



## **Report**

# **Analisi del danneggiamento di fili in alluminio argentato**

### **Committente:**

INFN – Sezione di Pisa

Rif. dott. Alessandro Baldini

### **Eseguito da:**

Prof. Tommaso Pastore

Prof. Marina Cabrini

Ing. Sergio Lorenzi, PhD.

Università di Bergamo

Pagine relazione n. 86 (escluso copertina e indice)



## Sommario

|             |                                                                                       |    |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1           | Contenuto della relazione .....                                                       | 3  |
| 2           | Riferimenti.....                                                                      | 3  |
| 3           | Caratteristiche dei fili e rotture osservate .....                                    | 4  |
| 4           | Procedura di analisi .....                                                            | 7  |
| 5           | Fili analizzati .....                                                                 | 7  |
| 6           | Risultati.....                                                                        | 8  |
| 7           | Considerazioni sui fenomeni di corrosione ritenuti cause della rottura dei fili ..... | 10 |
| Appendice A | - Analisi filo 10 .....                                                               | 13 |
| Appendice B | - Analisi filo 2 .....                                                                | 17 |
| Appendice C | - Analisi filo 14 .....                                                               | 21 |
| Appendice D | - Analisi filo 32 .....                                                               | 29 |
| Appendice E | - Analisi filo intonso .....                                                          | 37 |
| Appendice F | - Analisi metallo su sezione metallografica .....                                     | 69 |
| Appendice G | - Morfologia di corrosione dopo esposizione in soluzione di cloruro di sodio .....    | 73 |



## 1 Contenuto della relazione

La relazione riporta i risultati delle analisi condotte sui fili di un rilevatore di particelle installato presso la Sezione di Pisa di INFN (rif. Ordine di acquisto n. 7623 del 19-MAR-18).

Scopo dell'indagine è documentare lo stato di danneggiamento dei fili e valutare la presenza di sostanze contaminanti la superficie; si è articolate nei seguenti punti:

1. Messa a punto della metodologia per il prelievo e l'osservazione di parte di fili al microscopio elettronico a scansione
2. Osservazione al microscopio elettronico a scansione di 3 campioni prelevati da fili collegati al PCB lato upstream o downstream, tesa alla documentazione dello stato di danneggiamento superficiale e individuazione di eventuali sostanze contaminanti la superficie mediante sonda EDS
3. Analisi di 30 cm di filo "intonso", prelevato direttamente d INFN – Pisa, avvolto su cilindretto in acciaio cromato
4. Individuazione e documentazione di eventuali morfologie di corrosione
5. Relazione con i risultati delle analisi.

Oltre a queste analisi sono stati effettuati ulteriori approfondimenti riguardanti:

6. microstruttura dei fili,
7. composizione de metallo base,
8. suscettibilità alla corrosione selettiva.

## 2 Riferimenti

E-Mail di Alessandro Baldini:

- e-mail 1. Fwd: ORD.7623 - UNIVERSITÀ' DEGLI ST... martedì 20/03/2018 11:53
- e-mail 2. Re: invio offerta per Analisi del danneggi... martedì 20/03/2018 11:53
- e-mail 3. Re: analisi fili sabato 10/03/2018 14:23
- e-mail 4. Re: analisi fili mercoledì 07/03/2018 10:03
- e-mail 5. venerdì 16/02/2018 16:57
- e-mail 6. Re: Dimensioni supporto giovedì 08/02/2018 12:01
- e-mail 7. Re: Dimensioni supporto giovedì 01/02/2018 21:47
- e-mail 8. Re: Dimensioni supporto mercoledì 31/01/2018 11:03
- e-mail 9. Re: fili argentati martedì 30/01/2018 19:53
- e-mail 10. Re: fili argentati martedì 30/01/2018 18:53
- e-mail 11. Re: fili argentati giovedì 25/01/2018 17:29
- e-mail 12. richiesta offerta giovedì 25/01/2018 17:13
- e-mail 13. Re: fili argentati giovedì 25/01/2018 16:46
- e-mail 14. Ricevuta di ritorno (visualizzata) -R: fili ar... giovedì 25/01/2018 16:45
- e-mail 15. Re: fili argentati mercoledì 17/01/2018 09:58
- e-mail 16. Re: fili argentati mercoledì 17/01/2018 09:25
- e-mail 17. Re: fili argentati martedì 16/01/2018 12:18
- e-mail 18. Ricevuta di ritorno (visualizzata) -R: fili ar... mercoledì 10/01/2018 09:47
- e-mail 19. Re: fili argentati mercoledì 10/01/2018 09:44
- e-mail 20. Re: analisi fili argentati venerdì 22/12/2017 15:34
- e-mail 21. Re: fili argentati lunedì 20/11/2017 14:14
- e-mail 22. R: fili argentati venerdì 17/11/2017 19:05
- e-mail 23. Re: corrosione fili di alluminio giovedì 26/10/2017 17:26

e-mail 24. corrosione fili di alluminio martedì 24/10/2017 12:35

Documenti allegati:

- DOC. 1 245 No-Clean Cored Wire for Lead-Free and Lead Alloys. Technical data sheet.  
 DOC. 2 245 Flux-Cored Wire Data Sheet-2, Safety Data Sheet  
 DOC. 3 DettagliAnalisiFili.pdf

### 3 Caratteristiche dei fili e rotture osservate

I fili oggetto dell'indagine sono parte di un'apparecchiatura in funzione presso l'INFN Sezione di Pisa; sono prodotti dalla California Fine Wire e hanno una dimensione di 40 µm. Sono costituiti da un filo in lega di alluminio 5056, rivestito con argento di spessore micrometrico, applicato su uno strato intermedio di zinco.

Non sono note, a chi scrive, le condizioni di fornitura né la composizione; in Figura 1, a titolo puramente orientativo, sono riportati i dati di riferimento reperibili nella letteratura tecnica.

#### Technical Data Sheet

| Chemical Composition Limits |     |         |         |          |            |             |            |            |          |          |             |              |
|-----------------------------|-----|---------|---------|----------|------------|-------------|------------|------------|----------|----------|-------------|--------------|
| Weight%                     | Al  | Si      | Fe      | Cu       | Mn         | Cr          | Mg         | Mn+Cr      | Ti       | Zn       | Others Each | Others Total |
| 5056 USA                    | Bal | 0.3 max | 0.4 max | 0.10 max | 0.05/0.20  | 0.05 / 0.20 | 4.50 / 5.6 | -          | -        | 0.10 max | 0.05 each   | 0.15 max     |
| 5056A EWAA                  | Bal | 0.4 max | 0.5 max | 0.10 max | 0.10 / 0.6 | 0.20 max    | 4.50 / 5.6 | 0.10 / 0.6 | 0.20 max | 0.20 max | 0.05 max    | 0.15 max     |

Aluminium Alloy 5056 primary constituent is magnesium which gives this non heat treatable alloy its high strength. Due to Alloy 5056 high strength and excellent formability it is used extensively in cold heading applications as well as wire forms and hinge pins. Alloy 5056 also has excellent corrosion resistance and can be used in atmospheres such as salt water where corrosion would normally be a problem with other metals.

#### Typical Mechanical Properties

| Material                          | Temper | Diameter (") | Tensile Strength (ksi) min | Yield Strength (ksi) min | Elongation % in 2" |
|-----------------------------------|--------|--------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|
| 5056 Rolled, Cold finish wire/rod | 0      | All          | 46 max                     | -                        | 20                 |
| 5056 Rolled, Cold finish wire/rod | H111   | <0.374       | 44                         | -                        | -                  |
| 5056 Rolled, Cold finish wire/rod | H32    | <0.374       | 44                         | -                        | -                  |
| 5056 Rolled, Cold finish wire/rod | H34    | <0.374       | 50                         | -                        | -                  |

Figura 1 Composizione nominale e caratteristiche meccaniche di riferimento per la lega di alluminio 5056.

I fili sono montati, mediante una macchina di filatura, su un telaio utilizzato quale supporto sia per il trasporto sia per l'installazione sull'apparecchiatura finale, fissati per saldatura a due PCB in composito FR4 a matrice epossidica con fibre di vetro, uno denominato US – UpStream e l'altro DS - DownStream.

La macchina filatrice provvede al montaggio a una tensione di 20 g, pari al 50% del limite elastico. Successivamente, i fili sono fissati a un vassoio per il trasporto e mantenuti a una tensione corrispondente a un allungamento di +1mm rispetto alla tensione nulla, rapportata alla lunghezza nominale.

Prima di montarli sul telaio definitivo, i fili sono sottoposti a un test di accettazione a +5 mm (su 8 mm di allungamento corrispondente al limite elastico), poi detensionati a -2 mm rispetto alla posizione di tensione nulla per il montaggio in sicurezza; infine, nuovamente posti in tensione al 50% del limite elastico, a +4mm di allungamento.

Tutte le operazioni, compreso l'esercizio, sono condotte in condizioni atmosferiche controllate:

- i fili arrivano avvolti su bobine sigillate,
- sono filati e poi montati sul telaio in camere con atmosfera controllata a 20°C e 50% di umidità relativa, durante le operazioni, o 15-20% nei restanti periodi;
- sono posti, per il trasporto, in sacchi ermetici, in aria secca e azoto o argon.

La saldatura è effettuata con prodotti esenti da cloruri (filo Kester 245) per i quali è stata confermata la presenza di sali solubili in bassa concentrazione (0.7 ppm di fluoruri, 0.95 ppm di cloruri e 0.19 di bromuri, rapportati alla massa di filo).

Le rotture sono avvenute su 6 fili operanti alla lunghezza di lavoro (50% del limite elastico) e sono insorte dopo 10 mesi di funzionamento. Altri 6 fili, più 2 fili di diametro 50  $\mu$ , si sono rotti successivamente, durante un test di pretensionamento a + 5mm condotto per evidenziare i fili già danneggiati. Le rotture sono avvenute prevalentemente in prossimità del PCB DS, addensandosi soprattutto nei primi 20 cm.

### Distribuzione punto di rottura: distanza dalla saldatura del PCB DS

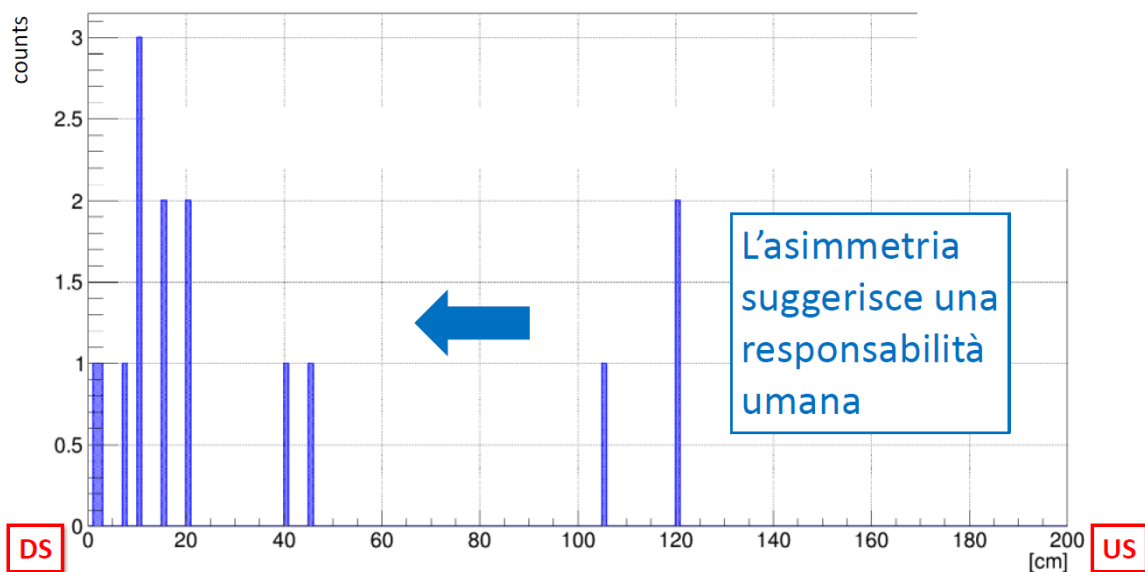


Figura 2 Distribuzione delle rotture lungo la lunghezza dei fili.

La morfologia di frattura dei fili è stata documentata presso i Laboratori dell'Università di Pisa, mediante analisi morfologica al microscopio a scansione della superficie di frattura e analisi EDS dei prodotti di corrosione. Le analisi effettuate sulla superficie di frattura hanno evidenziato la morfologia descritta in Figura 3. A seguito di queste analisi è stata avanzata l'ipotesi che il danneggiamento sia dovuto all'insorgenza di un fenomeno di corrosione sotto sforzo.

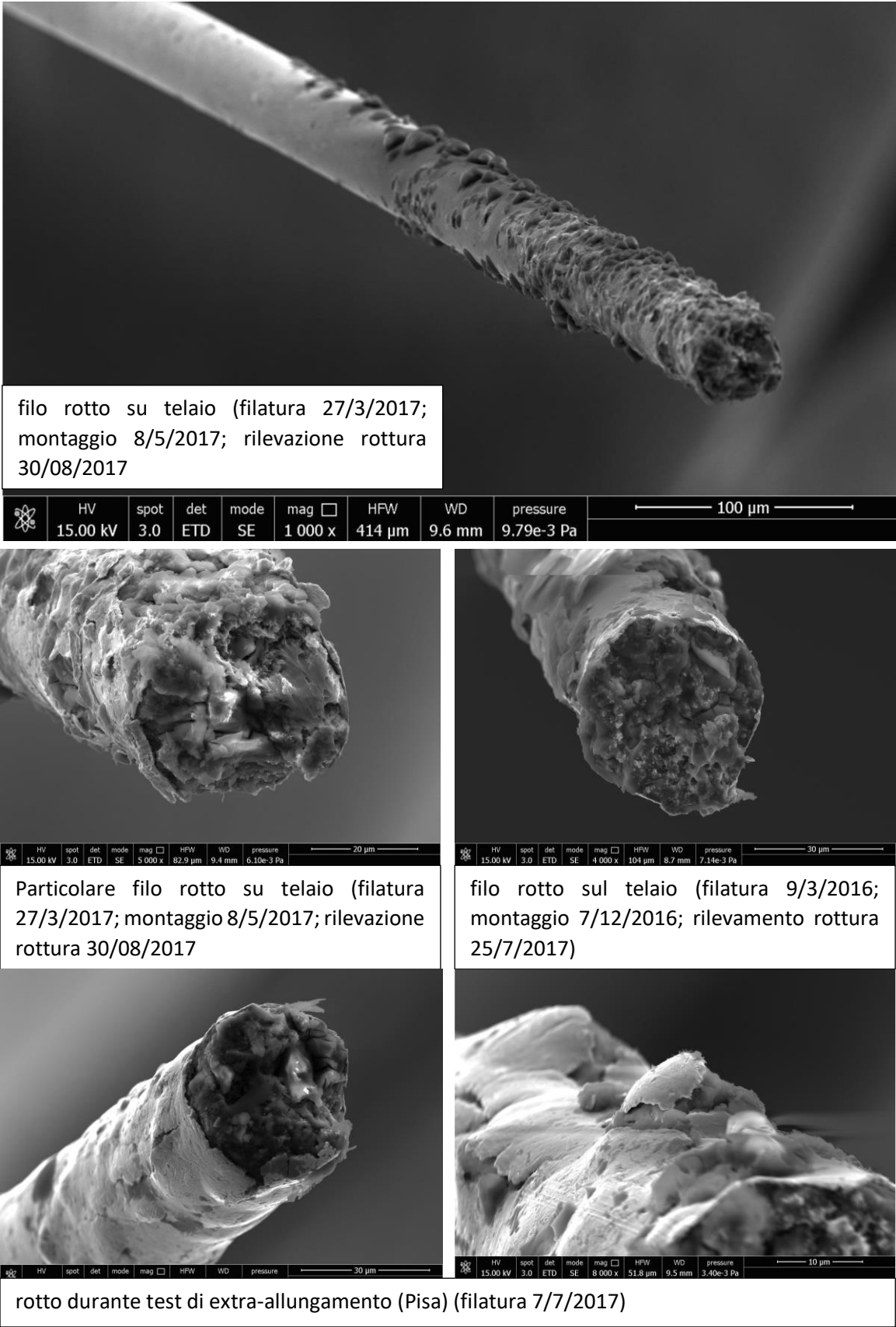


Figura 3 Morfologia della superficie di frattura



## 4 Procedura di analisi

Inizialmente, è stata sviluppata una procedura di prelievo dei fili e loro fissaggio su un idoneo supporto conduttivo, adatto per il montaggio nella camera del microscopio elettronico, tale da permettere lo svolgimento di analisi lungo il filo stesso.

Dopo le prime analisi condotte con un differente rivestimento metallico del supporto, la procedura è stata definita come segue:

1. Prelievo del filo con distacco in corrispondenza della saldatura con il PCB (da lato US o DS),
2. Avvolgimento del filo su un supporto tubolare metallico di diametro circa 20 mm e lunghezza 70 mm, rivestito con un strato spesso di cromo metallico, con passo ottimale tra 0.5 e 1 mm, in modo da mantenere le spire ben separate l'una dall'altra
3. Fissaggio degli estremi al supporto mediante nastro autoadesivo in alluminio metallico
4. Osservazione al SEM dei difetti superficiali
5. Realizzazione di analisi EDS in punti singolari della superficie e in corrispondenza dei depositi presenti.

La scelta del rivestimento di cromo a spessore (rivestimento cosiddetto di cromo duro) è motivata dal fatto che i picchi caratteristici dello spettro EDS di questo elemento non si sovrappongono con quelli caratteristici dati dagli atomi delle sostanze contaminanti la superficie.

Prima del montaggio del filo, il perno è stato pulito in acqua, sgrassato in acetone, sempre con ultrasuoni, e infine asciugato.

La procedura sviluppata permette di evidenziare i difetti presenti e realizzare l'analisi degli elementi contaminanti la superficie su zone circa equidistanti tra loro, per tutta la lunghezza del filo.

Il prelievo dei fili è stato effettuato nelle normali condizioni di laboratorio, in modo da ridurre la possibilità di contaminazione delle superfici. Il filo denominato *intonso* è stato prelevato direttamente da INFN sezione di Pisa e inviato già avvolto al laboratorio dell'Università di Bergamo.

L'analisi superficiale del filo è stata eseguita su un lato del cilindro, con l'esame della superficie di ciascuna spira. La rilevazione del numero della spira analizzata permette di risalire alla posizione approssimativa lungo il filo.

## 5 Fili analizzati

Le analisi sono state effettuate su differenti fili sia prelevati dai PCB inviati a Bergamo sia su un filo inviato da INFN già avvolto. Non è stato possibile effettuare l'analisi completa di tutta la lunghezza dei fili prelevati a Bergamo; l'analisi è stata quindi limitata al tratto integro staccato. Si è provveduto ad analizzare sia estremità prelevate dal PCB DS sia dal PCB US.

La numerazione dei fili è stata fissata come riportato nella Figura 4.

La Tabella 1 riassume i fili considerati nell'indagine.

Le sezioni metallografiche e il test di corrosione selettiva sono state effettuate su tratti di altri fili scelti casualmente dalla matassa ricevuta.

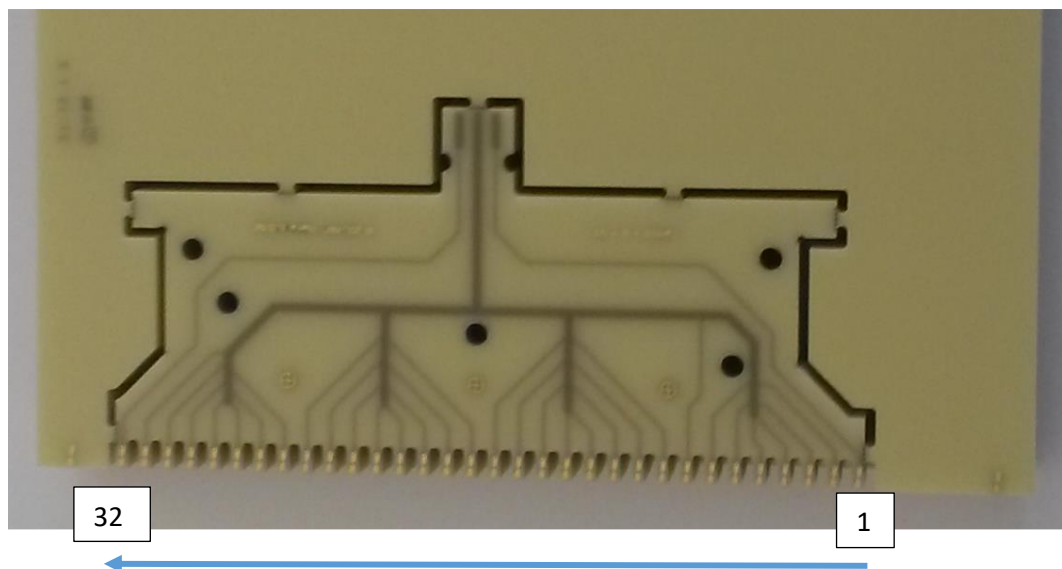


Figura 4 PCB UpStream di collegamento dei fili con numerazione delle pad di saldatura dei fili

Tabella 1 Fili considerati nelle analisi

| Filo n.   | Lato PCB US | Lato PCB DS |
|-----------|-------------|-------------|
| 2         | sì          | no          |
| 10        | sì          | no          |
| 14        | sì          | sì          |
| 32        | sì          | no          |
| "intonso" | -           | -           |

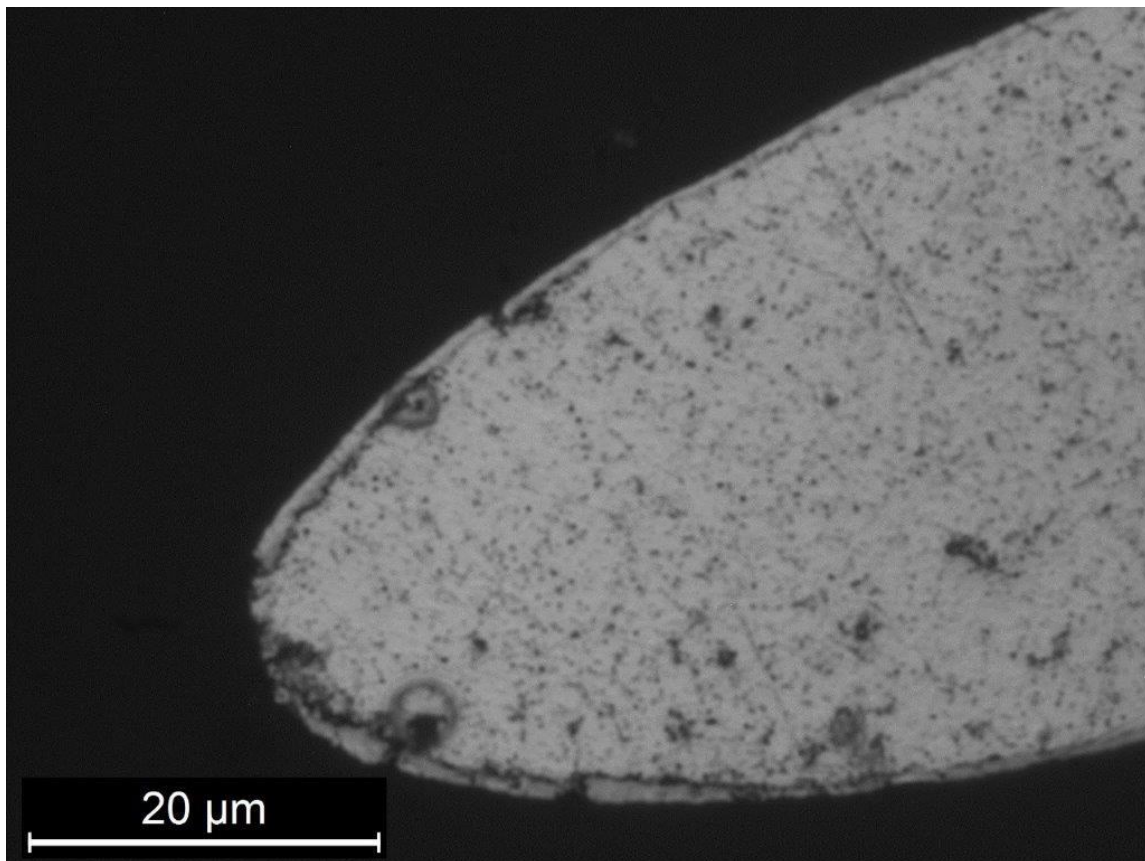
## 6 Risultati

I risultati delle analisi sono descritti nei report in allegato. Di seguito, sono riassunti i principali punti evidenziati.

1. In tutte le osservazioni eseguite, non è mai stata evidenziata la presenza di danneggiamenti analoghi a quelli documentati dalle immagini ottenute durante le analisi condotte presso l'Università di Pisa (vedi Figura 3). Non si è potuto fare, quindi, una failure analysis diretta del fenomeno di corrosione. Si è perciò proceduto a un'indagine volta a evidenziare la presenza di situazioni in grado di promuovere la corrosione o di una contaminazione della superficie dei fili da parte di sostanze, nello specifico i cloruri, la cui presenza era già stata rintracciata nelle zone di corrosione.
2. Su tutta la lunghezza, si osservano discontinuità del rivestimento di argento che appaiono allargate a seguito dello stiramento del filo. In queste zone, l'alluminio sottostante è esposto all'azione ambientale, tuttavia non si rilevano segni evidenti di corrosione. Si notano danneggiamenti di tipo meccanico dovuti a interazione con altre superfici, normalmente limitati allo strato di argento, ma talvolta molto più accentuati, con un sensibile schiacciamento.
3. In alcuni punti, ben distinguibili all'osservazione al SEM con gli elettroni retrodiffusi, sono rintracciabili elementi chimici non riconducibili alla composizione né del metallo base né del rivestimento. Tali elementi sono individuabili in zone isolate, in concentrazione superficiale che non risente della distanza dal PCB. Su uno dei fili, queste zone si addensano nelle prime

decine di centimetri ma non si rileva un addensamento sistematico con la distanza dal PCB e, soprattutto, si rilevano anche sul filo denominato intonso.

4. In alcuni punti della superfici, si rileva la presenza dell'elemento cloro in quantità significativa, tale da rendere l'elemento ben distinguibile nello spettro, nonostante la sovrapposizione dei suoi picchi caratteristici con quelli dell'argento.
5. La presenza di cloro è rilevabile anche sul campione cosiddetto intonso, prelevato da un filo non sottoposto al processo di filatura.
6. Elementi contaminanti sono stati rilevati anche in corrispondenza di rade particelle e depositi probabilmente di origine organica.
7. Non sono stati rintracciati elementi contaminanti in corrispondenza dell'interfaccia alluminio / argento; tuttavia, a questo riguardo, si deve sottolineare che il numero di analisi condotte è davvero ridotto, a causa della difficoltà intrinseca di tale indagine.
8. Non si evidenziano anomalie riguardo la composizione del metallo base. L'analisi EDS conferma una composizione compatibile con quella propria di una lega di alluminio 5056 (Appendice F).
9. La lega presenta una microstruttura appropriata, con composti intermetallici di magnesio distribuiti in modo relativamente omogeneo (Figura 5). Tale microstruttura non evidenzia una particolare sensibilizzazione della lega all'attacco selettivo intergranulare.
10. Si conferma, però, la suscettibilità intrinseca della lega alla all'attacco selettivo in soluzione di cloruro (Appendice G). Tale suscettibilità è in grado di promuovere profondi e rapidi attacchi localizzati nel metallo in presenza di un ambiente acquoso contenente cloruri. Tale suscettibilità deriva dall'elevato contenuto di magnesio in lega, superiore al limite di 3-3.5% di solito considerato per il miglior comportamento in ambienti di questo tipo.



*Figura 5 Aspetto della sezione metallografia dei fili dopo attacco con reagente Keller. Distribuzione omogenea dei precipitati ricchi di magnesio.*

## 7 Considerazioni sui fenomeni di corrosione ritenuti cause della rottura dei fili

Le analisi effettuate non hanno permesso di confermare la morfologia di corrosione già evidenziata nelle analisi svolte in precedenza, poiché nessun filo ha mostrato l'insorgenza di tali fenomeni. In assenza di riscontro diretto, in questo capitolo si riportano alcune considerazioni di carattere generale riguardanti aspetti che dovranno necessariamente essere chiariti, nel caso in cui sia inderogabile l'utilizzo dei fili in questione.

Nell'opinione di chi scrive, la diagnosi di corrosione sotto sforzo (SCC) causata da una contaminazione della superficie non appare pienamente fondata, quantunque tale ipotesi sia plausibile: è la morfologia stessa che evidenzia una forma differente, data da una intensa e profonda corrosione localizzata, con evidenti prodotti di corrosione espansivi all'interfaccia argento / alluminio che rigonfiano il rivestimento stesso, determinando in esso rotture longitudinali. La superficie di rottura appare ricoperta da questi ossidi e le uniche zone lasciate libere evidenziano morfologie di frattura duttile per taglio.

D'altra parte, la forte accelerazione delle rotture con la tensione sottolineata nella documentazione ricevuta non è di per sé sufficiente a individuare in modo inequivocabile l'insorgenza di un fenomeno di SCC, e può essere spiegata con il grado di riduzione della sezione resistente e la morfologia estremamente penetrante della corrosione localizzata. I numerosi difetti trasversali ampiamente rintracciabili su tutti i fili, non sono indice della formazione di cricche secondarie a seguito dell'insorgenza della corrosione sotto sforzo, ma sono semplicemente fratture fragili nel rivestimento, allargate dalla tensione meccanica nel filo.

In ogni caso, ancorché vi possano essere ipotesi differenti sulla forma di corrosione causa della rottura, l'aspetto fondamentale da definire è la ragione ultima perché la corrosione si possa essere prodotta. I punti che debbono essere approfonditi sono diversi. Innanzitutto, riguardano il meccanismo della corrosione a umido.

A temperatura ambiente, la corrosione si produce solo in presenza di acqua che bagna la superficie del metallo. In atmosfera, la formazione di tale film acquoso si ha per condensazione di umidità sulla superficie del metallo secondo diversi tipi di meccanismi. Nel caso in oggetto, appare improbabile che possa avvenire per bagnamento diretto o per contatto con un'atmosfera umida, a temperature sotto quella di *dew point*. Seppure non si possa escludere in assoluto eventi accidentali o anomalie durante il ciclo di produzione, filatura, trasporto, montaggio e servizio, le procedure poste in atto e la serietà ed esperienza delle strutture operative, rendono improbabili questi eventi. Più probabile è che il film di acqua si sia prodotto con un meccanismo di condensazione per capillarità o per condensazione chimica.

All'interno di cavità capillari, di dimensione micrometrica, la condensazione di acqua può avvenire per umidità molto inferiore a quella di saturazione. Si ritiene tale meccanismo efficace per umidità relative superiori a 60%, ma in realtà non esiste un limite inferiore, ed è in grado di agire anche per umidità più basse; dipende unicamente dalla dimensione dei pori e cavità presenti alla superficie. Le condizioni di umidità assicurate dalle procedure durante le fasi di filatura e montaggio non sono troppo discoste da questo limite, per cui si può ipotizzare che lievi fluttuazioni intorno al valore medio e piccole variazioni tra un punto e l'altro possano portare a situazioni favorevoli all'avvio del fenomeno. Per prevenire una tale eventuale situazione, è raccomandabile assicurare condizioni atmosferiche più secche, ben sotto l'attuale livello considerato per le fasi di lavorazione.

Nel caso in cui sulla superficie fossero presenti sostanze igroscopiche, la condensazione chimica permette la formazione del film di condensa anche per condizioni di umidità sotto il 50%. Sali quali cloruro di calcio e magnesio sono deliquescenti già per umidità sotto il 40%. Le condizioni di umidità previste durante le attività degli operatori sarebbero da ritenersi, pertanto, critiche nell'eventualità della presenza di tali sali. A questo riguardo, le analisi evidenziano la presenza sporadica sui fili di elementi spuri comprendenti cloruri, calcio, sodio, potassio ecc. Seppure sia stata ad oggi attribuita alla contaminazione durante le attività, l'origine di tali elementi non è in realtà stata individuata con certezza. Si può osservare che l'individuazione di questi elementi anche sui fili non posti in esercizio potrebbe avvalorare l'ipotesi di contaminazione avvenuta in precedenza o addirittura conseguente al ciclo produttivo e, in particolare, al processo di realizzazione del rivestimento. Si ritiene quindi opportuno un approfondimento anche in questa direzione, per valutare se eventuali sostanze utilizzate nei processi di rivestimento possano dare residui igroscopici sia sulla superficie sia all'interfaccia alluminio / argento.

Il rivestimento dei fili appare discontinuo, con difetti che si ritiene possano allargarsi durante la tensionatura, soprattutto durante i test di extra-allungamento a + 5 mm (in rapporto alla loro lunghezza). Tale allungamento corrisponde ai 5/8 del limite elastico (presumibilmente molto prossimo al limite di resistenza meccanica). In condizioni normali, i fili sono sottoposti a un tiro di circa 20 g, cui corrisponde una sollecitazione di circa 156 MPa; si può quindi assumere che la tensione sale a circa 195 MPa durante i test di sovra-allungamento e fissare in almeno 312 MPa la resistenza meccanica. Tali valori dimostrano che i fili sono normalmente sottoposti a condizioni di carico molto elevato, sostenibili solo in virtù di un forte incrudimento della lega di alluminio.

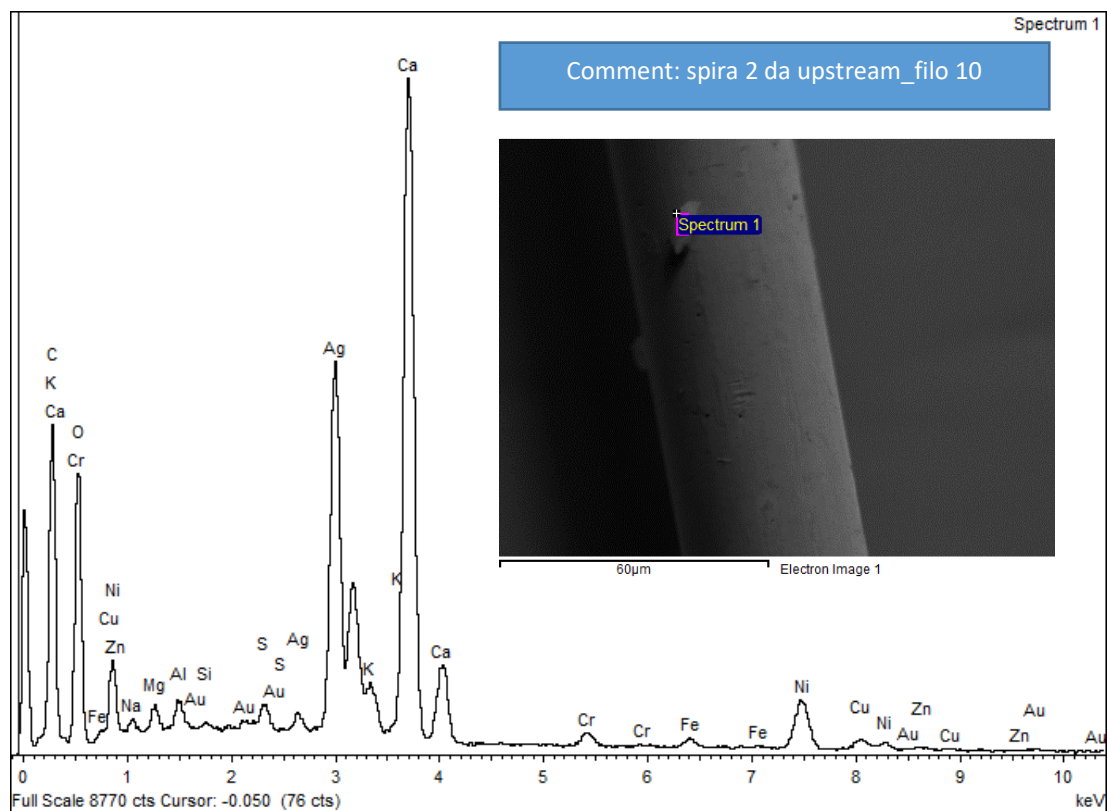
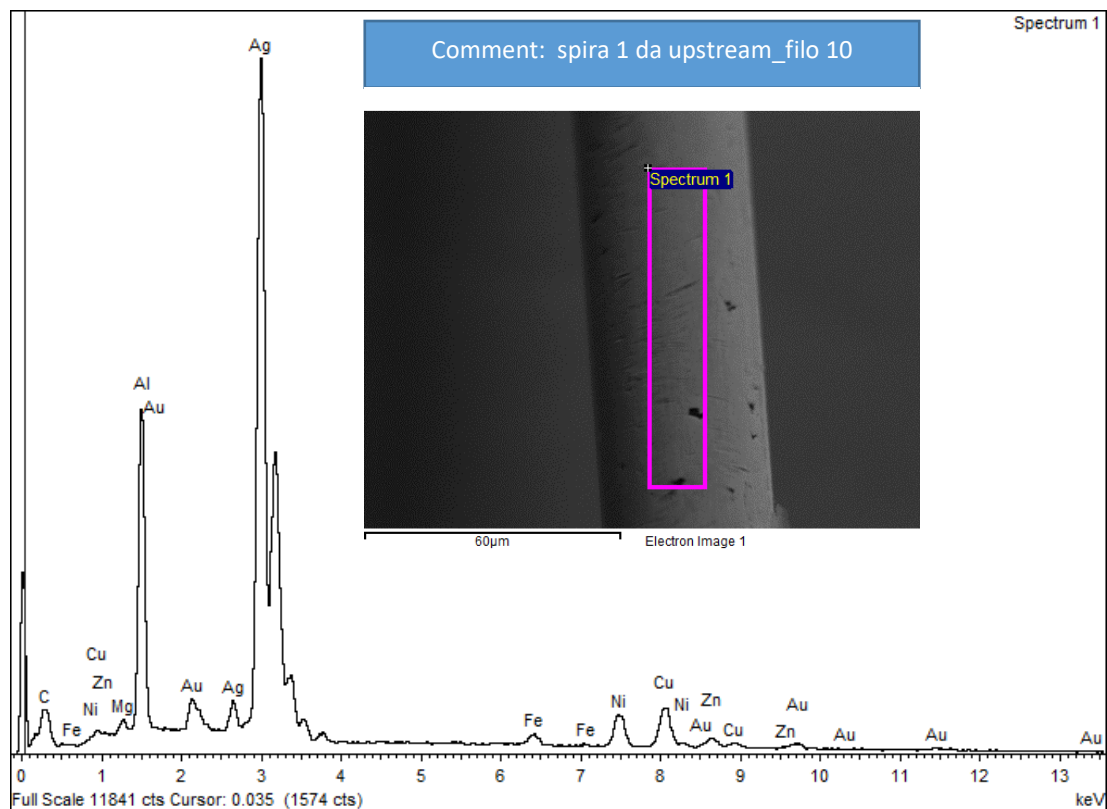
Tale stato di sollecitazione appare eccessivo per lo stato di rivestimento di argento. Stante il loro modulo di elasticità circa simile, la ripartizione della sollecitazione tra i due metalli tende a determinare sollecitazioni analoghe o leggermente superiori nello stato di argento, determinando così livelli di caricamento su quest'ultimo non compatibili con la resistenza meccanica dell'argento ricotto (UTS 140 MPa). Tutto questo giustifica l'estesa difettosità superficiale del rivestimento riscontrata nelle analisi.

Va da sé, che la presenza di discontinuità e difetti superficiali di dimensione micrometriche espone inevitabilmente l'anima sottostante di alluminio all'azione dell'ambiente. In caso di sufficiente umidità dell'atmosfera, tale da promuovere una condensazione per capillarità o favorita dalla presenza di sostanze igroscopiche di qualsiasi origine (siano esse derivanti dalle attività di montaggio o quant'altro o dal ciclo produttivo), si può così produrre un attacco particolarmente severo a causa dell'accoppiamento galvanico tra l'argento e l'alluminio, dovuta alla diversa nobiltà pratica dei due metalli. Può così insorgere una situazione molto critica, oltretutto aggravata dalla suscettibilità intrinseca della lega alla corrosione localizzata, conseguente al suo alto contenuto di magnesio. Ciò può determinare un profondo e rapido attacco, in grado di raggiungere dimensioni rilevanti, seppure in brevi periodi di umidità significativamente elevata.

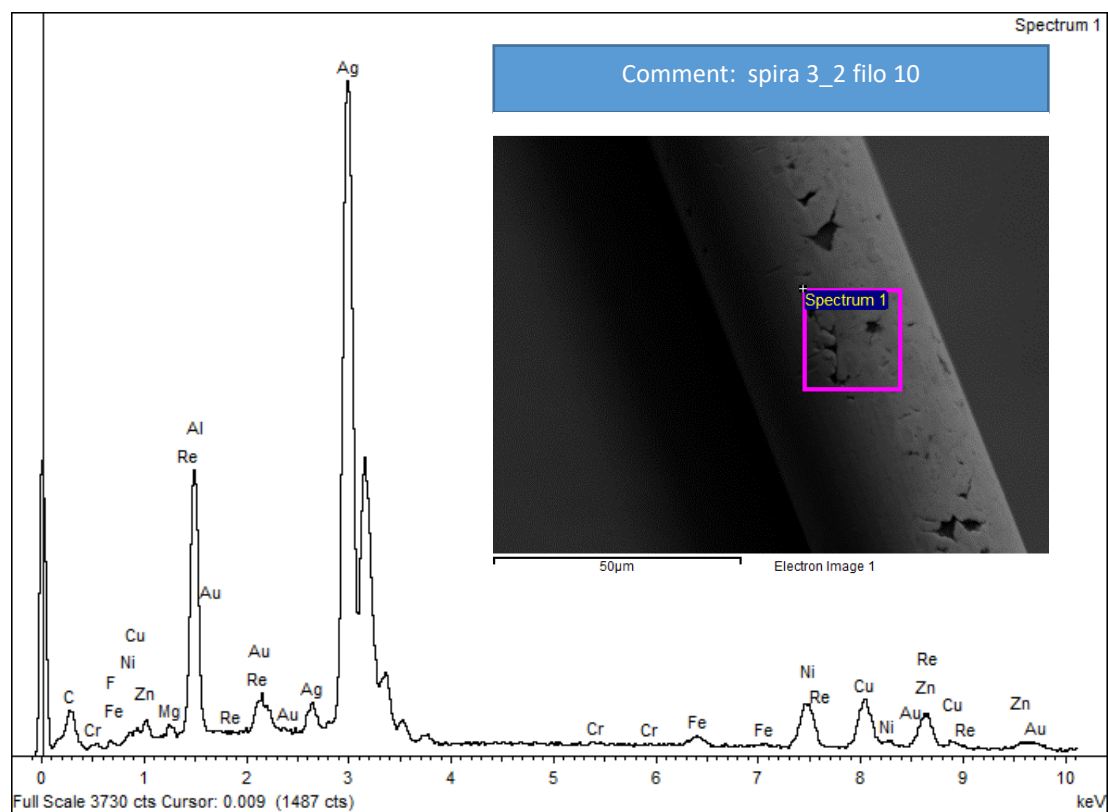
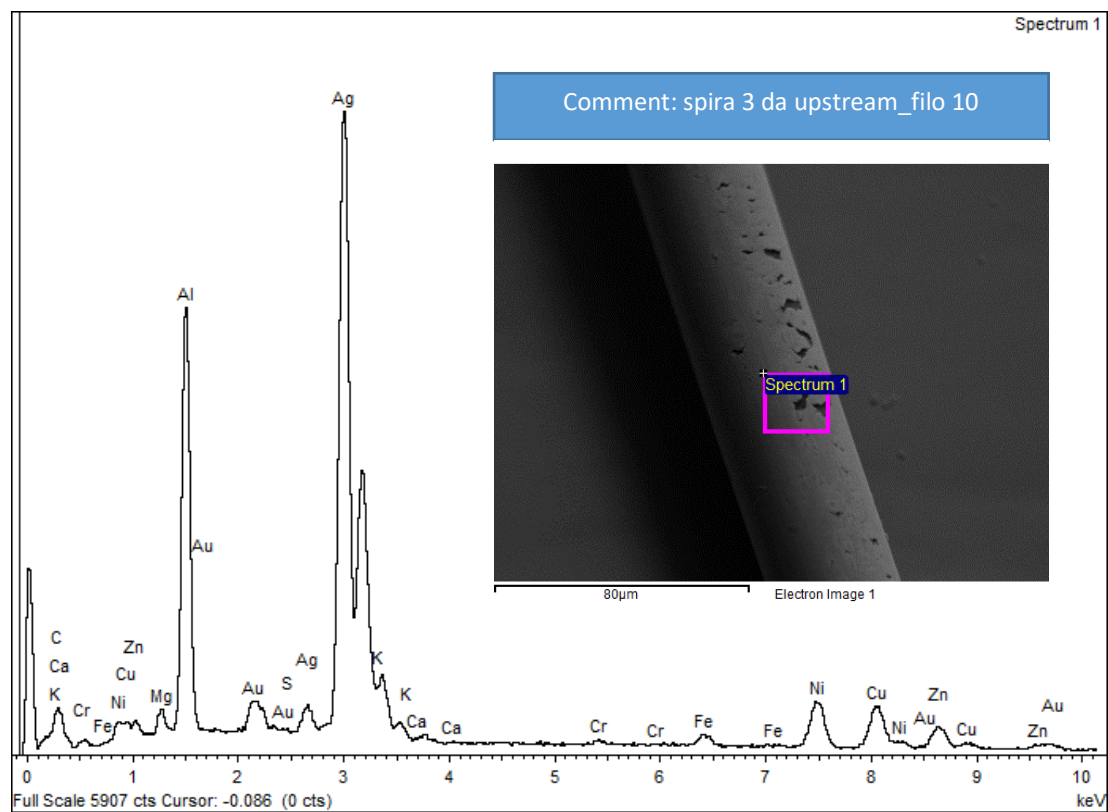
Si sottolinea, infine, che non si può ancora del tutto escludere una rottura puramente meccanica e che la corrosione documentata dalle precedenti analisi sia in effetti un fatto accidentale, successivo. Come sottolineato poc'anzi, le condizioni di caricamento sono piuttosto severe. Le condizioni di sollecitazione richiedono proprietà di resistenza del materiale proprie di uno stato fortemente incrudito; non sono invece compatibili con lo stato di lega ricotta o a basso grado di incrudimento. Per prevenire rotture meccaniche, è di fondamentale importanza, quindi, verificare da un lato le caratteristiche meccaniche dei fili forniti e, dall'altro, eventuali fenomeni di rilassamento.



