



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN  
INGEGNERIA MECCANICA

**ANALISI DELL'USURA SU RULLI DI RICOTTURA IN  
IMPIANTI DI TRAFILATURA MULTIFILO PER  
ALLUMINIO**

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN  
PROCESSI E METODI DI FABBRICAZIONE PER LO SVILUPPO DEL PRODOTTO

**Relatore**

**Prof. Lorenzo Donati**

**Presentata da**

**Davide Battiato**

**Correlatori**

**Ing. Sara Di Donato**

**Ing. Enrico Conte**

---

**Sessione III, marzo 2024  
Anno Accademico 2022/2023**



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN  
INGEGNERIA MECCANICA

**ANALISI DELL'USURA SU RULLI DI RICOTTURA IN  
IMPIANTI DI TRAFILATURA MULTIFILO PER  
ALLUMINIO**

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN  
PROCESSI E METODI DI FABBRICAZIONE PER LO SVILUPPO DEL PRODOTTO

**Relatore**

**Prof. Lorenzo Donati**

**Presentata da**

**Davide Battiato**

**Correlatori**

**Ing. Sara Di Donato**

**Ing. Enrico Conte**

---

**Sessione III, marzo 2024**  
**Anno Accademico 2022/2023**



## *ABSTRACT*

---

Questa tesi è stata sviluppata con lo scopo di analizzare il difetto di usura per il quale i rulli assemblati negli impianti di trafilatura multifilo dell'azienda Samp s.r.l. sono soggetti durante la produzione di fili in alluminio. È stato deciso di approfondire questo studio a causa di alcune anomalie rilevate durante la produzione da parte dei clienti dell'azienda, che hanno determinato fermi macchina. Nello specifico è stata focalizzata l'attenzione sulla teoria riguardante i possibili fenomeni fisici che determinano la deteriorazione dei rulli attraverso un'analisi generale delle attuali condizioni di produzione dei fili d'alluminio ed i trattamenti necessari per l'ottimizzazione del processo. Successivamente è stata illustrata una linea di produzione del filo in alluminio, focalizzando l'attenzione sul processo di usura che è stato rilevato. Per una maggiore comprensione del problema, sono state svolte delle analisi di controllo distruttive su due rulli sottoposti alla lavorazione del filo. Il progetto continua con la progettazione ed installazione di un banco prova avente lo scopo di simulare le condizioni di ricottura che si osservano nel macchinario industriale, prevedendo quale condizione possa ottimizzare e ridurre la degradazione dei rulli. Esso permette di focalizzare l'attenzione sui fenomeni fisici di attrazione elettrica tra il filo di alluminio ed alcuni rivestimenti superficiali, applicati in diversi provini metallici. Sono state eseguite delle prove di installazione che hanno permesso un confronto preliminare tra materiali, analizzando le condizioni di trattamento termico alle quali il filo di alluminio è soggetto. In fase conclusiva è stata focalizzata l'attenzione sui punti critici e di miglioramento sui quali dover continuare la ricerca per poter eseguire delle analisi sperimentali in maniera ripetibile con la minor quantità di errori possibile.

### *Parole chiave:*

Anello; Deterioramento; Elettricità; Filo; Prototipo; Provino; Rivestimento; Trattamento.

# SOMMARIO

---

<b>ABSTRACT</b>	<b>3</b>
<b>PREMESSA</b>	<b>7</b>
<b>1 CARATTERISTICHE DEL PROCESSO PRODUTTIVO DEL FILO</b>	<b>9</b>
1.1 I MATERIALI E LE LORO PROPRIETÀ FISICHE	9
1.2 L'ATTRIBUZIONE DELLA FORMA AL FILO	16
1.3 IL PROCESSO DI RICOTTURA	19
1.4 TRIBOLOGIA: FENOMENO DELL'USURA	24
1.4.1 USURA ELETTRICA	27
1.5 RESISTENZA ALL'USURA: DEPOSIZIONE DI RIVESTIMENTI SUPERFICIALI	32
1.5.1 DEPOSIZIONE DI SPESSORI SOTTILI	33
1.5.1 DEPOSIZIONE DI SPESSORI MEDI	34
1.5.1 DEPOSIZIONE DI SPESSORI ELEVATI	37
1.5.1.1 RIVESTIMENTI TERMOSPRUZZATI	37
<b>2 LINEA PRODUTTIVA AZIENDA SAMP</b>	<b>43</b>
2.1 ANALISI LINEA DI PRODUZIONE DEL FILO	43
2.2 DIFETTI DI USURA E POSSIBILI SOLUZIONI	53
2.2.1 PRIMA SOLUZIONE: <i>TIPOLOGIA RIVESTIMENTO SULL'ANELLO DI CONTATTO</i>	60
2.2.2 SECONDA SOLUZIONE: <i>CONTROLLO ATMOSFERA NEL FORNO DI RICOTTURA</i>	63
2.2.3 TERZA SOLUZIONE: <i>GRADO DI PULIZIA SUPERFICIALE DEL FILO</i>	64
2.2.4 QUARTA SOLUZIONE: <i>VARIAZIONE METODO DI RICOTTURA DEL FILO</i>	66
2.2.5 QUINTA SOLUZIONE: <i>PROTEZIONE ANELLO CON LIQUIDO DIELETTRICO</i>	67
2.3 CONCLUSIONI PRELIMINARI INERENTI ALLE SOLUZIONI PROPOSTE	68
<b>3 RICERCA E SVILUPPO</b>	<b>71</b>
3.1 PROGETTAZIONE BANCO PROVA	71

