallino. In realtà la fase Kamacite è quella dominante il frammento, ma anche con una prima ispezione visiva si nota la presenza di una seconda fase di Schreibersite che è presente per circa il 30 – 40% della superficie. Il fatto che quest'ultima fase non compaia nello spettro è perché l'area di analisi non l'ha intercettata.

Tuttavia, il dato fornito da questa prova solidifica il fatto che si tratta proprio di un'esaedrite, in quanto questa famiglia di meteoriti ha come matrice Kamacite.

# 4.2.3 Analisi microstrutturale

#### Levigatura e lucidatura

Il secondo campione analizzato presenta una superficie più estesa rispetto al primo (circa il doppio) e un peso complessivo di 197g: anche in questo caso l'area più grande (fig23A) è stata scelta come candidata all'analisi al microscopio ottico, XRD e microdurezza, mentre una porzione della superficie posteriore è stata utilizzata per analisi al quantometro.

La faccia in (fig.23A) presentava alla consegna alcune macchie nere dovute alla corrosione, un bordo frastagliato di crosta e delle seconde fasi molto estese (Schreibersite), già visibili ad occhio nudo e principalmente situate in metà della superficie (in questo caso verso destra dell'immagine).

Come per il campione precedente, la lucidatura si è svolta con carte fino a grana 2500/4000 e lucidatura finale con panni e sospensione colloidale micrometrica fino a 3µm (fig.23B).

La faccia scelta per il quantometro (non riportata) presentava inizialmente una superficie con solchi profondi qualche mm, dovuti probabilmente ad un taglio grossolano: tramite levigatura con carte a grana 60 è stato possibile ricavare un'area della grandezza di un pollice circa per consentire la misurazione.



Figura 23: A) campione pre-lucidatura e B) campione post lucidatura

In seguito alle prove di microdurezza eseguite sulla matrice di Kamacite e l'unica seconda fase presente (Schreibersite) sono stati ottenuti i valori in tabella:

Fase	Durezza HV	Media complessiva HV
	240	
	239.5	
Kamacite	240.3	240.5
	238.7	
	244.2	
	792.8	
	792.8	
Schreibersite	847.1	818.9
	873.6	
	788.2	

Tabella 6: durezze calcolate, meteorite di Sao Juliao

I valori medi delle misure combaciano molto bene con quelli forniti nel Buchwald già presi in considerazione per il meteorite di Atacama.

#### Ispezione preliminare al Microscopio Ottico a Riflessione

La superficie più estesa è stata suddivisa in nove zone prima dell'attacco chimico: ad occhio nudo è possibile distinguere fasi di Schreibersite molto estese immerse in una matrice di Kamacite.

Post attacco chimico della durata di 25,4 secondi la superficie è rimasta pressoché invariata, lasciando come indizio che questo particolare meteorite sia una esaedrite o atassite, siccome non sono apparse figure di Widmanstatten: per essere sicuri di questo si è proceduto ad una seconda immersione in Nital per 30,3 secondi e dopo questa operazione l'area di analisi è rimasta la stessa, salvo un leggero cambiamento di colore verso un grigio molto chiaro dovuto alla reazione dell'acido con il metallo.



Figura 24: A) in figura sono mostrate le zone che sono state esaminate on OM prima dell'attacco chimico e in B) la superficie post attacco chimico, dove è possibile notare un leggero alone grigio chiaro

Durante l'ispezione al microscopio ottico si è osservata una certa anisotropia delle zone selezionate, e vengono di seguito riportati alcuni esempi dell'aspetto generale delle micrografie post attacco chimico, in quanto prima di esso le 9 zone di analisi erano del tutto simili alla (fig.25).

#### Zona 1

Questa area presentava una fase di Schreibersite immersa in Kamacite, e al bordo di essa (fig.25) Taenite e una zona di corrosione diversa da quelle incontrate nel primo campione: si tratta di ossido di Fe, probabilmente  $Fe_2O_3$ .

Dopo attacco chimico si sono manifestate piccole inclusioni di Rhabdite (fig.26) e non sono state evidenziate ulteriori fasi, eccezione fatta per la comparsa della forma ossidata del Fe incontrata anche nel primo campione analizzato.