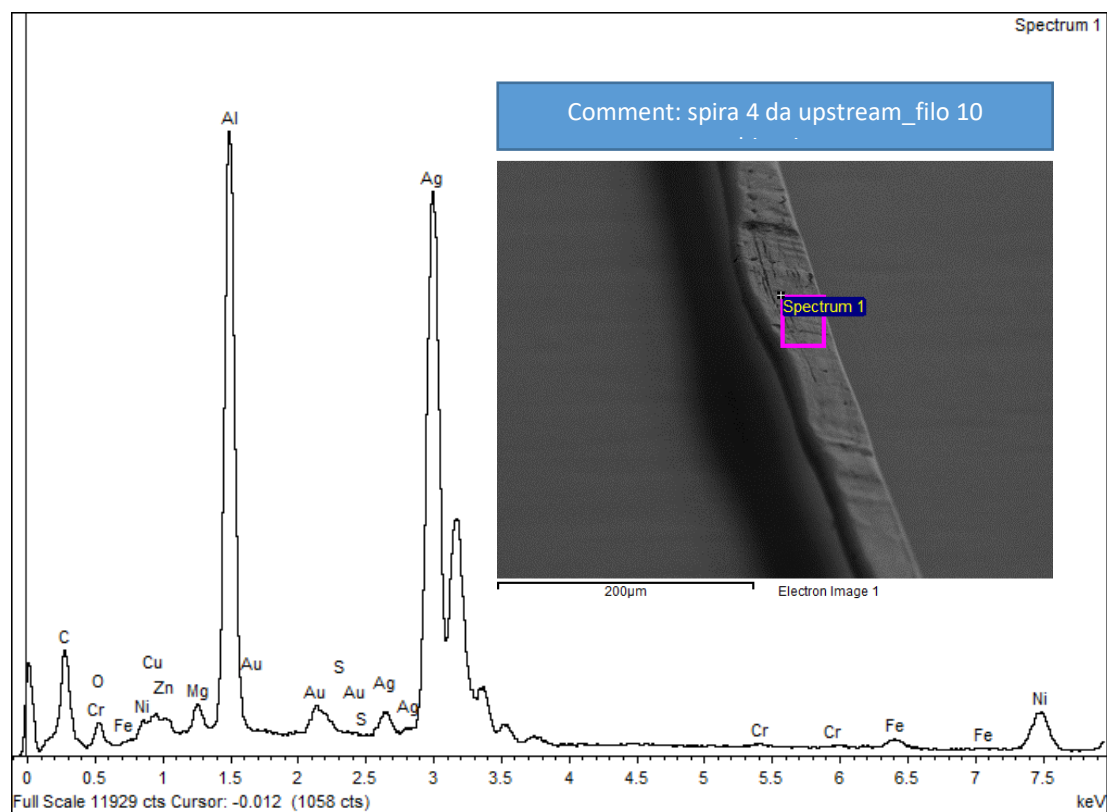
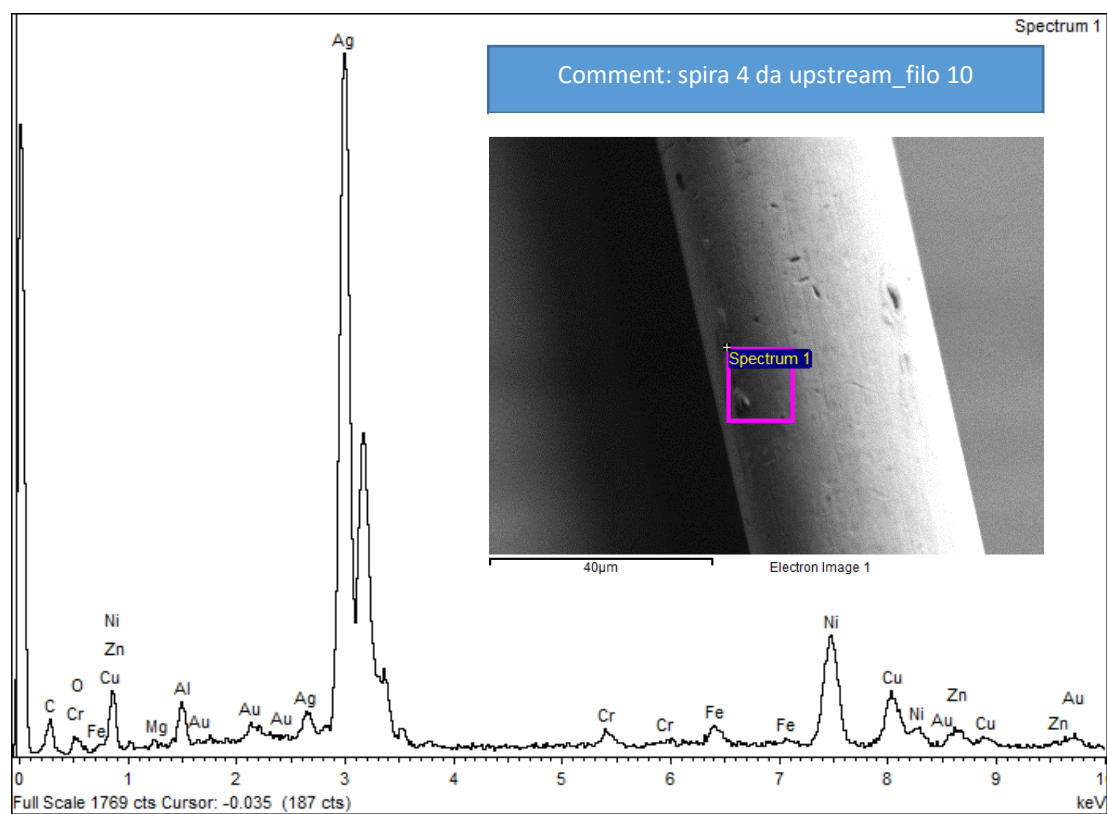
## Appendice A - Analisi filo 10





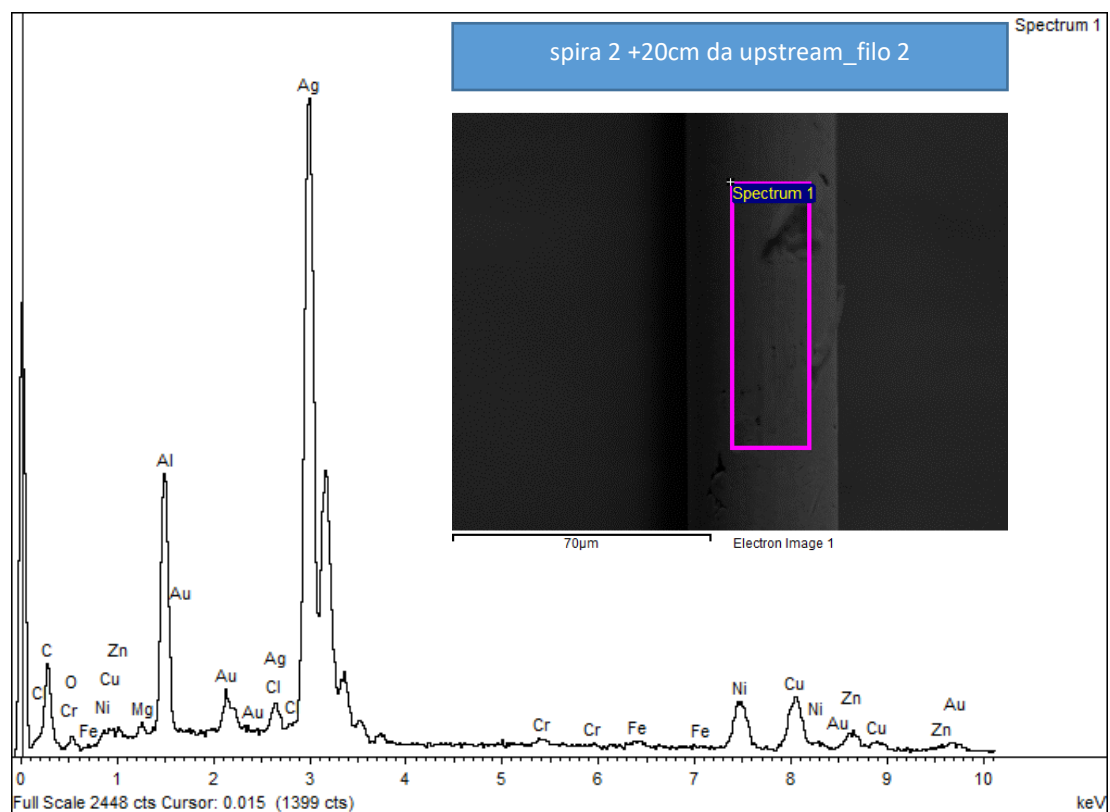
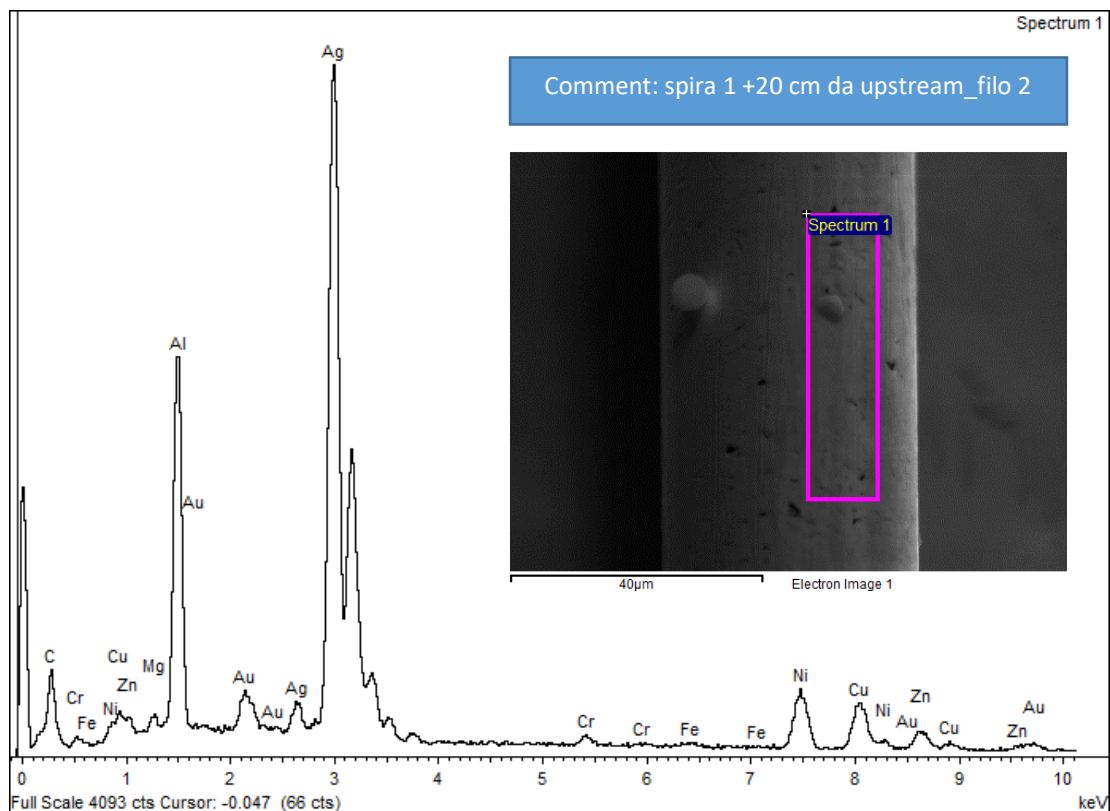


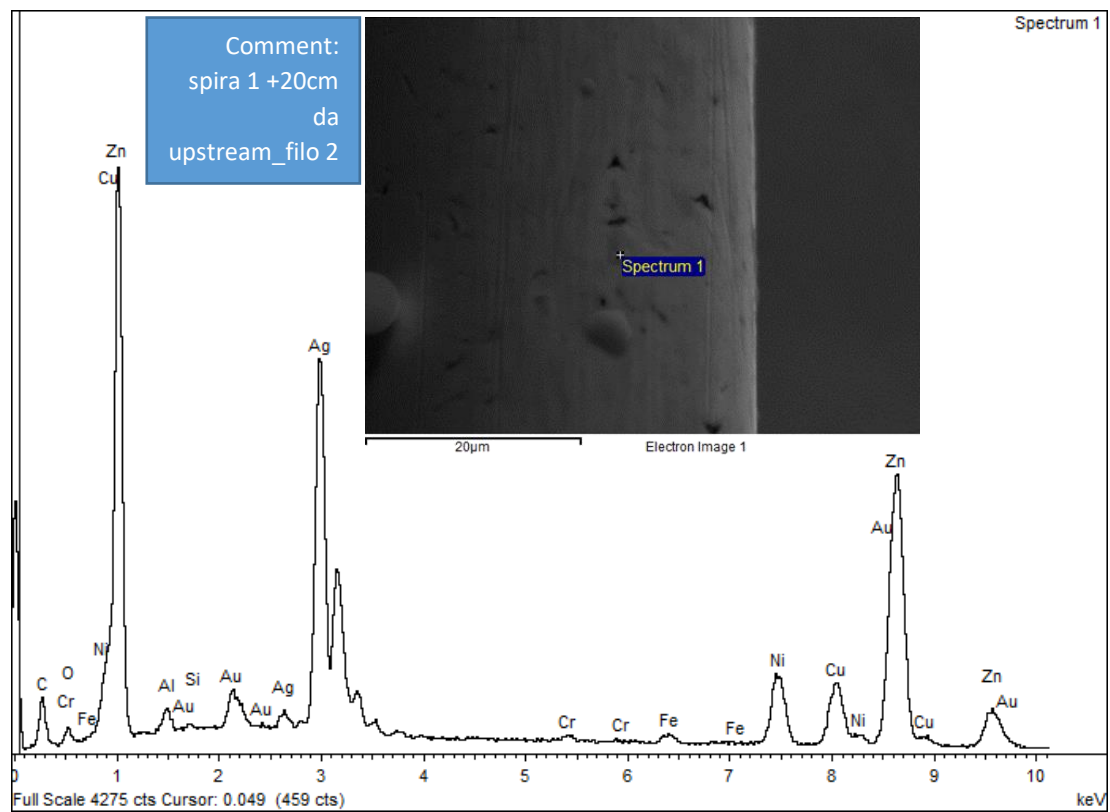
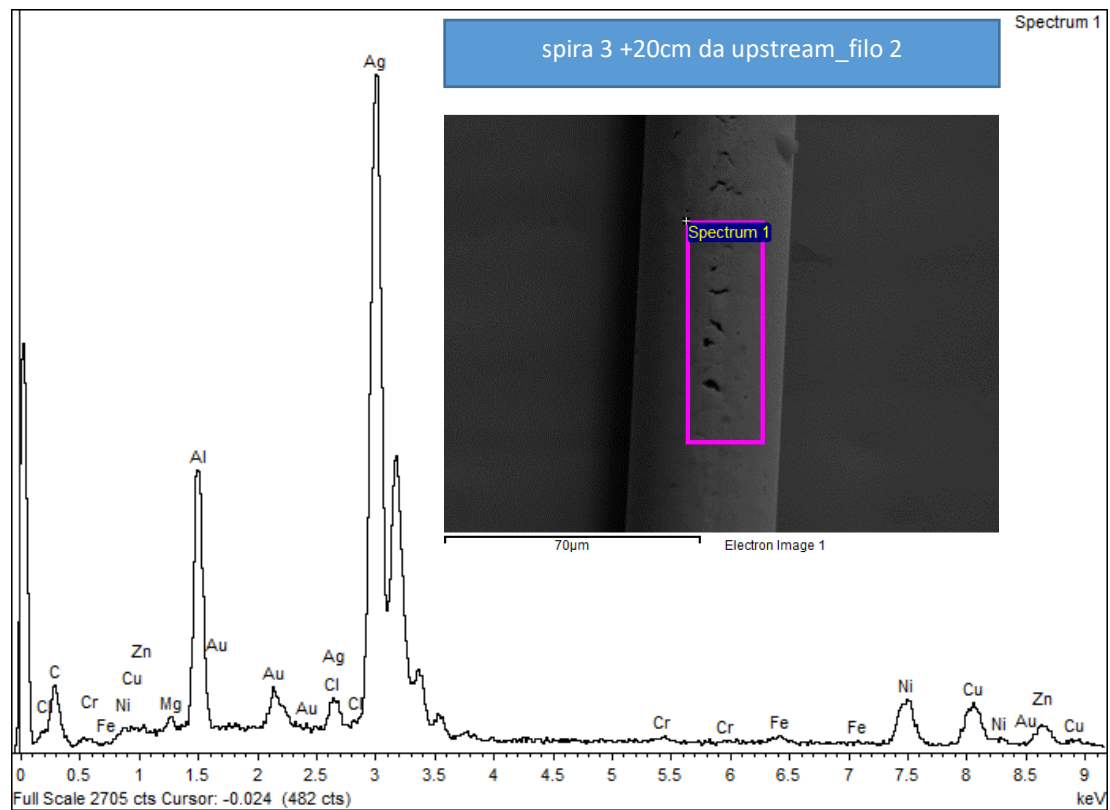


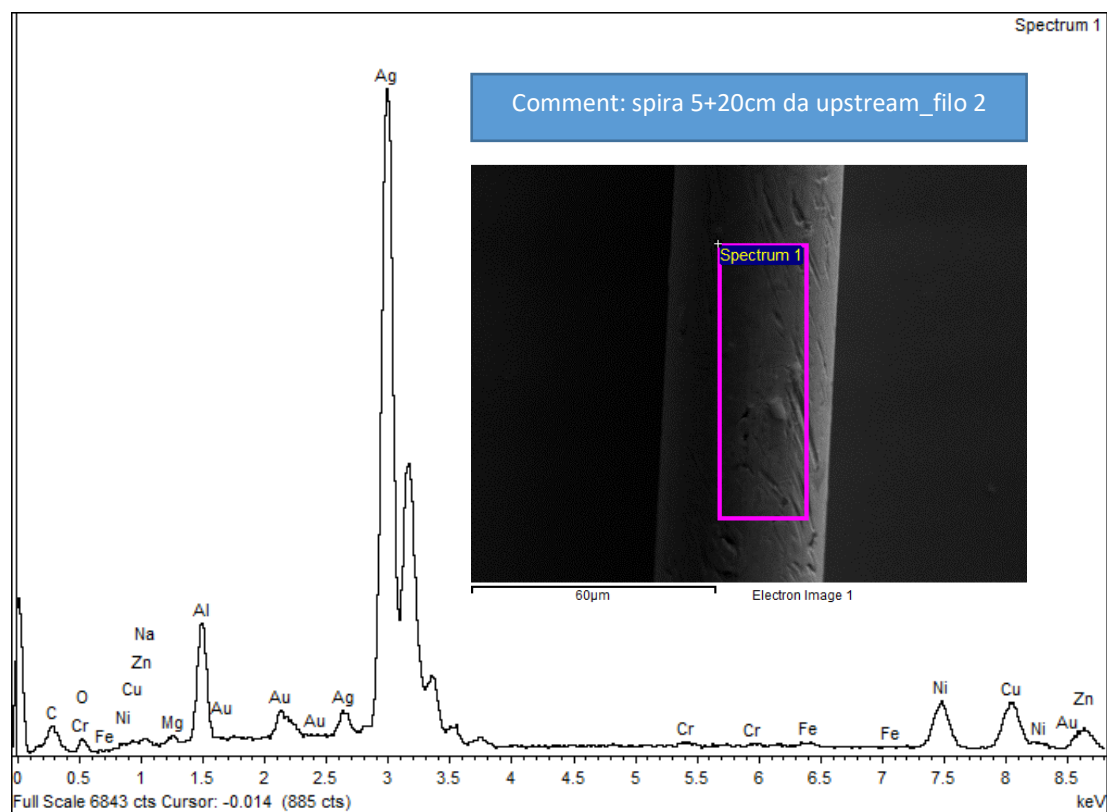
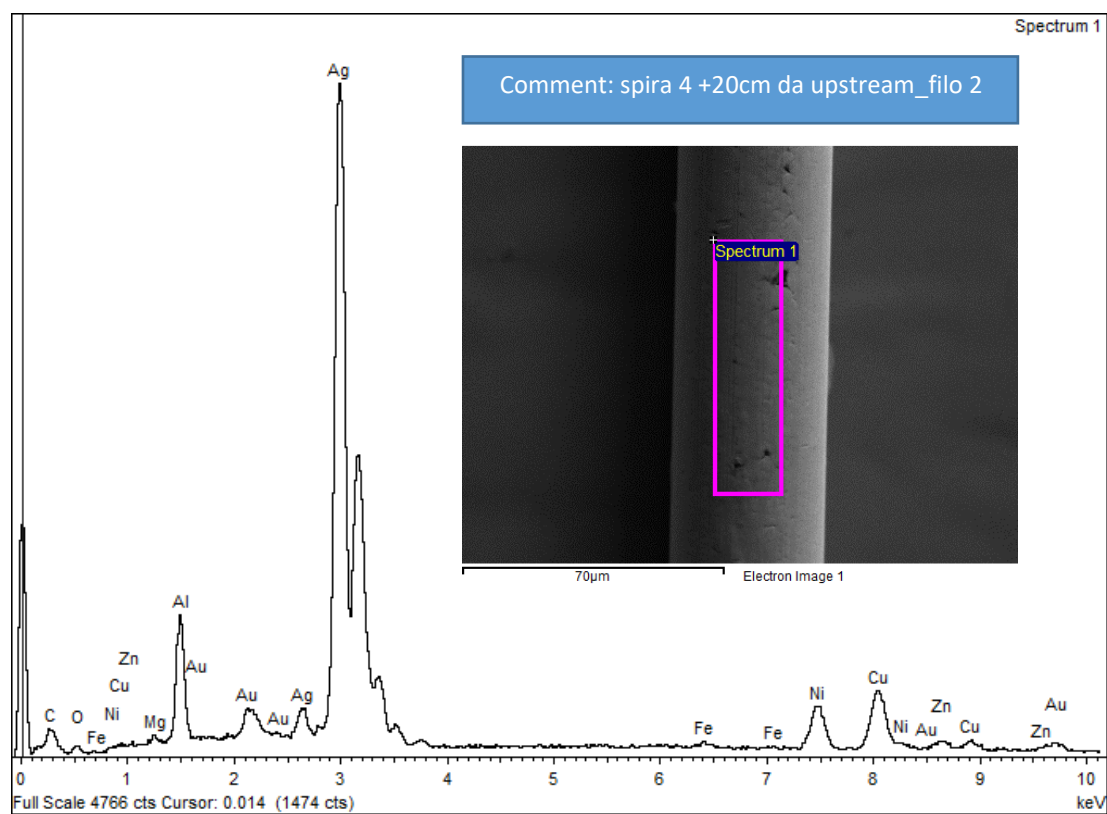


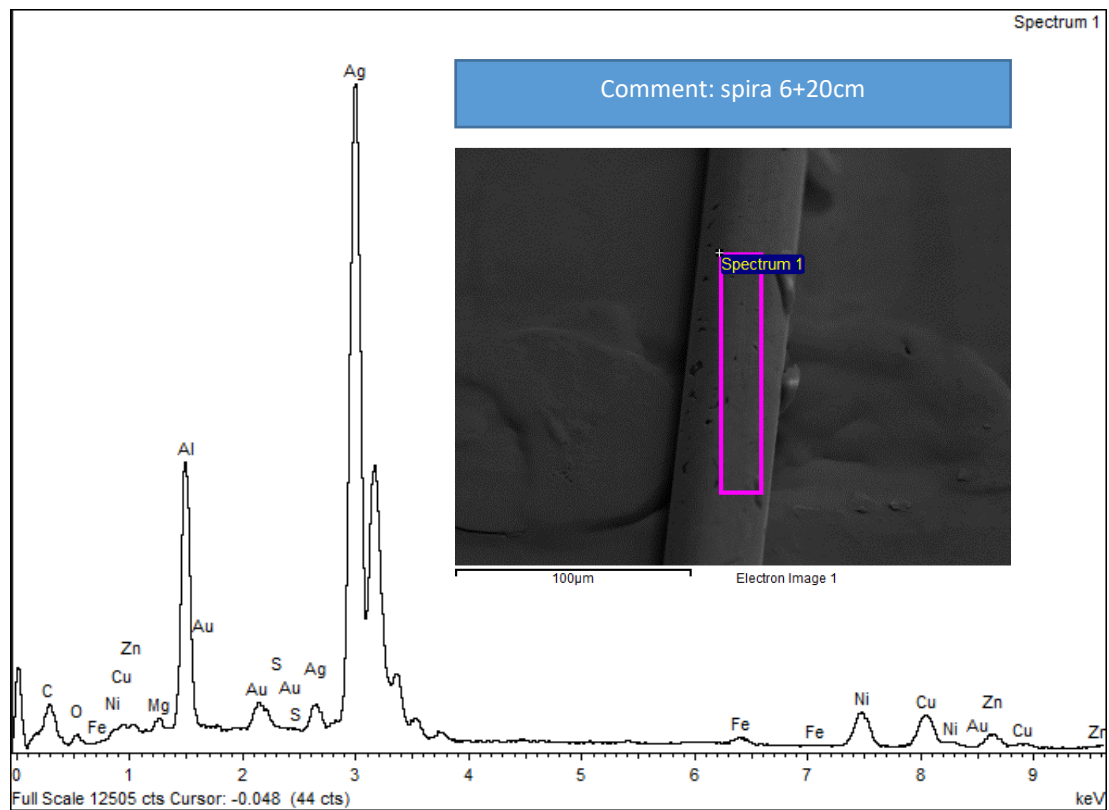


## Appendice B - Analisi filo 2

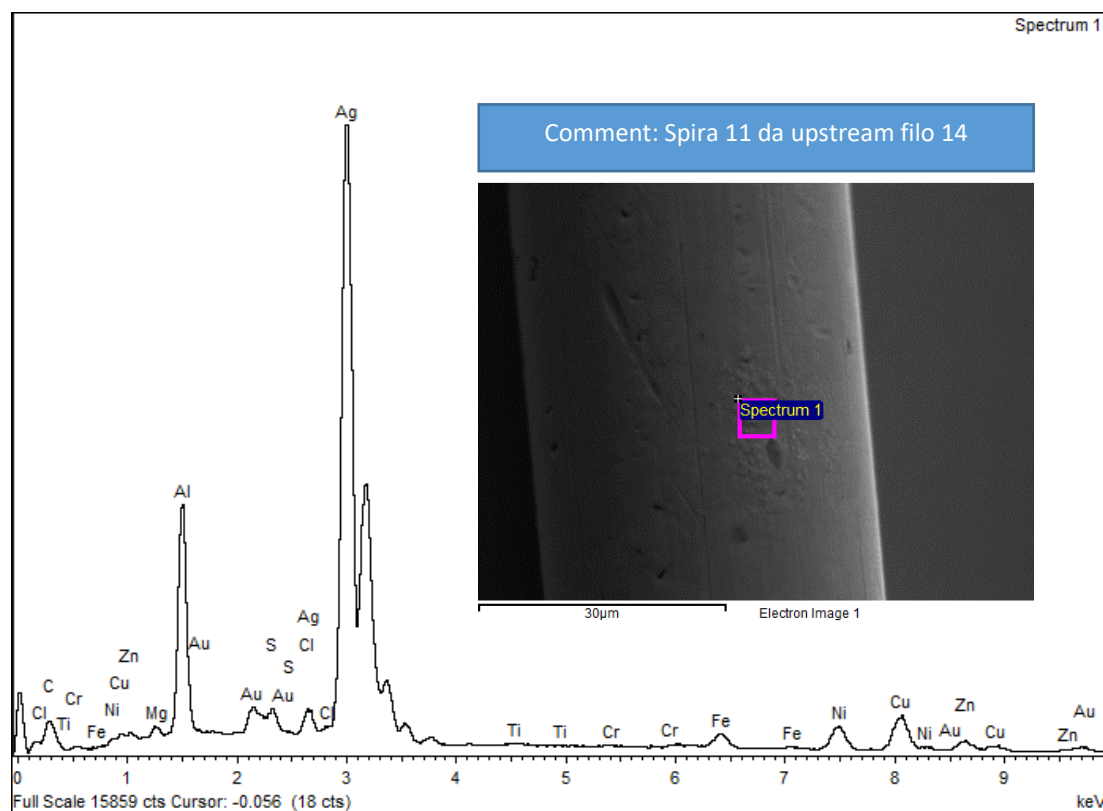


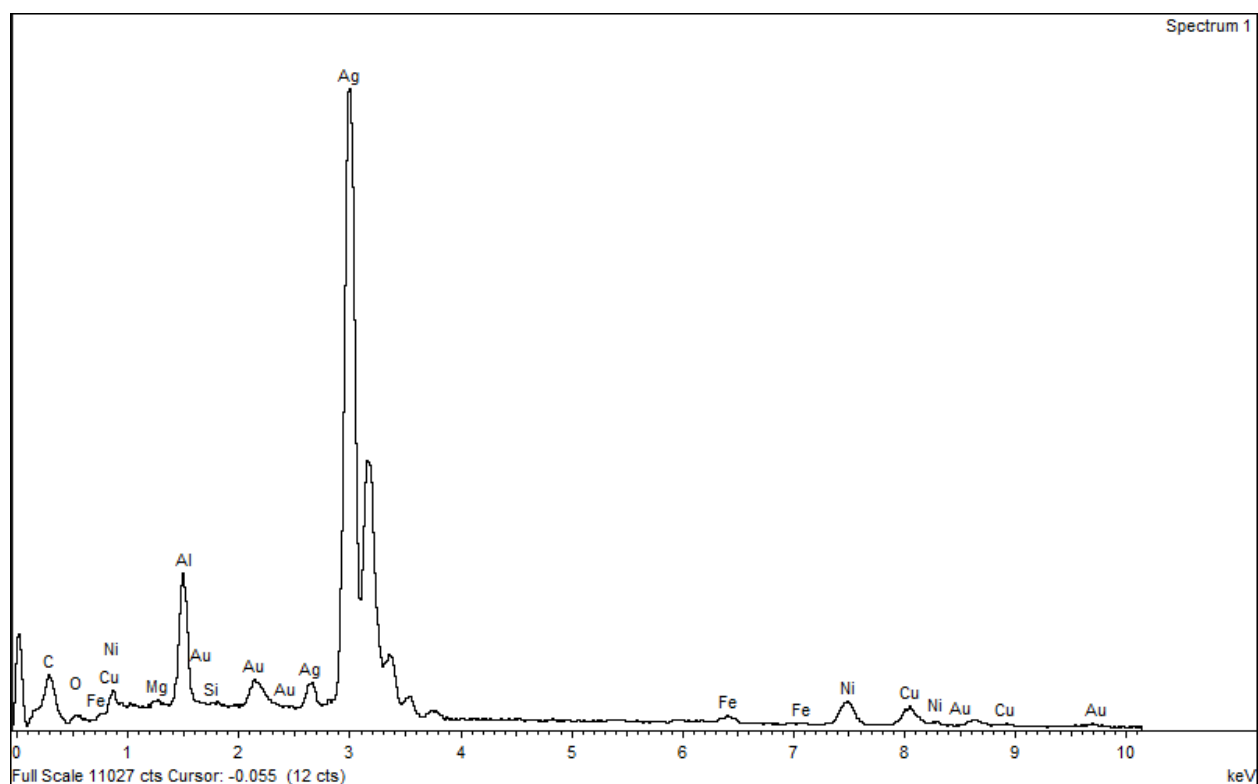






## Appendice C - Analisi filo 14

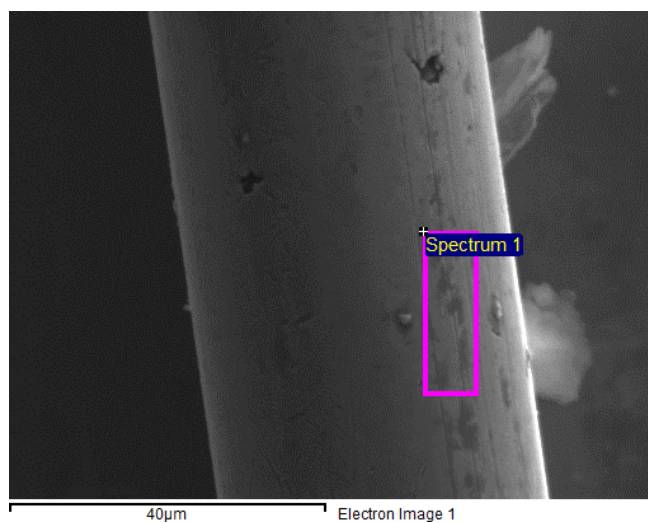




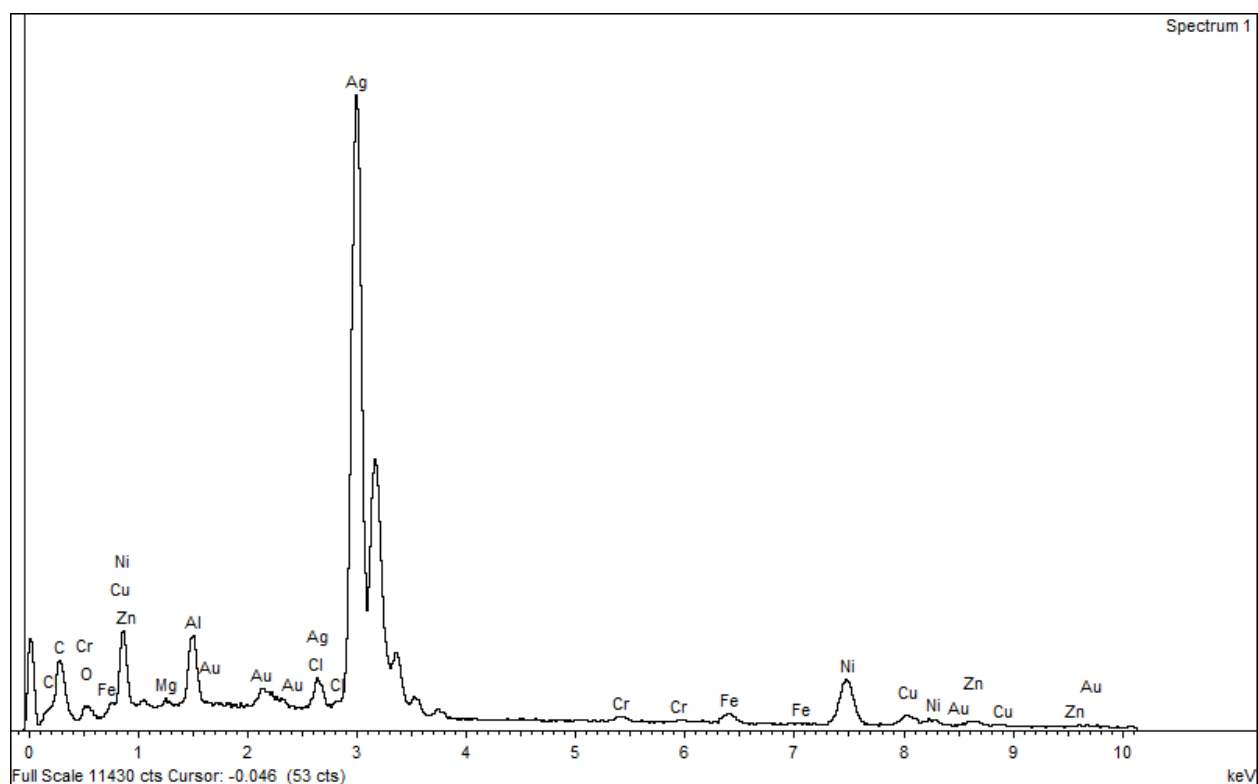
Peak possibly omitted : 5.383 keV

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 3.09    | 17.51   |
| O K     | 1.37    | 5.85    |
| Mg K    | 0.35    | 0.98    |
| Al K    | 5.93    | 14.96   |
| Si K    | 0.09    | 0.21    |
| Fe K    | 1.03    | 1.26    |
| Ni K    | 4.96    | 5.75    |
| Cu K    | 4.64    | 4.98    |
| Ag L    | 74.87   | 47.24   |
| Au M    | 3.67    | 1.27    |
| Totals  | 100.00  |         |

Comment: filo 14\_latoDS\_spira1



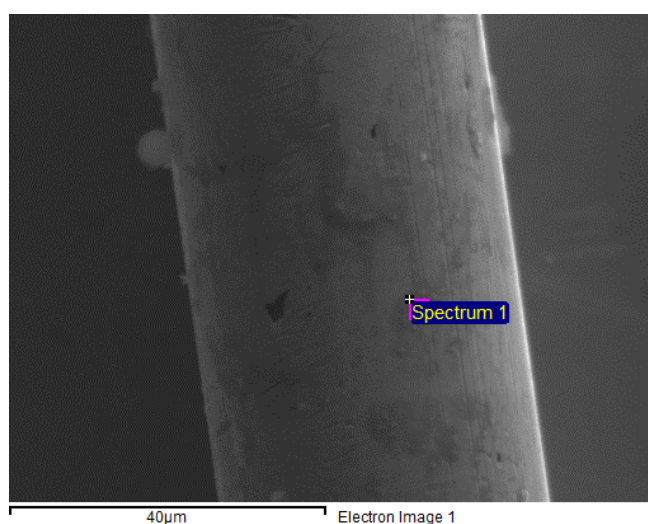


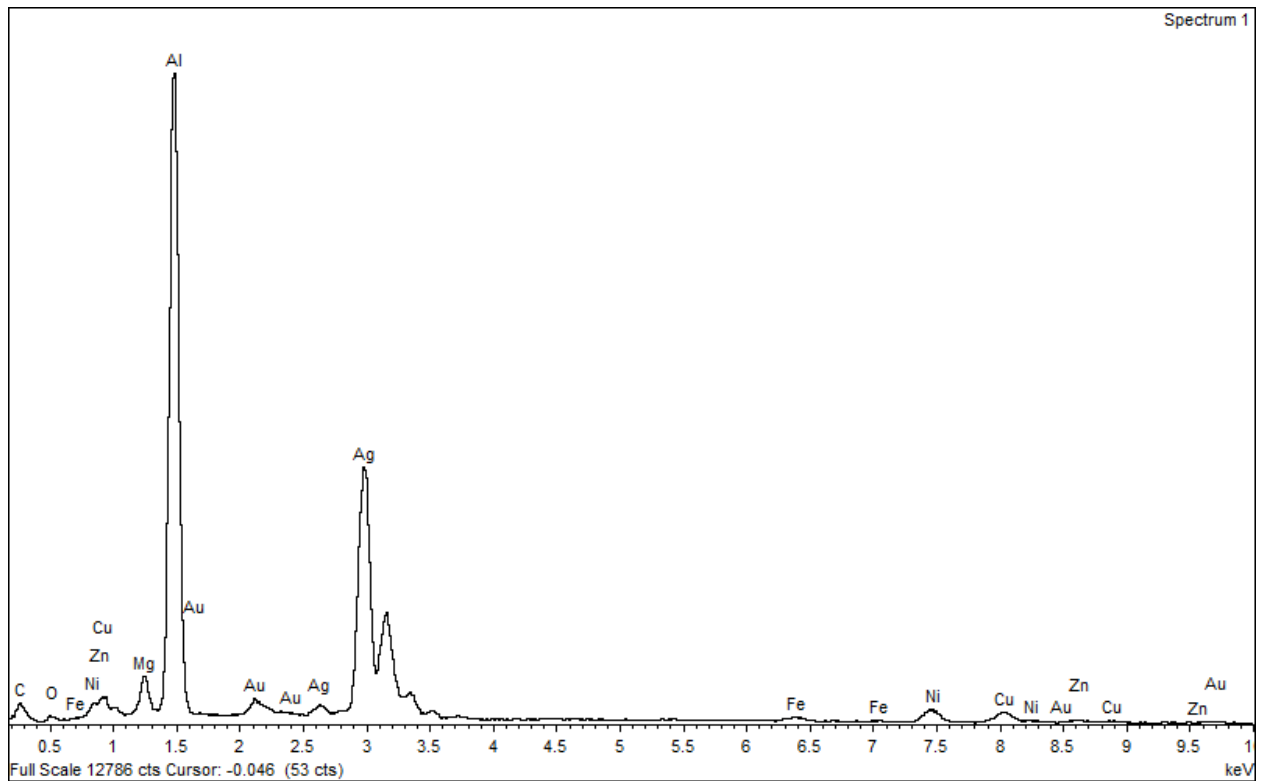


Spectrum processing :  
No peaks omitted

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 6.72    | 30.64   |
| O K     | 3.52    | 12.05   |
| Mg K    | 0.41    | 0.93    |
| Al K    | 3.09    | 6.27    |
| Cl K    | 0.33    | 0.51    |
| Cr K    | 0.56    | 0.59    |
| Fe K    | 1.31    | 1.29    |
| Ni K    | 9.36    | 8.73    |
| Cu K    | 2.63    | 2.27    |
| Zn K    | 1.69    | 1.42    |
| Ag L    | 68.35   | 34.72   |
| Au M    | 2.04    | 0.57    |
| Totals  | 100.00  |         |

Comment: filo14DS\_sito2



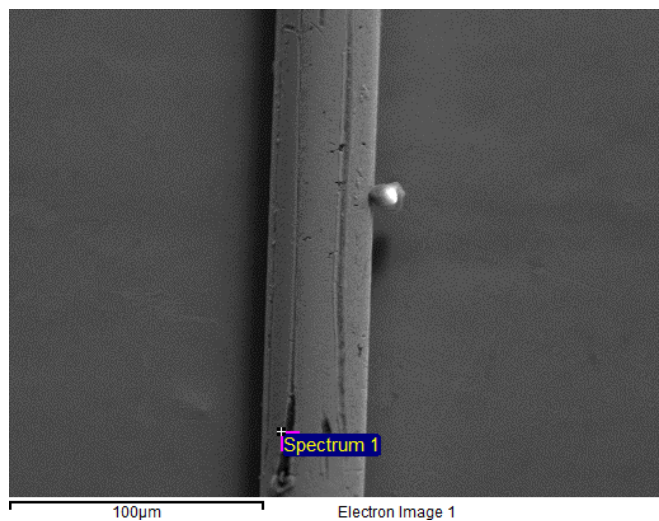


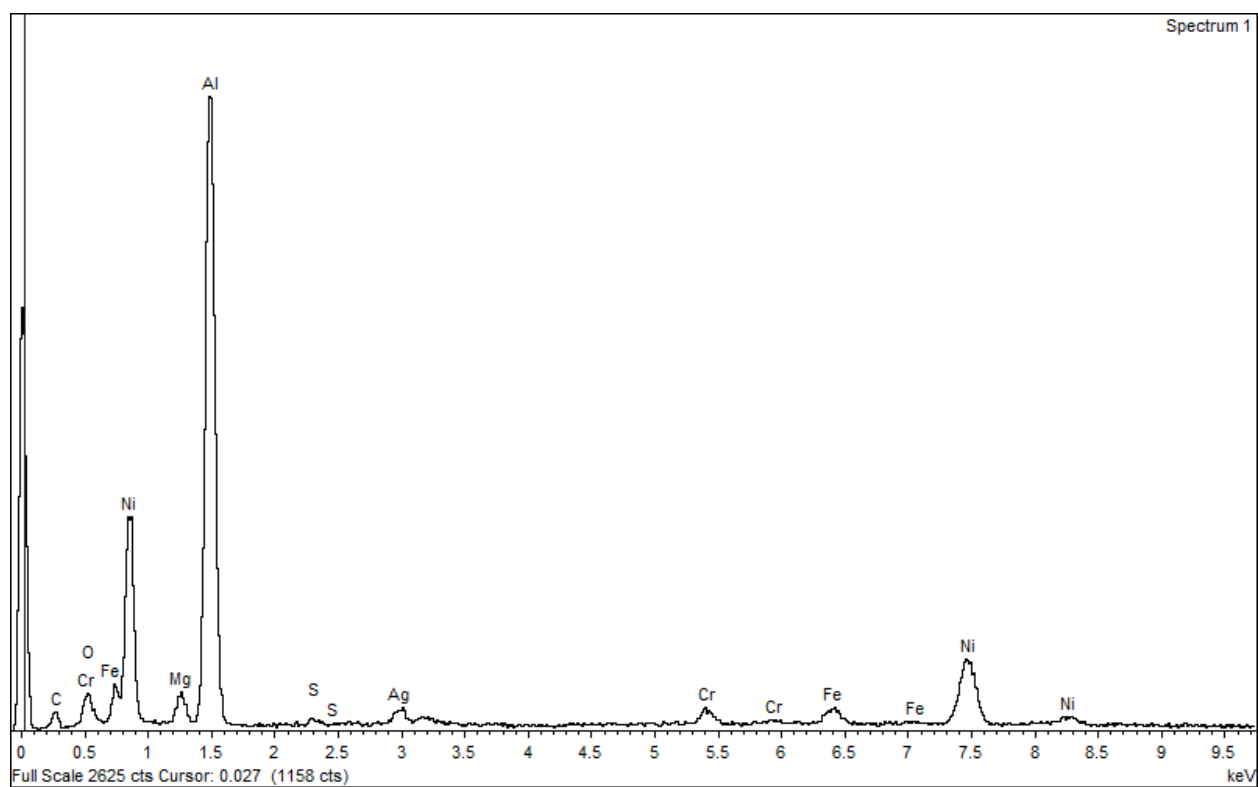
Spectrum processing :

Peak possibly omitted : 5.400 keV

Comment: filo14DS\_spira2

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 5.51    | 18.30   |
| O K     | 1.65    | 4.10    |
| Mg K    | 2.21    | 3.62    |
| Al K    | 34.50   | 50.97   |
| Fe K    | 0.82    | 0.58    |
| Ni K    | 3.77    | 2.56    |
| Cu K    | 3.89    | 2.44    |
| Zn K    | 1.16    | 0.71    |
| Ag L    | 43.75   | 16.17   |
| Au M    | 2.74    | 0.55    |
| Totals  | 100.00  |         |