3.1.1 ANALISI RIVESTIMENTI E PROGETTAZIONE PROVINI	74
3.1.2 ANALISI ATMOSFERA E PROGETTAZIONE TECA	79
3.2 INSTALLAZIONE ATTREZZATURA	80
3.2.1 PROVE PRELIMINARI DI FUNZIONAMENTO	88
<b>4 CONCLUSIONI</b>	<b>91</b>
4.1 PARAMETRI QUALITATIVI DI MIGLIORAMENTO	91
4.2 COMMENTI E MIGLIORAMENTI DEL BANCO PROVA	92
<b>5 ALLEGATI</b>	<b>96</b>
<i>ALLEGATO A</i>	96
<i>ALLEGATO B</i>	100
<i>ALLEGATO C</i>	101
<i>ALLEGATO D</i>	102
<b>6 BIBLIOGRAFIA</b>	<b>103</b>



## PREMESSA

---

Questo elaborato è stato sviluppato presso Samp s.r.l., azienda multinazionale di esperienza nella progettazione e produzione di macchinari per la fabbricazione di fili e cavi elettrici.

Nello specifico l'organizzazione dei processi produttivi dell'azienda seguono tre vie:

- linea metallurgica, nella quale ricadono tutti i macchinari che si occupano della produzione del filo di metallo;
- linea di estrusione, basata sui macchinari che permettono di isolare, tramite uno strato polimerico protettivo, il filo precedentemente prodotto dalla linea metallurgica;
- linea delle macchine rotanti, dove sono compresi i macchinari necessari alla formazione del cavo tramite l'assemblaggio di più fili.

Alcuni clienti hanno rilevato un difetto durante la produzione del filo di alluminio che ne provoca la rottura. Tale fenomeno è causato da un problema di usura a cui un componente meccanico è soggetto durante la fase di trattamento termico del filo, richiedendone la sostituzione con importanti esborsi economici ed inopportune interruzioni della produzione. Lo scopo di questo elaborato è centrato sullo studio ed ottimizzazione del processo produttivo di trattamento termico del filo di alluminio, studiando un metodo per prevedere e simulare il comportamento del componente industriale prima che esso venga messo in esercizio e ricercando la soluzione meno deteriorante. Questo studio introduce nel capitolo 1 i fenomeni fisici riguardanti il processo produttivo del filo di alluminio. Il capitolo 2 è focalizzato sulla descrizione di una linea completa di produzione del filo di alluminio, soffermandosi maggiormente sul difetto di usura osservato. Il capitolo 3 è sviluppato per descrivere la progettazione ed installazione di un prototipo sperimentale, installato nel laboratorio di Samp s.r.l. e che verrà utilizzato per eseguire delle prove sperimentali di simulazione del comportamento del fenomeno usurante. L'elaborato viene concluso con commenti in merito alle prime prove di installazione eseguite ed a future modifiche a cui il prototipo potrà essere soggetto per approfondire aspetti più specifici del difetto di usura rilevato.



# 1 CARATTERISTICHE DEL PROCESSO PRODUTTIVO DEL FILO

## 1.1 I materiali e le loro proprietà fisiche

Il rame è il materiale più utilizzato per la produzione di fili metallici grazie alle sue eccellenti proprietà elettriche e meccaniche.