Figura 25: PrAc, Schreibersite con bordo di Taenite



Figura 26: PoAC, ingrandimento di una zona di bordo di grano con precipitati di Rhabdite. Si può notare la presenza della forma ossidata del Fe già presente nel campione di Atacama in basso a sinistra nell'immagine

#### Zona 3 e 4

La microstruttura presentata è stata ritrovata su circa il 50% della superficie del campione, dove ad occhio nudo si presentava un alone opaco: si tratta di grani di Kamacite con precipitati di Schreibersite finemente dispersi all'interno e lungo il bordo, dove la Schreibersite è precipitata dopo la Kamacite. Le zone cerchiate in (fig.27) e (fig.28) rappresentano bande di Neumann.



Figura 28: zona 3, grani di Kamacite con dispersione fine di Schreibersite al loro interno



Figura 27: zona 4, grani di Kamacite con precipitati fini di Schreibersite, Bande di Neumann

# 4.3 Carlton, Texas

#### 4.3.1 Analisi al quantometro

Canale	1	2	3	4	5	6	7	Media
С	0.067	<0.001	0.057	0.08	<0.001	<0.001	<0.001	0.068
Si	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026
Mn	0.007	0.007	0.007	0.006	0.007	0.008	0.007	0.007
Р	0.048	0.116	0.136	0.151	0.057	0.061	0.143	0.101714
S	0.008	0.005	0.006	0.005	0.004	0.006	0.007	0.005857
Cr	0.011	0.013	0.011	0.012	0.013	0.011	0.011	0.011714
Мо	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Ni	13.755	13.567	13.747	13.59	13.514	13.547	13.78	13.64286

Al	0.005	0.006	0.005	0.005	0.006	0.005	0.005	0.005286
Cu	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.027	0.026	0.026143
Со	0.501	0.508	0.502	0.505	0.507	0.506	0.502	0.504429
Nb	0.008	0.009	0.008	0.009	0.009	0.009	0.009	0.008714
Ti	0.004	0.005	0.004	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004429
V	0	0	0	0	0	0	0	0
W	0.01	0.006	0.01	0.002	0.005	0.012	0.013	0.008286
В	0.0006	0.0006	0.0005	0.0006	0.0005	0.0005	<0.0005	0.00055
Pb	0.018	0.015	0.015	0.014	0.014	0.016	0.017	0.015571
Sn	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
Zn	>0.050	>0.050	>0.050	>0.050	>0.050	>0.050	>0.050	>0.050
Zr	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Ca	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010
As	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Bi	0.019	0.013	0.016	0.014	0.012	0.014	0.018	0.015143
Fe	85.403	85.592	85.339	85.465	85.711	85.664	85.346	85.50286

Tabella 7: analisi al quantometro del meteorite Carlton

Questo campione è quello che presenta il minor contenuto in Fe (85,5%) e di conseguenza, il maggior contenuto in Ni (13,6%) rispetto agli altri due analizzati, mentre Co e P sono simili (0,5% e 0,1%). Seguendo la linea guida del diagramma in (fig.5), il frammento analizzato solidifica con meccanismo III, che risulta essere tipico per i meteoriti appartenenti alle classi IIAB,IAB–IIICD, IIIAB, IIIE, e IVB (Yang, Goldstein<sup>6</sup> pag.251):  $\gamma \rightarrow (\alpha + \gamma) \rightarrow \alpha + \gamma + Ph$  il termine ( $\alpha + \gamma$ ) sta ad indicare che la lega attraversa il campo bifasico  $\alpha$ +  $\gamma$  ma non si ha nucleazione di Kamacite. Tramite consultazione di un recente articolo<sup>35</sup> si stima che per esemplari di classe IAB le velocità di raffreddamento sono di 25 – 70 °C/Myr (nell'articolo in questione vengono citati come gradi i kelvin, ma si è preferito utilizzare i Celsius in questo lavoro per uniformità dei dati).

Inoltre, nel Buckwald<sup>15</sup> (cap.10, vol.1, 1975) si afferma che lo spessore delle lamelle di Kamacite è inversamente proporzionale alla %Ni, che ben combacia con i valori trovati dall'analisi al quantometro confrontati con la microstruttura osservata dopo attacco chimico. La microstruttura fine dell'ottaedrite è un tratto distintivo dell'appartenenza al gruppo IAB.