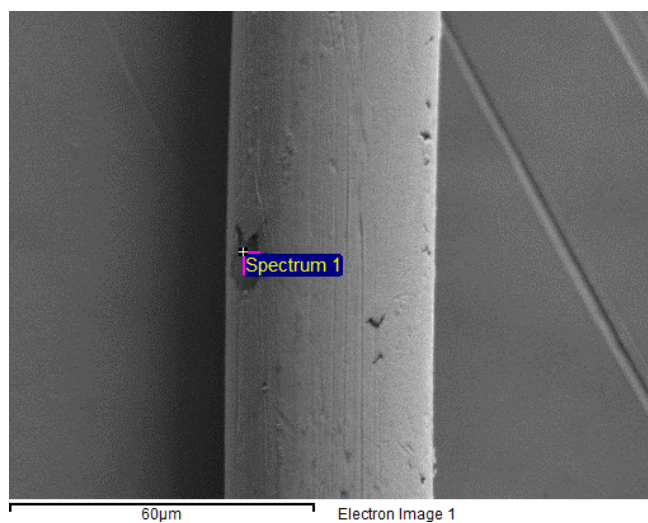


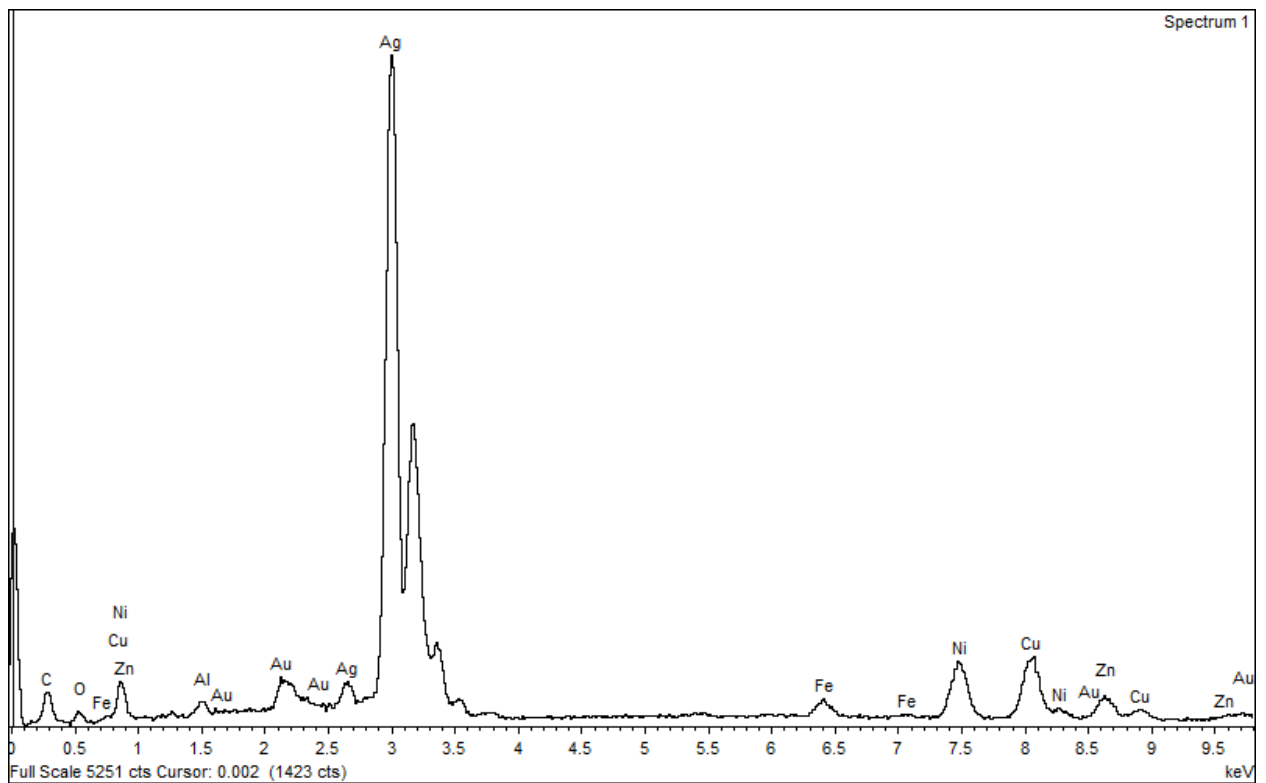
Spectrum processing :

No peaks omitted

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 15.40   | 32.83   |
| O K     | 6.89    | 11.03   |
| Mg K    | 2.04    | 2.15    |
| Al K    | 41.45   | 39.33   |
| S K     | 0.44    | 0.35    |
| Cr K    | 2.50    | 1.23    |
| Fe K    | 3.50    | 1.60    |
| Ni K    | 24.55   | 10.71   |
| Ag L    | 3.22    | 0.77    |
| Totals  | 100.00  |         |

Comment:



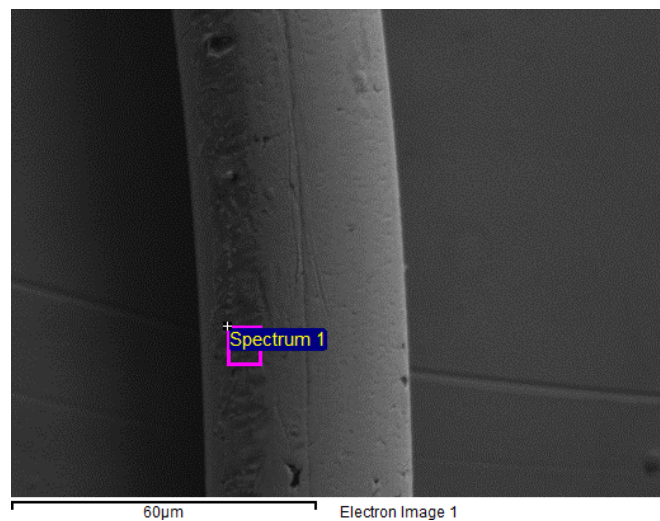


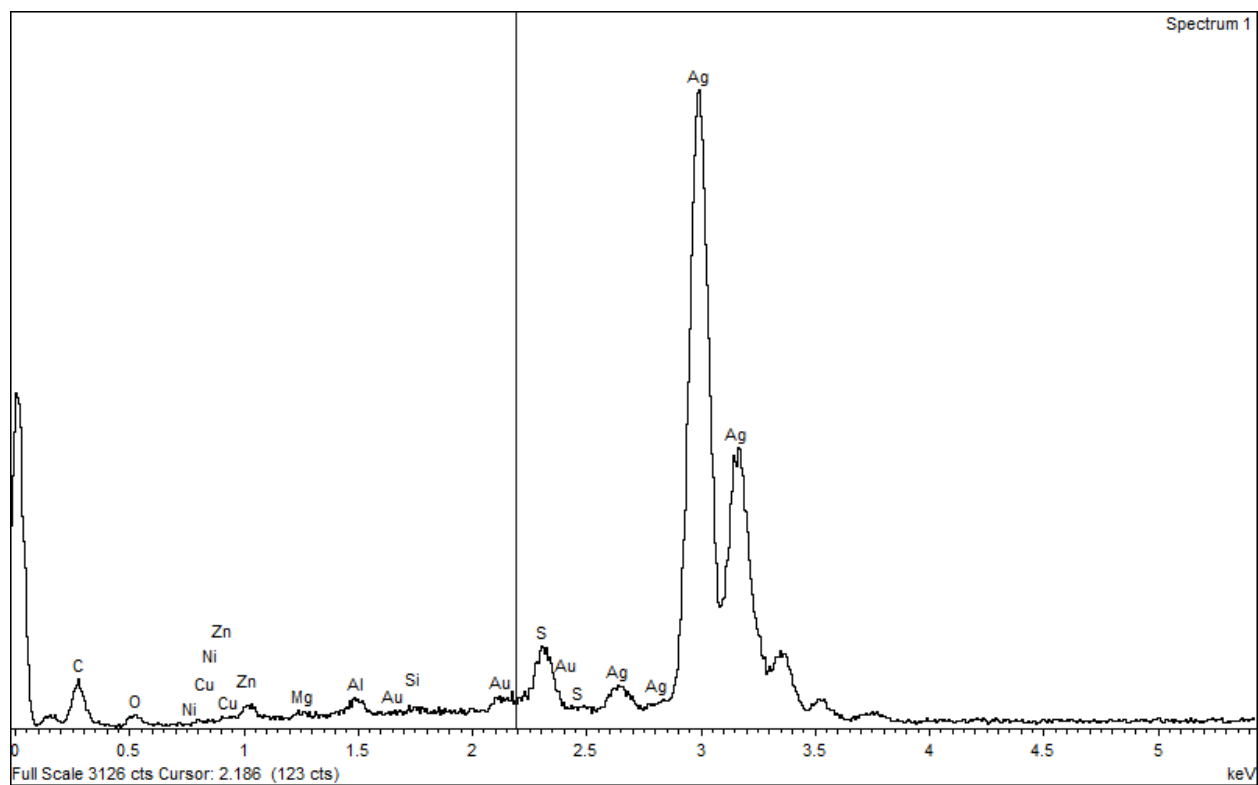
Spectrum processing :

Peak possibly omitted : 5.421 keV

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 4.27    | 22.52   |
| O K     | 2.49    | 9.85    |
| Al K    | 0.53    | 1.25    |
| Fe K    | 1.70    | 1.93    |
| Ni K    | 9.11    | 9.82    |
| Cu K    | 12.79   | 12.75   |
| Zn K    | 5.60    | 5.42    |
| Ag L    | 60.40   | 35.46   |
| Au M    | 3.11    | 1.00    |
| Totals  | 100.00  |         |

Comment:



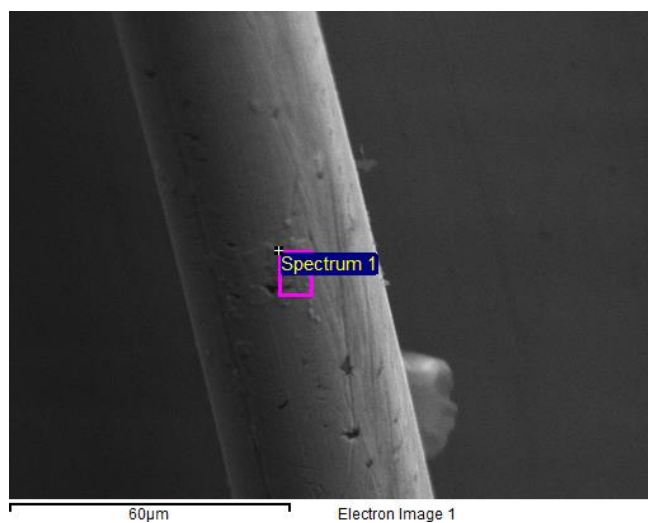


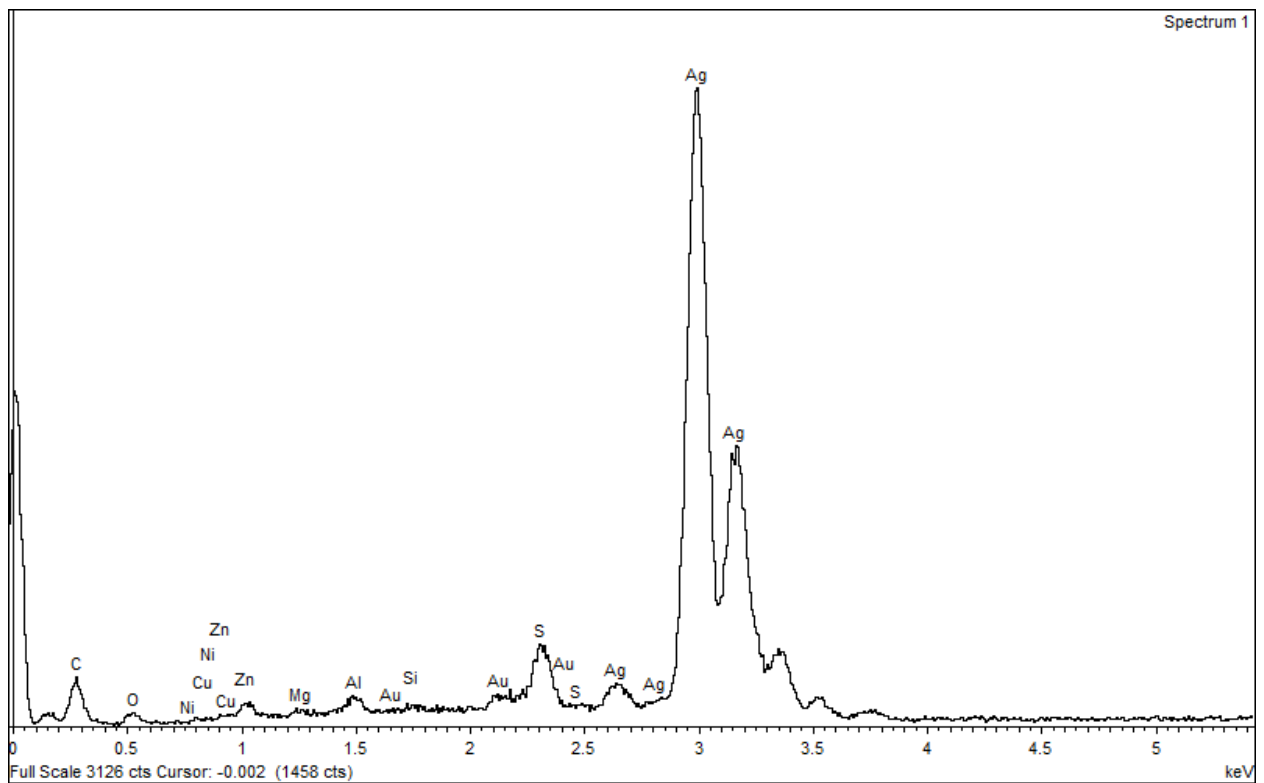
Spectrum processing :

No peaks omitted

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 6.70    | 31.33   |
| O K     | 3.87    | 13.60   |
| Mg K    | 0.26    | 0.60    |
| Al K    | 0.70    | 1.47    |
| Si K    | 0.17    | 0.35    |
| S K     | 2.68    | 4.69    |
| Ni K    | 3.53    | 3.38    |
| Cu K    | 4.08    | 3.61    |
| Zn K    | 2.46    | 2.12    |
| Ag L    | 73.45   | 38.27   |
| Au M    | 2.10    | 0.60    |
| Totals  | 100.00  |         |

Comment: filo14DS\_spira3



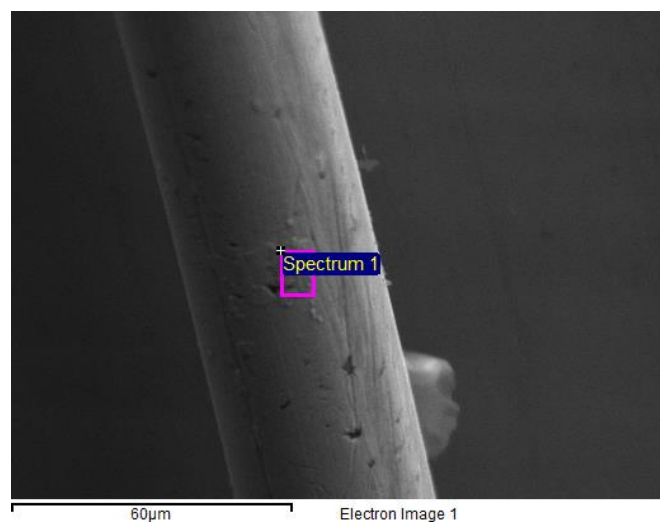


Spectrum processing :

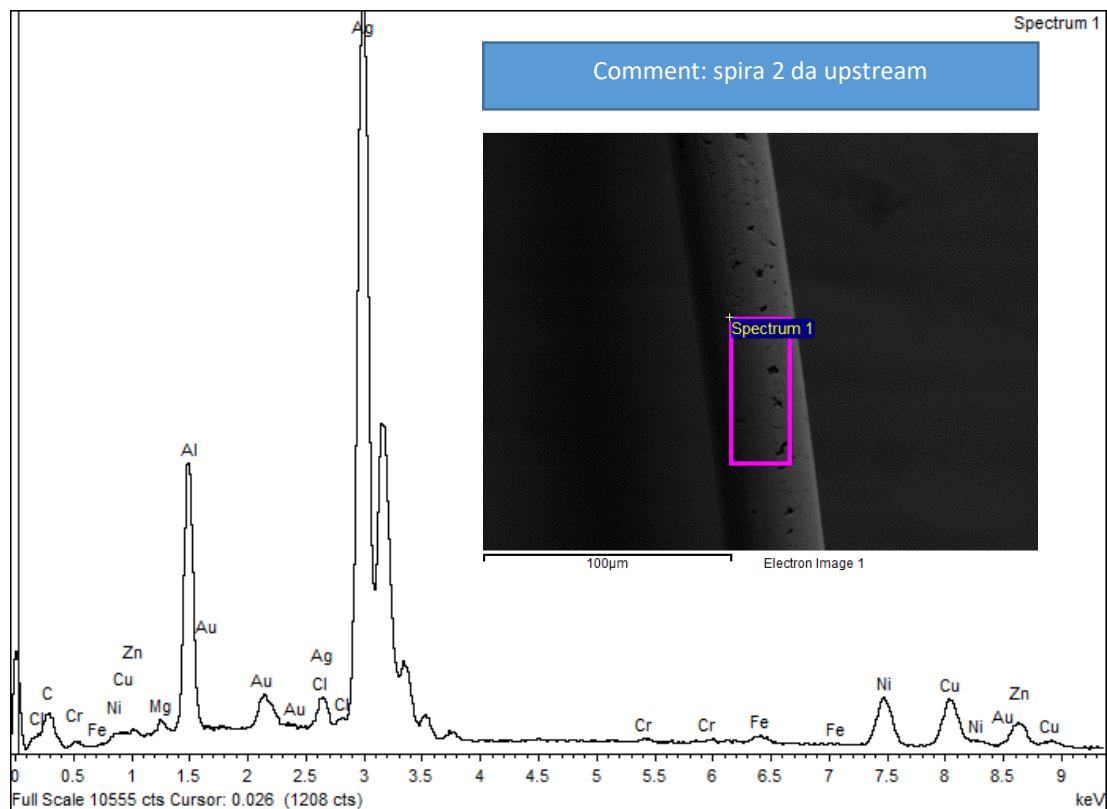
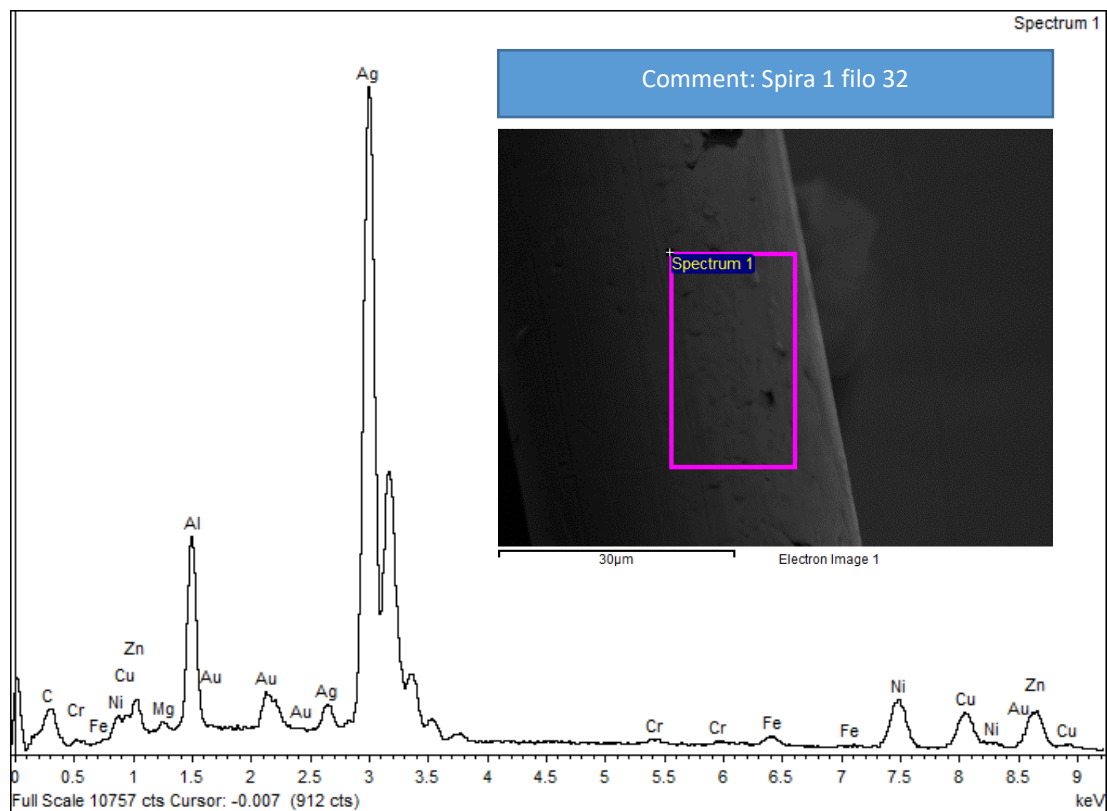
No peaks omitted

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 6.70    | 31.33   |
| O K     | 3.87    | 13.60   |
| Mg K    | 0.26    | 0.60    |
| Al K    | 0.70    | 1.47    |
| Si K    | 0.17    | 0.35    |
| S K     | 2.68    | 4.69    |
| Ni K    | 3.53    | 3.38    |
| Cu K    | 4.08    | 3.61    |
| Zn K    | 2.46    | 2.12    |
| Ag L    | 73.45   | 38.27   |
| Au M    | 2.10    | 0.60    |
| Totals  | 100.00  |         |

Comment: filo14DS\_spira3

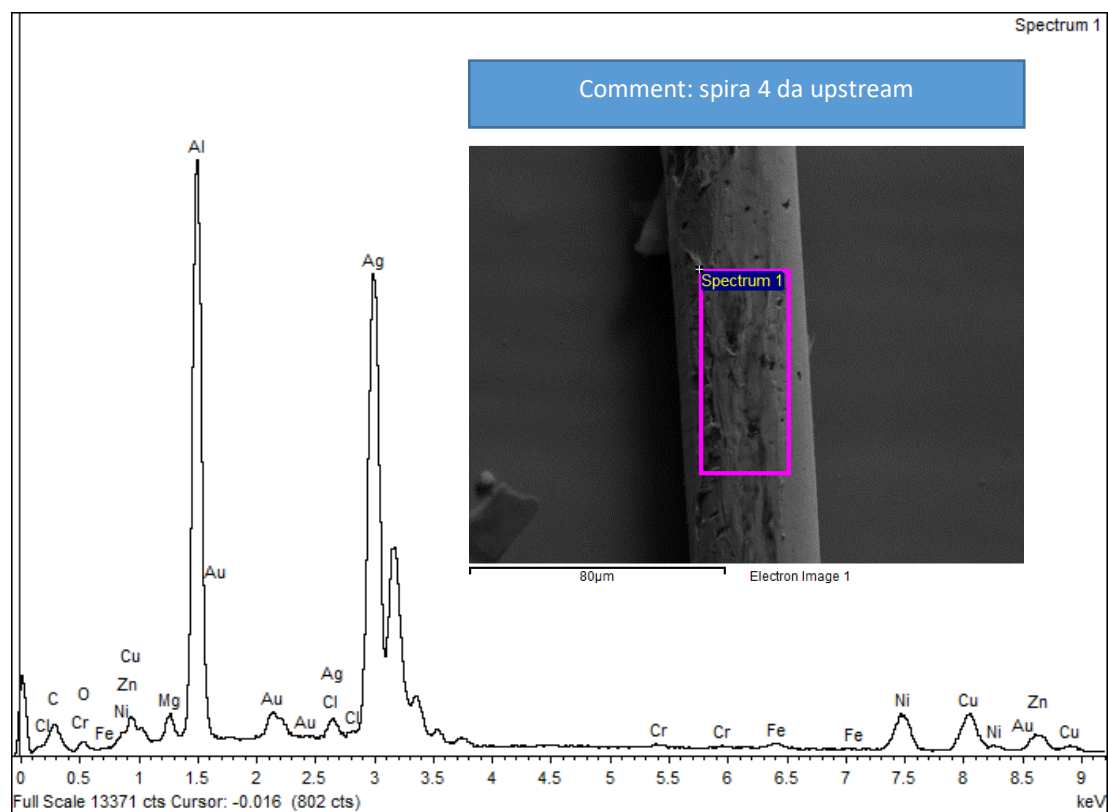
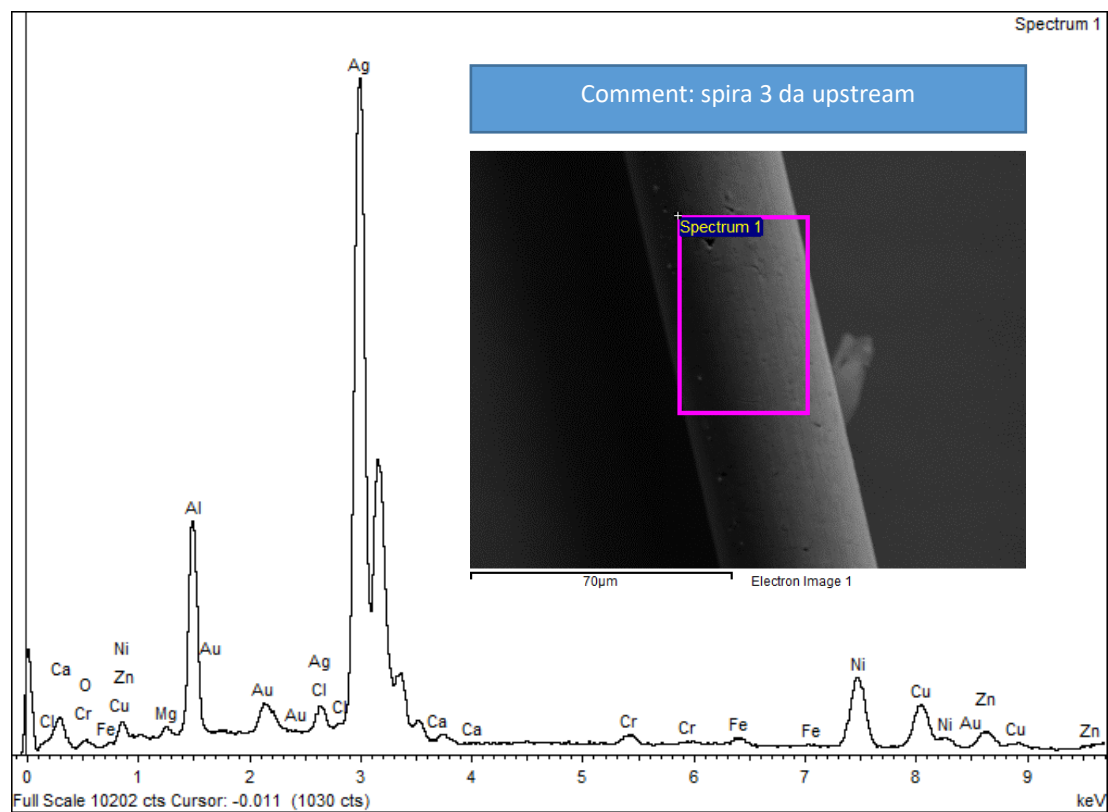


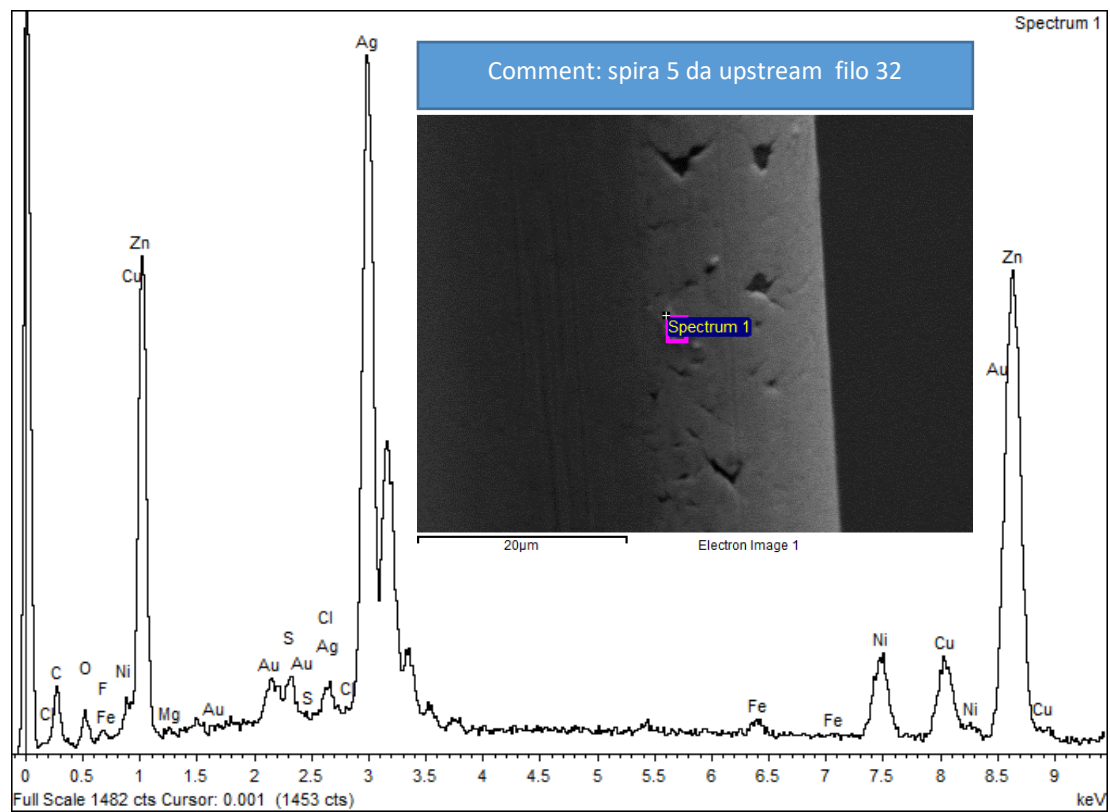
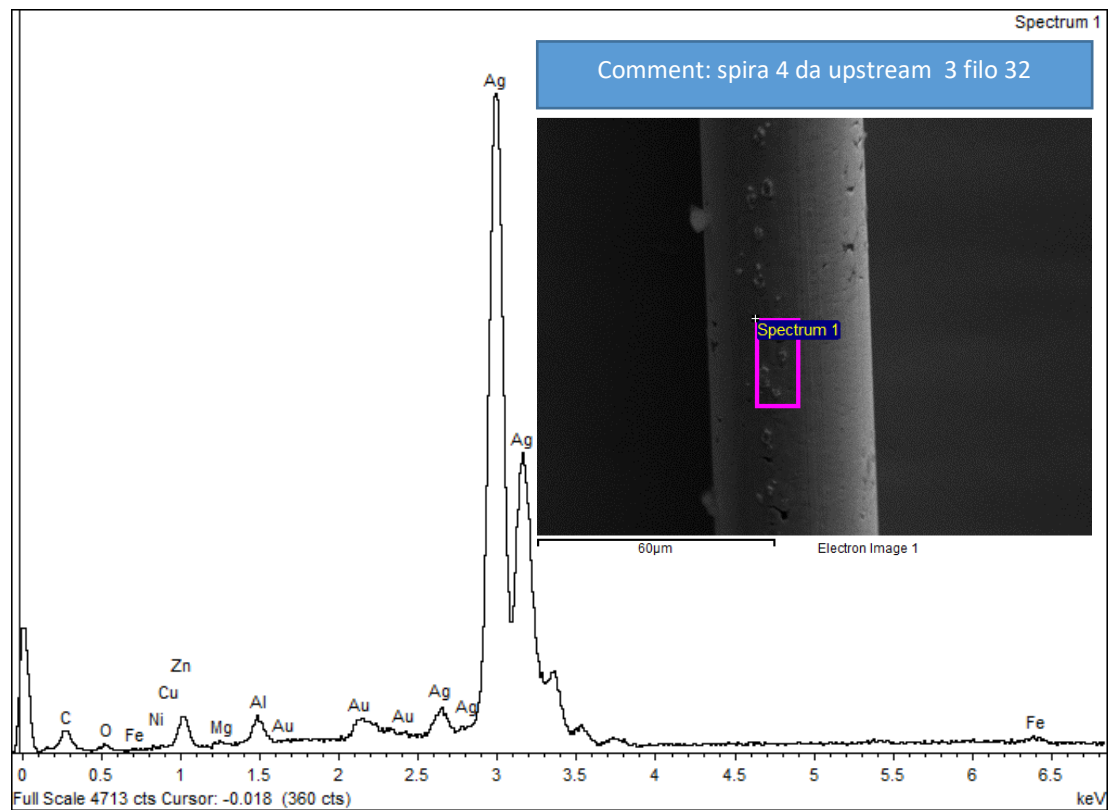
## Appendice D - Analisi filo 32

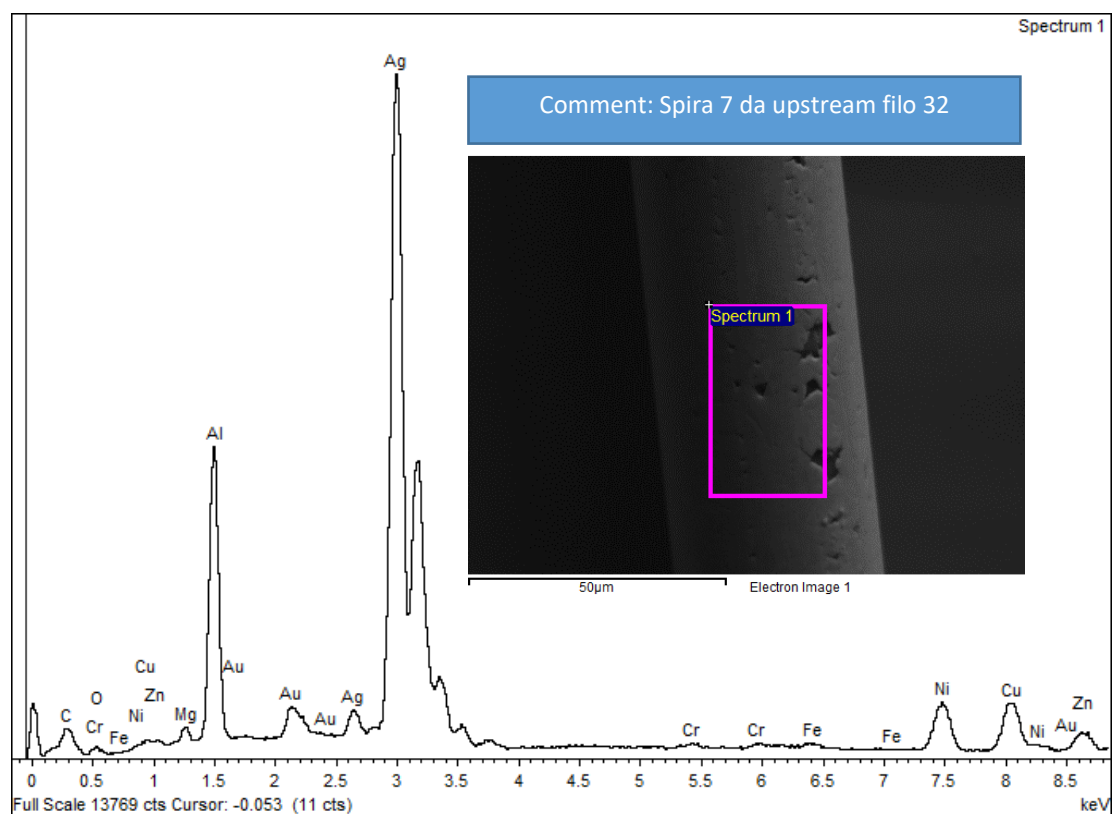
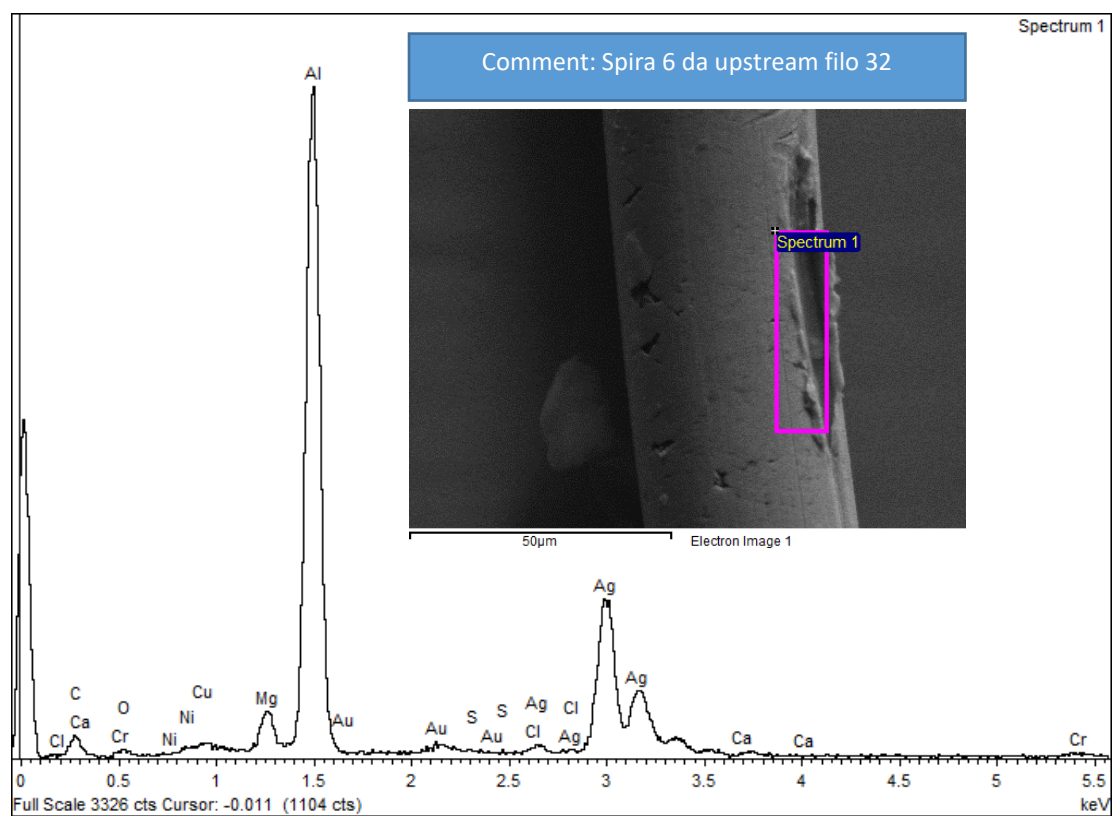


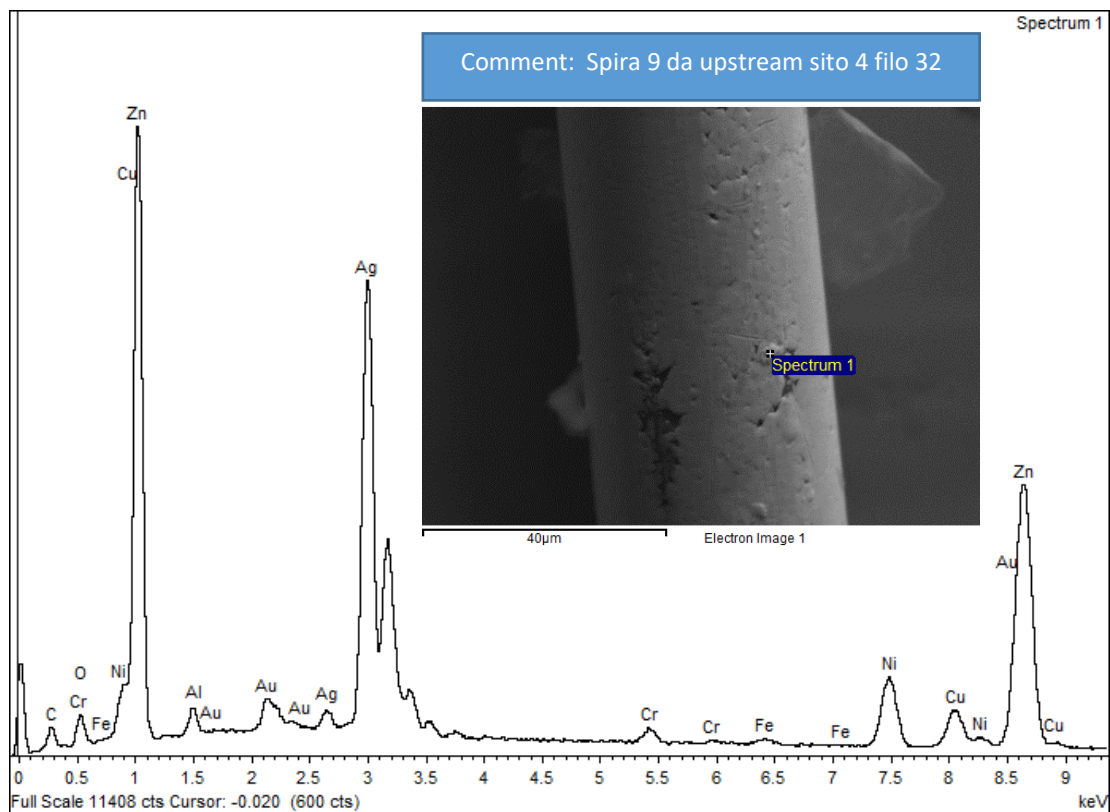
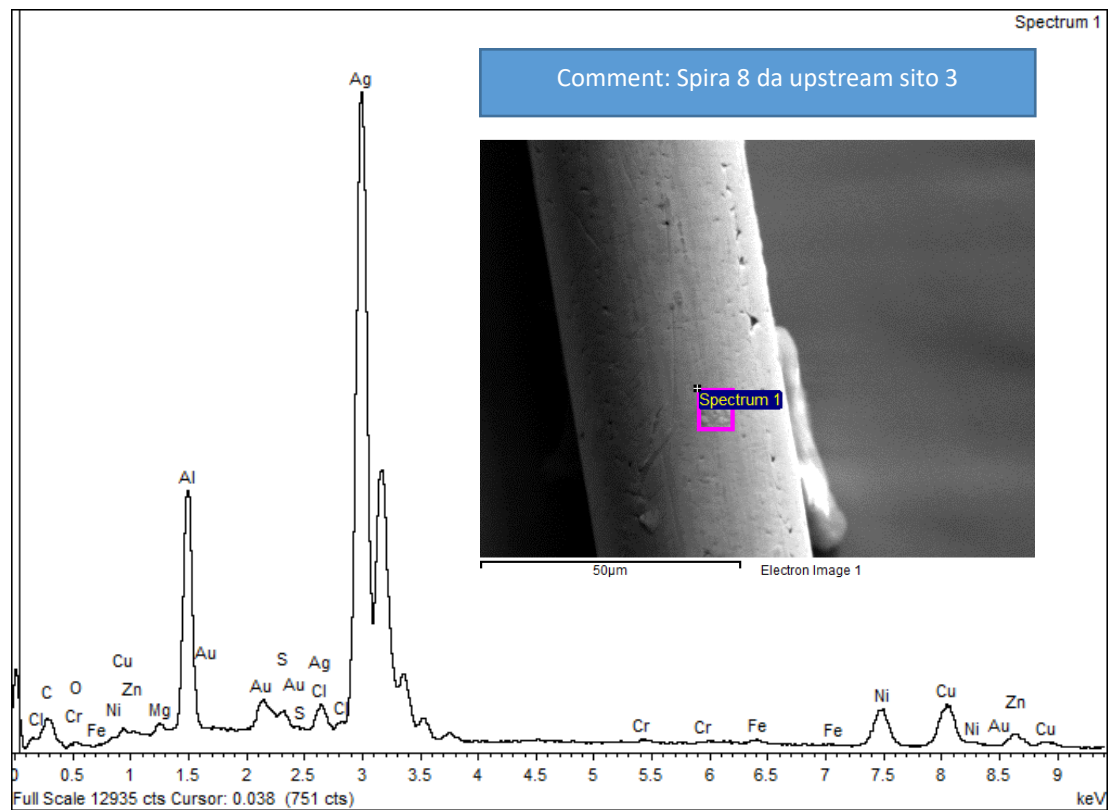