Con l'elettrificazione dei veicoli, il settore automotive è costantemente influenzato da un incremento della quantità di cavi che vengono installati nelle automobili. È pertanto fondamentale la loro corretta progettazione per ottimizzare il loro funzionamento e la loro durata in esercizio, dovendo soddisfare specifici requisiti elettrici e meccanici.

Un altro aspetto di fondamentale importanza che si deve tenere in considerazione riguarda la quantità di emissioni di carburante prodotta dalle automobili. Tale valore, essendo fortemente dipendente dal peso stesso dell'abitacolo, deve essere ridotto.

In una automobile di medie dimensioni, è stata stimata la presenza di cavi elettrici per un totale di circa 4 km di lunghezza [1] (Fig.1). Questo fa capire che è molto influente la loro presenza sul peso complessivo.



**Figura 1.** *Raffigurazione della quantità di cavi presenti all'interno di un'auto di medie dimensioni [2]*

In alternativa al rame, sono state studiate le proprietà che vengono rilasciate al cavo finale quando esso è formato da alluminio come materiale principale. È stato osservato come tale modifica, con i dovuti accorgimenti, permette di ridurre notevolmente i pesi del veicolo e contemporaneamente garantire le specifiche proprietà elettriche e meccaniche al cavo.

La caratteristica che lo rende il sostituto ideale del rame per far fronte ai problemi precedentemente elencati, è la sua bassa densità in confronto a quella del rame ( $2,7 \text{ g/cm}^3$  contro  $8,9 \text{ g/cm}^3$  del

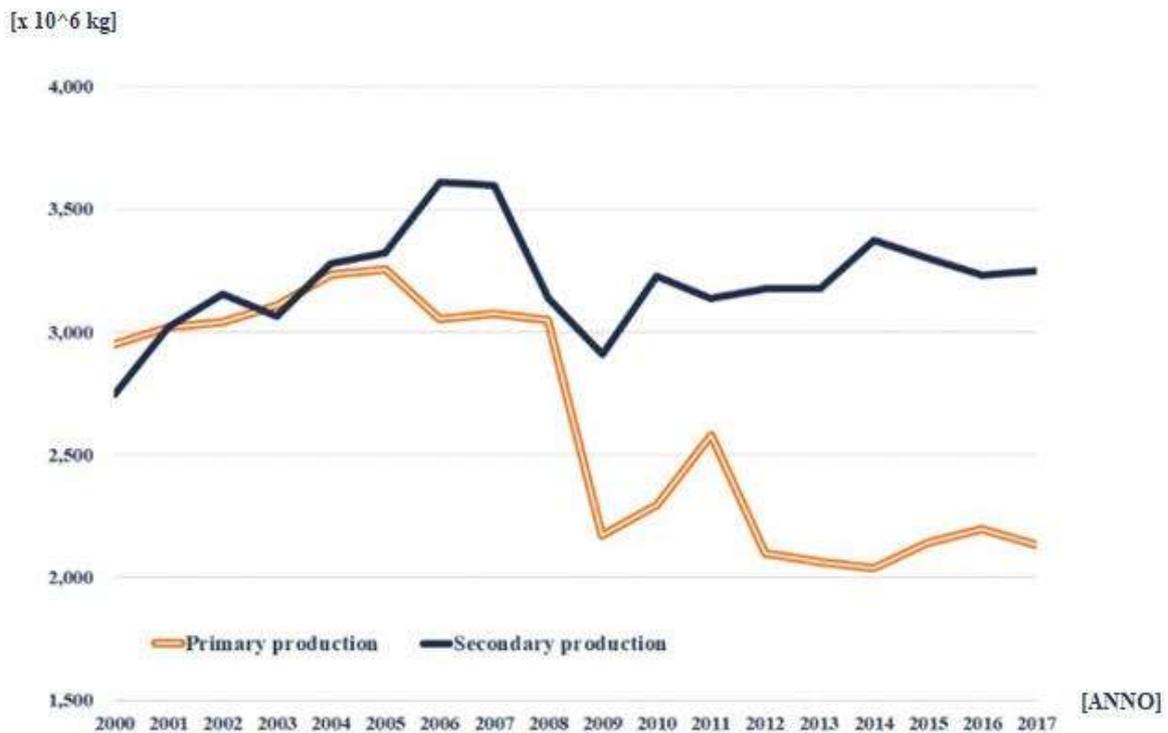
rame)[3]. La produzione di tale materiale partendo dalla materia prima è però un aspetto critico, che lo rende effettivamente un materiale ad elevato consumo energetico, rischiando di provocare una conclusione opposta rispetto a quella ricercata.