A supporto di queste affermazioni la letteratura consultata<sup>23,24</sup> conferma che i ritrovamenti nell'area di Carlton, Texas rientrano nella categoria dei meteoriti di classe IAB.

Come altro dato d'interesse è anche l'anno di riferimento (1887) che è lo stesso fornito per l'esemplare analizzato: con molta probabilità si tratta di una sezione dello stesso meteorite ritrovato nel luogo di impatto.

# 4.3.2 Analisi XRD

Come per il meteorite di Sao Juliao, anche per questo campione è stata effettuata una singola analisi XRD, il cui spettro viene riportato di seguito:



Grafico 5: XRD Carlton

Dallo studio dello spettro sono emersi numerosi picchi il cui fitting è stato ottenuto selezionando diversi minerali oltre a Kamacite e Taenite. Com'è possibile osservare, molti picchi sono propri di Maghemite e Wairauite, il primo risulta essere uno spinello di ossido di Fe ( $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e il secondo una lega FeCo. Sono state inoltre identificate linee corrispondenti a Co (rosa). Nella successiva trattazione al microscopio ottico però queste ultime fasi non sono state individuate, ma non è da escludere la loro presenza poiché si ha il riscontro dell'analisi diffrattometrica.

# 4.3.3 Analisi microstrutturale

#### Levigatura e lucidatura

Il terzo meteorite analizzato è il più piccolo dei tre sia per peso (52.2g) che per dimensioni (superficie e spessore molto ridotti, fig29). Il contorno risulta irregolare e le due superfici scelte per analisi sono in buono stato: in figura A la superficie mostrata è stata scelta per eseguire analisi al microscopio ottico, XRD e microdurometro, mentre in figura B la superficie è stata utilizzata per analisi al quantometro. La superficie A è stata levigata e lucidata con carta fino a grana 2500/4000 e successivamente con panno e sospensione micrometrica fino ad 1 μm, mentre la superficie B è stata levigata fino ad una carta grana 80.



Figura 29: A) superficie del meteorite Carlton pre-lucidatura scelta per osservazione al OM B) superficie del meteorite Carlton scelta per analisi al QT

La prova di microdurezza eseguita su questo campione è stata diversa dalle altre: siccome le lamelle di questo campione erano ben definite, si è deciso di valutare la variazione di durezza attraversandone perpendicolarmente alcune.

Le prove di cucitura eseguite sono state in totale tre, e i valori delle durezze rilevate sono stati plottati per realizzare un grafico illustrativo che rappresenti, in funzione della variazione del %Ni, l'andamento della durezza. Le zone di confine tra una fase e l'altra sono indicate con linee verticali nei rispettivi grafici, e per completezza sono state aggiunte le immagini acquisite durante la prova per meglio evidenziare le fasi coinvolte. Si è fatto uso di una funzione polinomiale di sesto grado per visualizzare meglio i dati: nel terzo grafico la funzione non era sufficiente per rappresentare l'andamento che si voleva mostrare, così si è scelto di utilizzare un formato di grafico più esplicativo.

La prima e la terza cucitura rappresentano l'andamento dello strumento con incremento fissato attraverso una lamella di Taenite, che, contenendo una maggior %Ni risulta avere valori di durezza più elevati. È possibile notare inoltre nel terzo grafico due picchi che corrispondono con il bordo della fase Taenite incontrato ad ingresso ed uscita cucitura. La seconda cucitura passa attraverso una lamella di Kamacite tra due di Taenite e si può osservare una decrescita della durezza in corrispondenza di tale passaggio.

#### Prima cucitura





Grafico 6: prima cucitura, Carlton

#### Seconda cucitura





Grafico 7: seconda cucitura, Carlton

## Terza cucitura





Grafico 8: terza cucitura, Carlton

#### Ispezione preliminare al Microscopio Ottico a Riflessione

La superficie A è stata suddivisa in 8 zone di analisi, riportate in fig.30: è possibile notare ad occhio nudo la presenza di Schreibersite in alto al centro della figura, oltre a due venature di una seconda fase a circa metà campione. La porzione di superficie a destra (zona 8) risultava molto omogenea microstrutturalmente sia prima che dopo attacco chimico, mentre l'altra metà di campione presentava zone più interessanti e variegate.