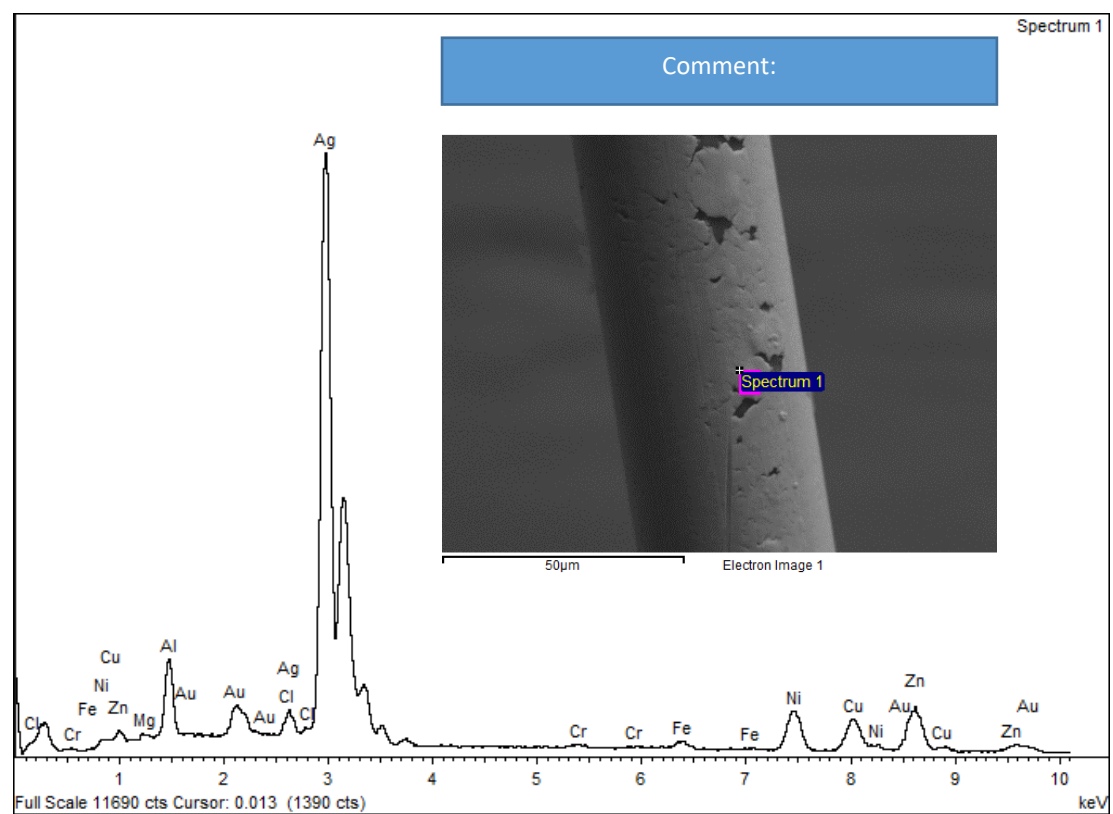
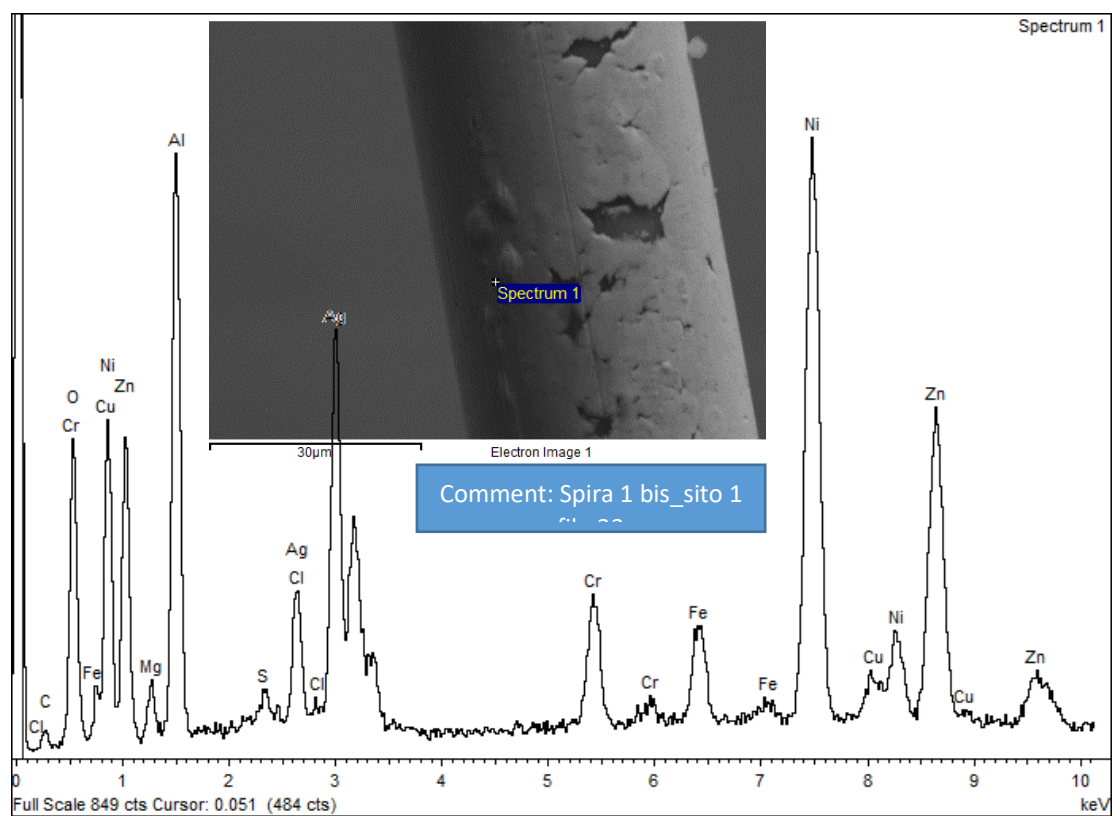






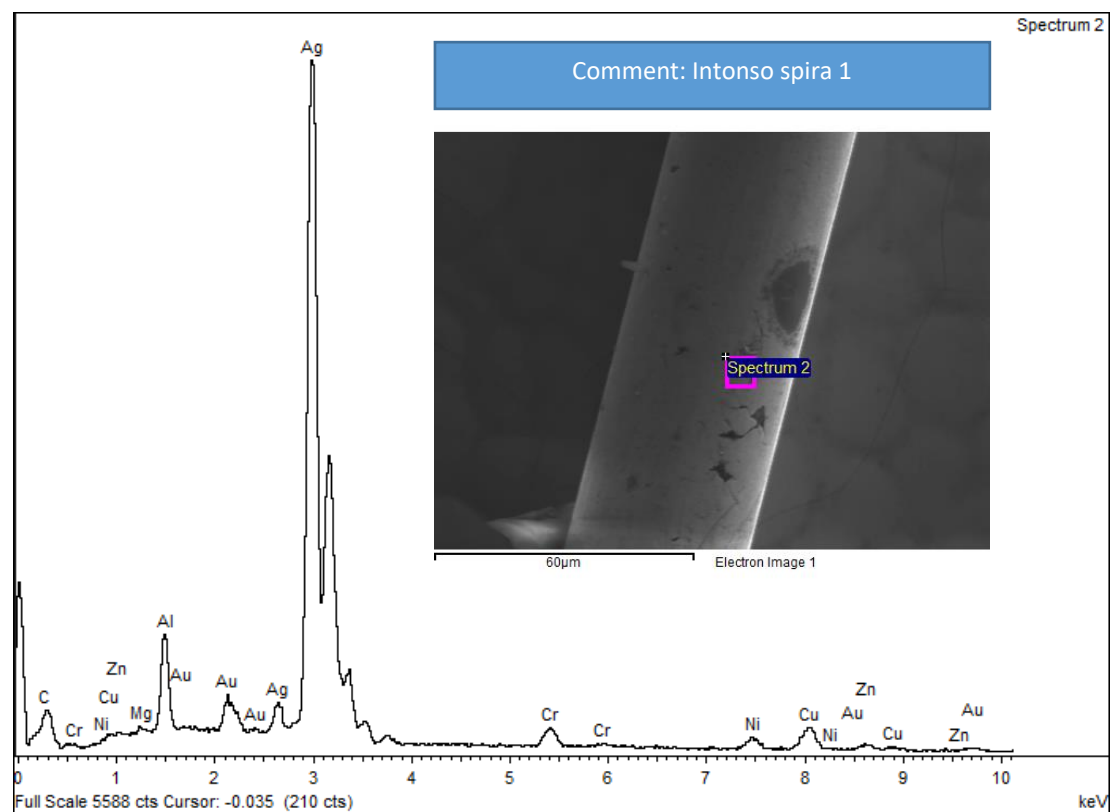
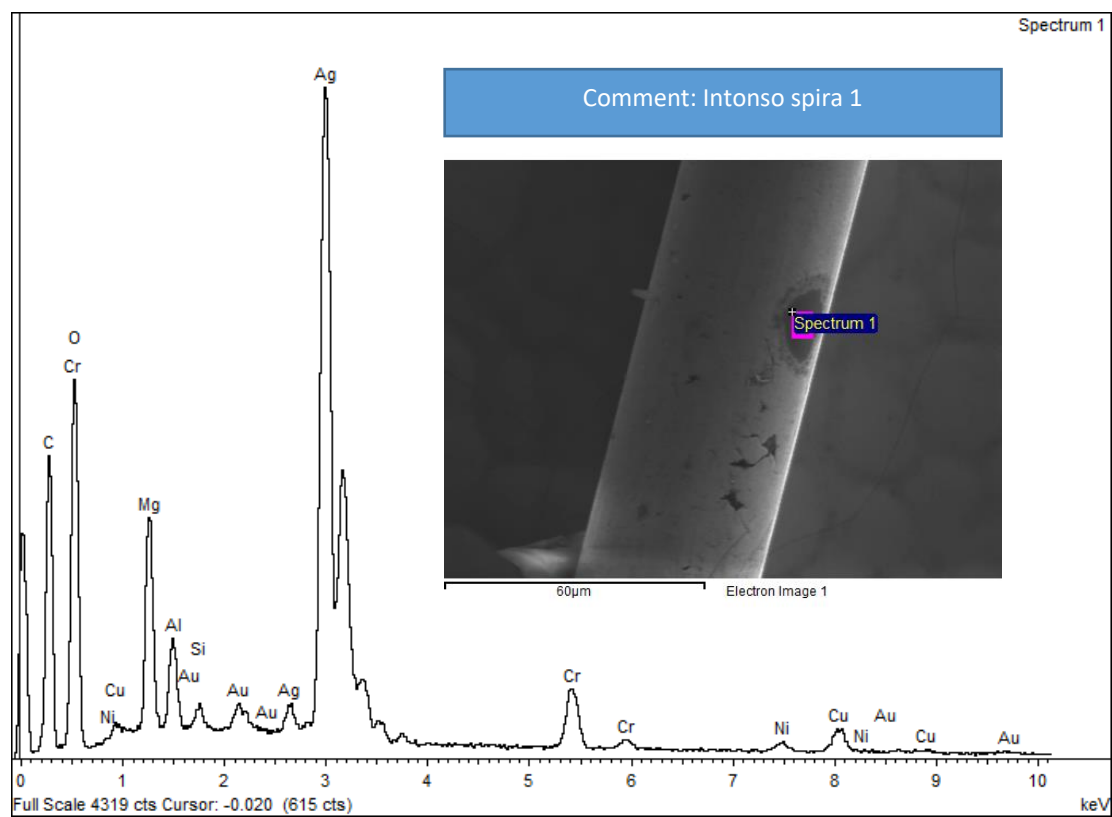


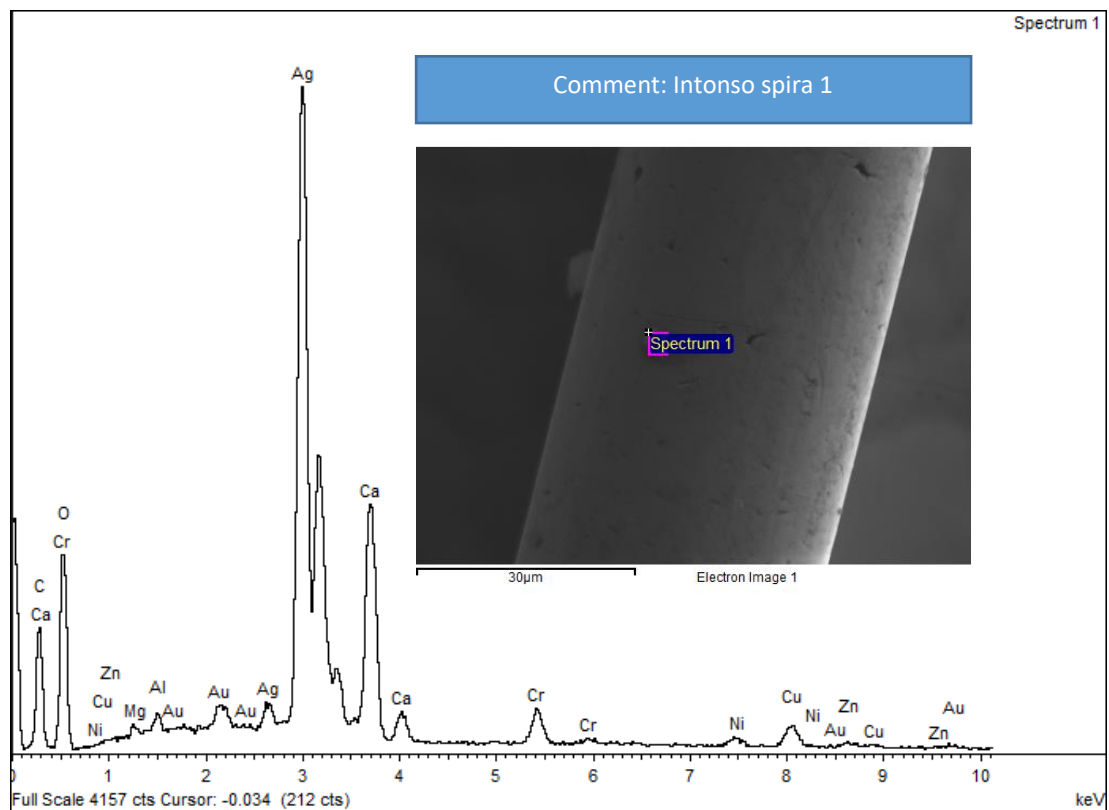
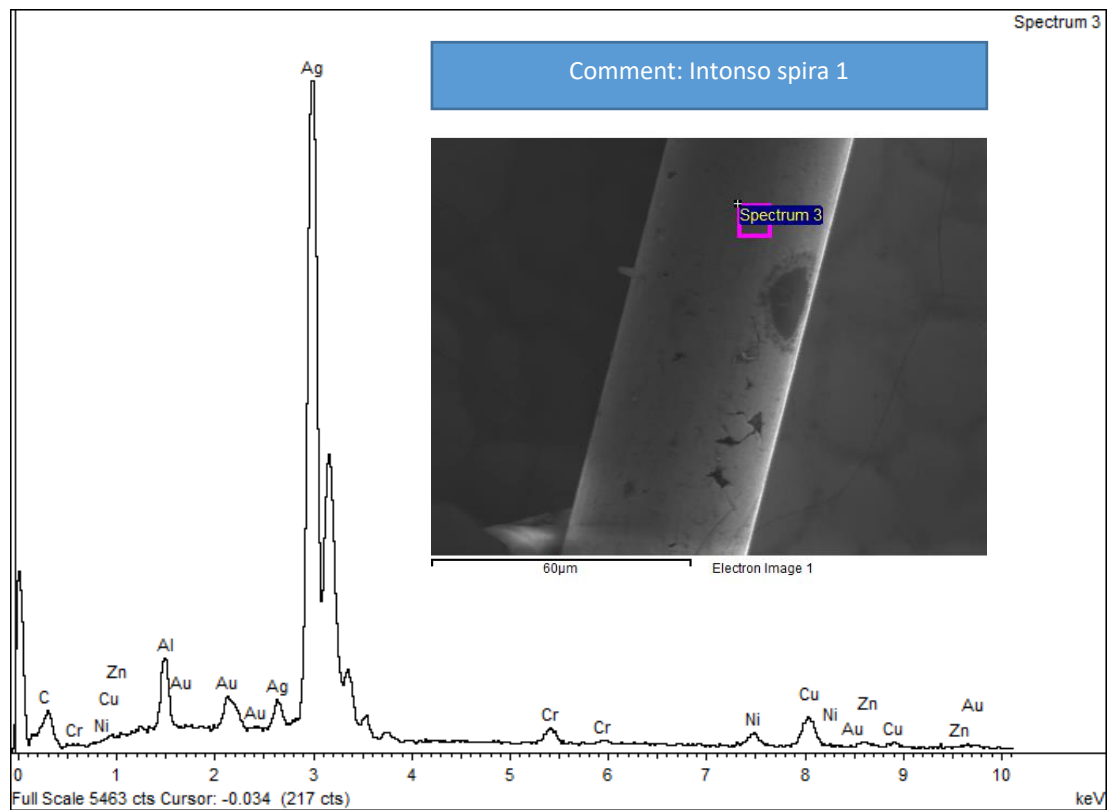




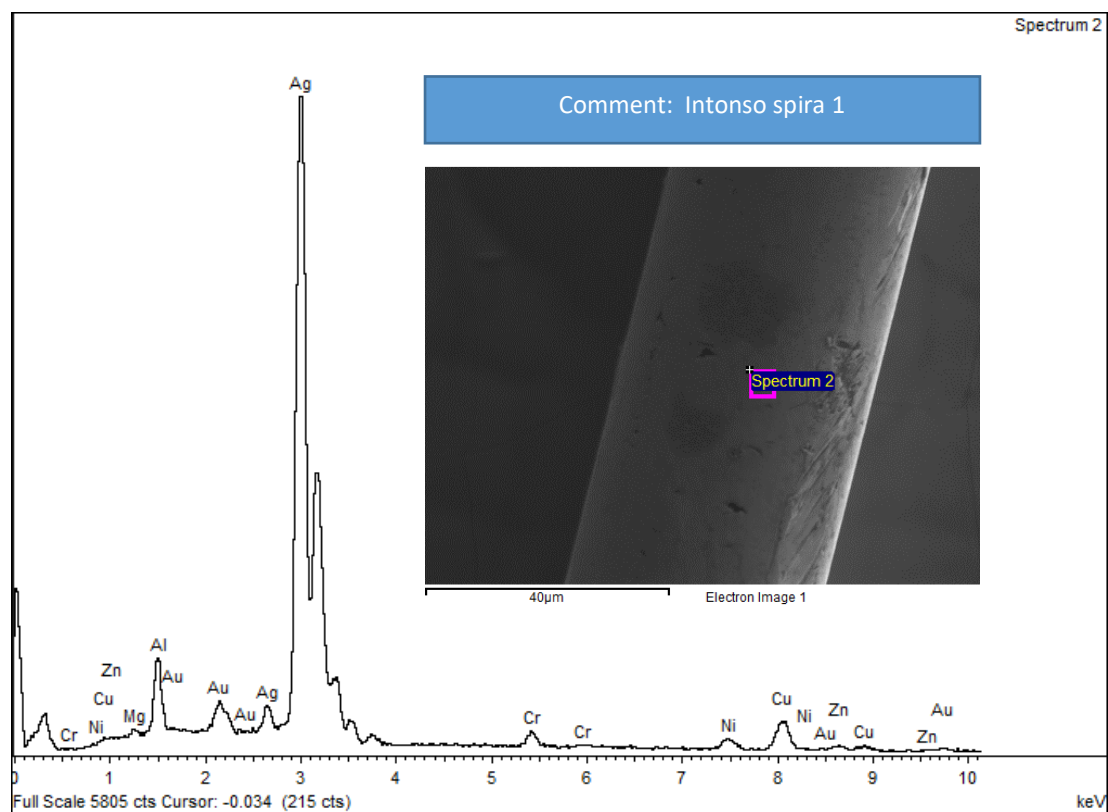
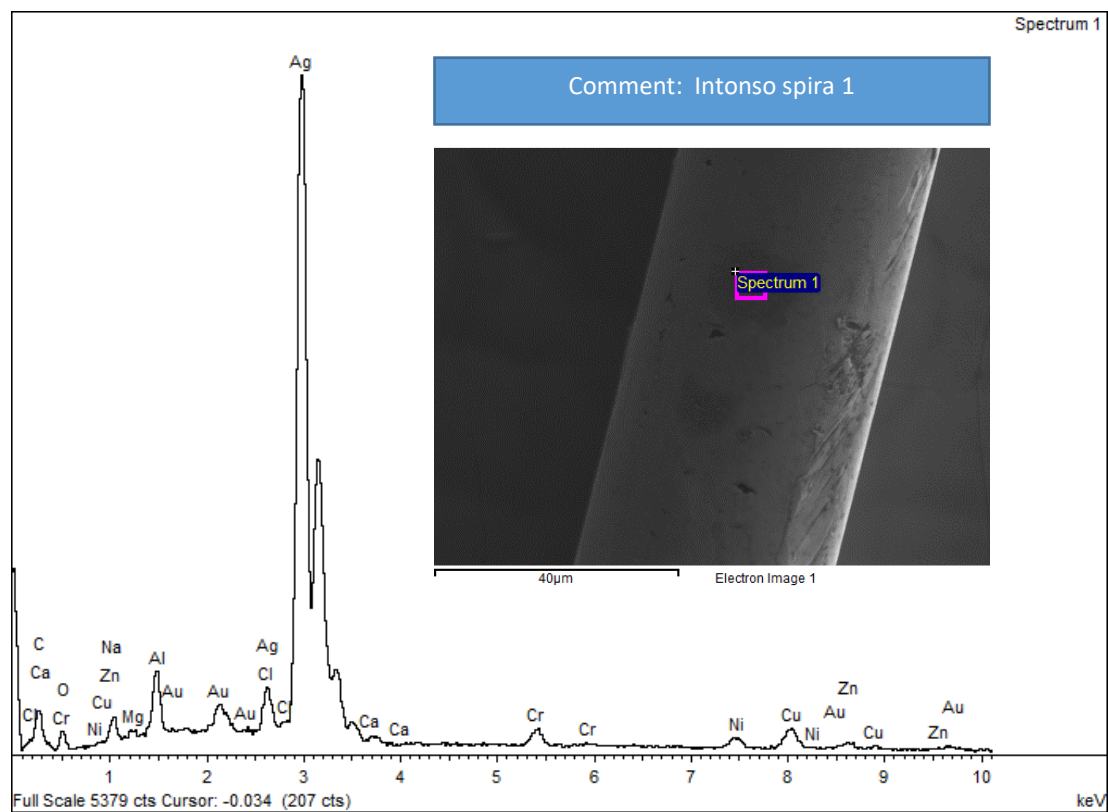


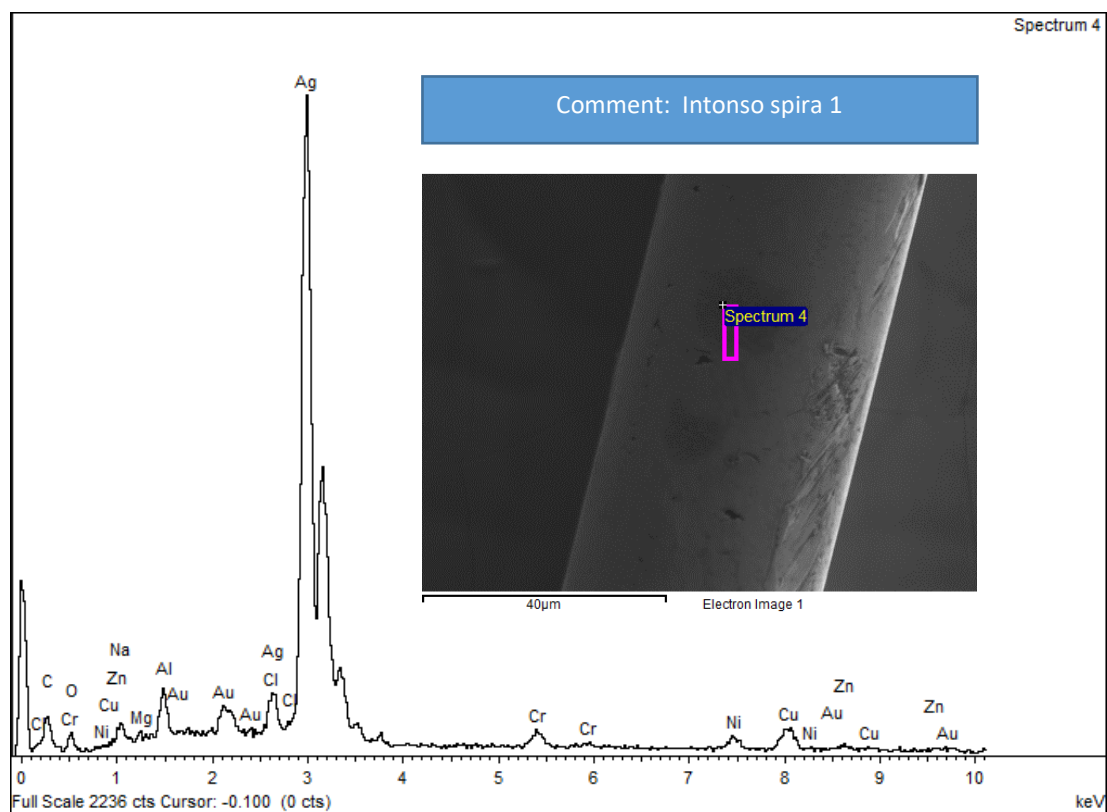
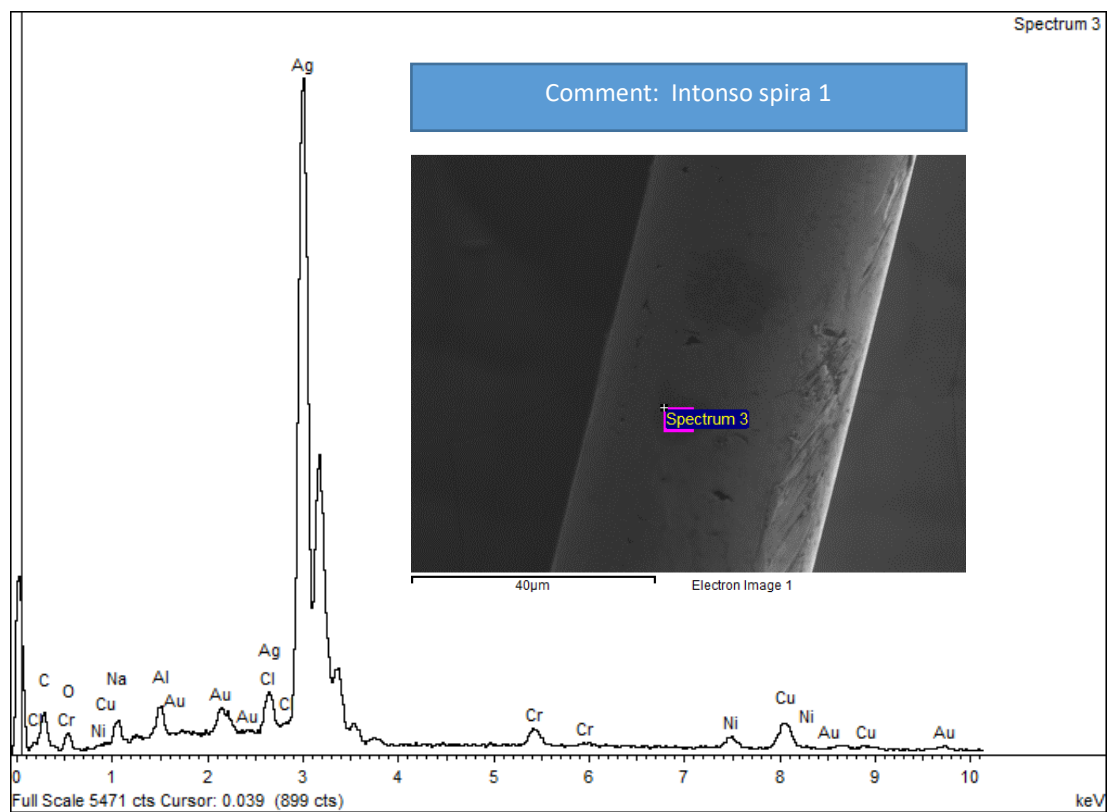
## Appendice E - Analisi filo intonso

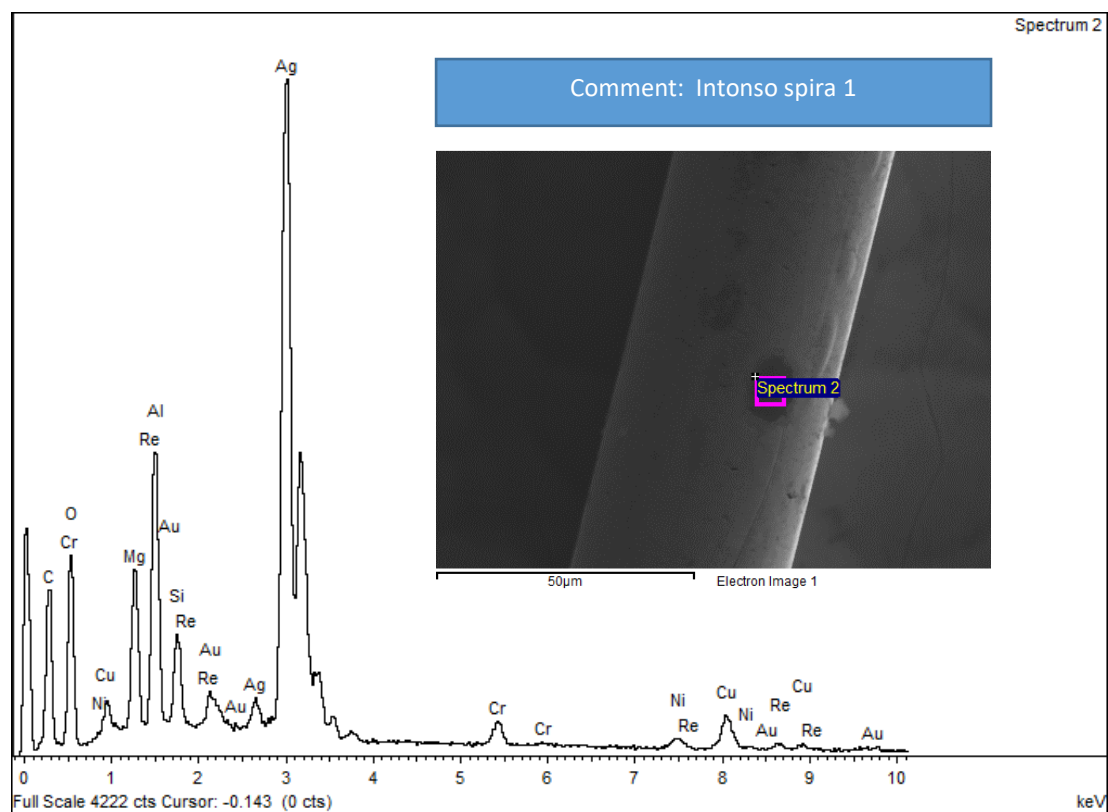
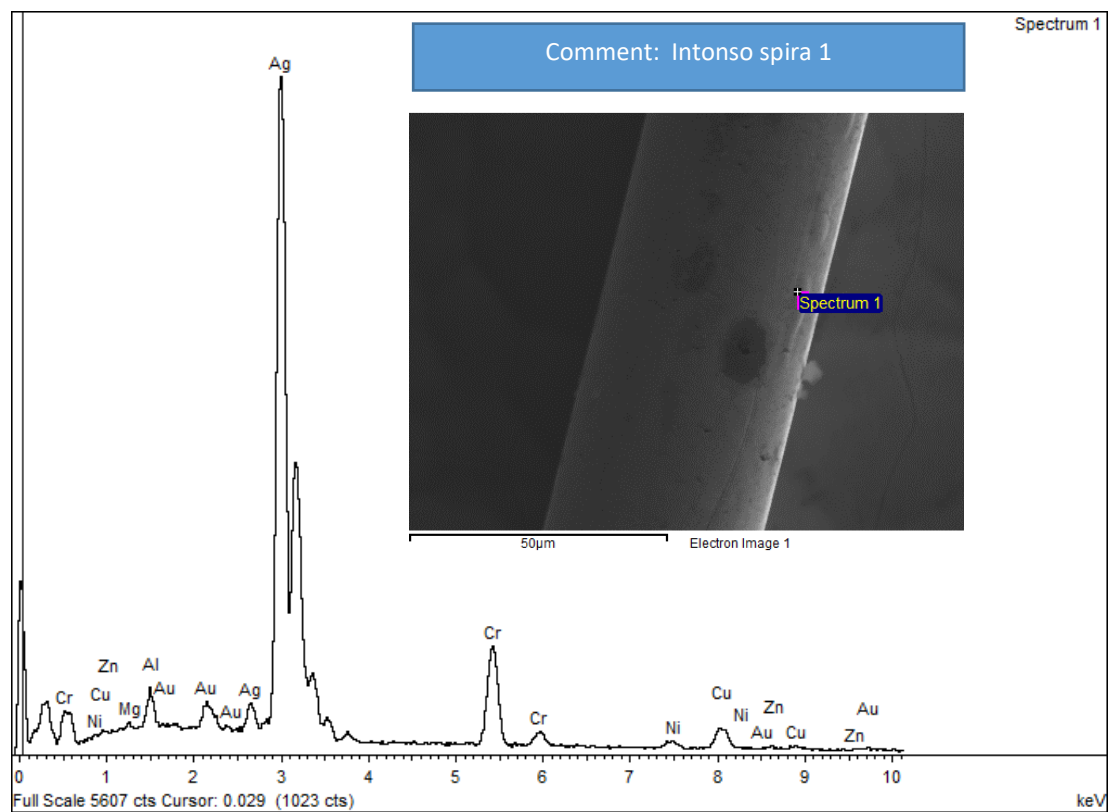


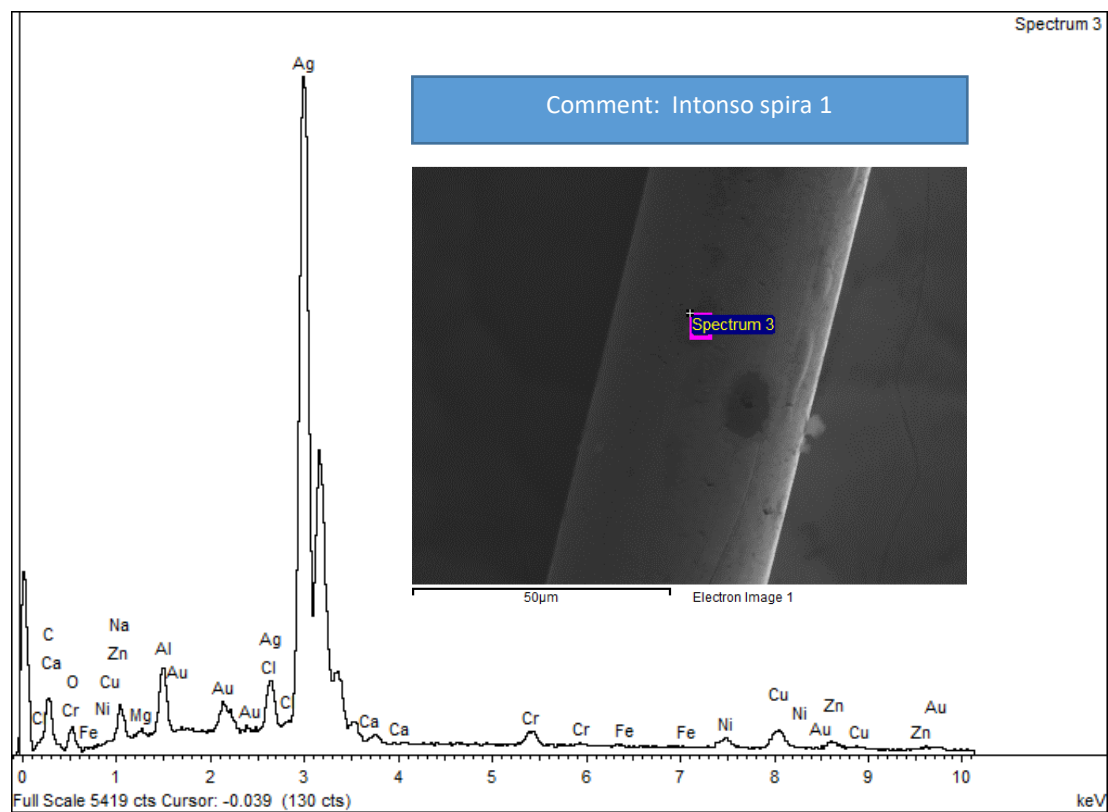


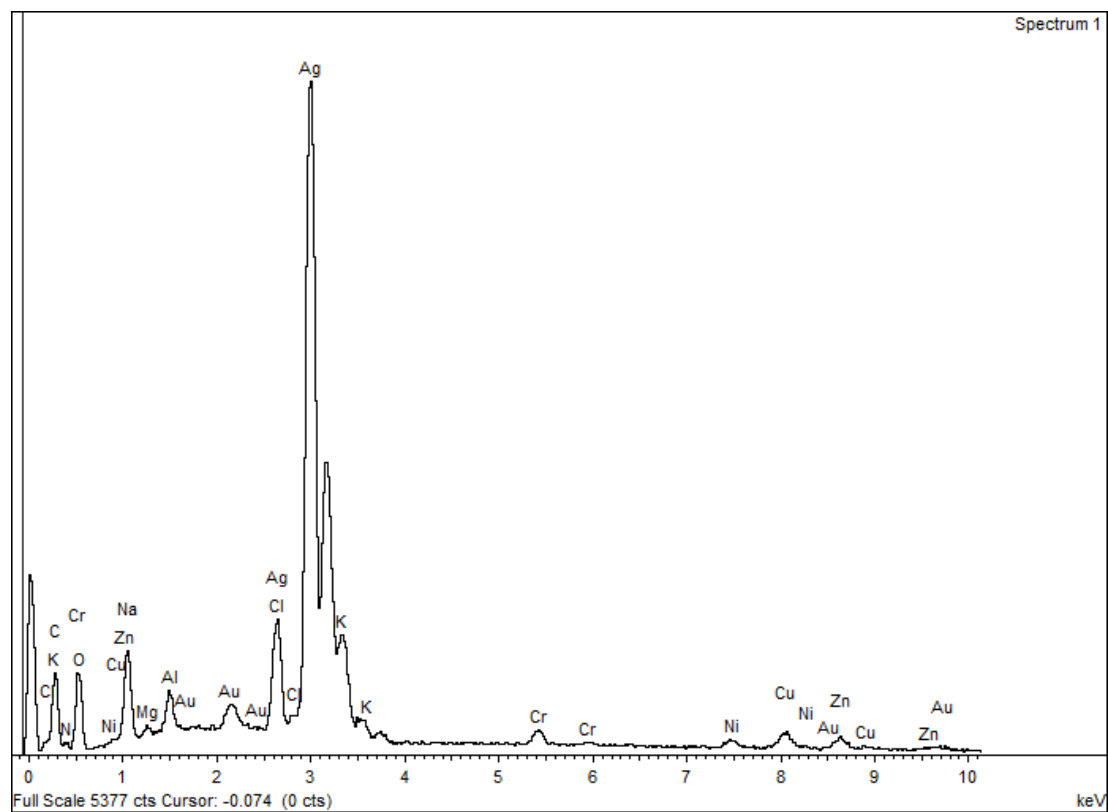








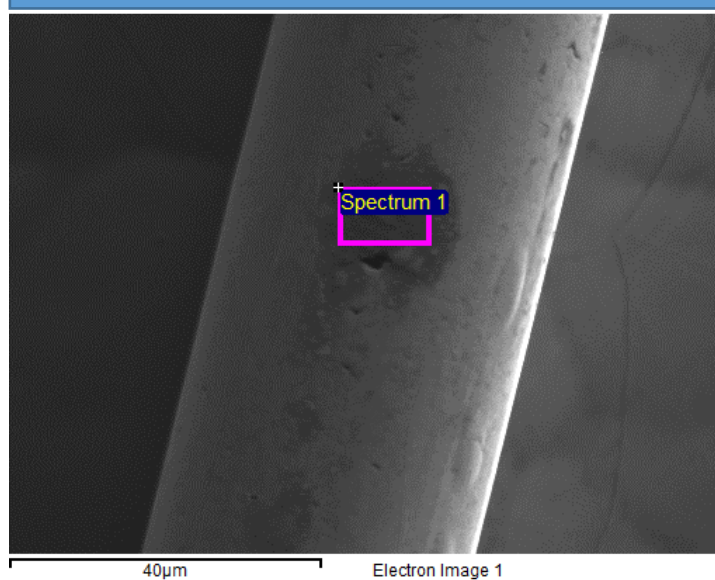


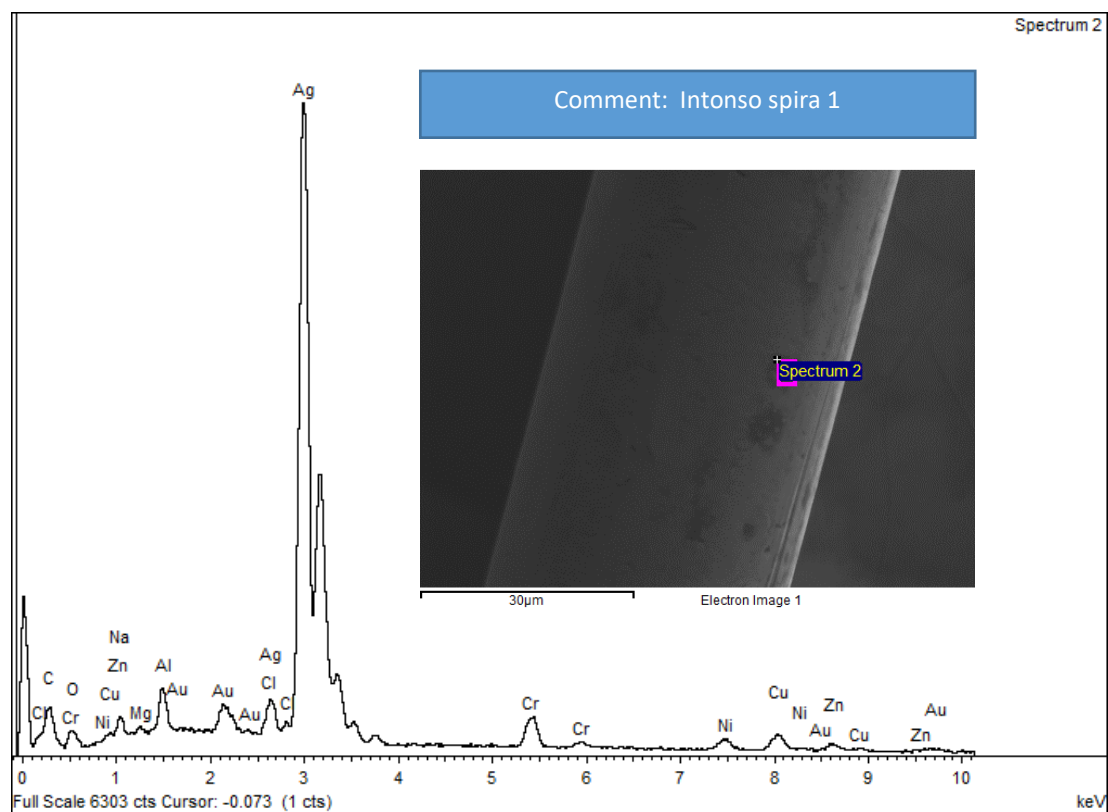
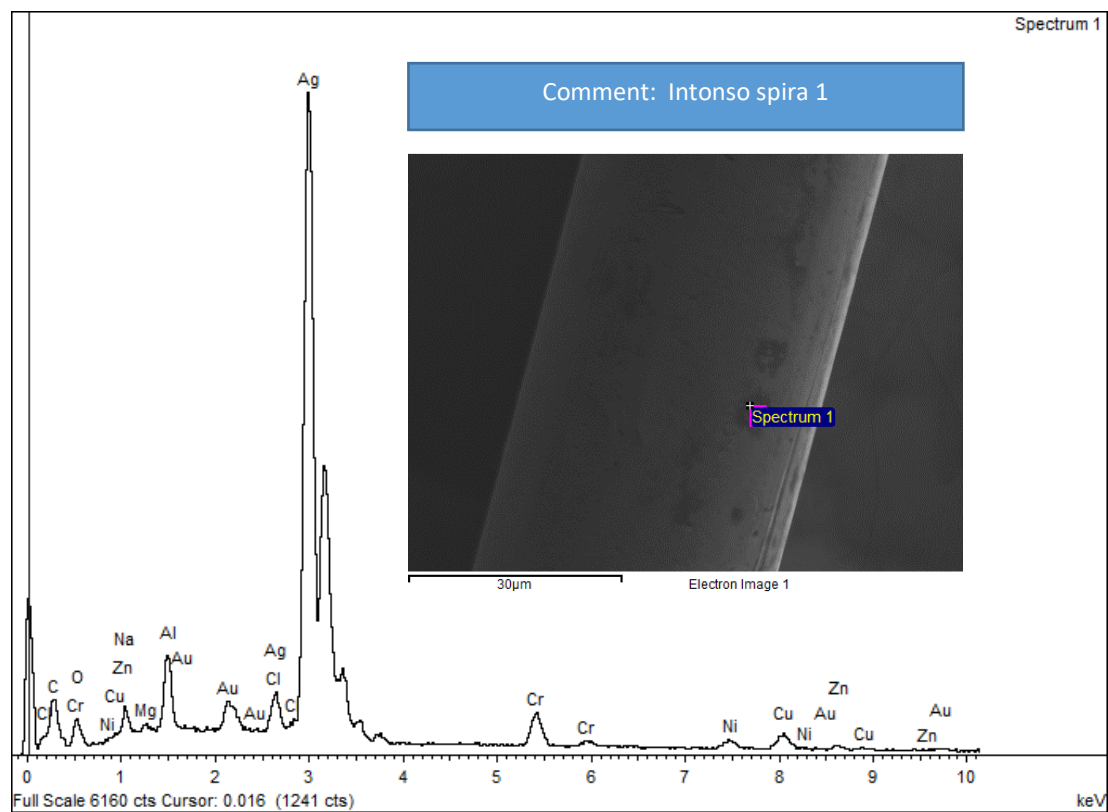


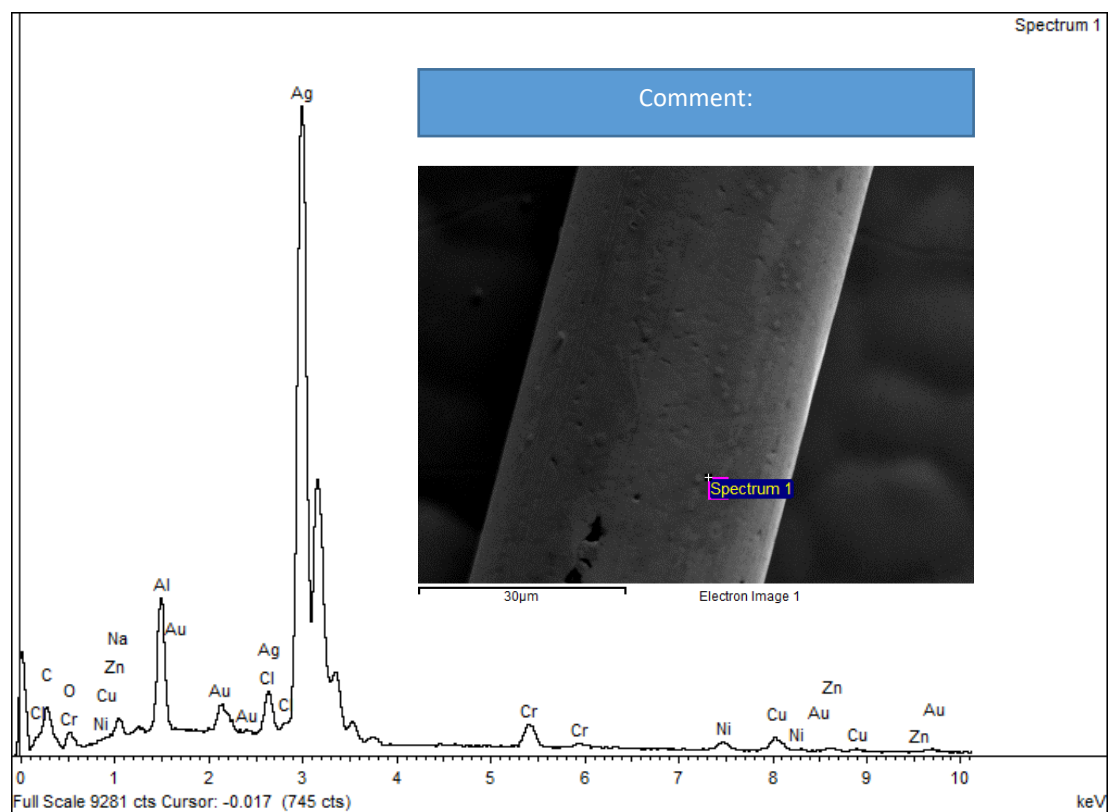
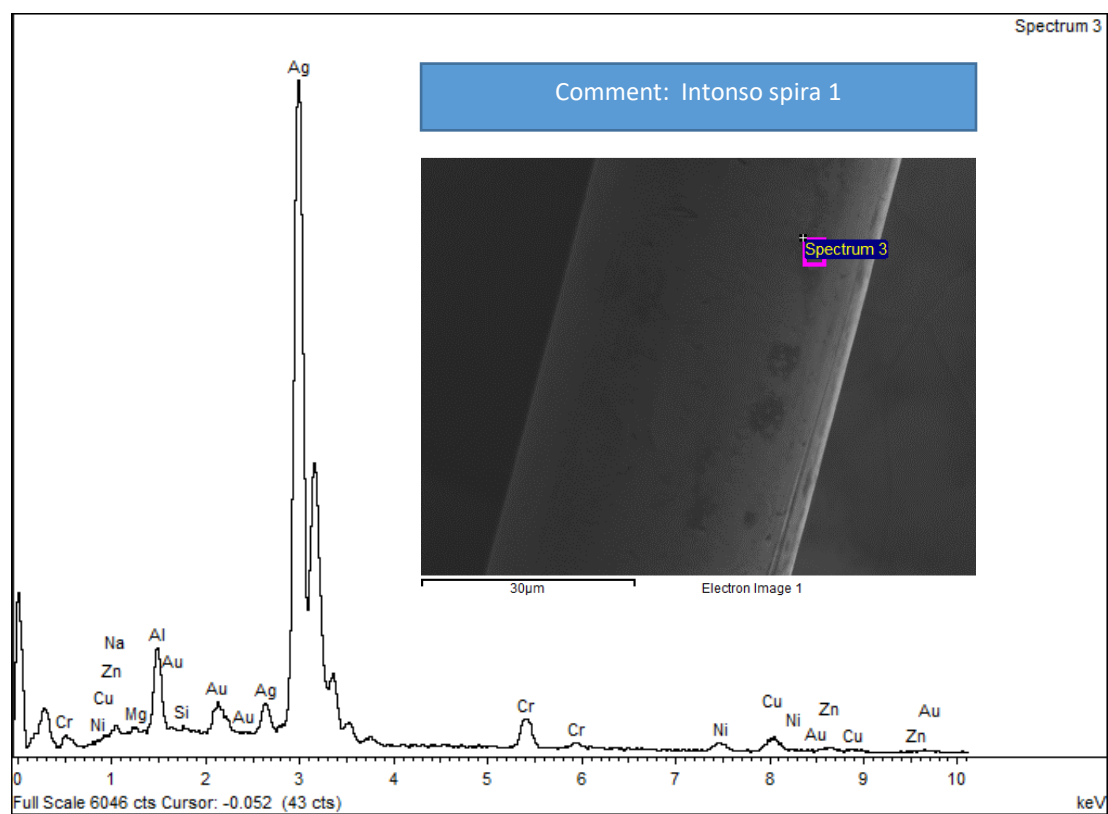
Peak possibly omitted : 6.368 keV