La sua produzione si distingue in due prodotti: l'alluminio prodotto partendo dalle rocce presenti in natura, denominato "alluminio primario", e quello ottenuto tramite processi di riciclo, denominato "alluminio secondario" [4].

Il minerale di partenza con il quale viene ottenuto l'alluminio primario è la bauxite. Essa è composta da ossidi ed idrossidi di alluminio e ferro, ed è una sostanza molto diffusa nella crosta terrestre (circa 8% [5]). Sebbene la sua vasta presenza ne avrebbe potuto implicare un grande utilizzo sin dall'antichità, questo non è avvenuto. Il motivo principale è dovuto al fatto che i processi dai quale si ottiene l'alluminio primario sono molto laboriosi ed energivori, il che ha portato ad un loro sviluppo solo nella fine del Novecento. In merito a quest'ultimi, vengono citati il processo Bayer, dal quale è possibile ottenere allumina ( $Al_2O_3$ ) tramite un processo fusione ad alta temperatura, ed il processo Hall-Héroult, dal quale si ottiene l'alluminio primario ricercato.[4].

Un ulteriore effetto negativo di questi processi sono gli scarti di produzione. I cosiddetti "fanghi rossi" (nome derivante dal tipico colore rosso posseduto) sono sottoprodotti del processo Bayer. Essi contengono ossidi di ferro, metalli pesanti ed anche elementi radioattivi, ed il loro smaltimento risulta alquanto difficile [6].

A causa delle motivazioni citate, in molte applicazioni si preferisce optare per l'alluminio secondario. Questo prodotto, oltre a dare una seconda opportunità ad un materiale a fine vita, entrando nell'ottica di una progettazione circolare, permette di abbassare notevolmente i consumi di energia. È stato stimato che circa il 93% di energia può essere risparmiata optando per una produzione di alluminio secondario piuttosto che quello primario [7]. La tendenza della produzione di alluminio in Europa ha avuto un forte calo per l'alluminio primario, mentre ha mantenuto valori stabili per quello secondario (Fig.2).



**Figura 2.** Confronto tra la produzione di alluminio primario e secondario in EU [8]

Altre due caratteristiche dell'alluminio sono una buona malleabilità e la bassa temperatura di fusione, illustrate nella figura 3.

	Al	Mg	Ti	Cu	Fe
<b>numero atomico</b>	13	12	22	29	26
<b>struttura cristallina</b>	cfc	ec	ec	cfc	ccc
<b>densità, <math>\rho</math> (Mg/m<sup>3</sup>)</b>	2,70	1,74	4,51	8,96	7,87
<b>temperatura di fusione (° C)</b>	660	650	1670	1083	1535
<b>conducibilità termica (W/mK)</b>	238	156	26	387	78
<b>coeff. di espansione termica (10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>)</b>	23,5	26,0	6,9	17,0	12,1
<b>modulo elastico (GPa)</b>	70	45	120	130	211
<b>modulo specifico E/<math>\rho</math></b>	26	26	26	14	27
<b>carico di rottura (MPa)</b>	60	190	250	220	250

**Figura 3.** Confronto delle proprietà fisiche e chimiche dei principali elementi utilizzati nell'industria manifatturiera [8]

Di contro però, l'alluminio ha come punto critico quello di non essere un materiale meccanicamente resistente rispetto agli altri materiali utilizzati nell'industria manifatturiera (Fig.2). Per migliorare questa caratteristica, nelle applicazioni in cui è richiesta maggiore efficienza meccanica l'alluminio viene additivato con altri elementi, ottenendo le "leghe di alluminio". Esse vengono definite dall'International Alloy Designation System (IADS) [9] che ne definisce la nomenclatura in funzione degli elementi alliganti presenti. Grazie alla loro vasta presenza ed importanza, quando ci si riferisce

a questo materiale è sempre necessario specificare a quale lega si sta facendo riferimento, in quanto esse possono avere proprietà completamente diverse.

Oltre alle proprietà meccaniche, sono di fondamentale importanza anche quelle elettriche quando si fa riferimento ai cavi per la conduzione di elettricità.