Post attacco chimico con Nital 3,5% della durata di 35 secondi la superficie ha manifestato la comparsa di figure di Widmanstatten molto definite e sottili, che colloca come affermato precedentemente questo campione all'interno della categoria delle ottaedriti fini (IAB).



Figura 30: meteorite Carlton pre-attacco chimico



Figura 31: meteorite Carlton post attacco chimico

## Zona 1

La micrografia in (fig.32) mostra i grani di Schreibersite già visibili ad occhio nudo immersi in una matrice di Kamacite. È possibile inoltre notare la presenza di Taenite (bianco perlaceo) e di alcune cricche, cerchiate nell'immagine.





Figura 32: Zona 1 PrAC

Figura 33: zona 1 PoAC

Dopo etching appare più distinta la suddivisione in lamelle di Taenite e Kamacite, si notano bande di Neumann sulla sinistra (cerchiate in rosso) e una zona di Plessite aciculare.

## Zona 2

In questa micrografia si nota la presenza di cricche e di prodotti di corrosione visti anche nei precedenti campioni (probabilmente FeO(OH), di colore grigio chiaro), immersi in una matrice di lamelle alternate di Taenite e Kamacite. In fondo a destra dell'immagine si vede Schreibersite. Le microfessure presenti in (fig.34) sono dovute a piani di clivaggio cubici.

Successivamente all'attacco chimico (fig.35), appaiono ben distinte tra di loro le lamelle.



Figura 34:zona 2 PrAC



Figura 35: zona 2 PoAC

## Zona 3 e 6

Queste due zone presentano caratteristiche simili: osservando ad occhio nudo (fig.30) è possibile individuare due cricche piuttosto estese al centro del campione di meteorite.



Figura 36: a sinistra zona 3 PrAC e a destra zona 6 PrAC

Ingrandendo la zona, si notano prodotti di corrosione all'interno di queste cricche e inoltre sono presenti segni di corrosione da vaiolatura piuttosto estesa.

Dopo etching della superficie, le micrografie sono apparse del tutto simili a quelle già mostrate in precedenza. Un dettaglio degno di nota è la presenza di grani allungati a forma di ago, con struttura simile alla martensite degli acciai, collocati all'interno di un grano di Taenite. Si tratta sempre di Plessite aciculare, ma rispetto a quella osservata nel campione di Atacama, questa presenta tonalità diverse di colore (grigio chiaro e grigio scuro, rispetto al bianco del primo campione). Potrebbe trattarsi di porzioni che hanno segregato durante solidificazione secondo cinetiche diverse rispetto al primo campione.



Figura 37: ingrandimento di un grano di Taenite PoAC

# 5.Conclusioni

In questo lavoro sono stati presentati tre diversi campioni di meteoriti ferrosi, concessi dal dipartimento di Geomineralogia del DIATI presso il Politecnico di Torino ed esaminati tramite analisi metallografica all'interno dei laboratori del dipartimento DISAT del medesimo ateneo sotto la supervisione del relatore di questa tesi.

La finalità del lavoro presentato è stata di fornire una serie di dati che assegnassero, per ciascun esemplare, una classificazione basata sia sulla microstruttura, tramite osservazione al microscopio metallografico e analisi XRD, sia sulla loro chimica, attraverso misurazioni di spettrometria di emissione ottica. Si è poi indagato il meccanismo di formazione delle microstrutture commentate, procurando in seguito dei valori indicativi della loro velocità di raffreddamento, tramite consultazione della letteratura in merito.