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 12.08   | 30.21   |
| N K     | 4.86    | 10.41   |
| O K     | 17.42   | 32.71   |
| Na K    | 3.93    | 5.13    |
| Mg K    | 0.24    | 0.29    |
| Al K    | 1.02    | 1.14    |
| Cl K    | 2.44    | 2.06    |
| K K     | 1.32    | 1.02    |
| Cr K    | 1.03    | 0.60    |
| Ni K    | 1.08    | 0.55    |
| Cu K    | 2.57    | 1.22    |
| Zn K    | 2.42    | 1.11    |
| Ag L    | 47.60   | 13.25   |
| Au M    | 2.00    | 0.30    |
| Totals  | 100.00  |         |

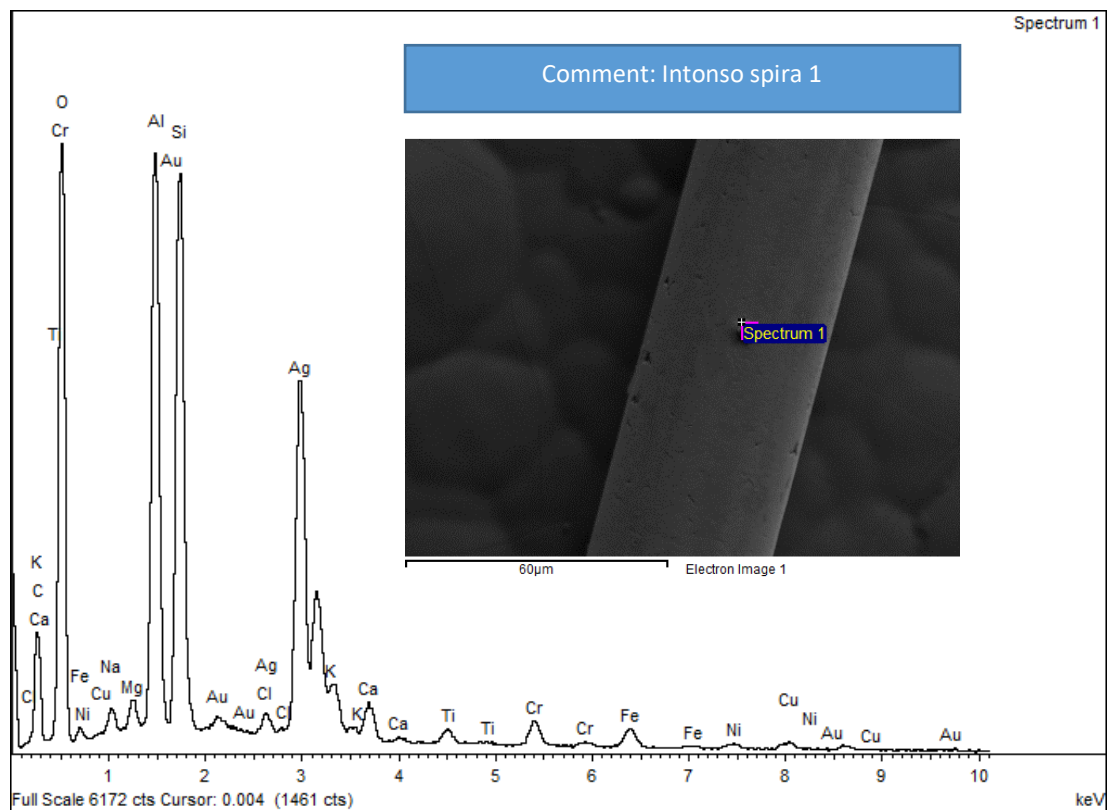
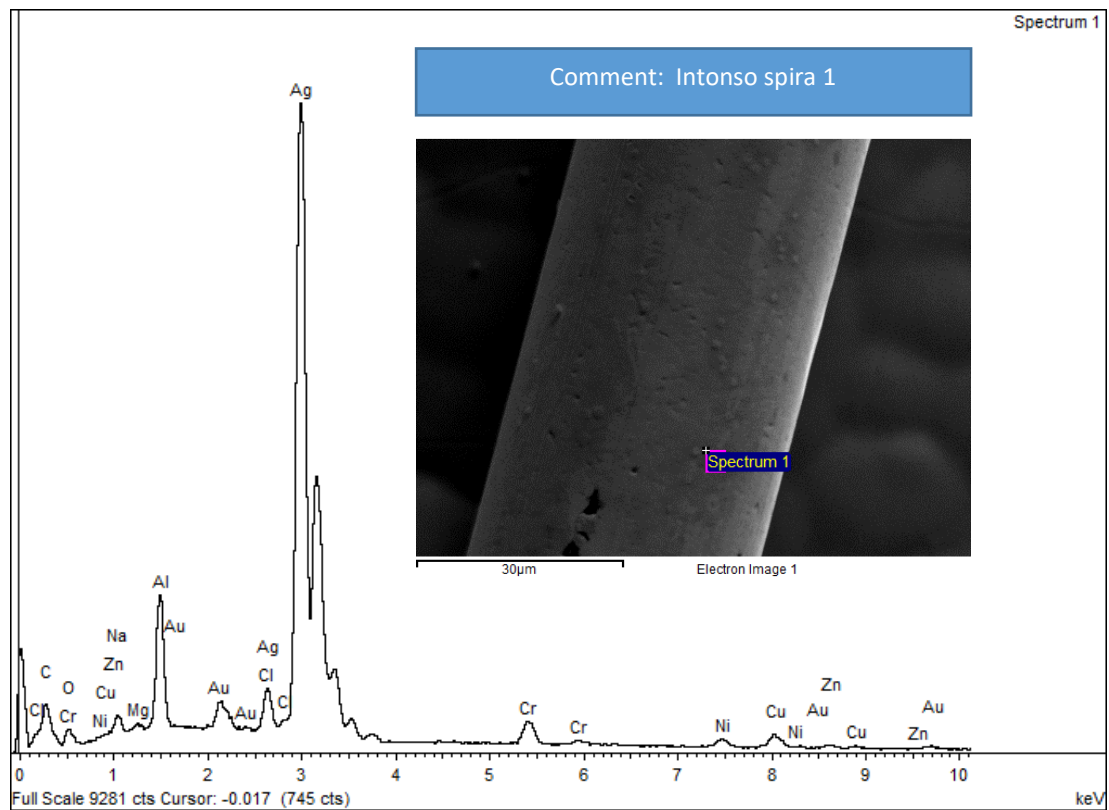
Comment: Intonso spira 1



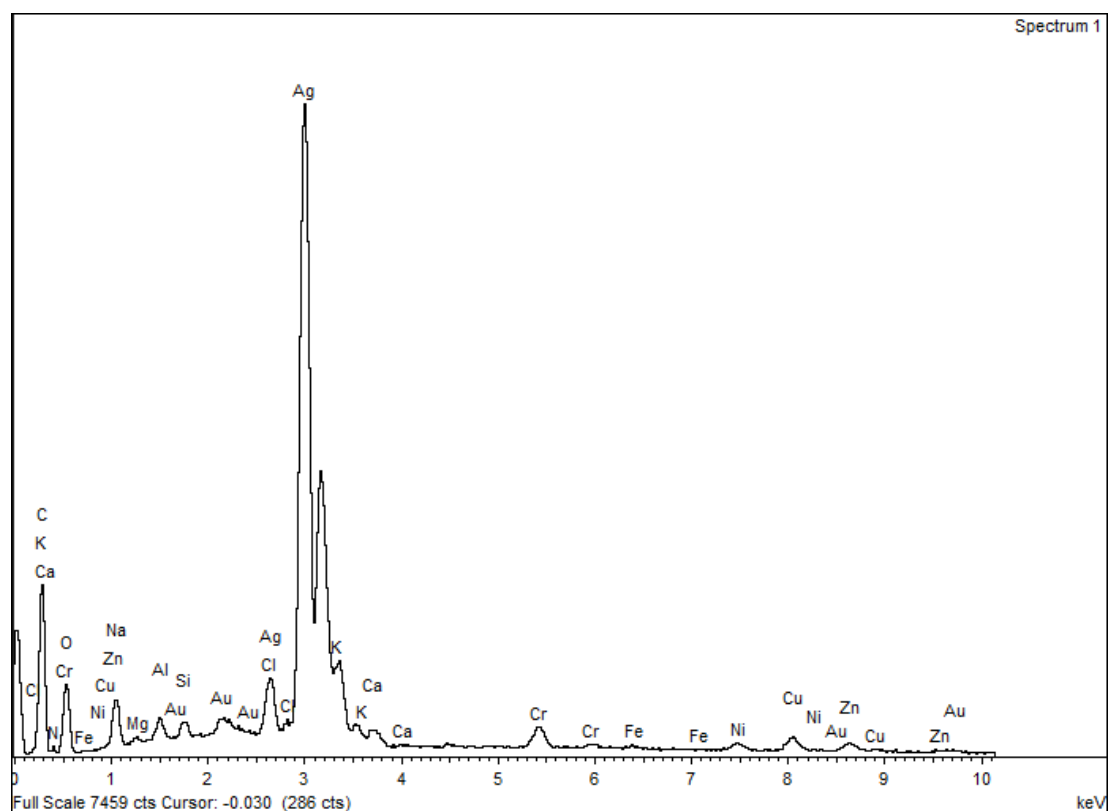








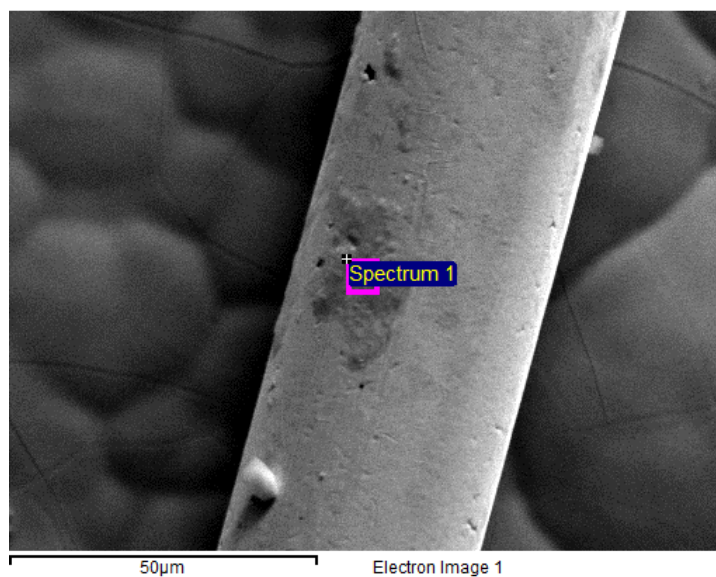


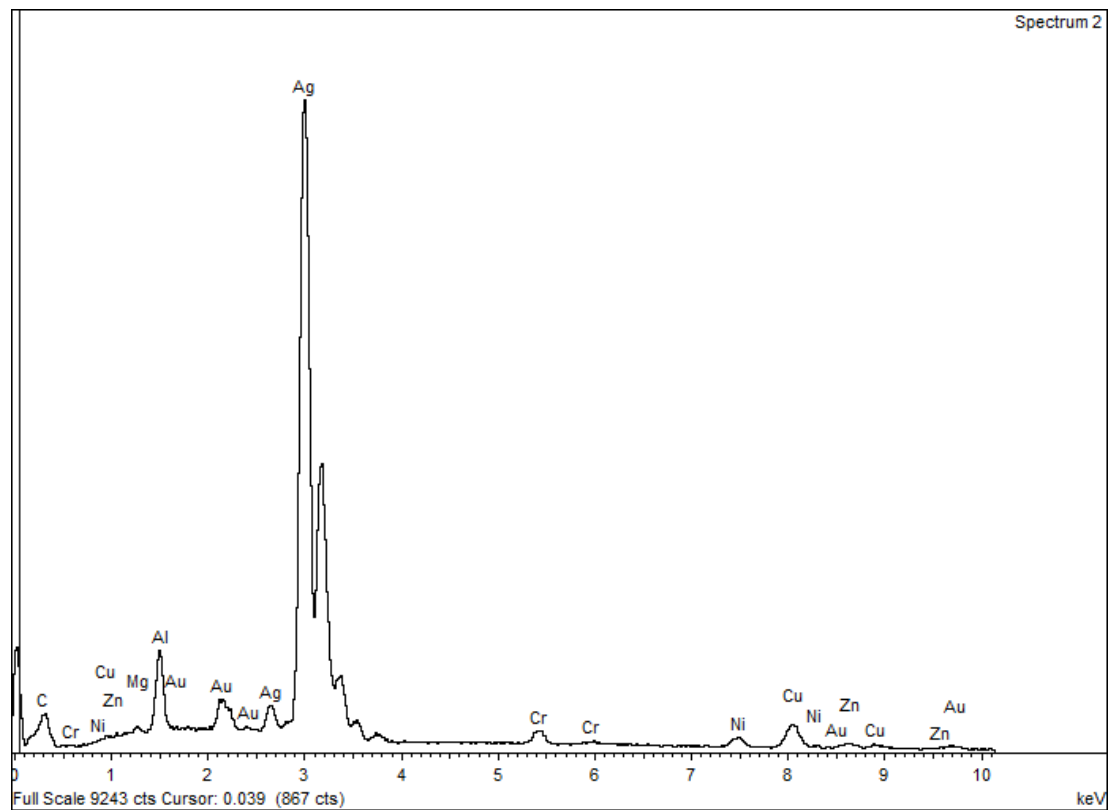


Peak possibly omitted : 4.501 keV

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 23.85   | 51.49   |
| N K     | 2.28    | 4.22    |
| O K     | 16.00   | 25.94   |
| Na K    | 1.77    | 2.00    |
| Mg K    | 0.16    | 0.17    |
| Al K    | 0.50    | 0.48    |
| Si K    | 0.35    | 0.32    |
| Cl K    | 1.00    | 0.73    |
| K K     | 0.58    | 0.39    |
| Ca K    | 0.47    | 0.31    |
| Cr K    | 1.57    | 0.78    |
| Fe K    | 0.21    | 0.10    |
| Ni K    | 0.97    | 0.43    |
| Cu K    | 2.25    | 0.92    |
| Zn K    | 1.92    | 0.76    |
| Ag L    | 44.97   | 10.81   |
| Au M    | 1.15    | 0.15    |
| Totals  | 100.00  |         |

Comment: Intonso spira 1

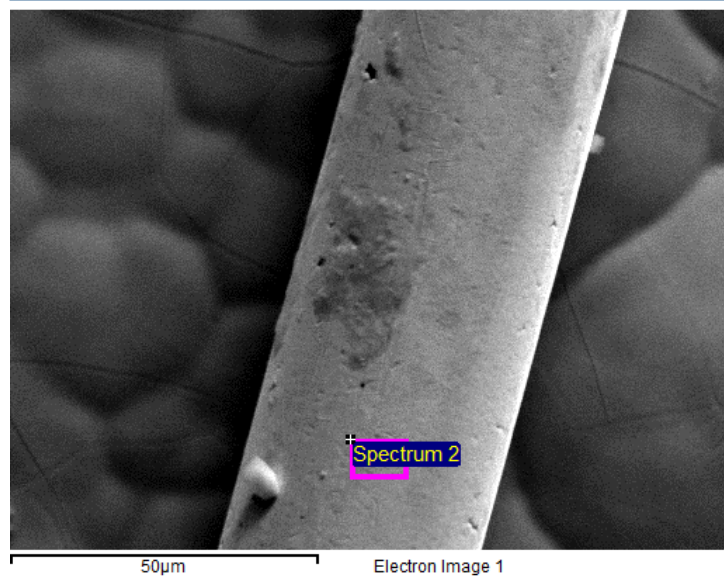


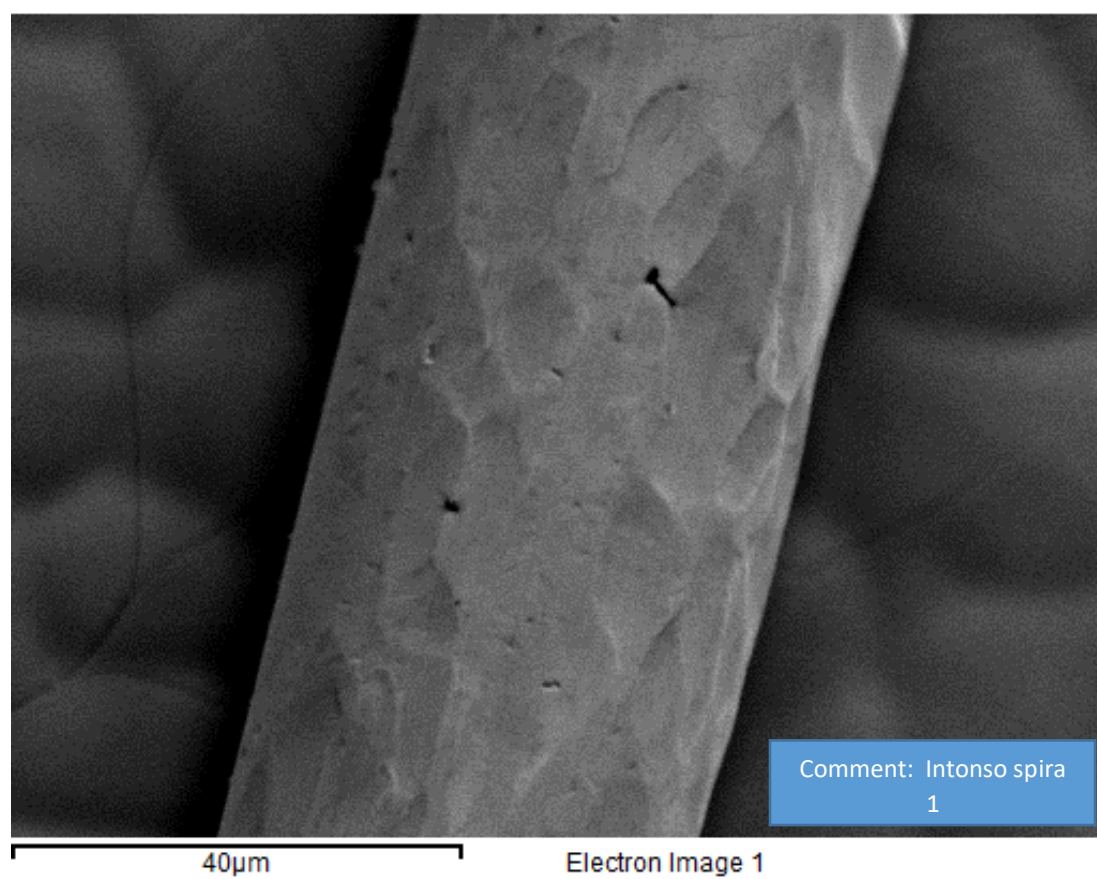
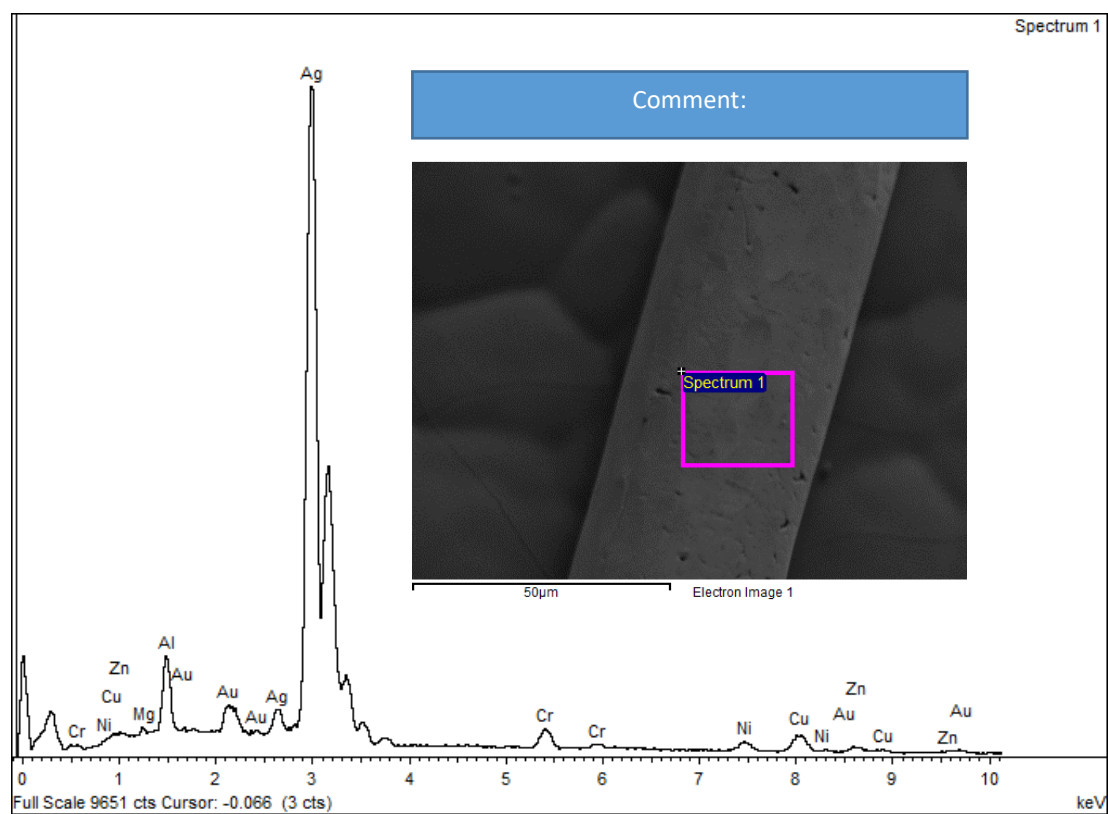


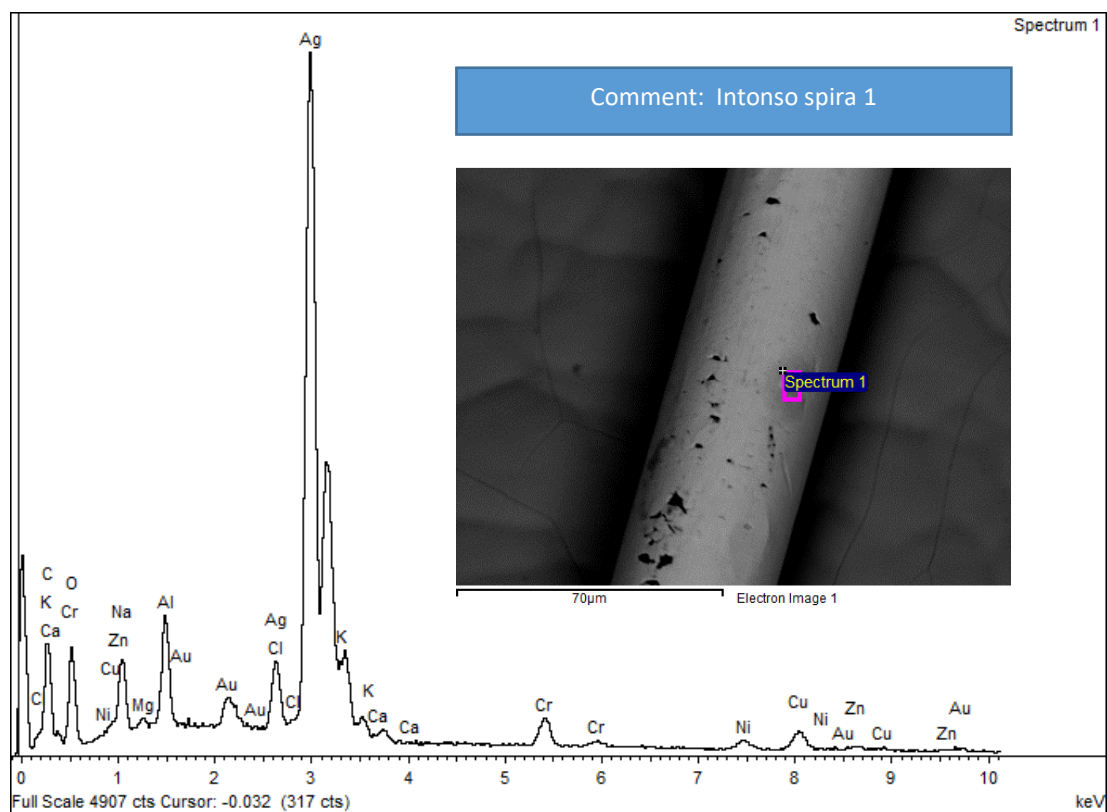
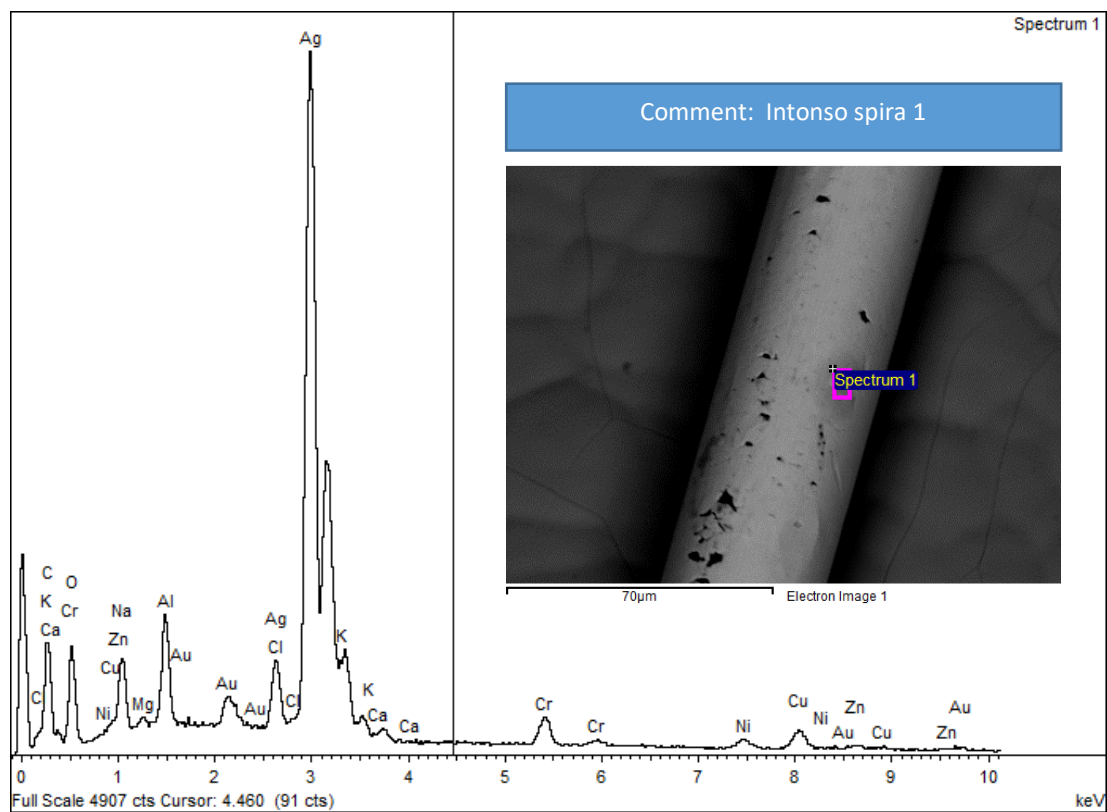
No peaks omitted

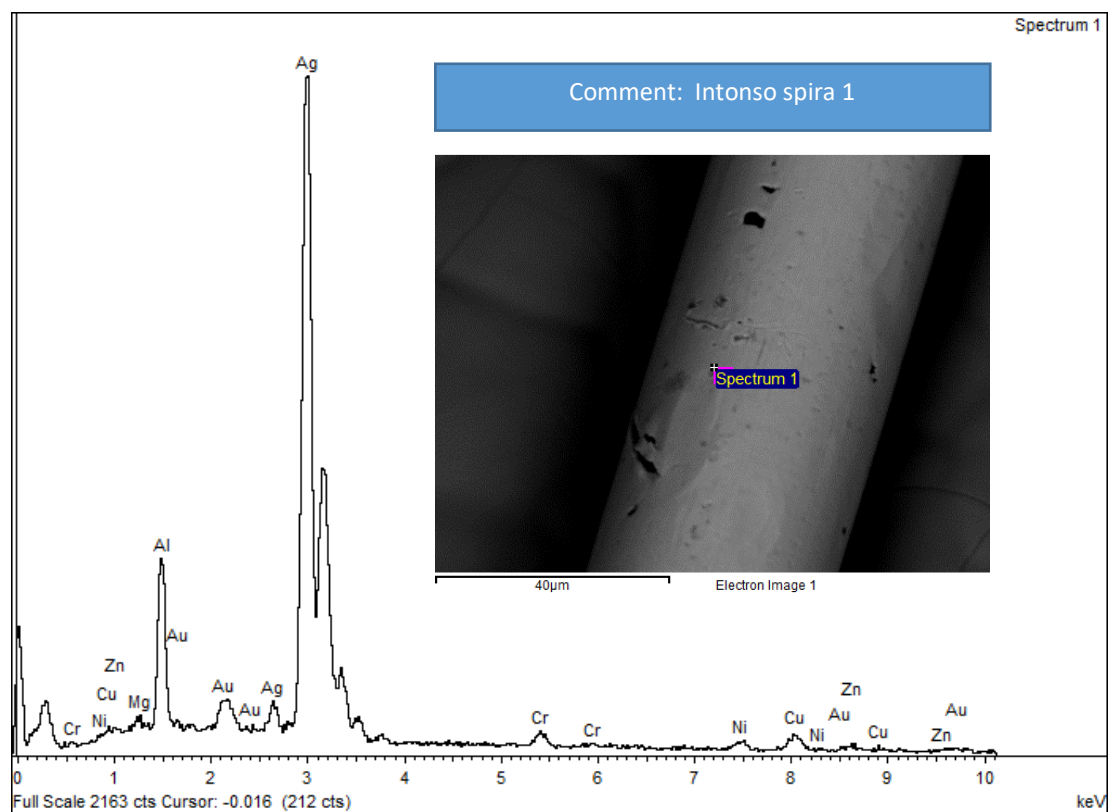
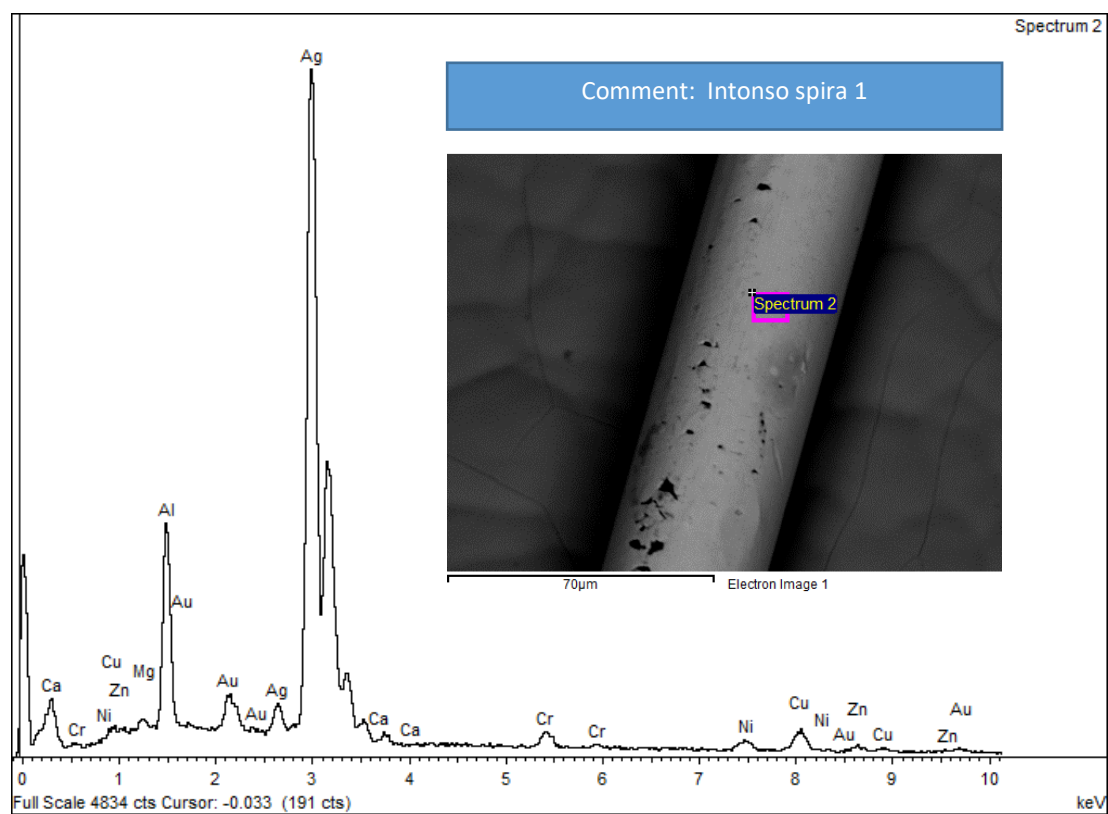
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 0.63    | 4.55    |
| Mg K    | 0.41    | 1.45    |
| Al K    | 3.83    | 12.29   |
| Cr K    | 1.66    | 2.77    |
| Ni K    | 2.07    | 3.05    |
| Cu K    | 6.31    | 8.59    |
| Zn K    | 1.44    | 1.91    |
| Ag L    | 78.91   | 63.31   |
| Au M    | 4.74    | 2.08    |
| Totals  | 100.00  |         |

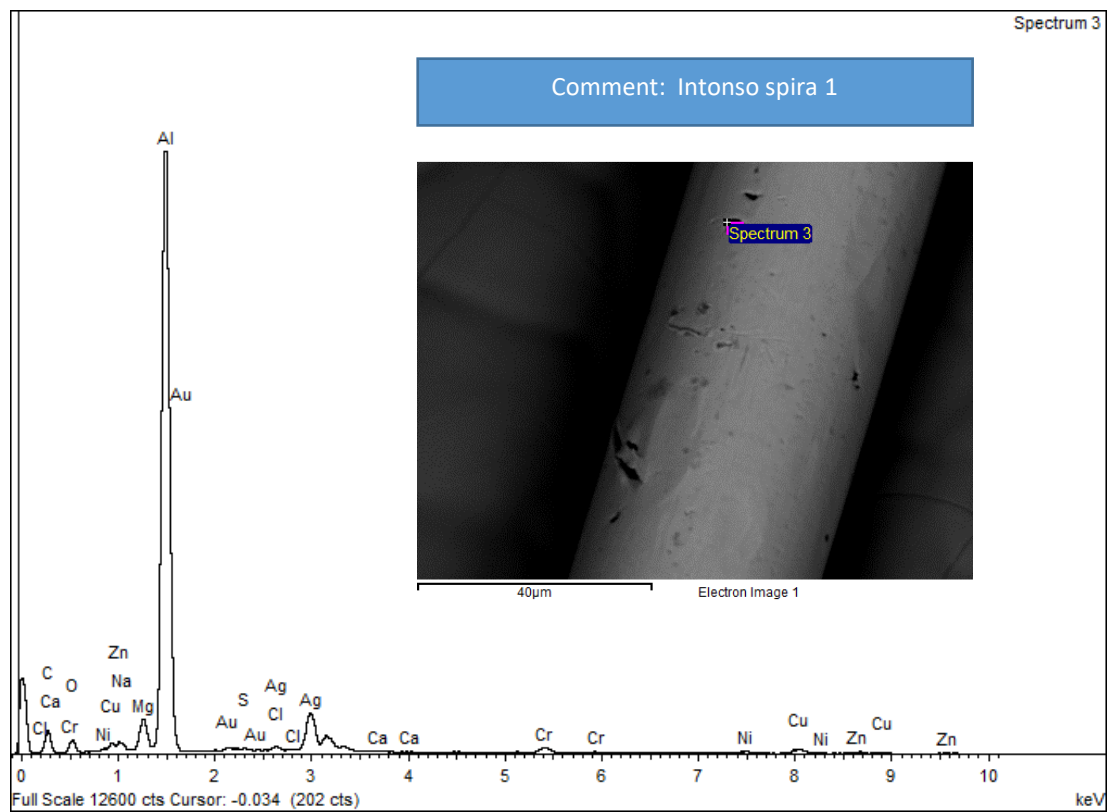
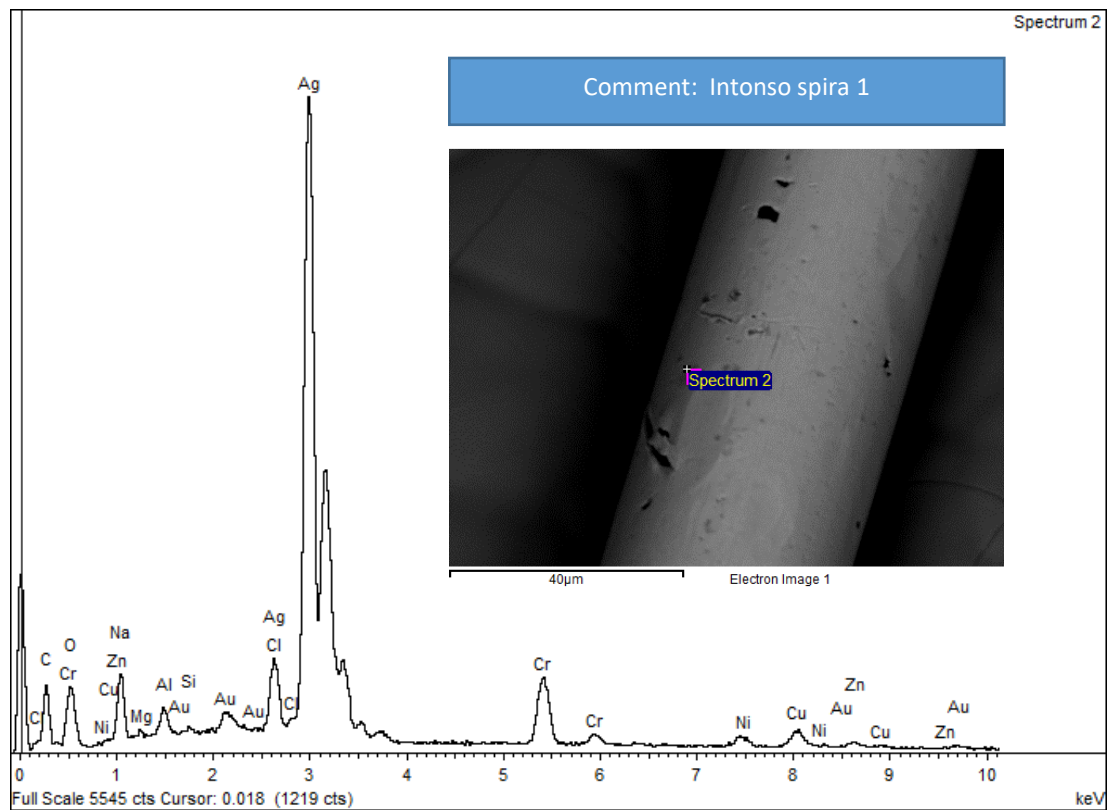
Comment: Intonso spira 1



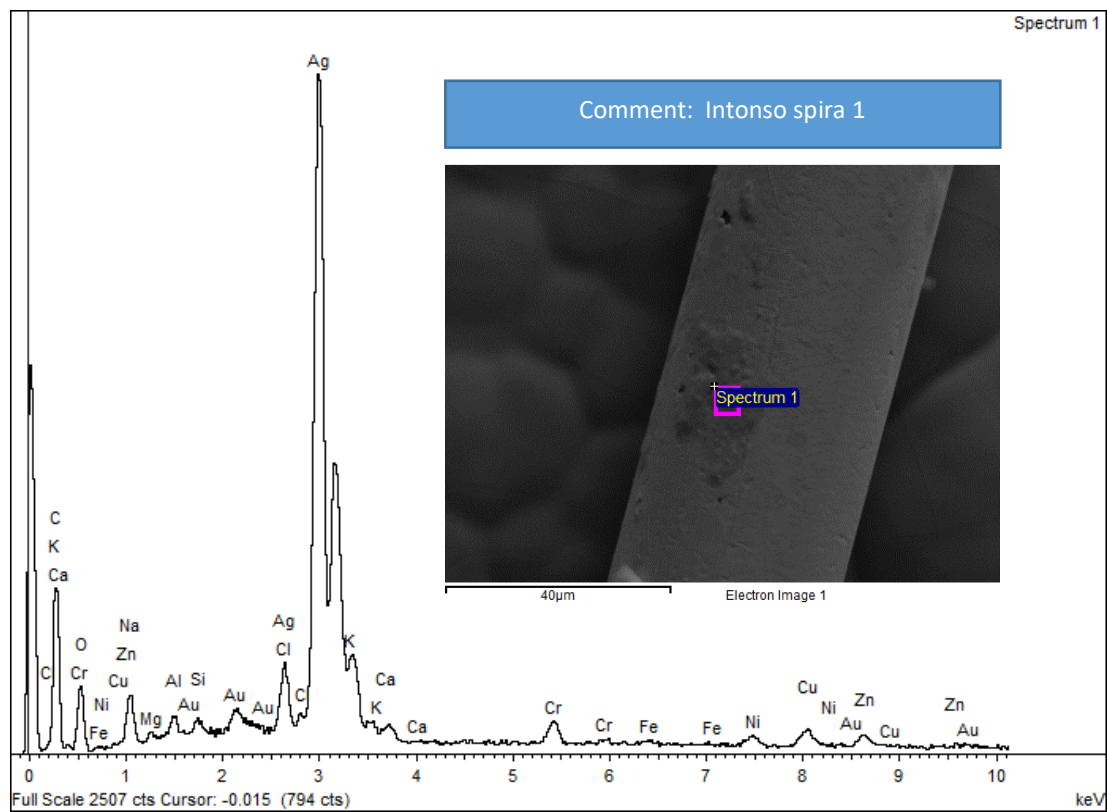
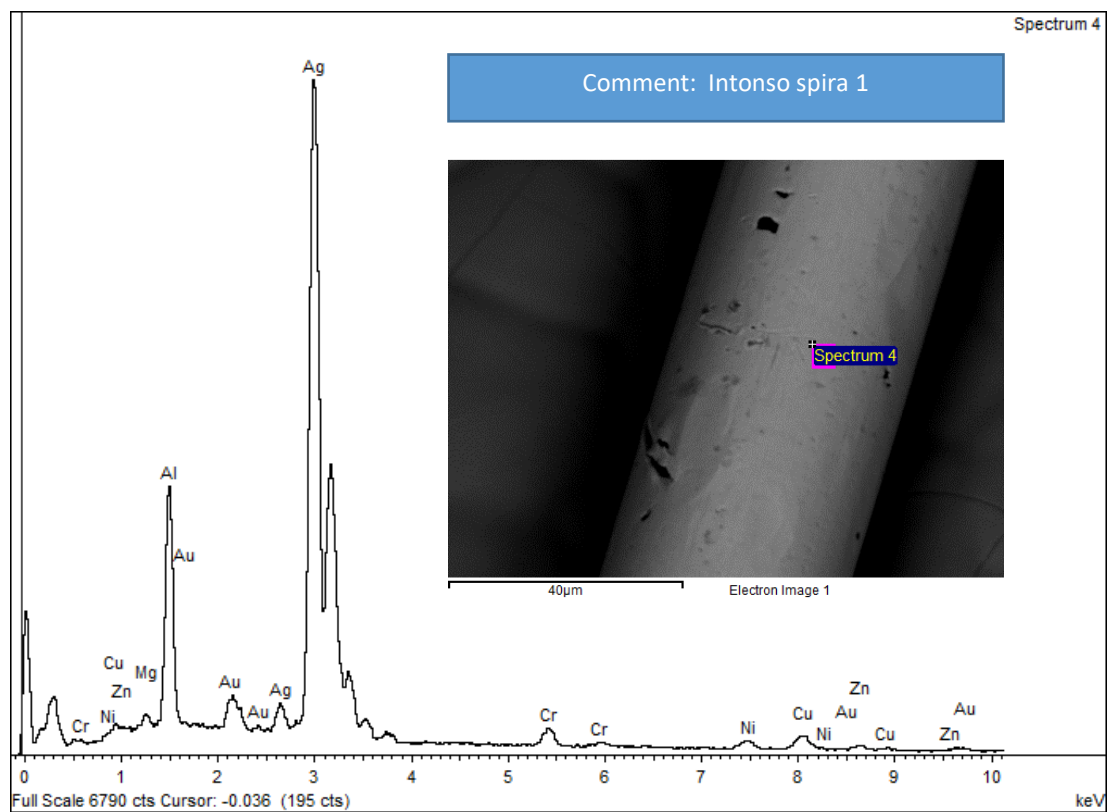