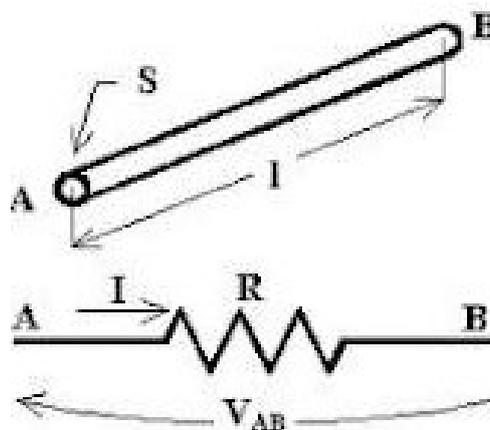
Si definisce carica elettrica la grandezza scalare che rappresenta la carica fisica fonte dei fenomeni elettromagnetici di un sistema elettrico. La sua unità di misura è il Coulomb (C) ed il suo valore elementare viene quantificato paragonandolo direttamente a quello dell'elettrone, convenzionalmente di segno negativo pari a  $-1,602176634 \times 10^{-19}$  C [10].

Partendo da questa definizione, si definisce la conduttanza elettrica (G) il parametro che identifica la capacità di un materiale a permettere il passaggio di elettroni per mezzo del proprio corpo. Viene quantificata dal Sistema internazionale con l'unità di misura Siemens (S) ed è definita dall'equazione 1 (Tab.1), all'interno della quale è presente il termine omega ( $\sigma$ ), che rappresenta la conducibilità del materiale in  $\Omega \times m/m^2$ , lunghezza (l), che rappresenta l'estensione del tratto di filo valutato in mm e la sezione (S), del filo espressa in  $mm^2$ .

La conduttanza è l'inverso della resistenza elettrica (R) che, viceversa, quantifica l'attitudine del materiale all'opposizione del passaggio di corrente elettrica [11] misurata in ( $\Omega$ ).

La conducibilità elettrica di un materiale definisce la conduttanza in riferimento ad un filo di lunghezza pari ad 1 m [12] e viene definita dall'equazione 2 (Tab.1), all'interno della quale sono presenti i termini della differenza di potenziale elettrico ( $\Delta V$ ) ai capi del filo in espressa Volt e della densità di corrente elettrica (J) espressa in  $A/mm^2$ .

All'interno di un circuito elettrico (Fig. 4) i parametri tensione (V), intensità di corrente (I) e resistenza (R) sono relazionati dalla Prima Legge di Ohm (Eq.3, Tab. 1). Tale relazione risalta la diretta proporzionalità tra la tensione (V) ed il prodotto tra corrente e resistenza ( $R \times I$ ).



**Figura 4.** Schematizzazione della resistenza elettrica [13].

Si definisce intensità di corrente la grandezza scalare che quantifica la carica elettrica che percorre la sezione del conduttore nell'unità di tempo. La tensione elettrica è l'entità fisica necessaria a far circolare la carica elettrica all'interno di un circuito elettrico [11].

Un parametro principale che determina la resistenza all'opposizione del passaggio di carica elettrica è la lunghezza del conduttore. Seguendo la Seconda Legge di Ohm (Eq.4, Tab.1), maggiore è la lunghezza, maggiore sarà la resistenza che il materiale opporrà [11], a parità degli altri fattori di influenza ( $\rho$  rappresenta la resistività del materiale in  $\Omega \times m^2/m$ ).

La resistività elettrica è un valore quantitativo intrinseco ai materiali che rappresenta la resistenza al passaggio di elettroni in un conduttore ideale avente sezione di  $1 m^2$  e lunghezza di  $1 m$ . Essa è dipendente dalla temperatura secondo l'equazione 5 (Tab.1), nella quale  $\rho_0$  rappresenta la resistività del materiale a  $0^\circ C$  in ( $\Omega \times m^2/m$ ),  $\alpha$  è il coefficiente di variazione della resistività al variare della temperatura e  $T$  è la differenza di temperatura rispetto  $0^\circ C$ .

**Tabella 1.** Raccolta formule dimostrative delle proprietà elettriche del filo.

$G = \sigma \times \frac{S}{l}$	<b>Equazione 1</b>
$\sigma = \frac{I \times l}{S \times \Delta V} = \frac{J \times l}{\Delta V}$	<b>Equazione 2</b>
$V = R \times I$	<b>Equazione 3</b>
$R = \rho \times \frac{l}{S}$	<b>Equazione 4</b>
$\rho = \rho_0 \times (1 + \alpha \times T)$	<b>Equazione 5</b>

Un valore che viene tenuto in considerazione quando si progetta un componente atto a condurre elettricità è la conducibilità elettrica specifica, ossia la conducibilità assoluta dell'elemento per unità di peso del materiale in considerazione definita in  $S/(m \times kg)$ . In figura 5 vengono confrontati qualitativamente i principali materiali utilizzati nell'ambito della conduzione elettrica.