#### Atacama, Cile

Il primo meteorite preso in analisi è risultato appartenere al gruppo delle ottaedriti medio/grossolane appartenenti alla classe IIIAB. L'identificazione è stata possibile preliminarmente tramite analisi della microstruttura dopo attacco chimico (con la comparsa di lamelle molto ampie) e successivamente sono stati paragonati i dati ottenuti con quelli trovati in letteratura, scelta sulla base della classe di appartenenza e della geografia del ritrovamento. Sono state avanzate in seguito delle stime sulla velocità di raffreddamento che è risultata essere di di 60 – 300°C / Myr, valore che è stato fornito considerando la microstruttura, la chimica e il meccanismo di formazione delle figure di Widmanstatten. In relazione a questo frammento sono state identificate delle incertezze dovute alla mancata identificazione di alcuni tra i picchi dello spettro XRD, che anche dopo consulto con alcuni docenti e vari tentativi (riportati in appendice 3A) non è stato possibile il loro riconoscimento. Servirebbero quindi ulteriori analisi per la corretta indicizzazione di tali picchi, in concomitanza possibilmente con test sulla concentrazione in ppb di Ga e Ge che risultano essere "impronte digitali" dei meteoriti. Ciononostante, i riferimenti bibliografici consultati condividono tutti che è sufficiente conoscere la concentrazione di Ni e P per effettuare una identificazione sufficientemente accurata della classe di provenienza e in aggiunta si sottolinea anche che la classe IIIAB è la più comune tra le olosideriti Om/Og e in riferimento a ciò la collocazione di questo campione nel suddetto gruppo è stata dichiarata con sufficiente sicurezza.

#### Sao Juliao, Portogallo

L'esemplare analizzato inizialmente mostrava una superficie omogenea nei nove punti scelti per l'ispezione, e non è stata trovata traccia di porzioni di colore bianco perlaceo uniformemente distanziate tra loro che è un primo (seppur grossolano) indizio per capire se si tratti di un'ottaedrite, in quanto queste porzioni indicano la presenza di Taenite che in alcuni casi è possibile intravedere prima dell'attacco chimico. In seguito ad etching con Nital 3.5% il meteorite non ha riscontrato mutamenti della superficie, nella fattispecie non sono comparse figure di Widmanstatten: l'ipotesi dunque poteva soltanto essere che si trattasse o di un'esaedrite o di un'atassite. Tramite l'analisi chimica dei tenori di Ni e l'esperienza XRD si è confermato che il meteorite facesse parte della famiglia delle esaedriti, classificate come IIAB, risultato supportato dalla letteratura consultata per la ricerca di possibili riscontri. Richiamando la ricerca effettuata sul sito della Meteoritical Society<sup>11</sup>, lo studio effettuato da Nolze e Heide<sup>20</sup>(2019) e su un altro sito di riferimento (MinDat.org<sup>21</sup>) il campione si conferma appartenente al gruppo IIAB (IIB per Nolze e Heide, che è un sottogruppo di IIAB).

Le caratteristiche di raffreddamento sono state fornite prendendo in considerazione uno studio<sup>31</sup> effettuato su sei diversi campioni di esaedrite che forniscono valori di 2 – 10 °C /Myr.

#### Carlton, Texas

Dopo la fase di etching con Nital 3.5% questo frammento di meteorite presentava figure di Widmanstatten molto fini, che ha escluso dalla classificazione sia le esaedriti che le atassiti, ponendolo, come nel caso del meteorite di Atacama, Cile, nel gruppo delle ottaedriti. L'analisi chimica ha rivelato tenori di Ni del 13.7% circa, che collocano i meteoriti con simili concentrazioni nella classe delle ottaedriti fini. L'analisi XRD ha rivelato una composizione variegata di molti minerali, in particolare è stato trovato Co metallico e Wairauite (FeCo) seppure durante l'ispezione al microscopio ottico non è stata trovata traccia né dell'elemento metallico né del minerale: l'ipotesi di questo dato è che il Co come elemento è sostituzionale in una lega Fe-Ni e quindi è possibile trovarne la presenza a livello puntuale ma nel microscopico non è osservabile. Se fosse possibile ottenere il permesso di sezionare il campione, sarebbe interessante la sua osservazione al microscopio elettronico a scansione per scoprire tramite analisi EDS le zone dove il cobalto risulti sostituzionale e segnalare eventuali diversità del grano legate alla sua presenza, qualora fossero evidenti.

Nonostante la presenza di Co e altri minerali, è stato possibile identificare anche quest'ultimo campione con efficacia a seguito di una letteratura esaustiva<sup>23,24</sup> che fornisce come risultato la classe IAB (anche citato come IIICD in altri testi) che proviene dal medesimo luogo ed è stato ritrovato nello stesso anno (1887) dell'esemplare analizzato.

Per quanto riguarda le velocità di raffreddamento del meteorite di cui questo frammento faceva parte, la stima fornita è di 25 – 70°C/Myr, secondo la letteratura consultata.