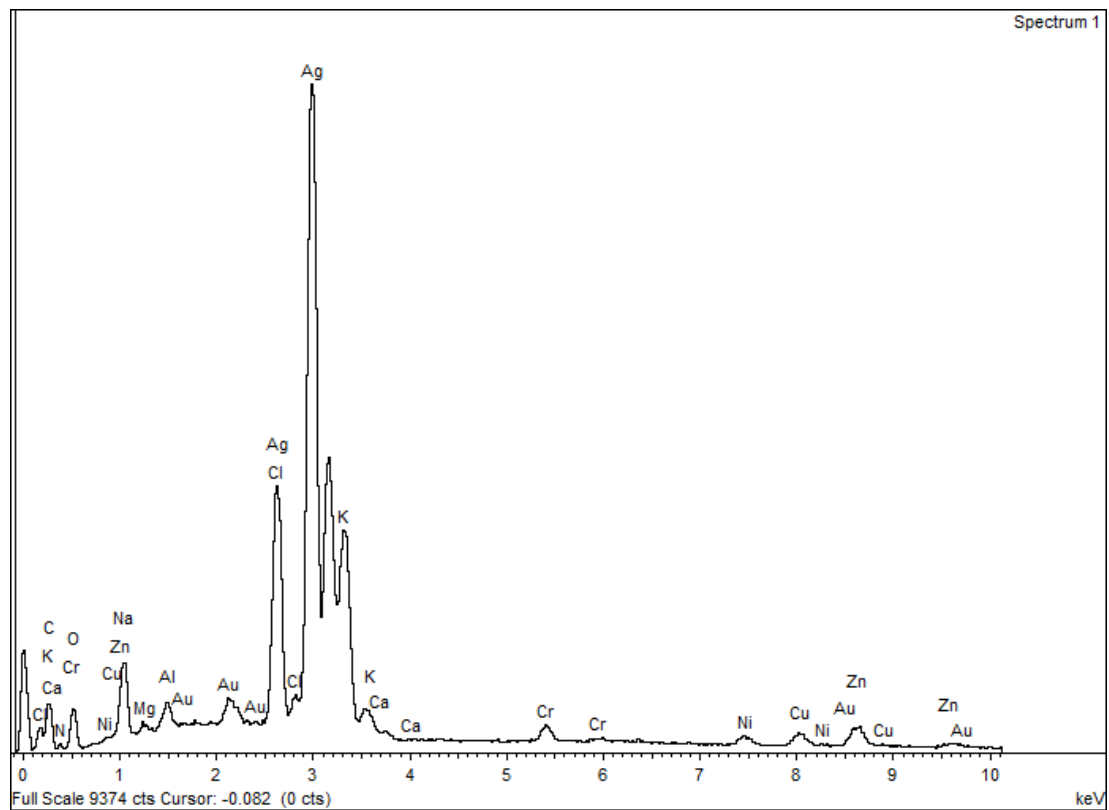










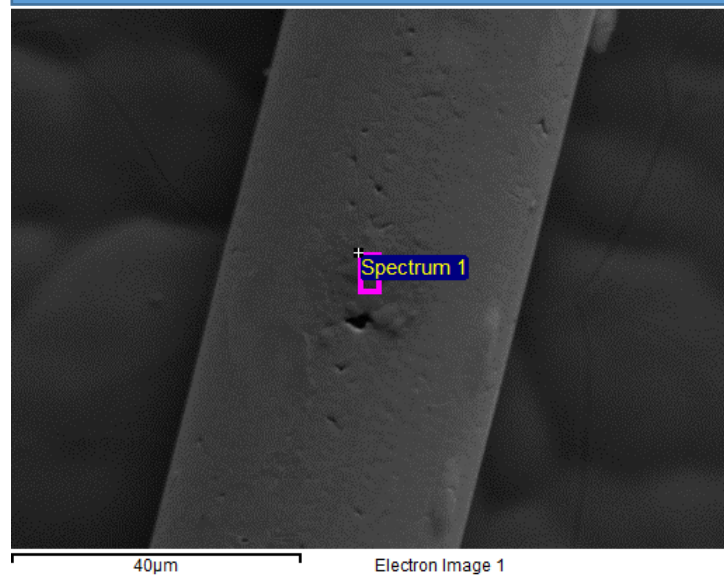


Spectrum processing :

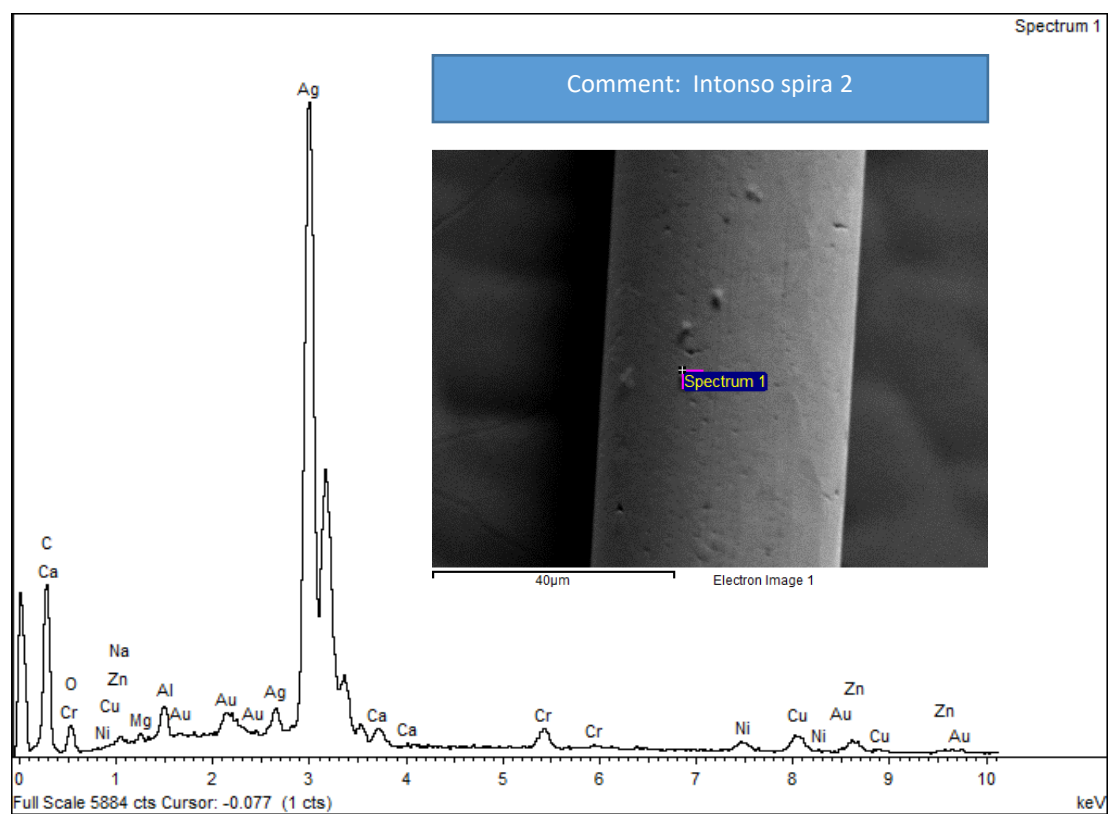
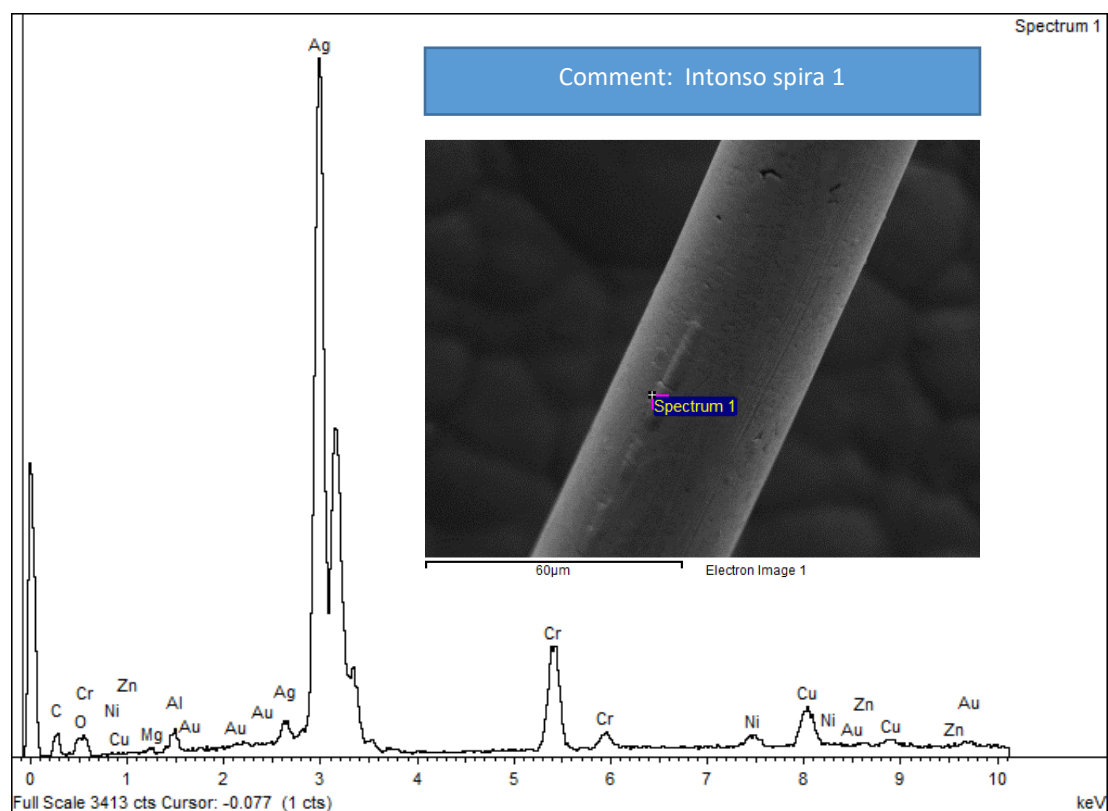
No peaks omitted

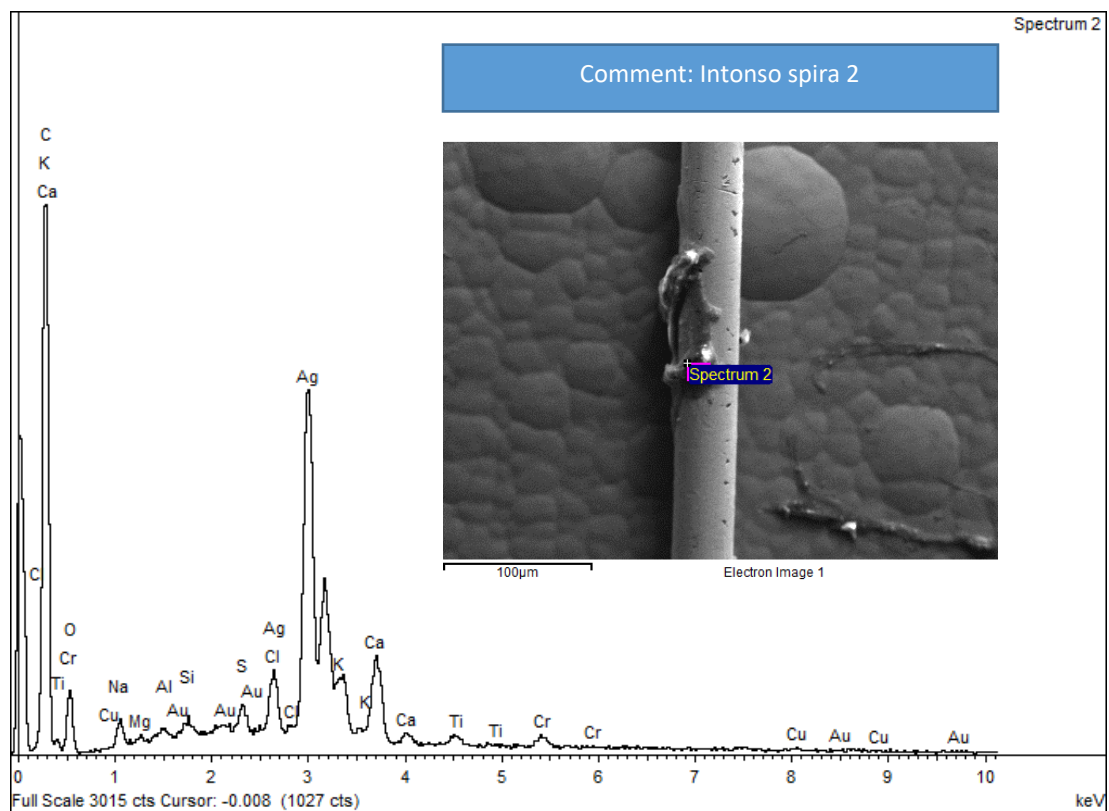
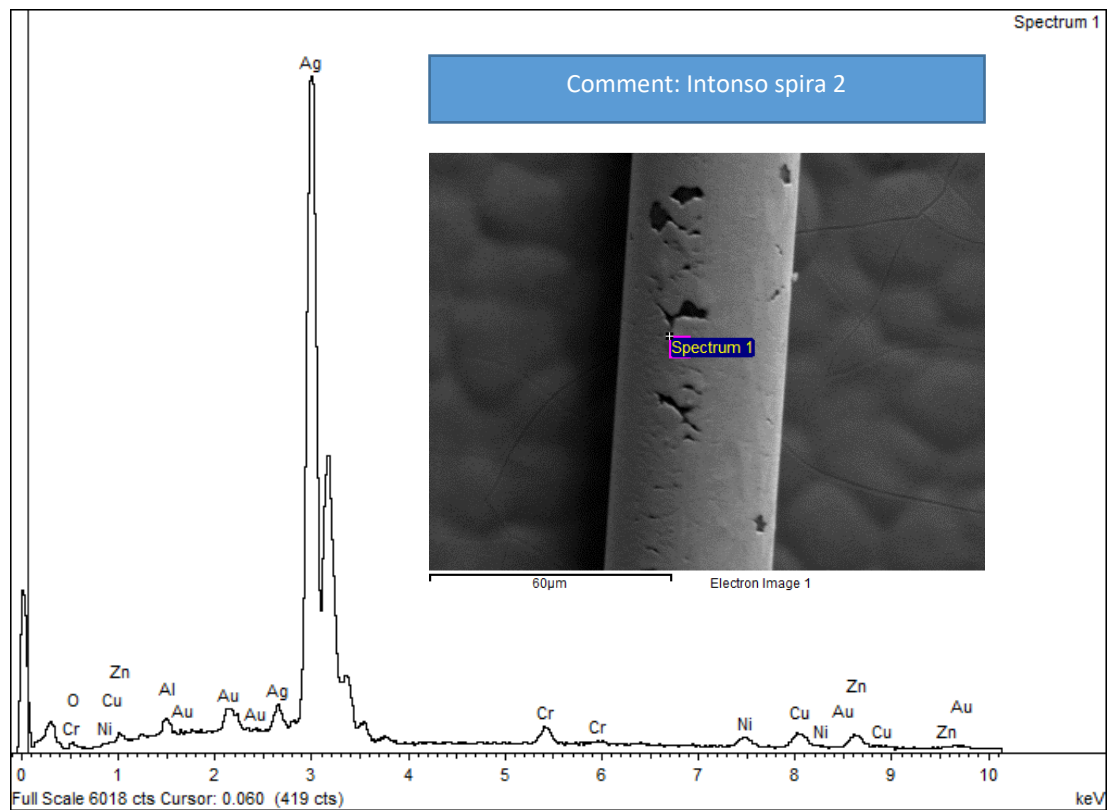
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 10.53   | 30.72   |
| N K     | 3.00    | 7.51    |
| O K     | 10.62   | 23.24   |
| Na K    | 3.54    | 5.40    |
| Mg K    | 0.24    | 0.34    |
| Al K    | 0.58    | 0.76    |
| Cl K    | 6.41    | 6.33    |
| K K     | 4.92    | 4.41    |
| Ca K    | 0.03    | 0.03    |
| Cr K    | 1.11    | 0.75    |
| Ni K    | 1.15    | 0.68    |
| Cu K    | 2.09    | 1.15    |
| Zn K    | 4.32    | 2.32    |
| Ag L    | 49.22   | 15.98   |
| Au M    | 2.23    | 0.40    |
| Totals  | 100.00  |         |

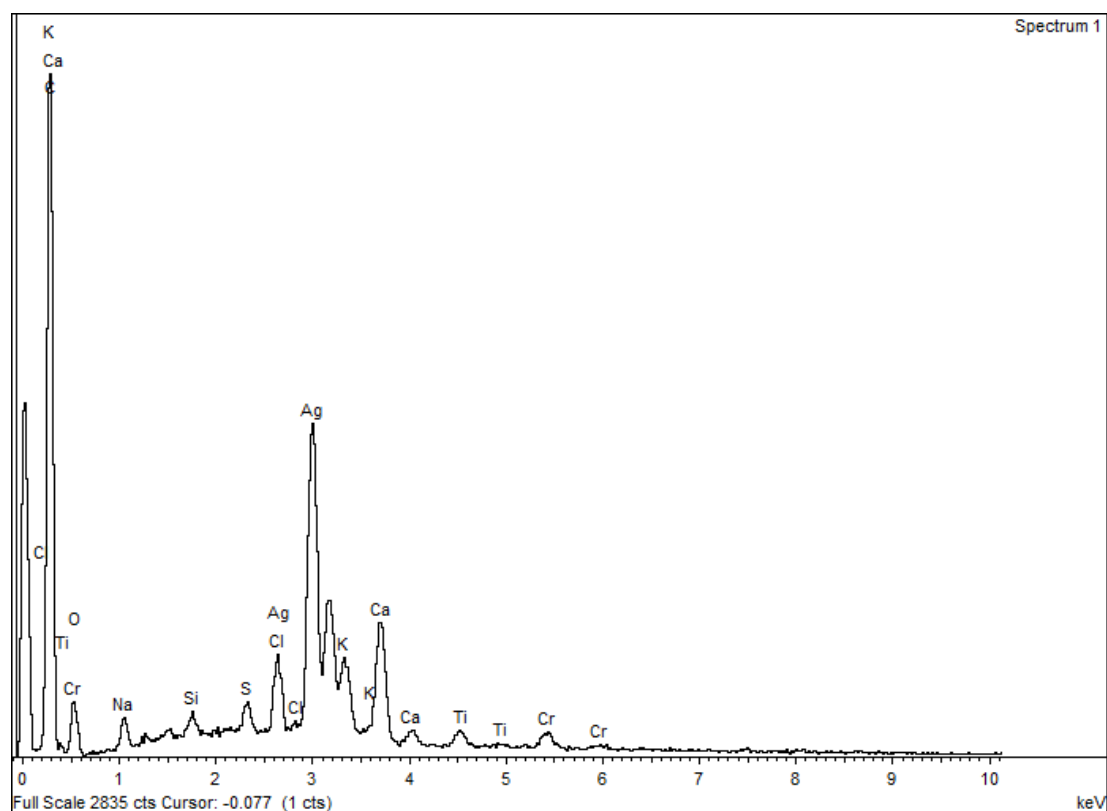
Comment:









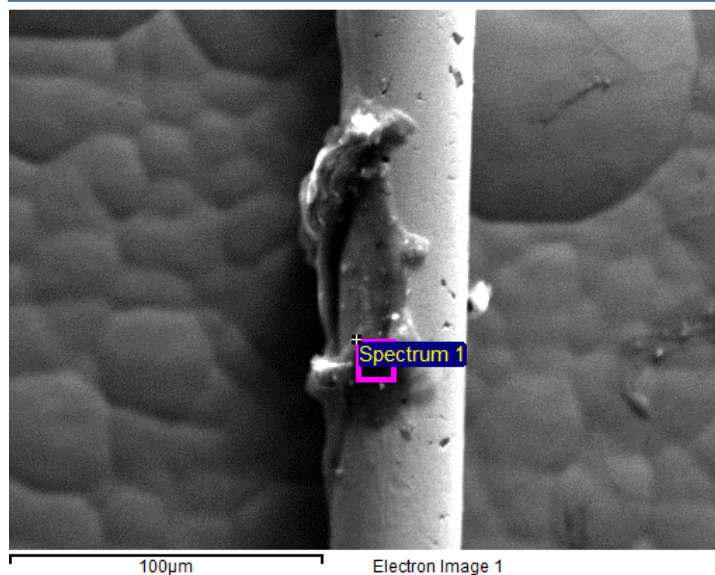


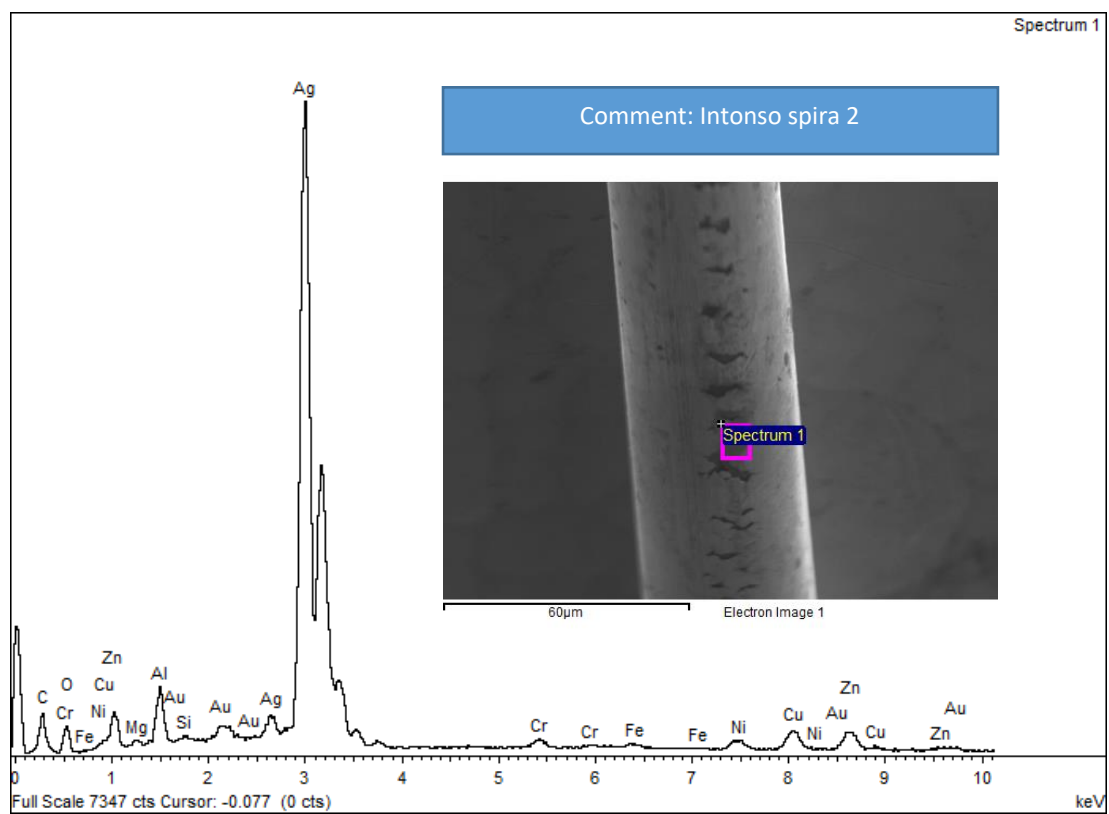
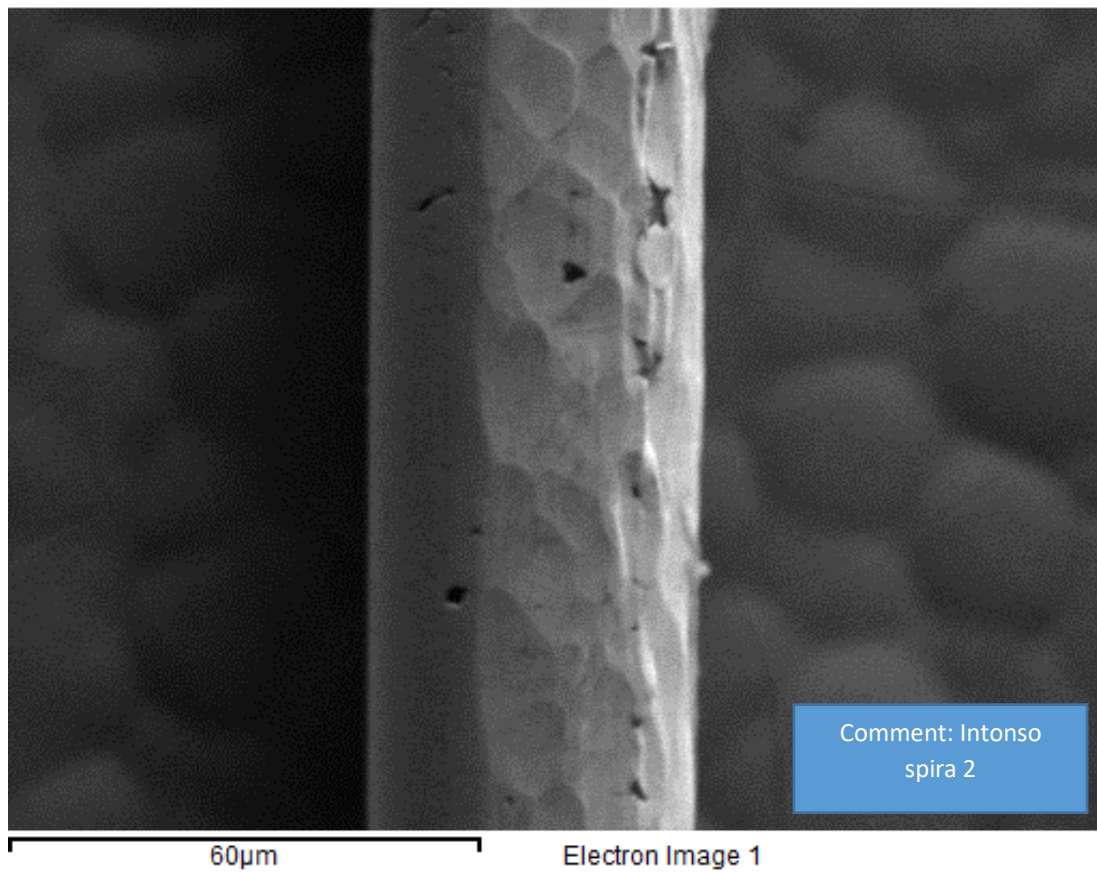
Spectrum processing :

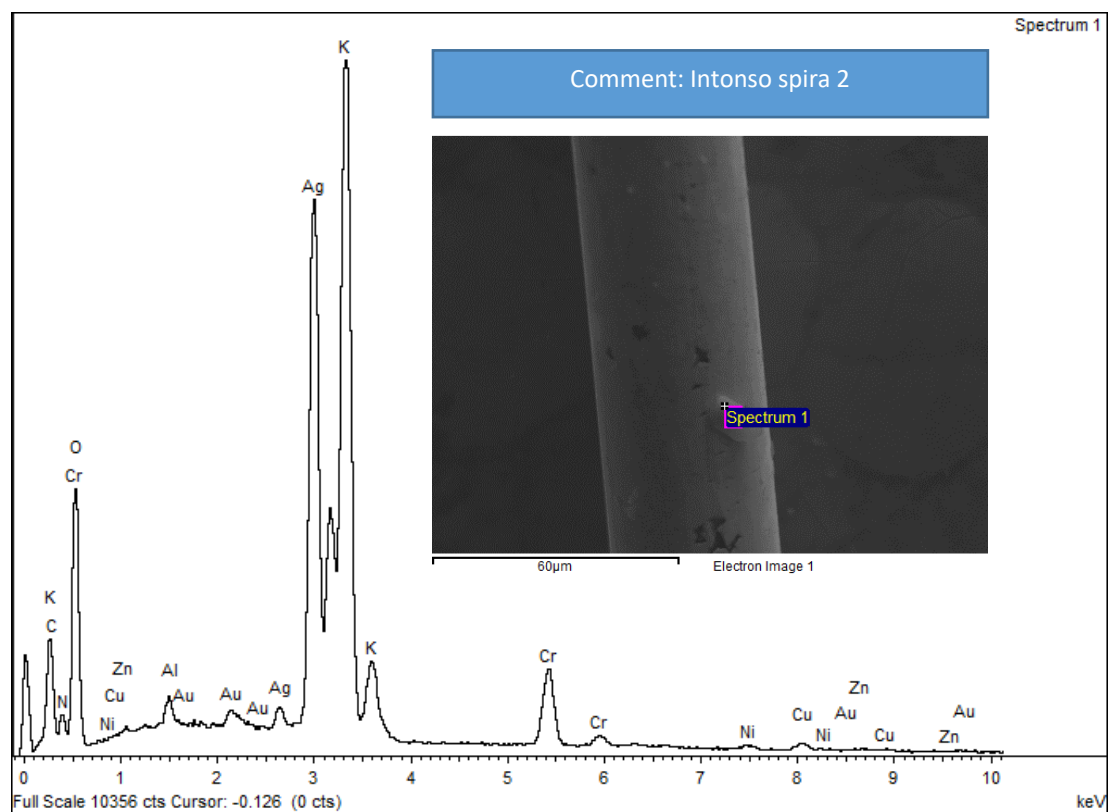
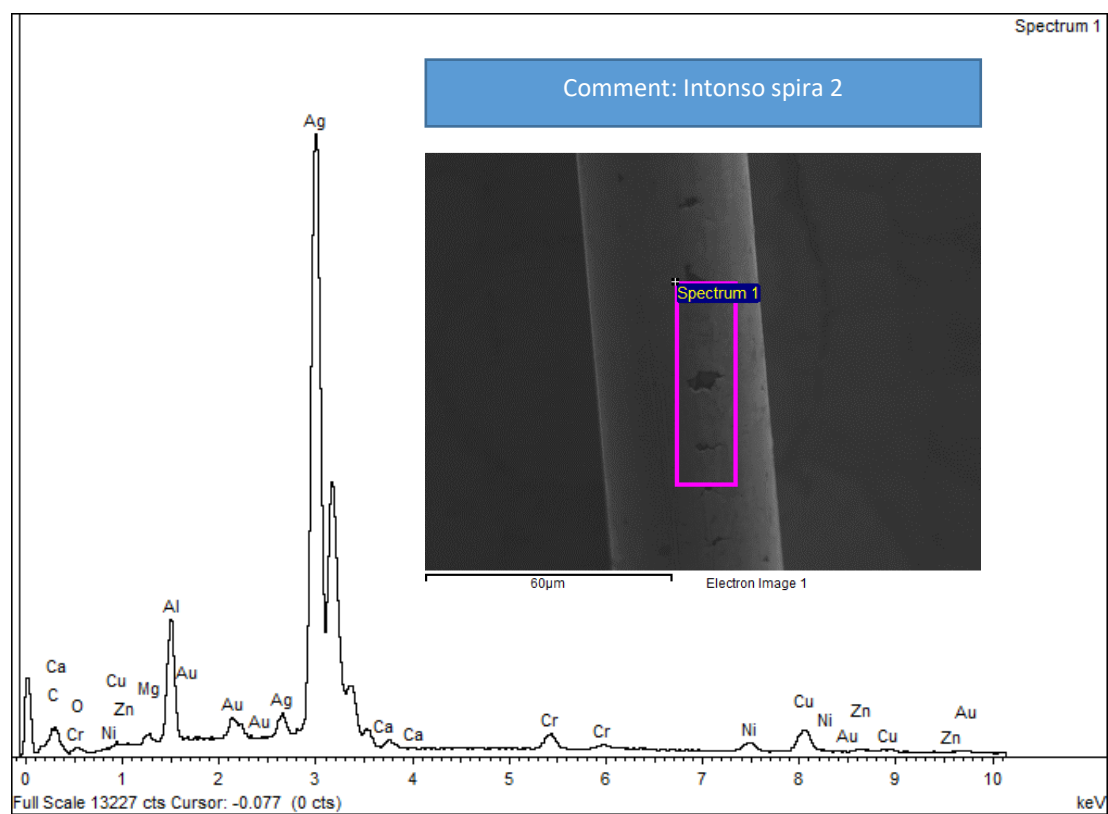
Peaks possibly omitted : 7.459, 8.032, 8.655 keV

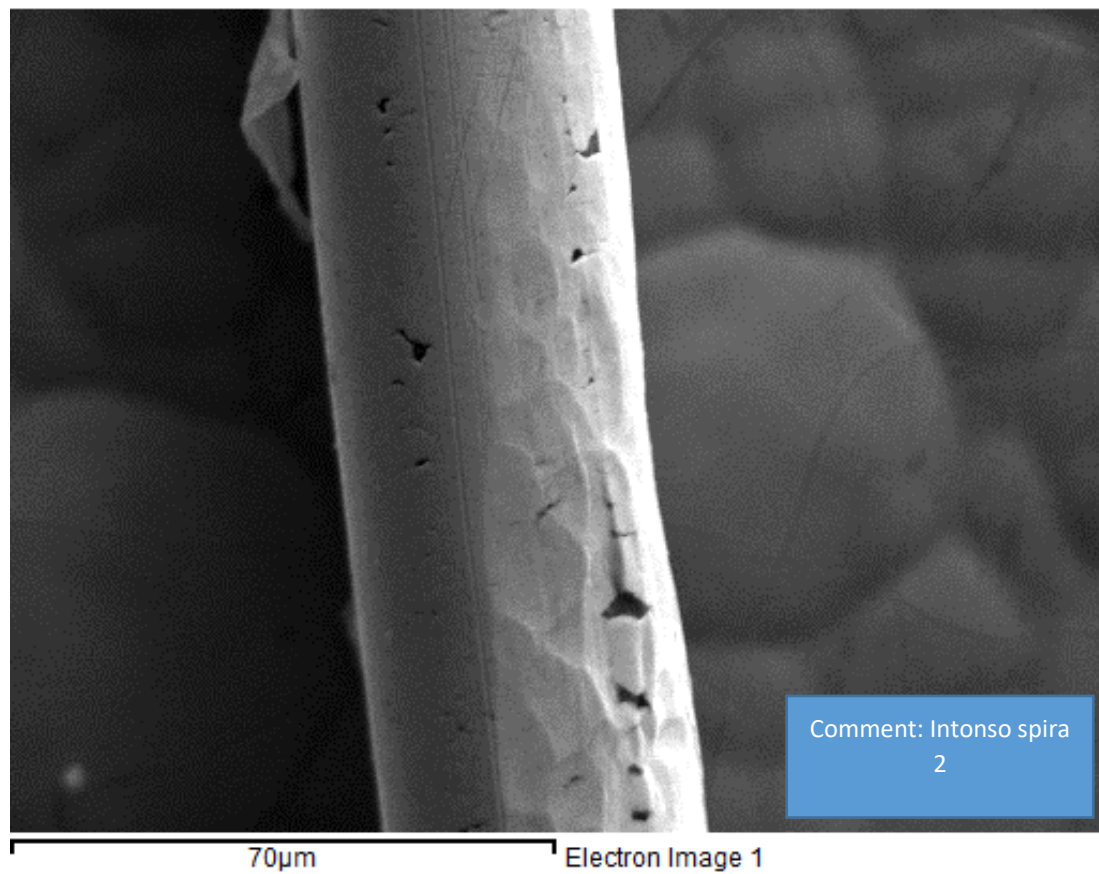
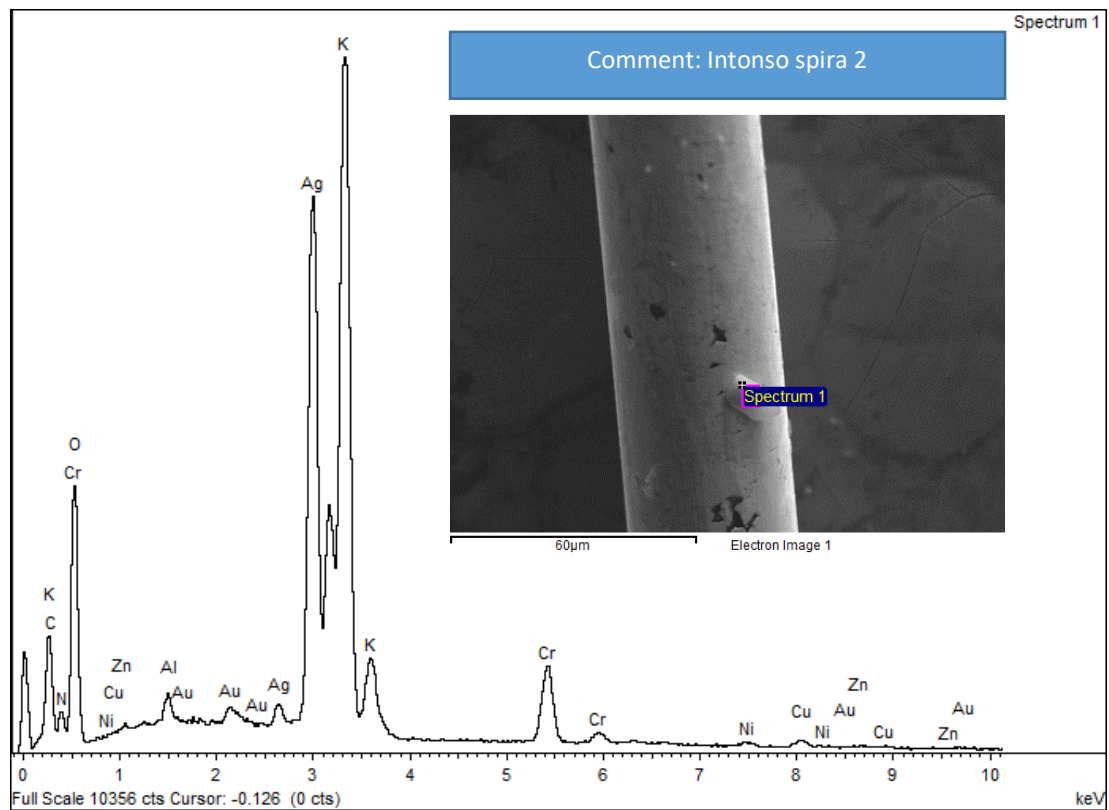
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 59.36   | 80.36   |
| O K     | 12.35   | 12.56   |
| Na K    | 0.91    | 0.64    |
| Si K    | 0.33    | 0.19    |
| S K     | 0.52    | 0.26    |
| Cl K    | 1.38    | 0.63    |
| K K     | 1.26    | 0.52    |
| Ca K    | 3.69    | 1.50    |
| Ti K    | 0.67    | 0.23    |
| Cr K    | 0.99    | 0.31    |
| Ag L    | 18.54   | 2.79    |
| Totals  | 100.00  |         |

Comment: Intonso spira 2

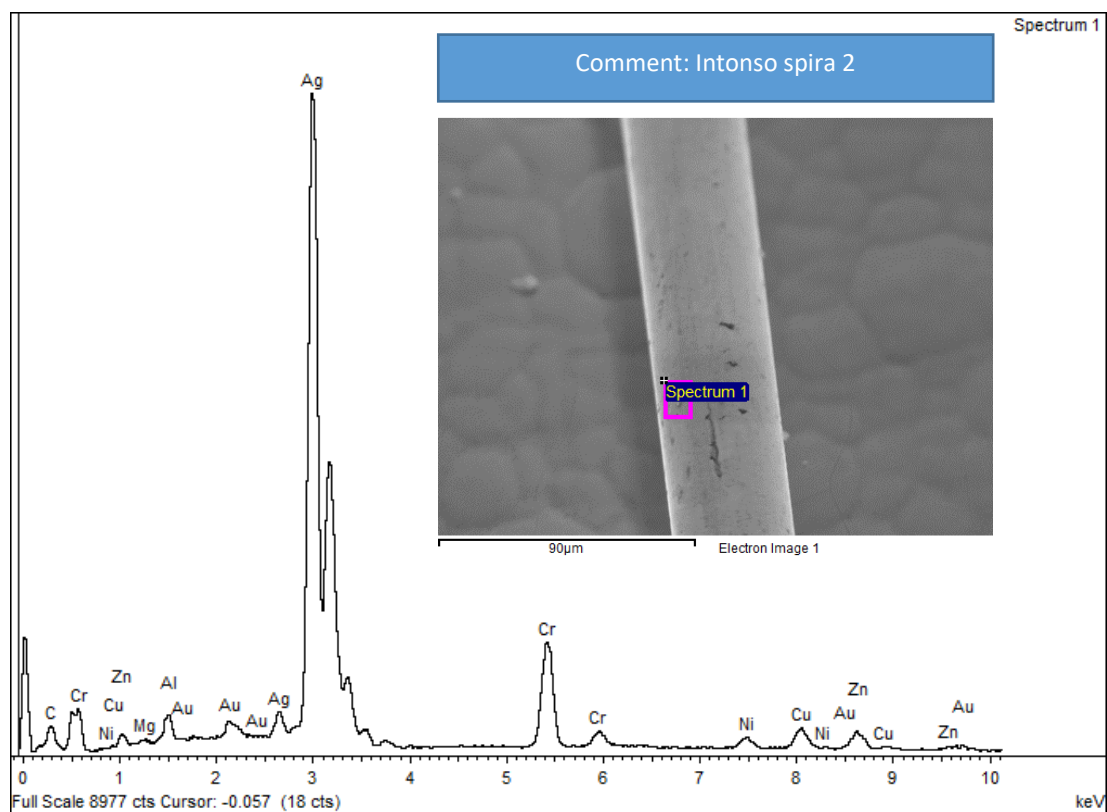
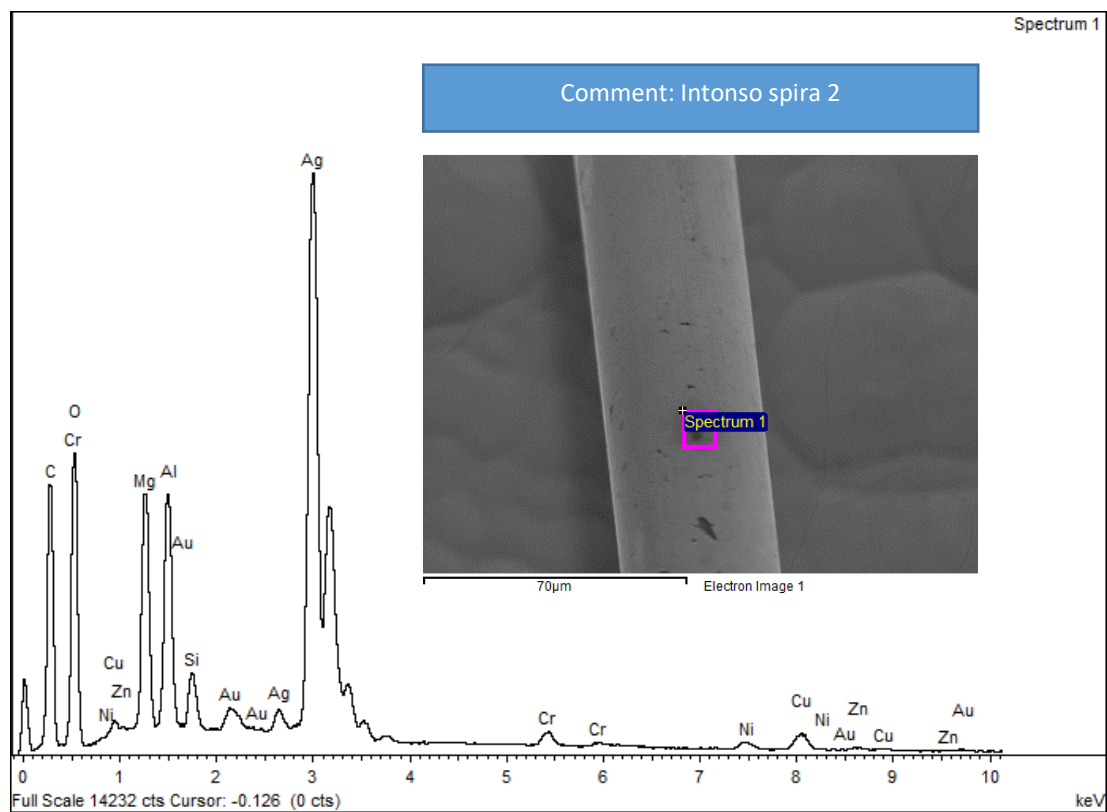


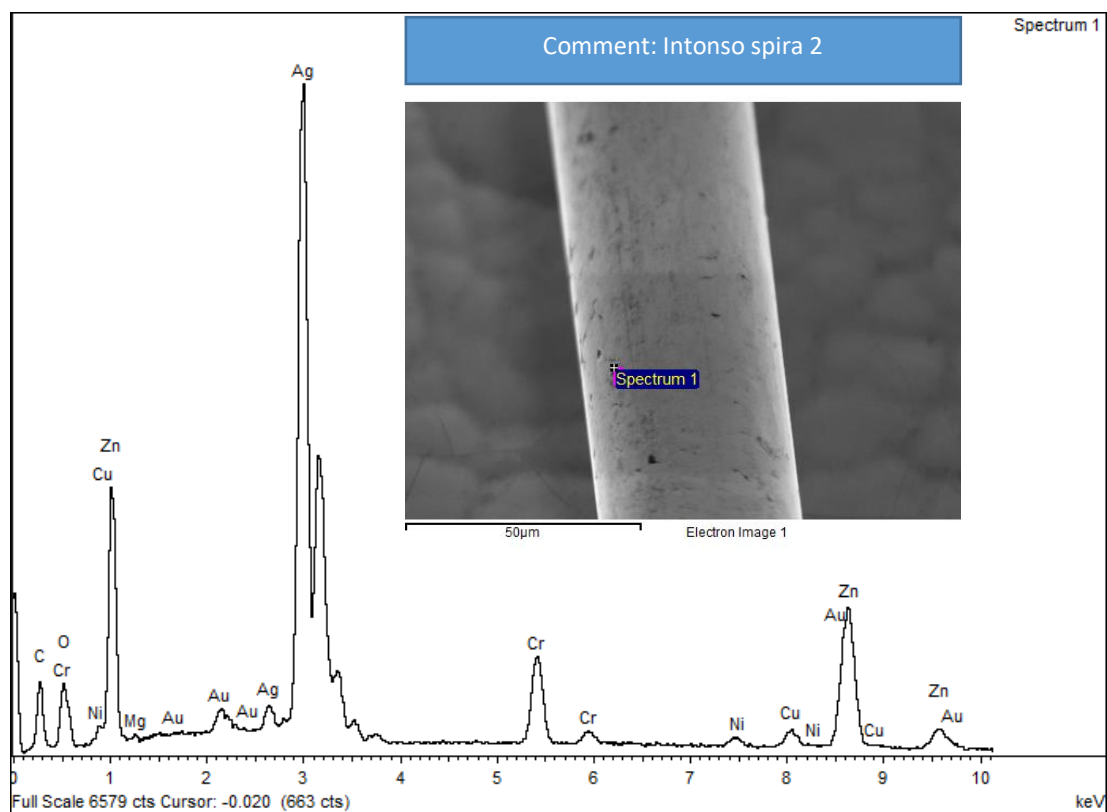
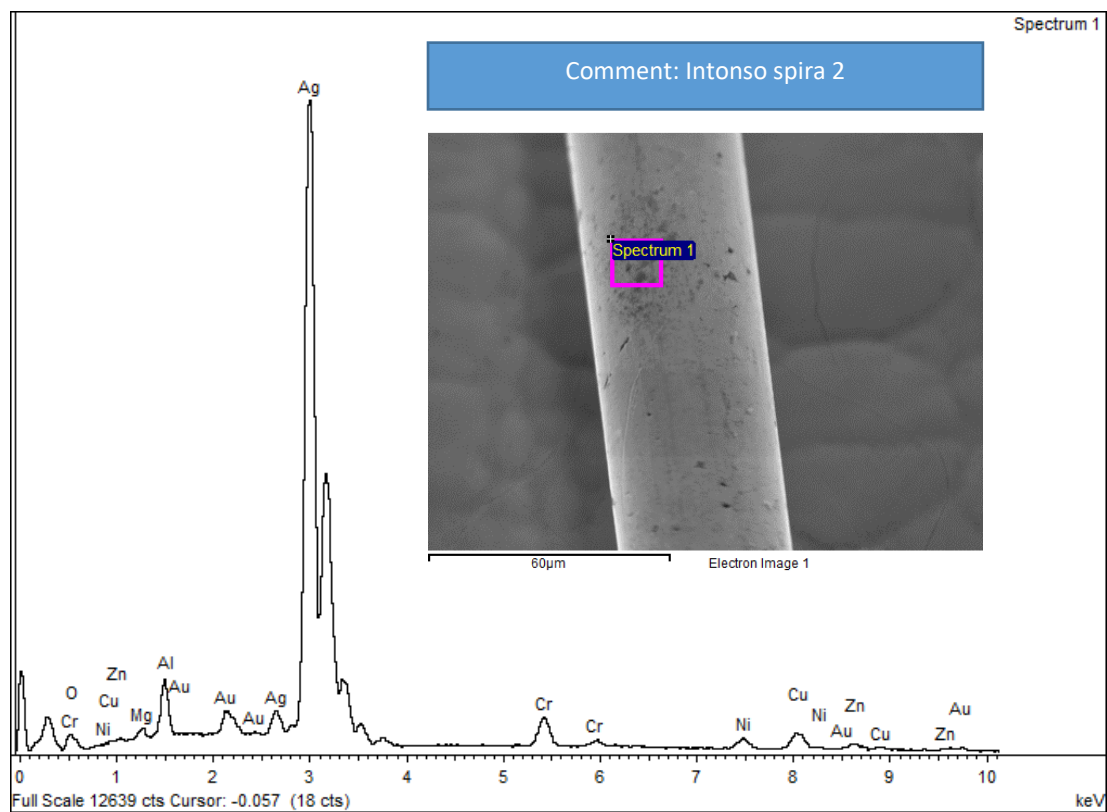




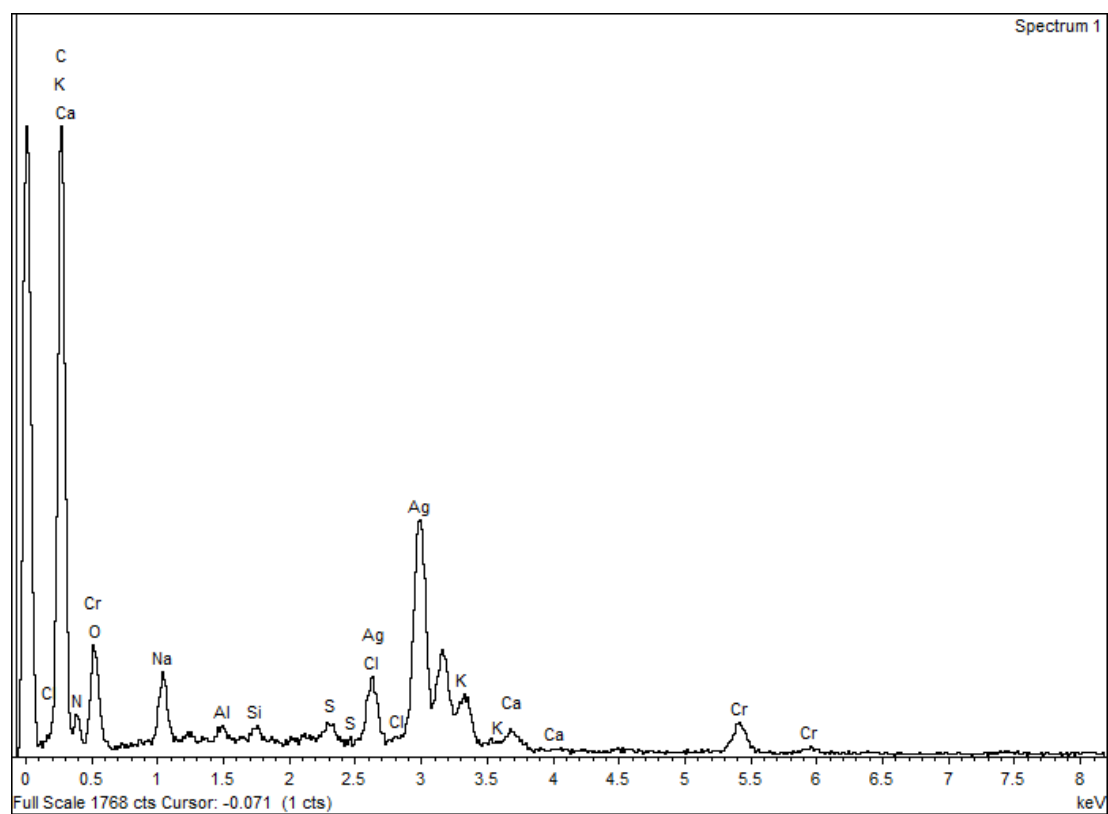










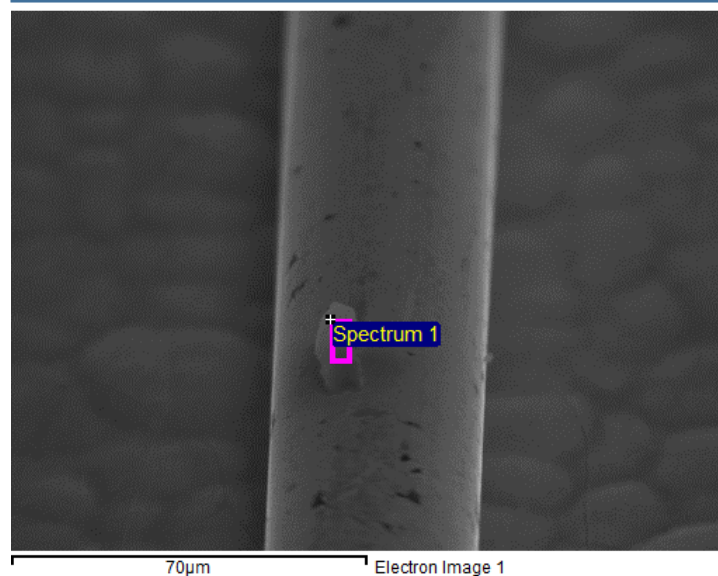


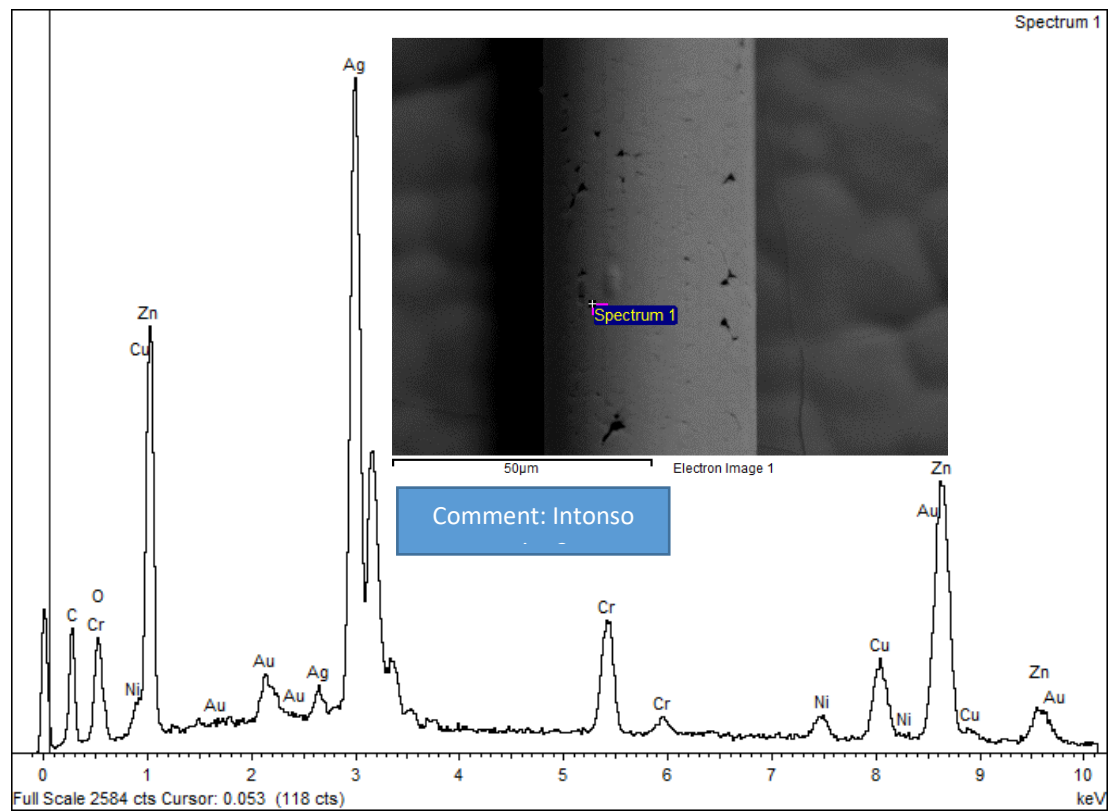
Spectrum processing :

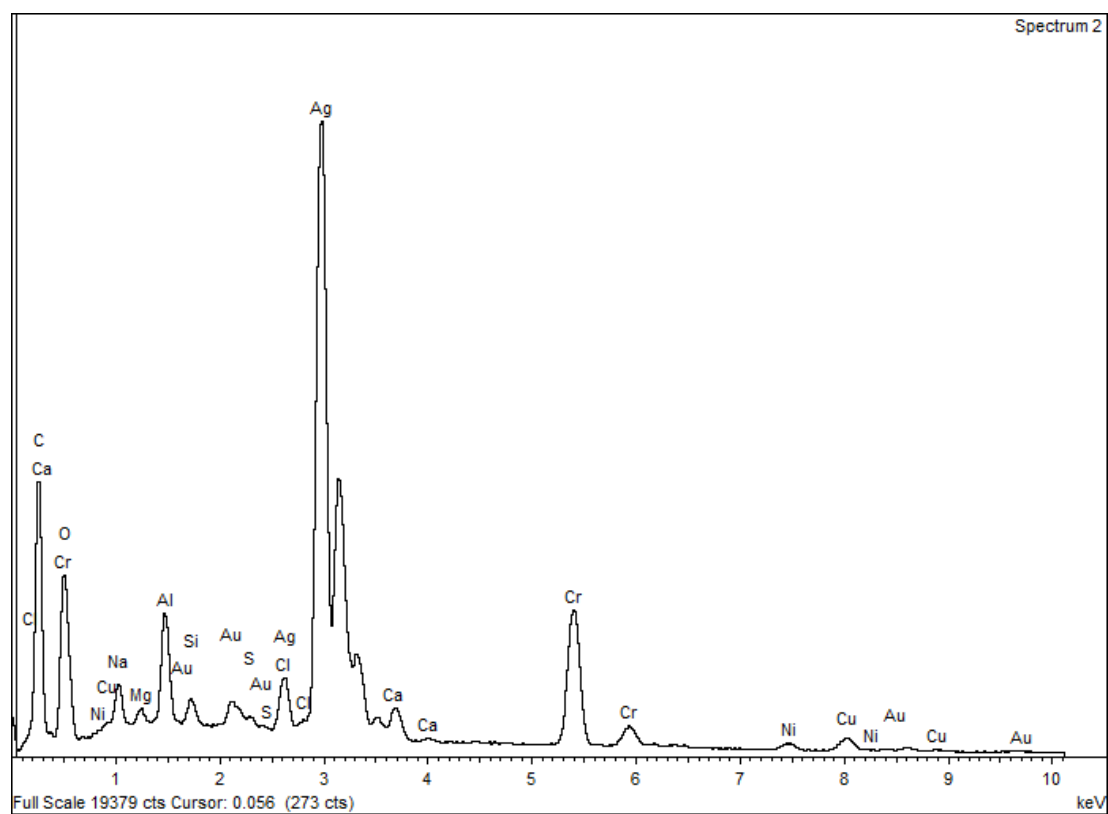
No peaks omitted

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 49.30   | 62.61   |
| N K     | 15.43   | 16.80   |
| O K     | 16.66   | 15.89   |
| Na K    | 1.78    | 1.18    |
| Al K    | 0.22    | 0.12    |
| Si K    | 0.19    | 0.11    |
| S K     | 0.32    | 0.15    |
| Cl K    | 1.14    | 0.49    |
| K K     | 0.80    | 0.31    |
| Ca K    | 0.43    | 0.16    |
| Cr K    | 1.52    | 0.45    |
| Ag L    | 12.21   | 1.73    |
| Totals  | 100.00  |         |

Comment: Intonso spira 3





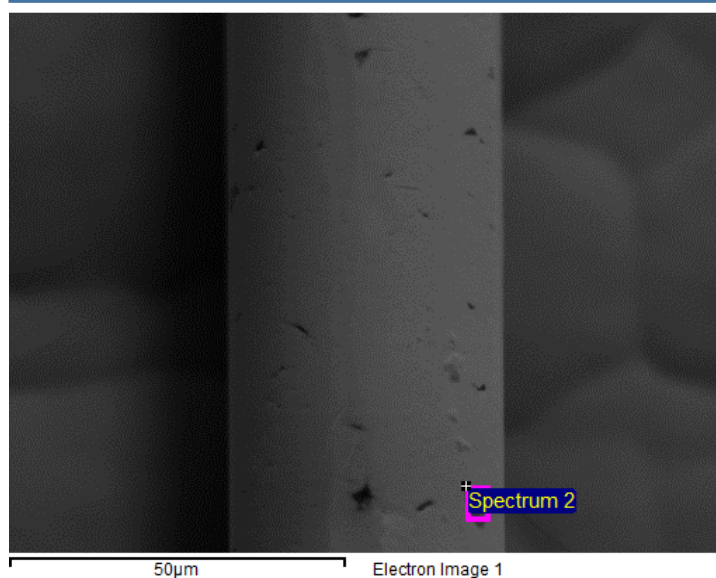


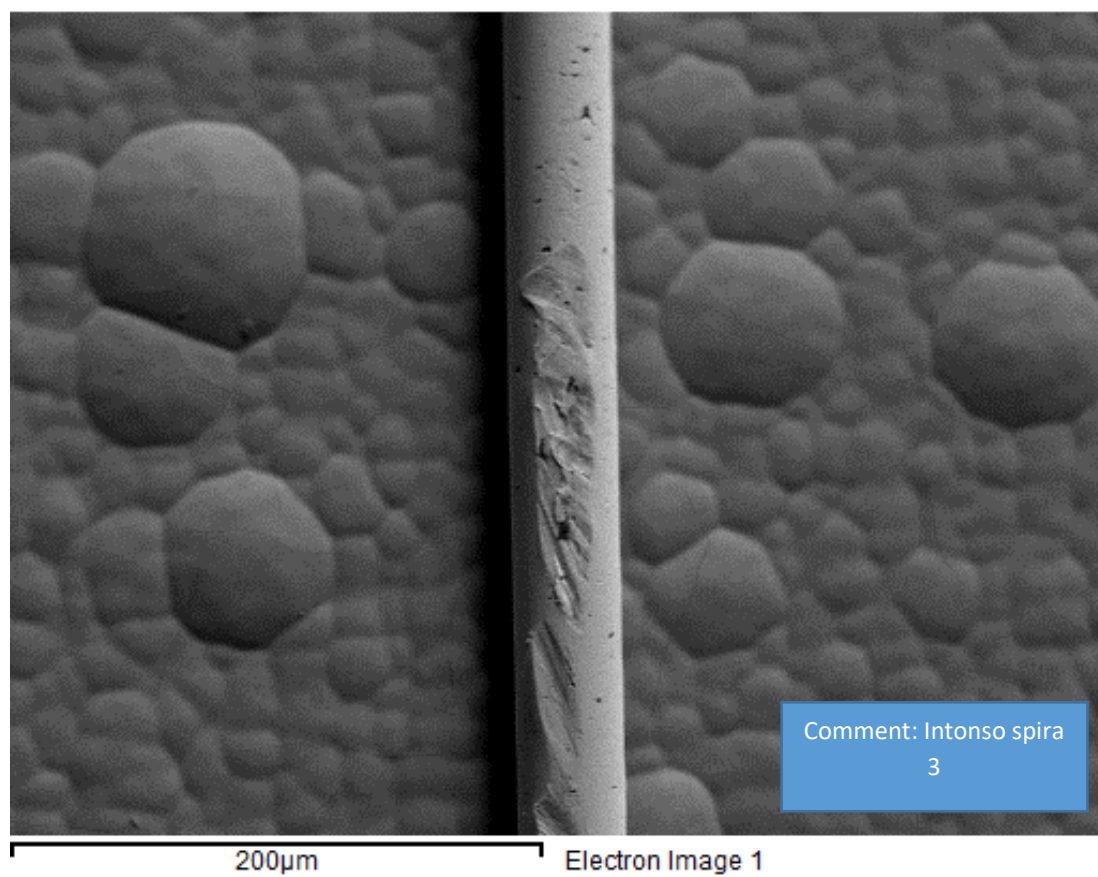
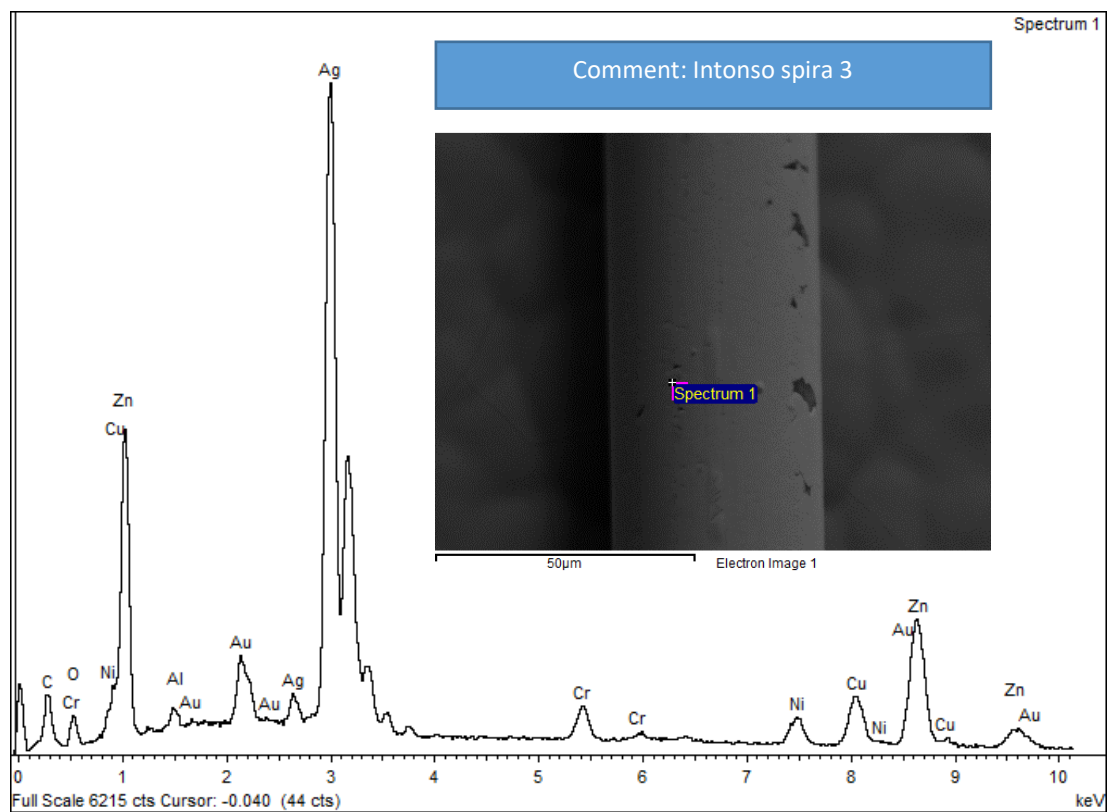
Spectrum processing :

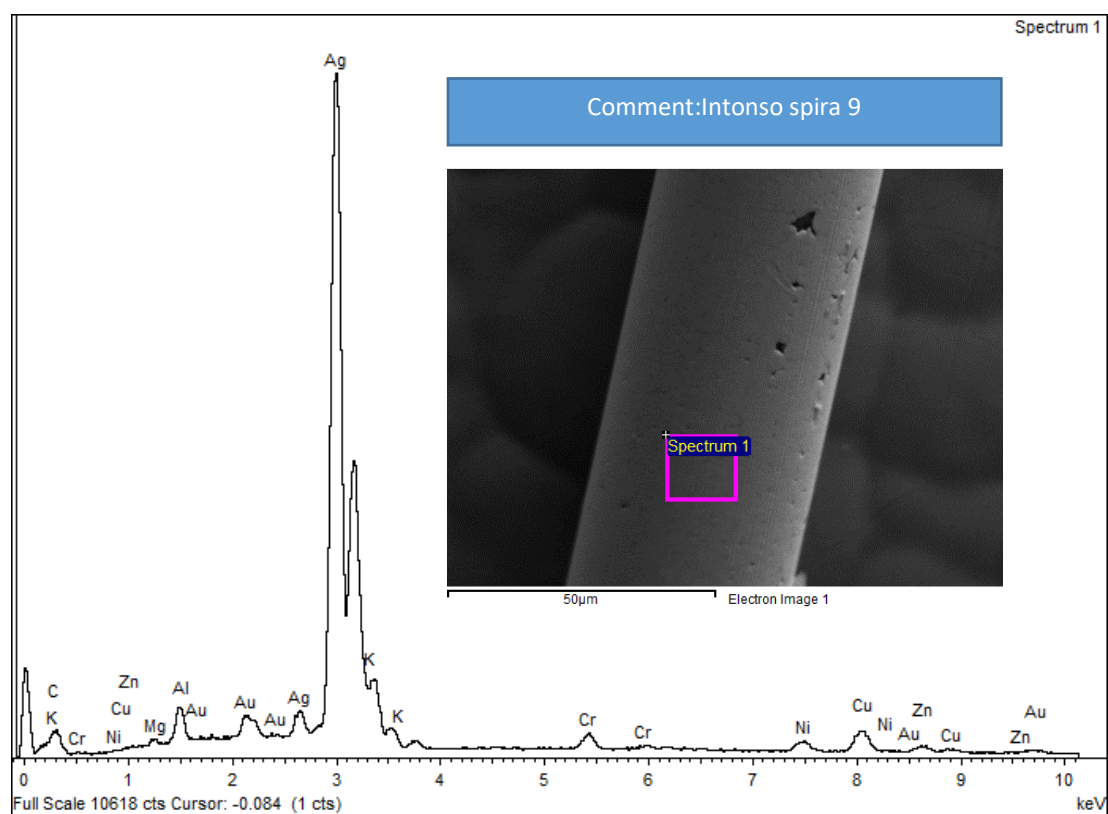
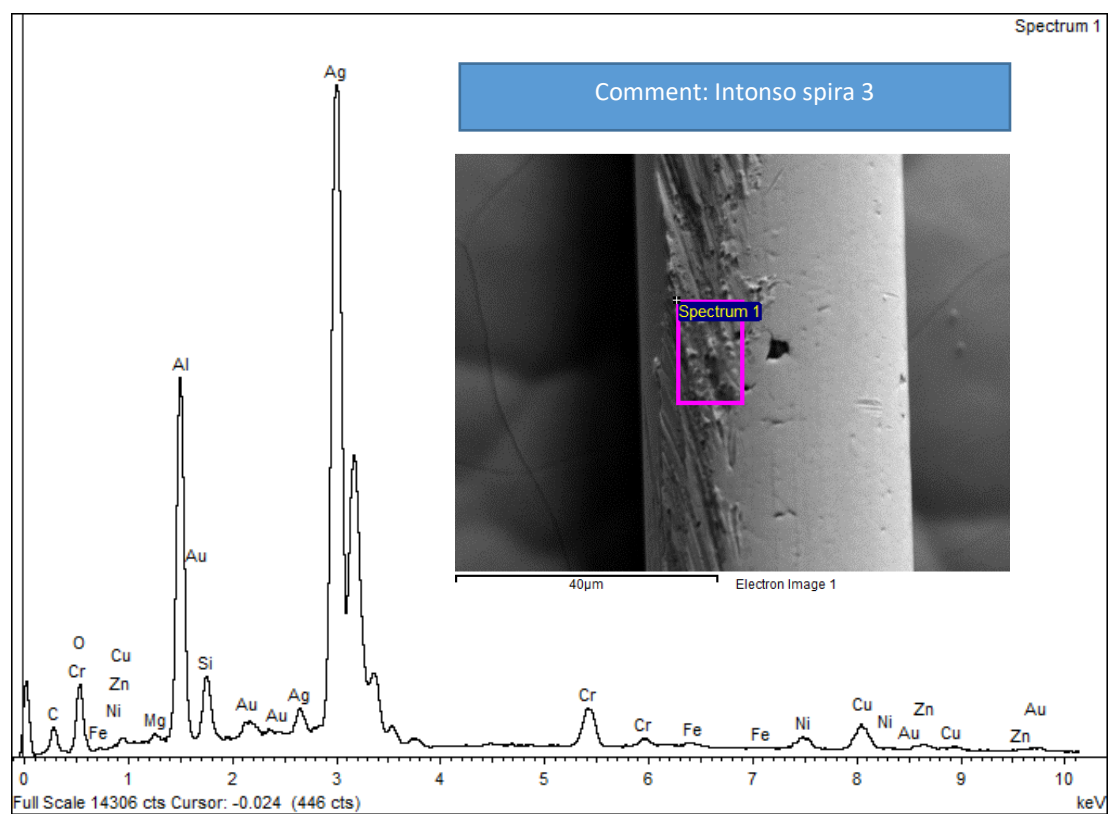
Peak possibly omitted : 6.408 keV

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 22.15   | 47.05   |
| O K     | 20.28   | 32.33   |
| Na K    | 1.64    | 1.82    |
| Mg K    | 0.36    | 0.38    |
| Al K    | 2.26    | 2.13    |
| Si K    | 0.51    | 0.46    |
| S K     | 0.22    | 0.18    |
| Cl K    | 0.74    | 0.53    |
| Ca K    | 0.94    | 0.60    |
| Cr K    | 8.62    | 4.23    |
| Ni K    | 0.75    | 0.33    |
| Cu K    | 1.99    | 0.80    |
| Ag L    | 37.79   | 8.94    |
| Au M    | 1.76    | 0.23    |
| Totals  | 100.00  |         |

Comment: Intonso spira 3

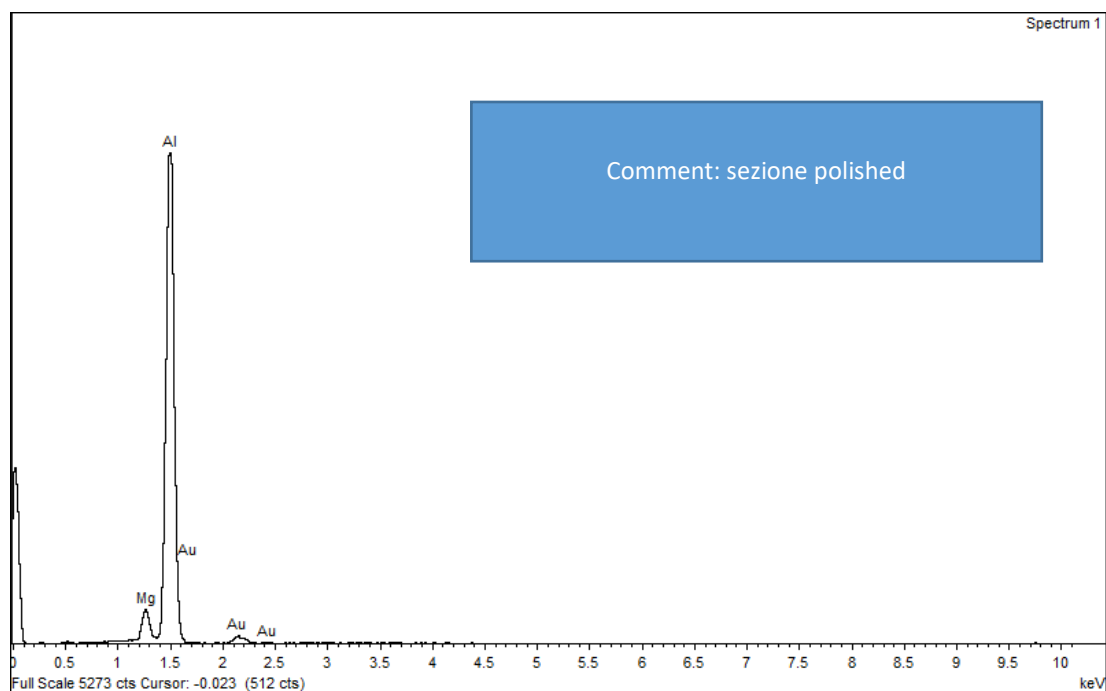








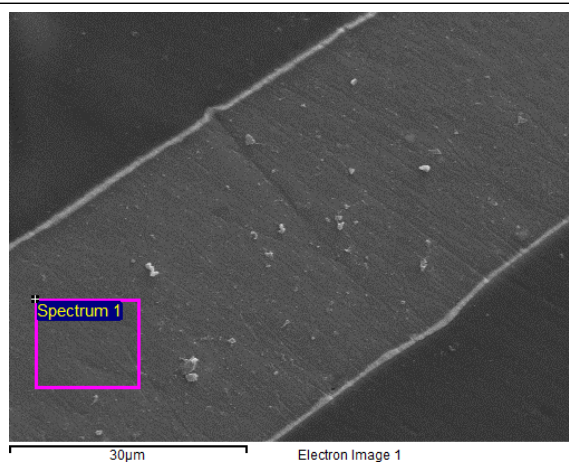
## Appendice F – Analisi metallo su sezione metallografica

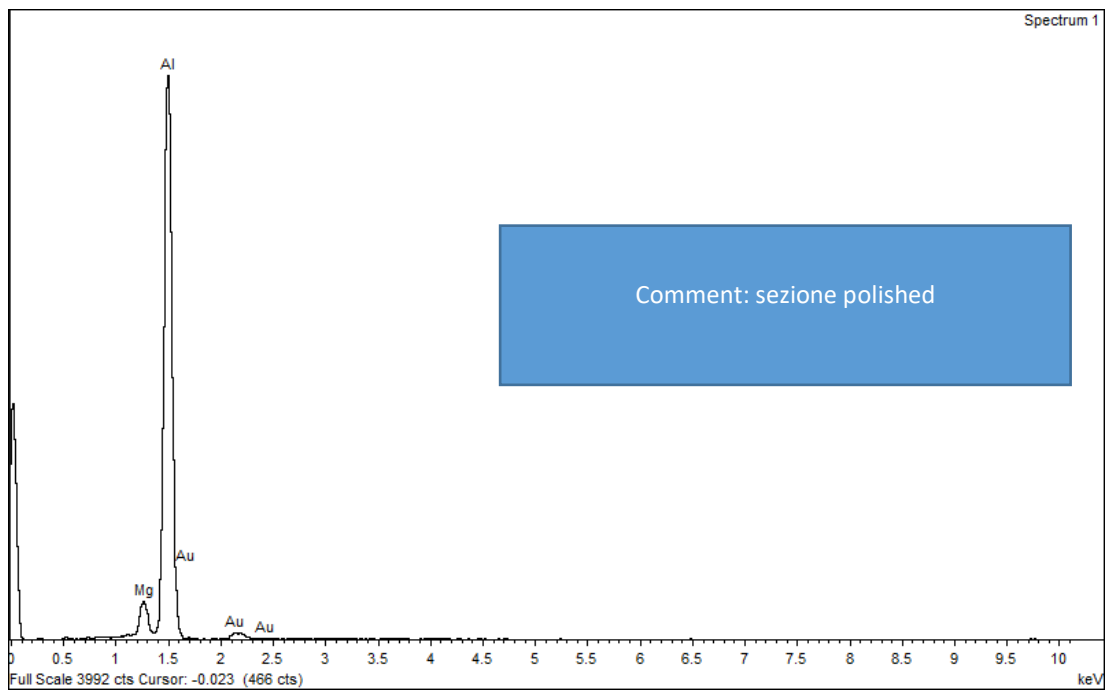


Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 0.265, 0.523 keV

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| Mg K    | 5.41    | 5.97    |
| Al K    | 94.59   | 94.03   |
| Totals  | 100.00  |         |

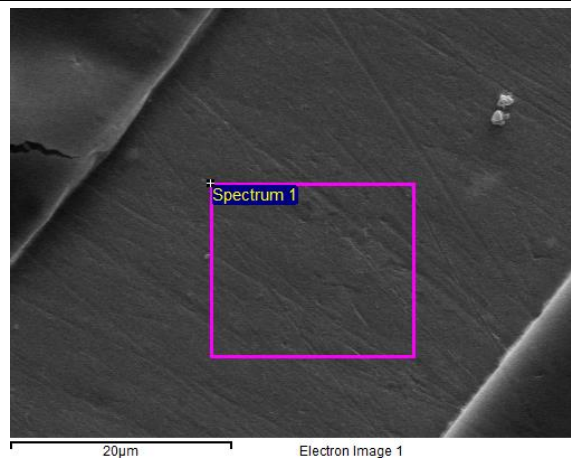




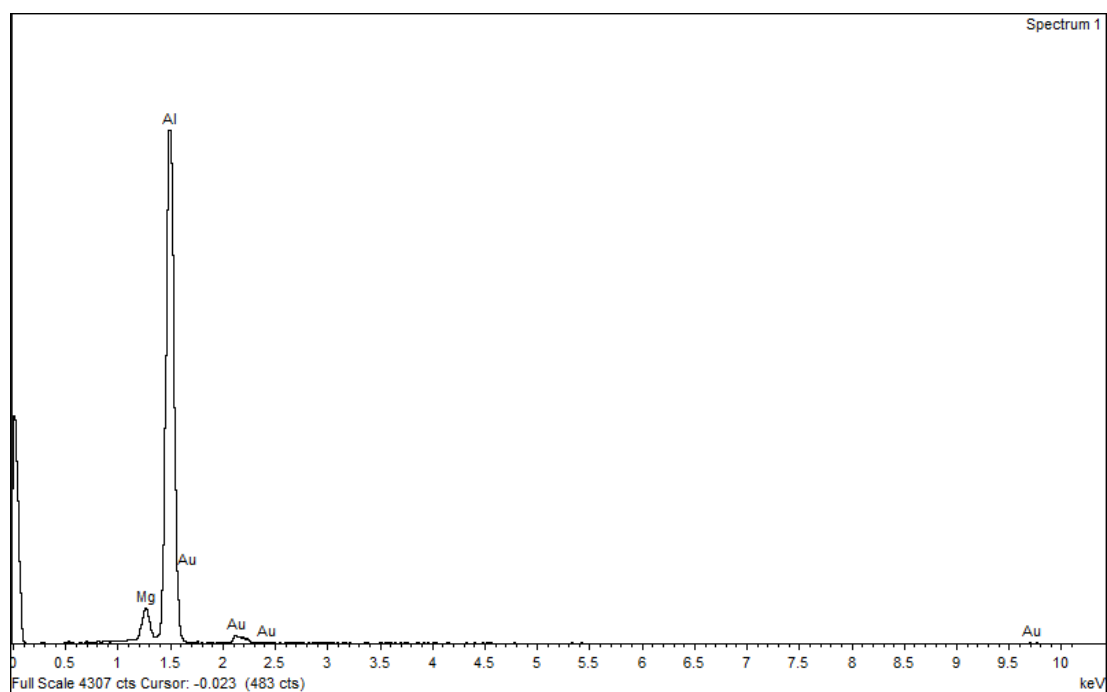
Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 0.268, 0.517 keV

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| Mg K    | 5.35    | 5.91    |
| Al K    | 94.65   | 94.09   |
| Totals  | 100.00  |         |





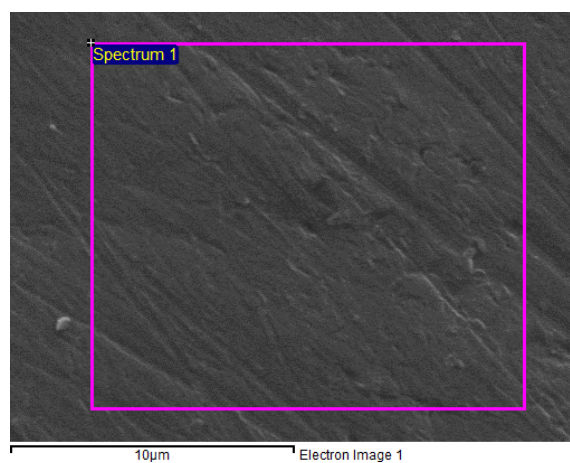


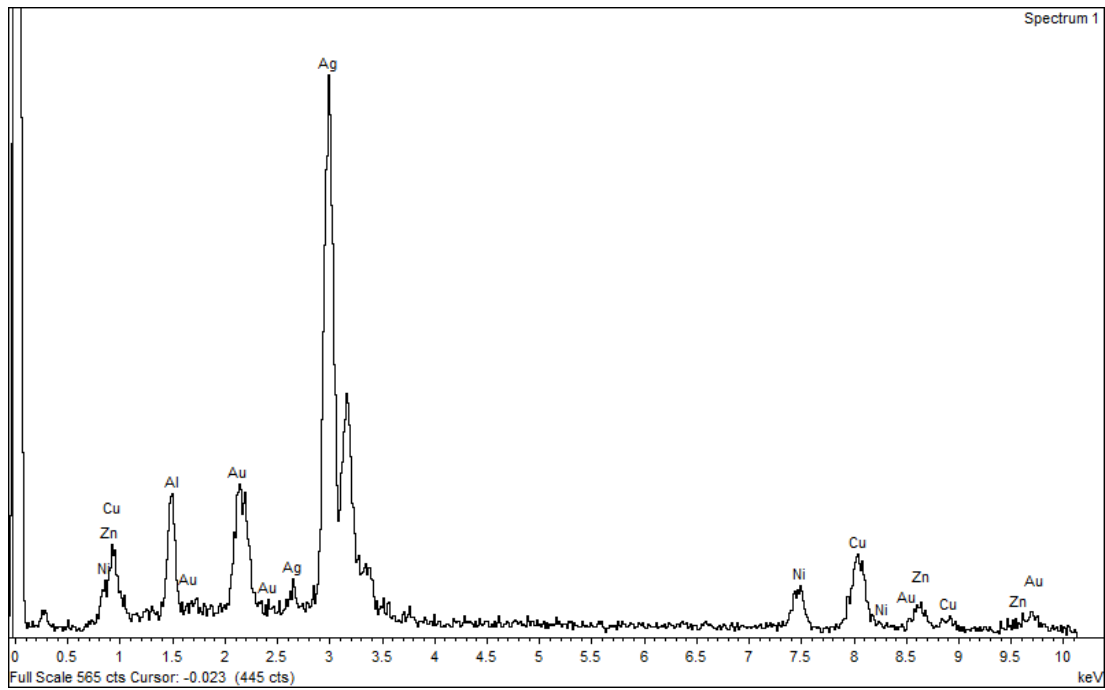
Spectrum processing :

No peaks omitted

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| Mg K    | 5.27    | 5.82    |
| Al K    | 94.73   | 94.18   |
| Totals  | 100.00  |         |

Comment: sezione polished



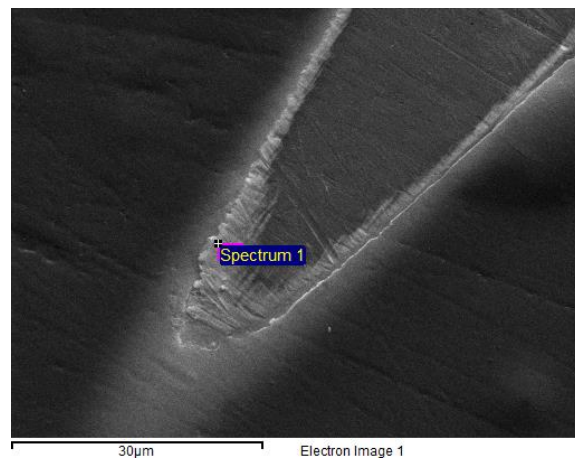


Spectrum processing :

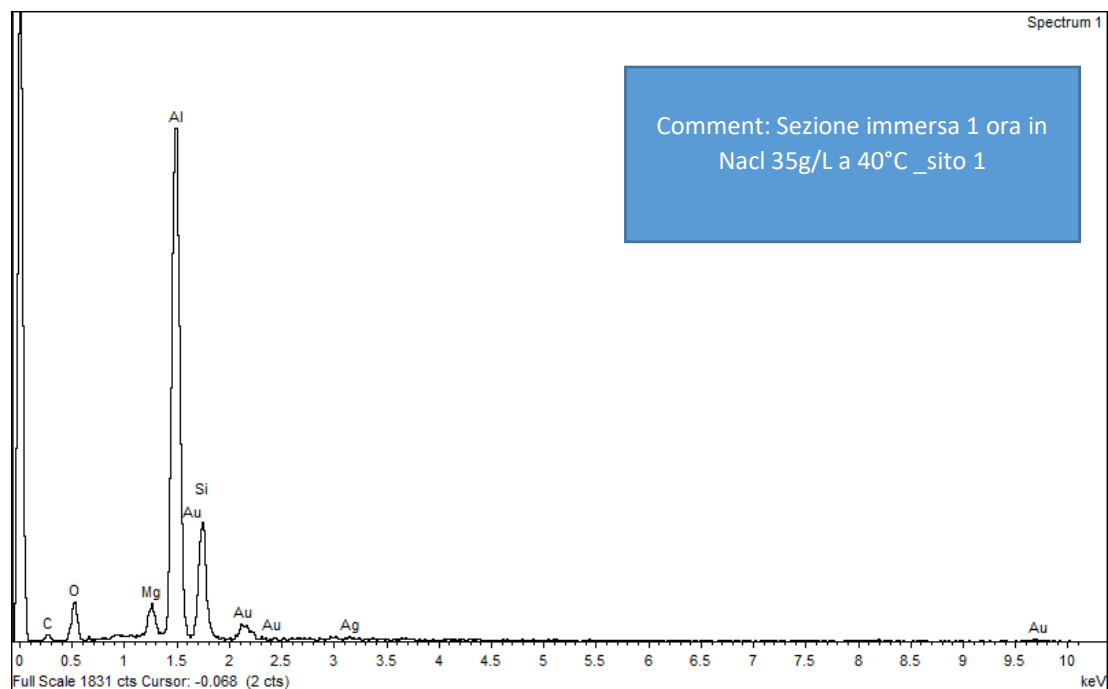
No peaks omitted

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| Al K    | 6.41    | 18.35   |
| Ni K    | 6.64    | 8.74    |
| Cu K    | 15.73   | 19.12   |
| Zn K    | 5.94    | 7.02    |
| Ag L    | 65.28   | 46.76   |
| Totals  | 100.00  |         |

Comment: sezione polished



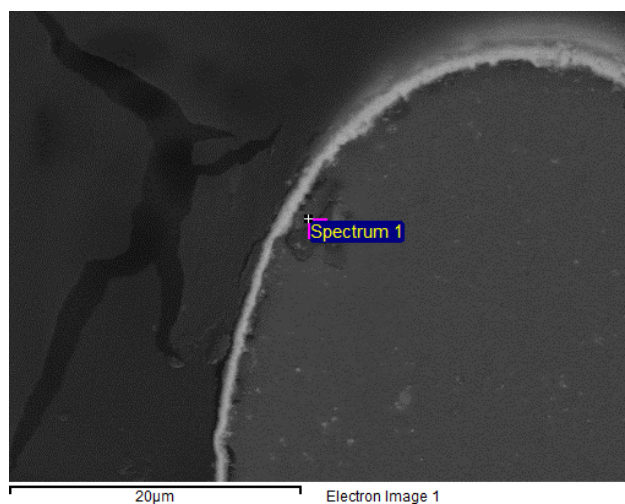
## Appendice G – Morfologia di corrosione dopo esposizione in soluzione di cloruro di sodio