# 6.Bibliografia

- 1. https://www.youtube.com/watch?v=dpmXyJrs7iU
- 2. https://medium.com/@roblea\_63049/how-the-meteorite-got-its-shape-10b40db08a0d, visitato il giorno 7/10/20
- 3. https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/meteors-and-meteorites/in-depth/, visitato il giorno 7/10/20
- 4. http://galhassin.it/come-nascono-i-pianeti/ visitato il giorno 7/10/20
- 5. https://www.space.com/51-asteroids-formation-discovery-and-exploration.html, visitato il giorno 7/10/20
- 6. Jijin Yang, Joseph I. Goldstein, Metallographic cooling rates of the IIIAB iron meteorites, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol.70, Issue 12, 2006, Pages 3197-3215, ISSN 0016-7037, https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.04.007.
- 7. Vagn Fabritius Buchwald, *Iron and steel in ancient times*, Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab, 2005
- 8. Buchwald, V. F., *On the Use of Iron by the Eskimos in Greenland*, in *Materials Characterization*, vol. 29, n. 2, 1992, pp. 139–176, DOI:10.1016/1044-5803(92)90112-U
- T. A. Rickard, *The Use of Meteoric Iron*, in *The Journal of the Royal Anthropological Institute of Great Britain and Ireland*, vol. 71, n. 1/2, Royal Anthropological Institute of Great Britain and Ireland, 1941, pp. 55–66, DOI:10.2307/2844401
- 10. https://it.wikipedia.org/wiki/Meteorite\_ferroso: consultato il giorno 18/12/20
- 11. Edward R. D. Scott, John T. Wasson, Classification and Properties of Iron Meteorites, Reviews of Geophysics and Space Physics, Vol.13, n.4,1975, pp. 527-546
- 12. V. F. Buchwald, Handbook of Iron Meteorites, Their History, Distribution, Composition and Structure, Department of Metallurgy, Technical University, Lyngby, Denmark, 1975
- 13. Tschermak, G., Beitrag zur Classification der Meteoriten, Sitzber. Akad. Wiss. Wien, Math. -Naturwiss. Kl., Abt. I, 88, 1973, pp.347-371
- Brezina, A., Die Meteoritensammlung des k. k. Mineralogischen Hofkabinettes in Wien, Jahrb. k. k. Geol. Reichsanst., 35, 151-276,1885 *e* The arrangement of collections of meteorites, Proc. Amer. Phil. Soc., 43, 211-247, 1904.
- 15. V. F. Buchwald, The Mineralogy of Iron Meteorites, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 286, No. 1336, Mineralogy: Towards the Twenty-first Century (Sep. 12, 1977), pp. 453-491
- 16. http://www.astrofilitrentini.it/mat/meteor/clsschrt.html, visitato il giorno 18/10/20
- 17. https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?code=5319, visitato il giorno 24/10/20
- Wasson, J. T. & Canut de Bon, C., New Chilean iron meteorites: Medium octahedrites from Northern Chile are unique, Meteoritics & Planetary Science, vol. 33, no. 2, 2010, pages 175-179
- 19. https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?code=23172 visitato in data 24/10/20
- 20. Gert Nolze, Klaus Heide, Roaldite in the iron-meteorite São Julião de Moreira, Geochemistry, Volume 79, Issue 4, 2019, 125538, ISSN 0009-2819, https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.125538.
- 21. MinDat.org
- 22. Wasson and Kallemeyn, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol.66 no.13, pp.2445-2473, 2002
- 23. https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?code=5277, visitato in data 24/10/20
- 24. https://www.mindat.org/loc-16176.html, visitato in data 28/10/20
- 25. https://geogallery.si.edu/10026051/carlton-iron-meteorite, visitato in data 28/10/20
- 26. Pracejus, Bernhard. *The Ore Minerals under the Microscope: An Optical Guide*, Elsevier Science & Technology, 2015
- 27. http://webmineral.com/