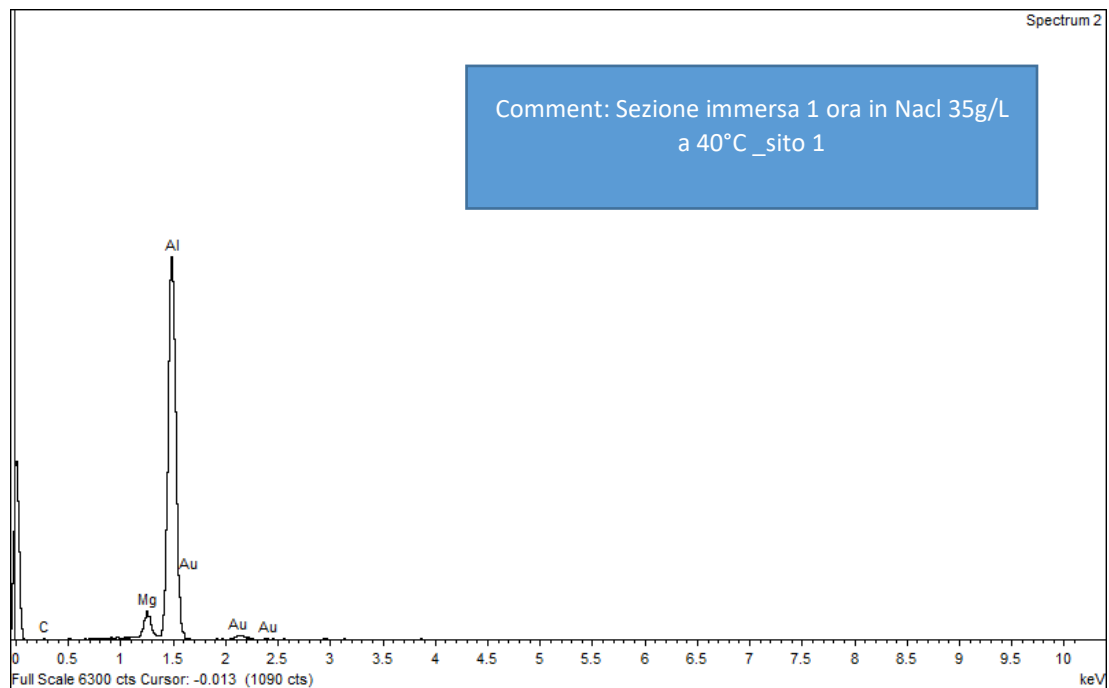


Spectrum processing :

No peaks omitted

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 27.81   | 38.95   |
| O K     | 38.26   | 40.22   |
| Mg K    | 1.61    | 1.11    |
| Al K    | 24.76   | 15.44   |
| Si K    | 7.00    | 4.19    |
| Ag L    | 0.56    | 0.09    |
| Totals  | 100.00  |         |

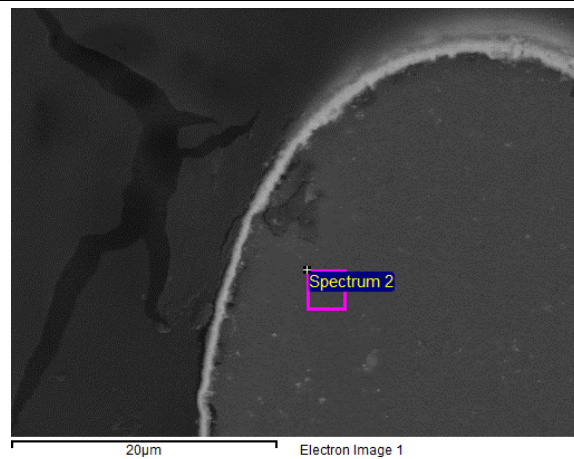


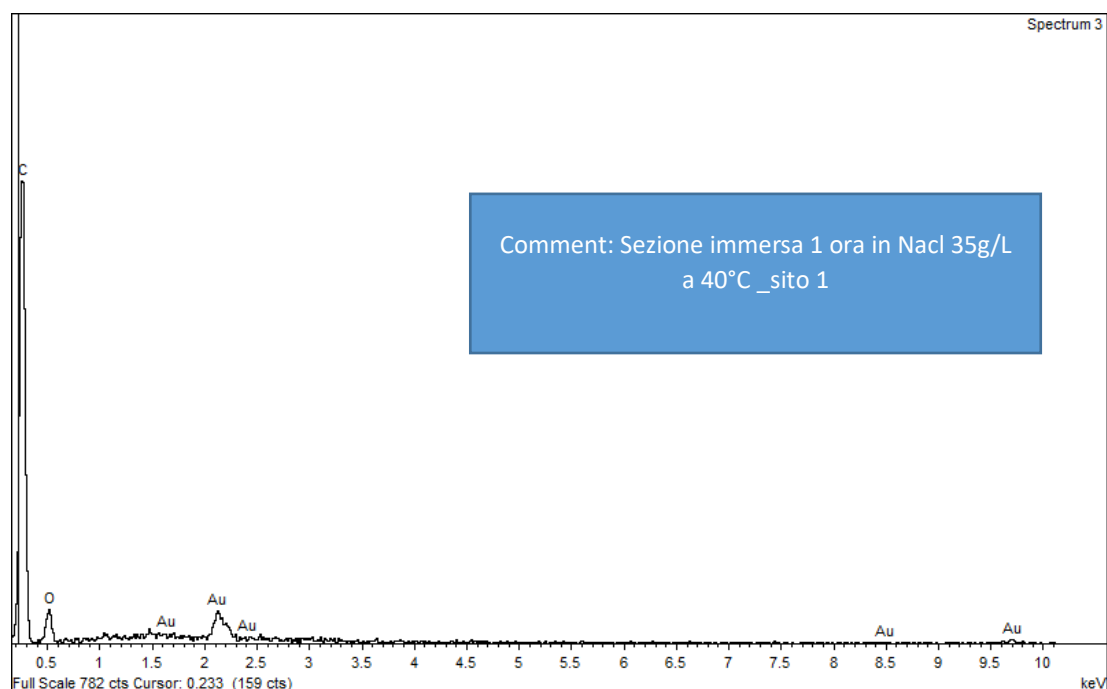


Spectrum processing :

No peaks omitted

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 33.10   | 52.48   |
| Mg K    | 4.12    | 3.23    |
| Al K    | 62.77   | 44.29   |
| Totals  | 100.00  |         |

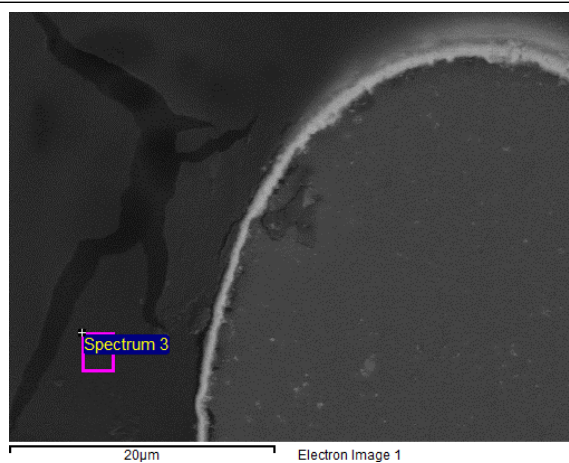


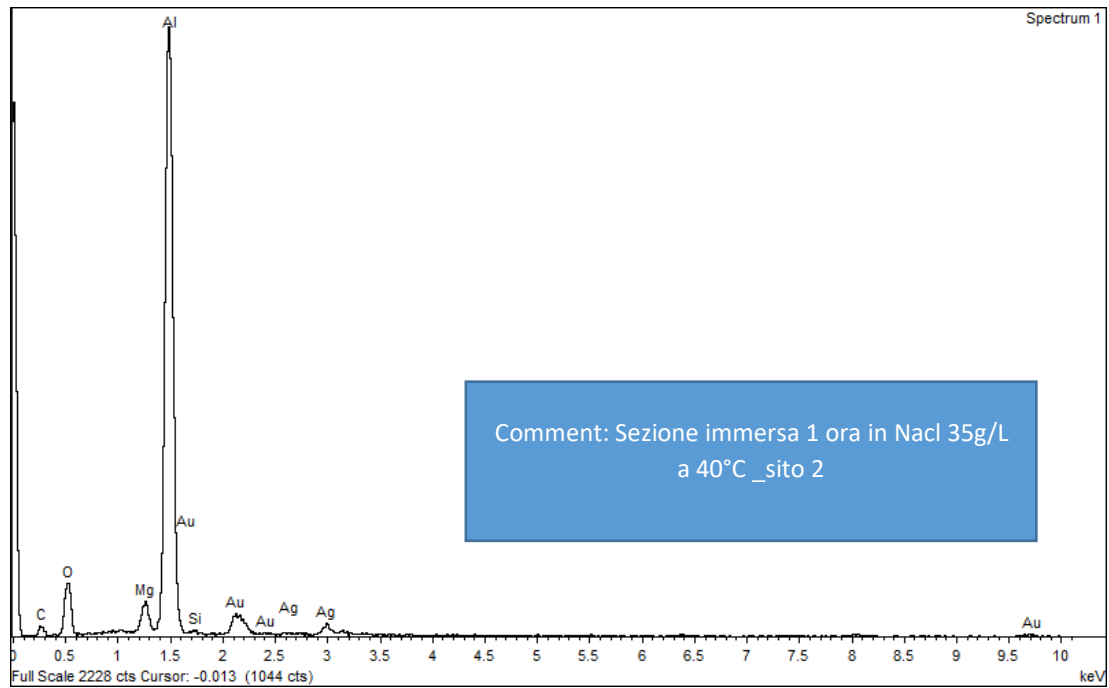


Spectrum processing :

No peaks omitted

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 86.05   | 89.15   |
| O K     | 13.95   | 10.85   |
| Totals  | 100.00  |         |

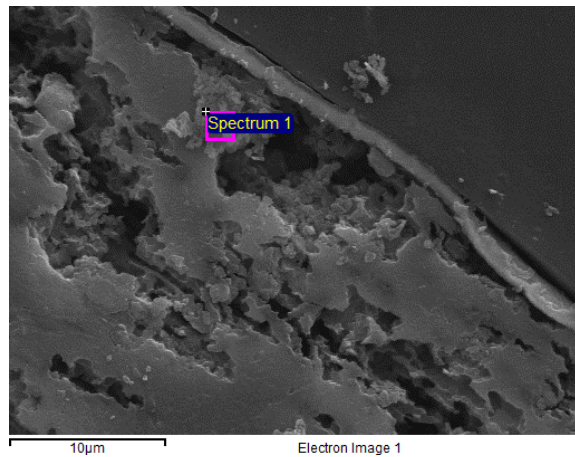


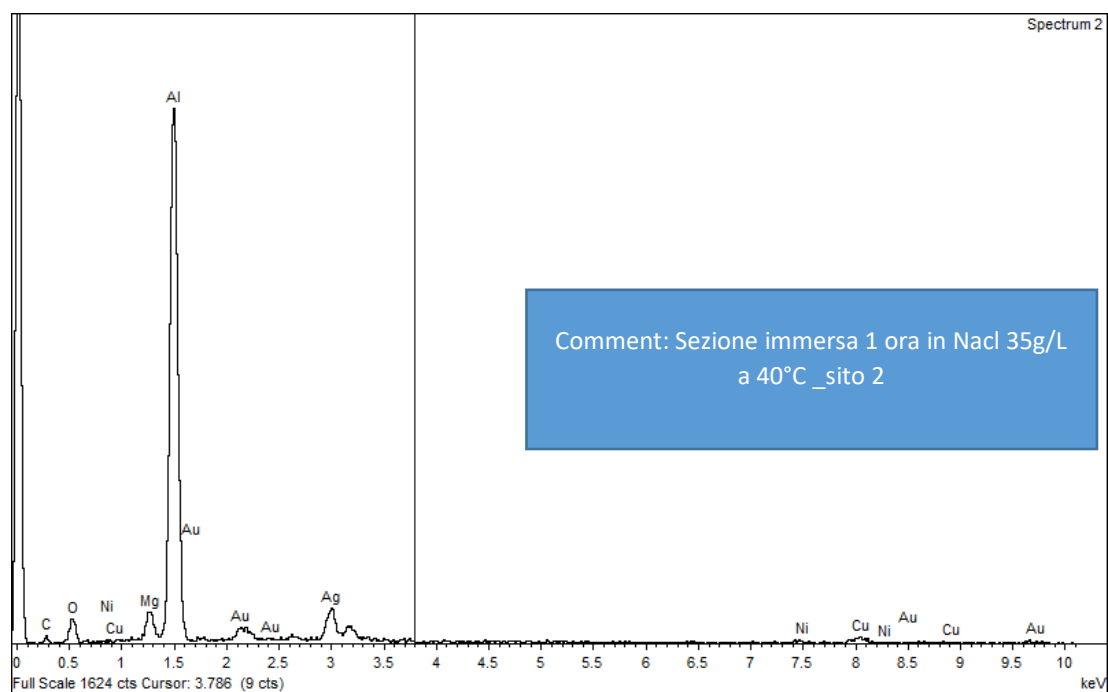


Spectrum processing :

No peaks omitted

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 29.01   | 39.56   |
| O K     | 42.94   | 43.96   |
| Mg K    | 1.45    | 0.98    |
| Al K    | 25.05   | 15.20   |
| Si K    | 0.15    | 0.09    |
| Ag L    | 1.40    | 0.21    |
| Totals  | 100.00  |         |

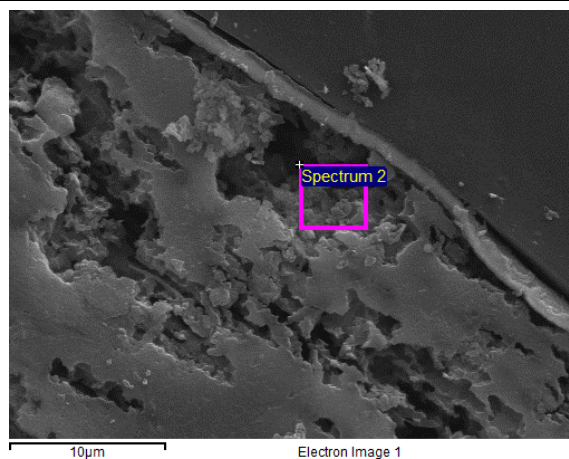


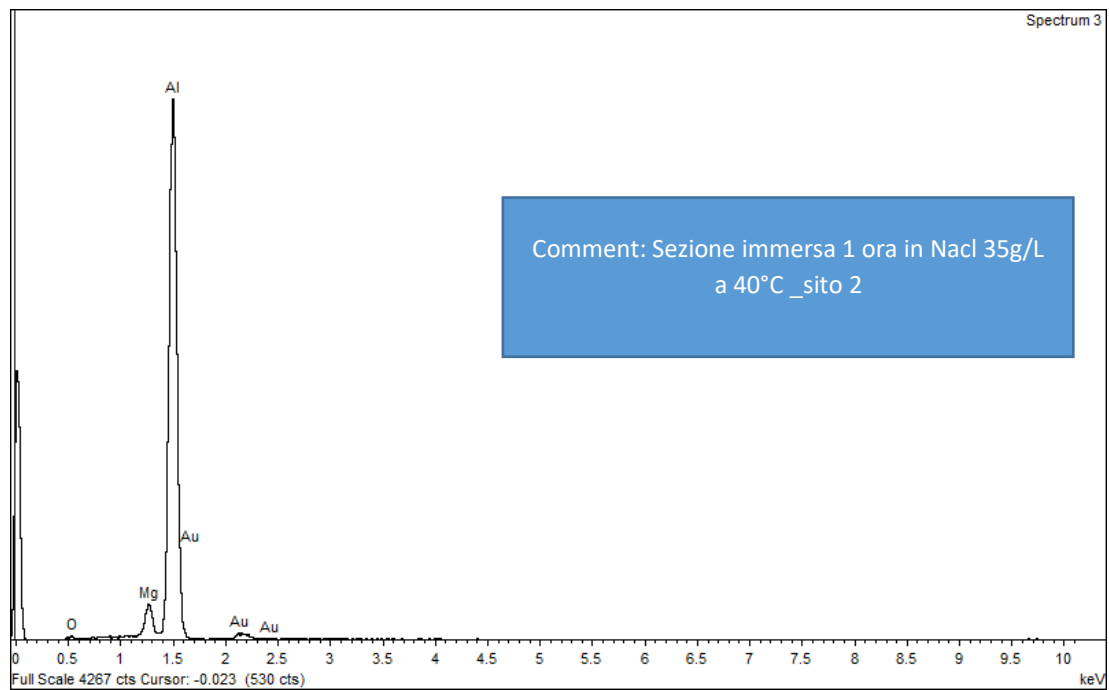


Spectrum processing :

No peaks omitted

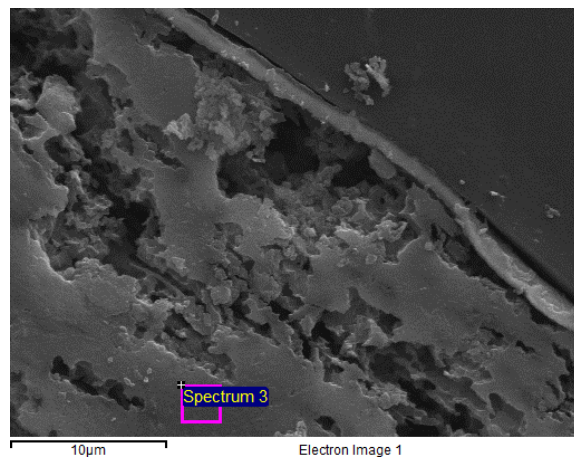
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 24.99   | 38.64   |
| O K     | 30.89   | 35.86   |
| Mg K    | 2.01    | 1.53    |
| Al K    | 31.68   | 21.80   |
| Ni K    | 0.55    | 0.17    |
| Cu K    | 2.44    | 0.71    |
| Ag L    | 7.44    | 1.28    |
| Totals  | 100.00  |         |





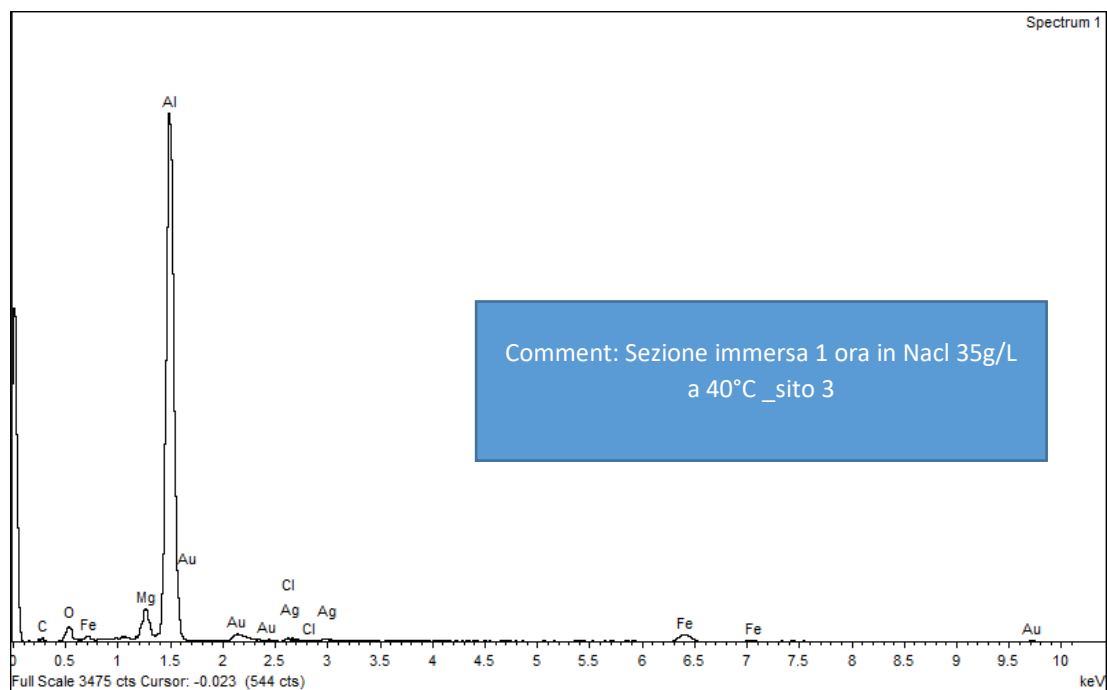
Spectrum processing :  
No peaks omitted

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| O K     | 9.13    | 14.42   |
| Mg K    | 4.79    | 4.98    |
| Al K    | 86.08   | 80.60   |
| Totals  | 100.00  |         |



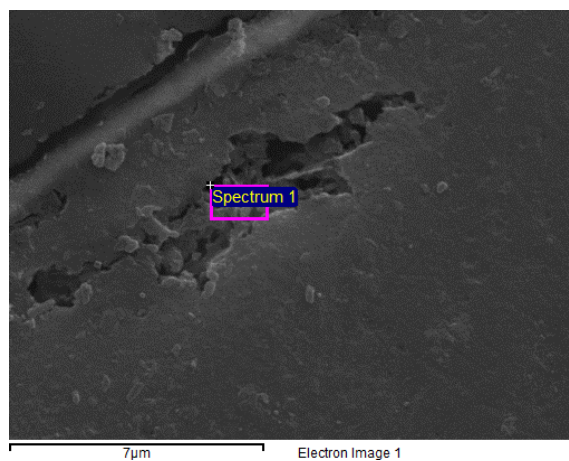
14.5

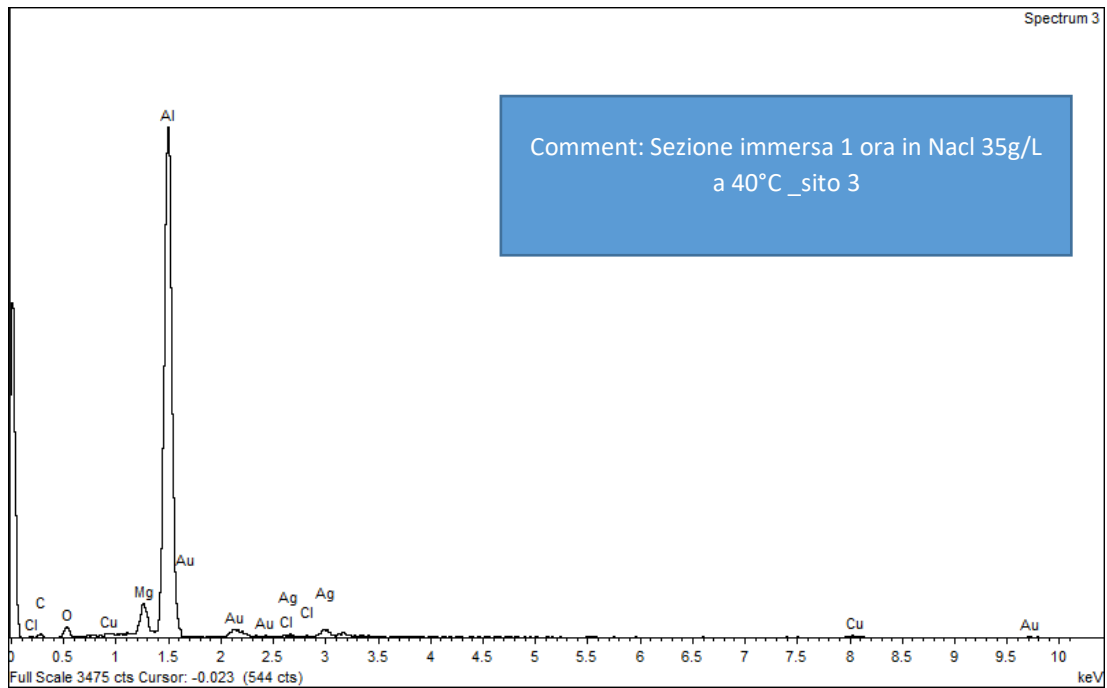




Spectrum processing :  
No peaks omitted

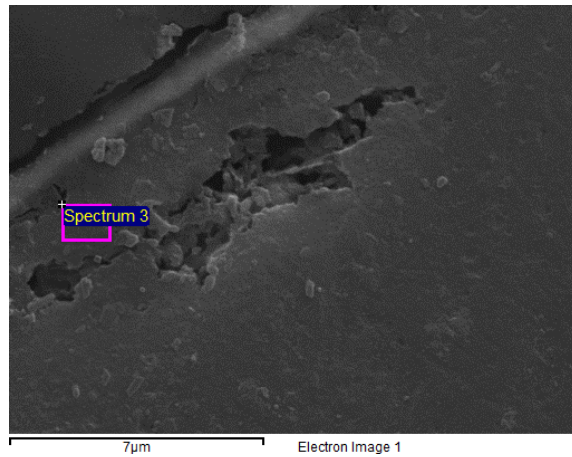
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 28.40   | 42.04   |
| O K     | 25.90   | 28.78   |
| Mg K    | 2.48    | 1.82    |
| Al K    | 40.01   | 26.36   |
| Cl K    | 0.29    | 0.14    |
| Fe K    | 2.41    | 0.77    |
| Ag L    | 0.50    | 0.08    |
| Totals  | 100.00  |         |

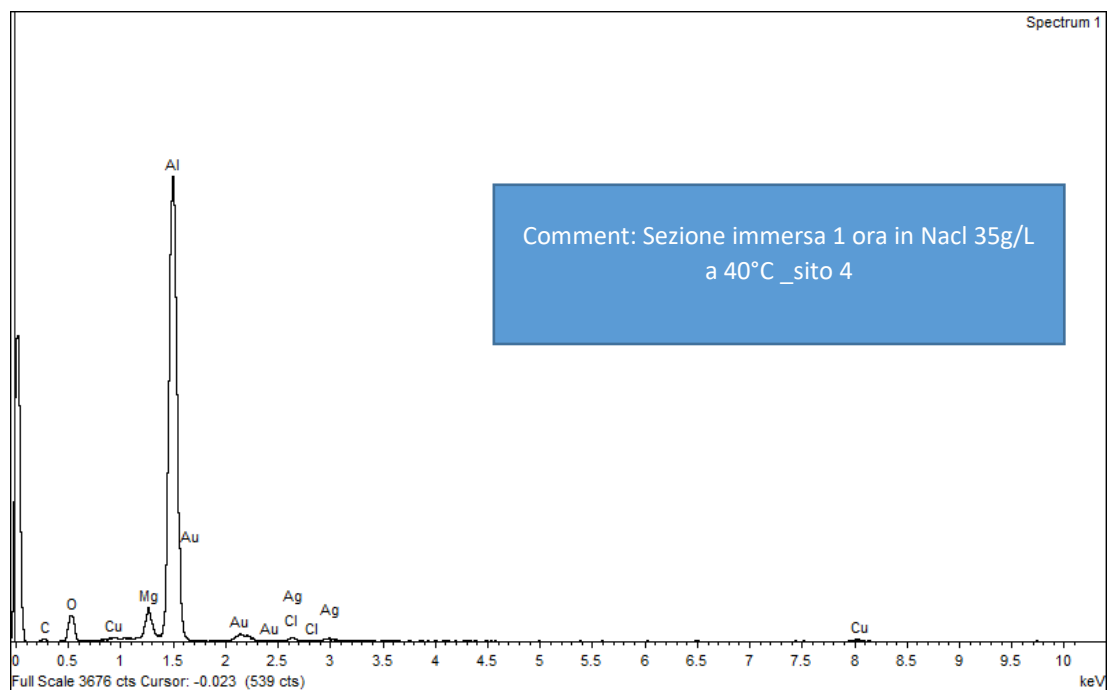




Spectrum processing :  
No peaks omitted

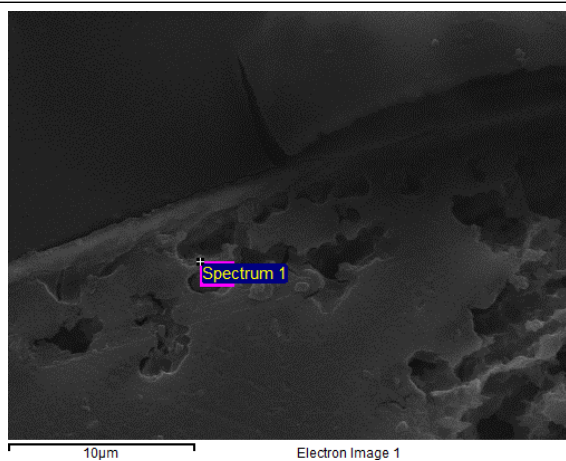
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 31.42   | 46.59   |
| O K     | 21.22   | 23.63   |
| Mg K    | 2.73    | 2.00    |
| Al K    | 40.84   | 26.96   |
| Cl K    | 0.20    | 0.10    |
| Cu K    | 1.11    | 0.31    |
| Ag L    | 2.49    | 0.41    |
| Totals  | 100.00  |         |

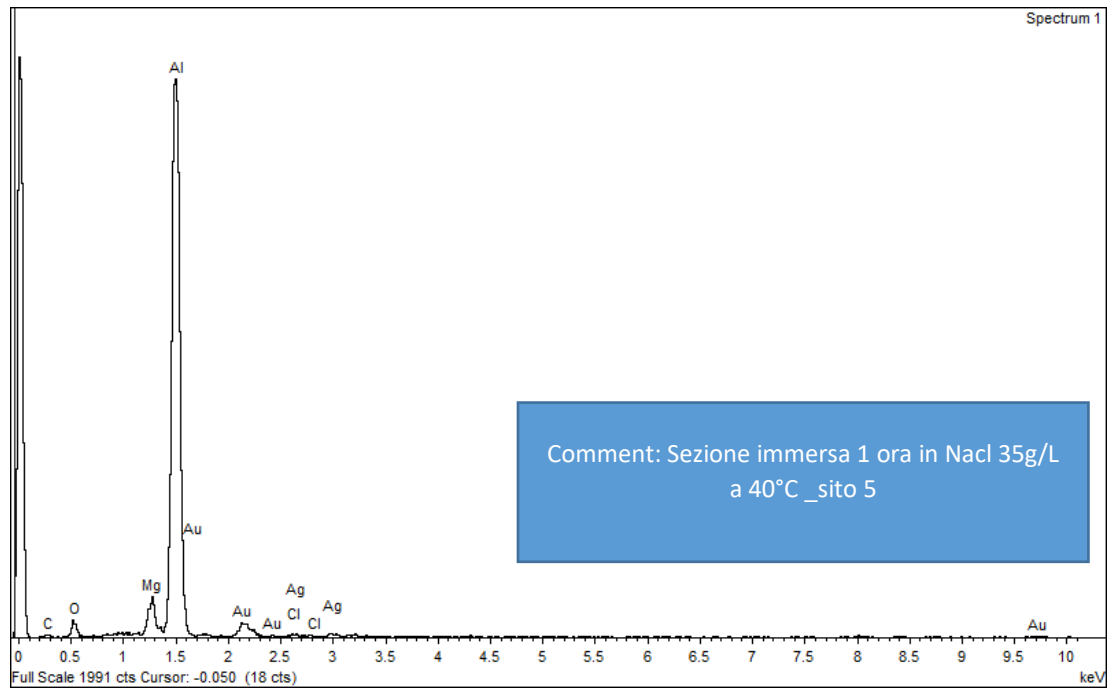




Spectrum processing :  
No peaks omitted

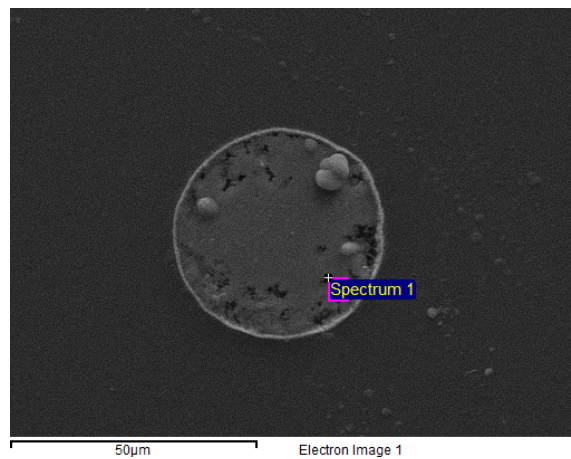
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 18.66   | 28.19   |
| O K     | 38.41   | 43.56   |
| Mg K    | 2.59    | 1.93    |
| Al K    | 38.19   | 25.68   |
| Cl K    | 0.41    | 0.21    |
| Cu K    | 1.15    | 0.33    |
| Ag L    | 0.60    | 0.10    |
| Totals  | 100.00  |         |

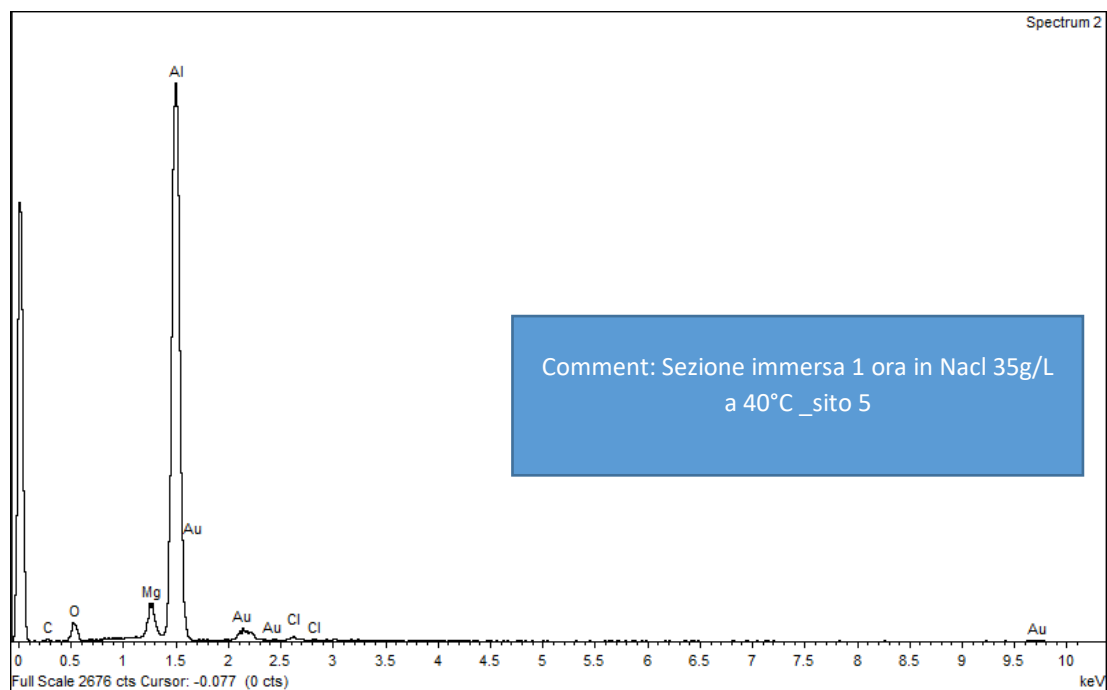




Spectrum processing :  
No peaks omitted

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 25.67   | 38.74   |
| O K     | 25.37   | 28.75   |
| Mg K    | 2.86    | 2.13    |
| Al K    | 44.68   | 30.02   |
| Cl K    | 0.31    | 0.16    |
| Ag L    | 1.11    | 0.19    |
| Totals  | 100.00  |         |

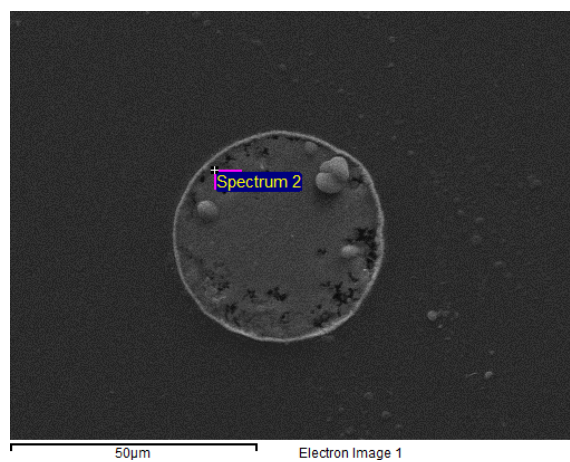


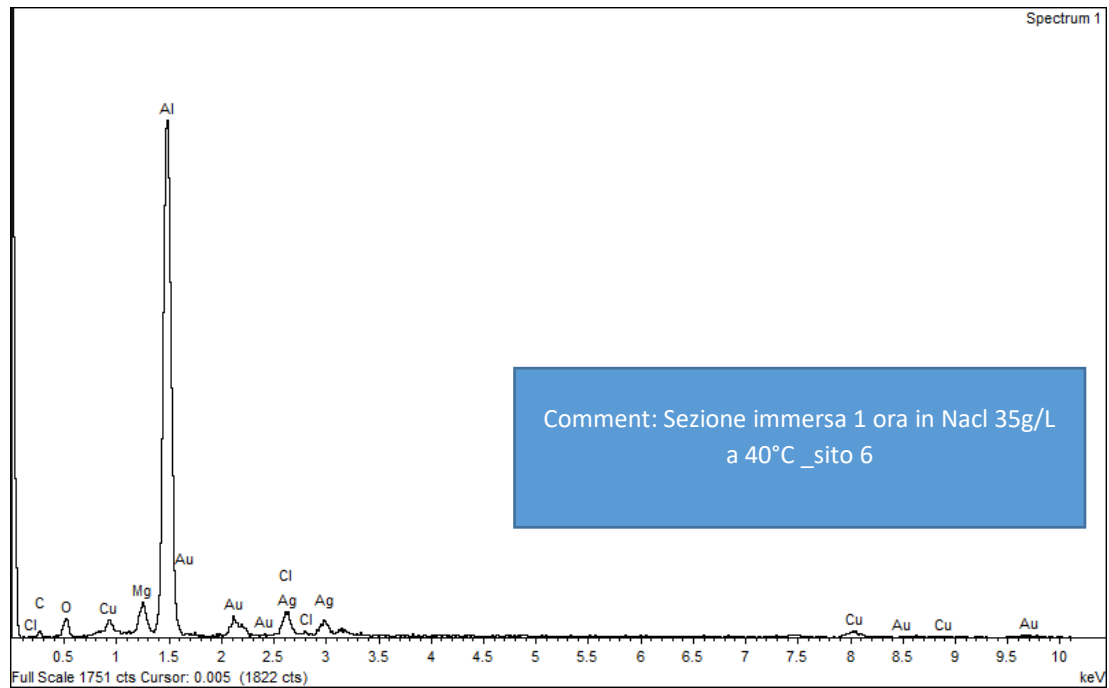


Spectrum processing :

No peaks omitted

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 24.24   | 36.20   |
| O K     | 29.12   | 32.65   |
| Mg K    | 2.83    | 2.09    |
| Al K    | 43.39   | 28.85   |
| Cl K    | 0.41    | 0.21    |
| Totals  | 100.00  |         |

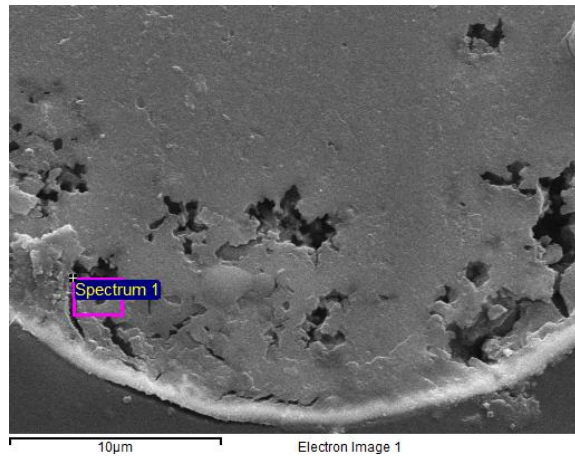


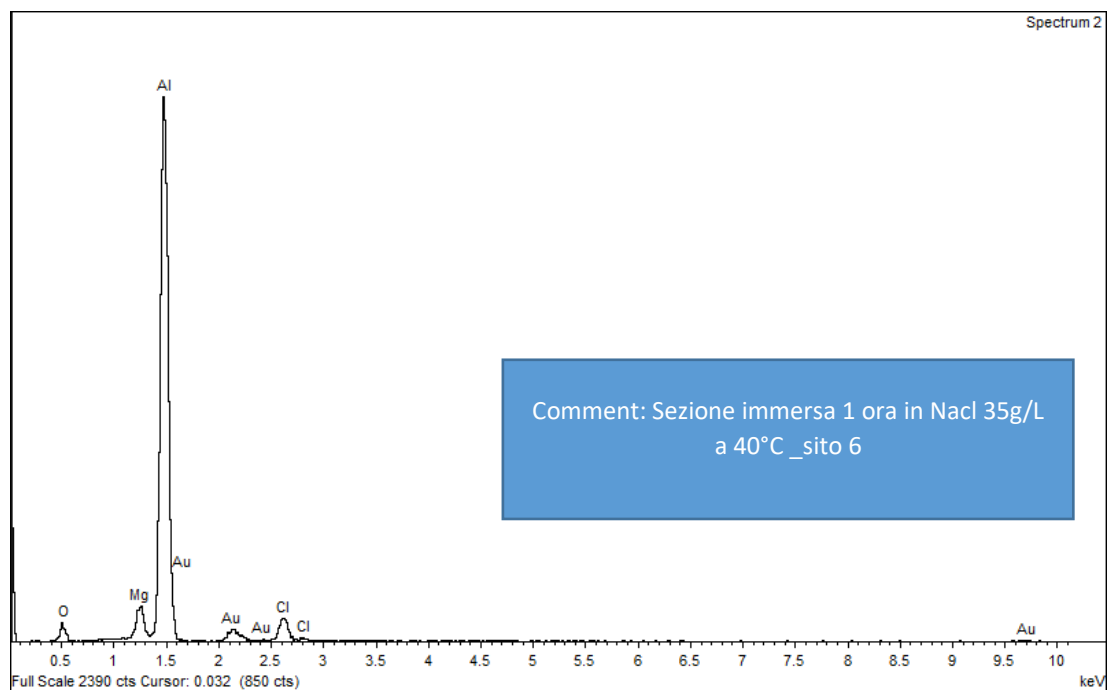


Spectrum processing :

No peaks omitted

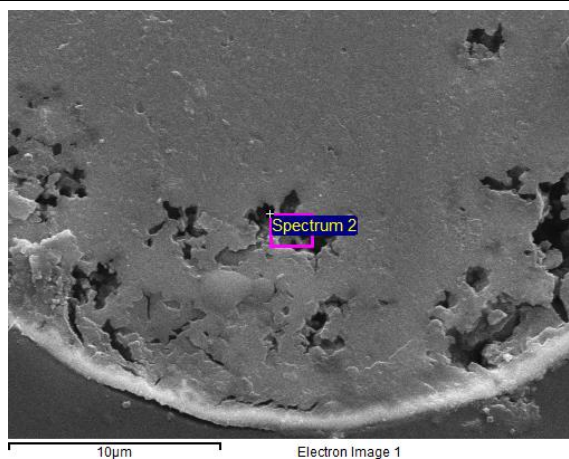
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 32.76   | 47.66   |
| O K     | 25.86   | 28.24   |
| Mg K    | 2.03    | 1.46    |
| Al K    | 31.52   | 20.41   |
| Cl K    | 2.02    | 0.99    |
| Cu K    | 2.55    | 0.70    |
| Ag L    | 3.26    | 0.53    |
| Totals  | 100.00  |         |

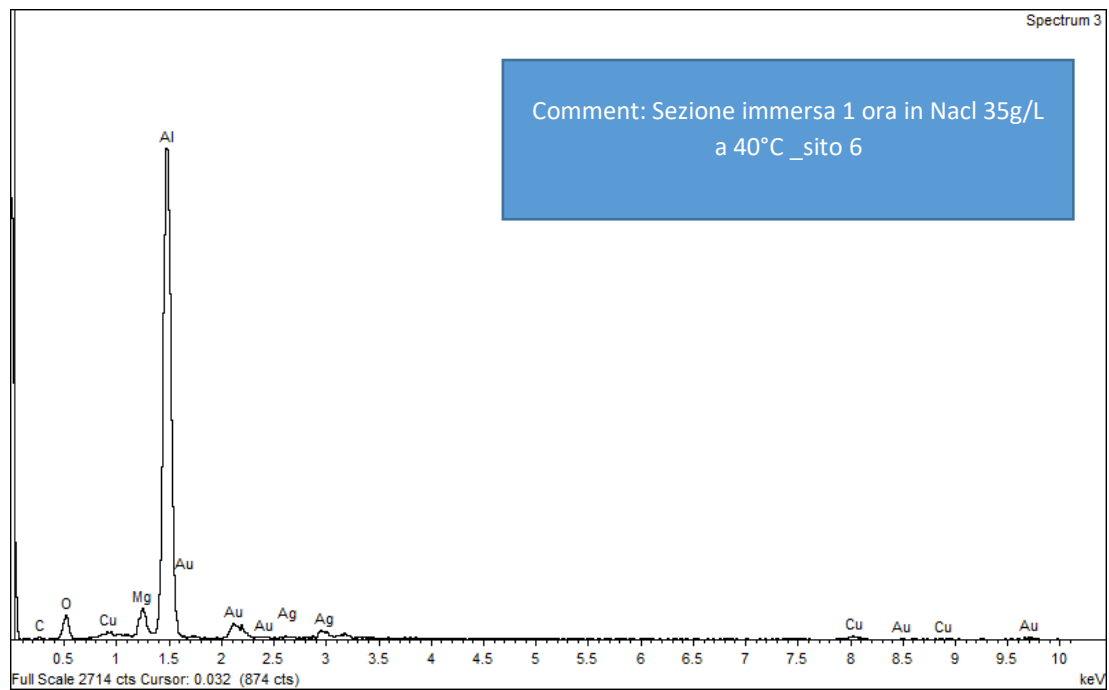




Spectrum processing :  
No peaks omitted

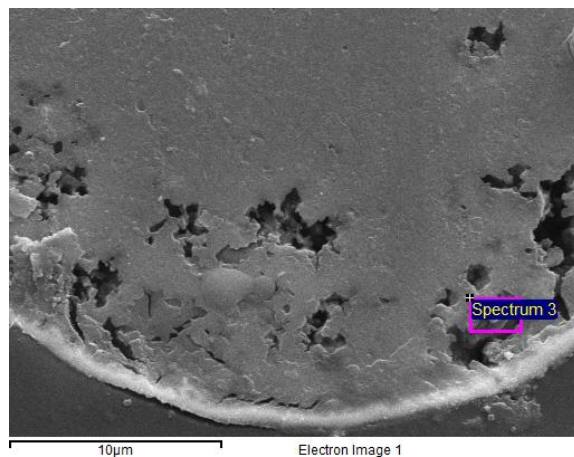
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| O K     | 30.83   | 43.22   |
| Mg K    | 3.78    | 3.49    |
| Al K    | 60.09   | 49.95   |
| Cl K    | 5.30    | 3.35    |
| Totals  | 100.00  |         |





Spectrum processing :  
No peaks omitted

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 19.26   | 29.78   |
| O K     | 34.65   | 40.22   |
| Mg K    | 2.55    | 1.94    |
| Al K    | 39.45   | 27.15   |
| Cu K    | 1.64    | 0.48    |
| Ag L    | 2.46    | 0.42    |
| Totals  | 100.00  |         |



paginafinale