- 28. http://representatives.spectro.com/spectro-italy/products/sma/principle consultato il 22/02/21
- 29. J. YANG\* and J. I. GOLDSTEIN, The formation of the Widmanstätten structure in meteorites, Department of Mechanical and Industrial Engineering, College of Engineering, University of Massachusetts, *Meteoritics & Planetary Science* 40, Nr 2,2005, pp.239–253
- 30. http://www.crystallography.net/cod/search.html
- 31. J.I. Goldstein, E.R.D. Scott, N.L. Chabot, Iron meteorites: Crystallization, thermal history, parent bodies, and origin, Geochemistry, Volume 69, Issue 4, 2009, Pages 293-325, ISSN 0009-2819, https://doi.org/10.1016/j.chemer.2009.01.002.
- 32. B. Idzikowski et al., Crystalline Structure, Stoichiometry and Magnetic Properties of the Morasko Meteorite, ACTA PHYSICA POLONICA A, vol.118 No.5, 2010, pp. 1071-1073
- 33. S. Ghosh, D. Ray, S.V.S. Murty, Raghunathpura: An early crystallised IIAB iron with sulphide micro nodules, Advances in Space Research, Volume 58, Issue 9, 2016, Pages 1879-1892, ISSN 0273-1177, https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.07.006.
- E. Randich, J.I. Goldstein, Cooling rates of seven hexahedrites, Geochimica et Cosmochimica Acta, Volume 42, Issue 3, 1978, Pages 221-233, ISSN 0016-7037, https://doi.org/10.1016/0016-7037(78)90174-6.
- 35. Lyons, R.J., Bowling, T.J., Ciesla, F.J., Davison, T.M. and Collins, G.S. (2019), The effects of impacts on the cooling rates of iron meteorites. Meteorit Planet Sci, 54: 1604-1618. https://doi-org.ezproxy.biblio.polito.it/10.1111/maps.13301

## 6.1 Immagini

- 1. https://en.wikipedia.org/w/index.php?curid=50732334, Fair use. ottenuta il 7/10/20
- 2. https://xrd.co/component-parts-x-ray-diffractometer/ ottenuta il 14/02/21
- 3. J. YANG\* and J. I. GOLDSTEIN, The formation of the Widmanstätten structure in meteorites, Department of Mechanical and Industrial Engineering, College of Engineering, University of Massachusetts, *Meteoritics & Planetary Science* 40, Nr 2,2005, pp.239–253
- 4. V. F. Buchwald, Handbook of Iron Meteorites, Their History, Distribution, Composition and Structure, Department of Metallurgy, Technical University, Lyngby, Denmark, 1975
- 5. J. YANG\* and J. I. GOLDSTEIN, The formation of the Widmanstätten structure in meteorites, Department of Mechanical and Industrial Engineering, College of Engineering, University of Massachusetts

## 6.2 Grafici

1. Classification and Properties of Iron Meteorites Edward R. D. Scott, John T. Wasson, Reviews of Geophysics and Space Physics, Vol.13, n.4, 1975 pp 527-546

# 7.Appendice

# 1A: raccolta immagini al microscopio ottico

## Atacama, Cile precedente ad attacco chimico



#### Atacama, Cile dopo attacco chimico





Sao Juliao, Portogallo precedente ad attacco chimico

Sao Juliao, Portogallo dopo attacco chimico





Carlton, Texas, precedente ad attacco chimico





Carlton, Texas dopo attacco chimico



## 2A: Prove Microdurezza

#### Matrice meteorite Atacama, Cile



#### Seconde fasi, meteorite Atacama, Cile



Matrice meteorite Sao Juliao, Portogallo



#### Seconde fasi, meteorite Sao Juliao, Portogallo



#### 3A Prove di fitting XRD

Di seguito è rappresentata una collezione di prove eseguite per individuare i picchi relativi al profilo XRD del meteorite di Atacama, Cile. I file sono stati scaricati in formato .cif ed erano relativi a misurazioni effettuate con catodo in Cu.

Successivamente tramite Vesta è stato possibile convertire da catodo in Cu a catodo in Co, e i valori di intensità e angolo 20 sono stati raccolti ed esportati su Excel, ottenendo i grafici mostrati. Un ulteriore accorgimento è stato quello di utilizzare un range di 20 da 35° a 109° dove possibile per avere congruenza con i valori dati dallo strumento di laboratorio.

I grafici indicati con il termine "numero XXXXX" sono relativi a file reperibili sul sito www.cristallography.net indicando nella barra di ricerca "Search by COD ID".

