**Figura 5.** Confronto tra la conduttività assoluta e relativa delle principali leghe utilizzate in ambito elettrico [8]

Questo porta ad una conseguenza molto importante, che deve essere tenuta sempre in considerazione quando si vogliono ottimizzare i valori precedentemente citati.

Per sopperire alla ridotta conducibilità elettrica assoluta (S/m) dell'alluminio rispetto al rame, è necessario prevedere maggiore sezione del filo per trasferire la stessa carica elettrica.

Anche se si verificasse un aumento del volume di cavi complessivo, la massa totale diminuirebbe notevolmente perché la densità dell'alluminio è molto inferiore rispetto a quella del rame. Questo permetterebbe, mantenendo la stessa lunghezza di fili elettrici presenti dentro l'automobile, di ridurre fino al 50% il peso complessivo dell'autoveicolo [14]. Nella figura 6, viene quantificata la massa per unità di lunghezza di un cavo di rame e di alluminio, mettendo in risalto il ridotto peso di quello di alluminio (2,0g/m rispetto 4,3g/m).

Conductor	Conductivity	Cross section of	Specific gravity	Weight of wire
	%IACS	mm <sup>2</sup>	Mg/m <sup>3</sup>	g/m
Copper	100	0.5	8.9	4.3
Aluminum	66	0.75	2.7	2.0

**Figura 6.** Indicazione della massa per unità di lunghezza tra il filo di alluminio e rame [14]

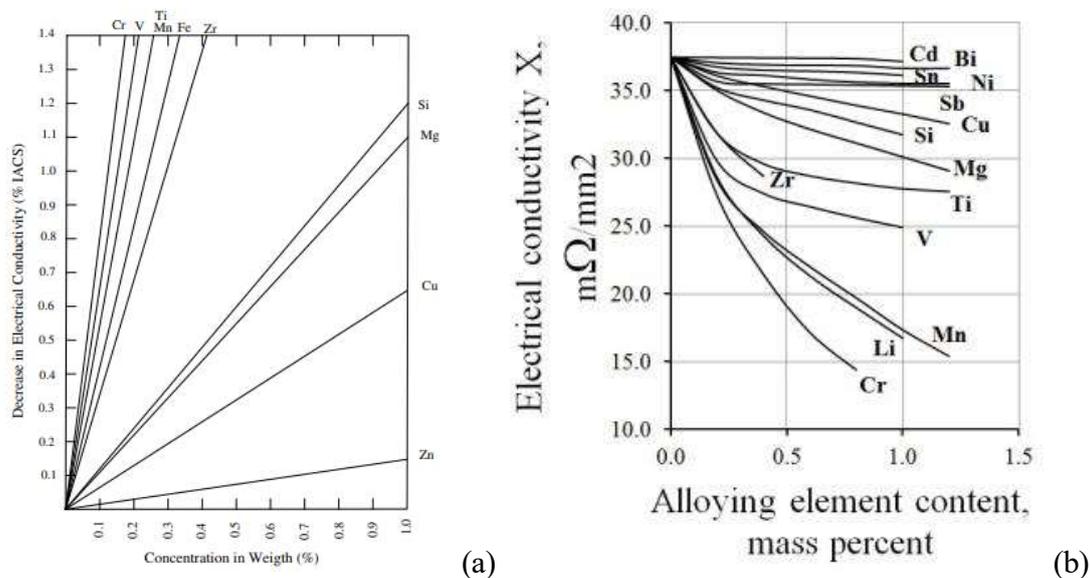
Molto spesso si preferisce un'altra unità di misura quando si deve quantificare la conducibilità di un materiale. Si parla di IACS (International Annealed Copper Standard) quando si vuole identificare la conduzione elettrica tramite una numerazione più pratica ed intuitiva. È un'unità di misura approvata nel 1914 dal dipartimento di commercio degli Stati Uniti d'America [15] ed è attualmente largamente utilizzata nel campo dei conduttori elettrici.

Essa quantifica, in forma percentuale, la capacità di un materiale ad essere attraversato da corrente elettrica secondo una scala comparativa alla conducibilità elettrica del filo di rame ricotto, che corrisponde a  $5,8001 \times 10^7$  S/m (a 20°C), idealmente tarato a 100 % IACS. Partendo da questo valore, vengono definiti tutti i valori degli altri materiali, riportando un valore maggiore di 100 % IACS nel

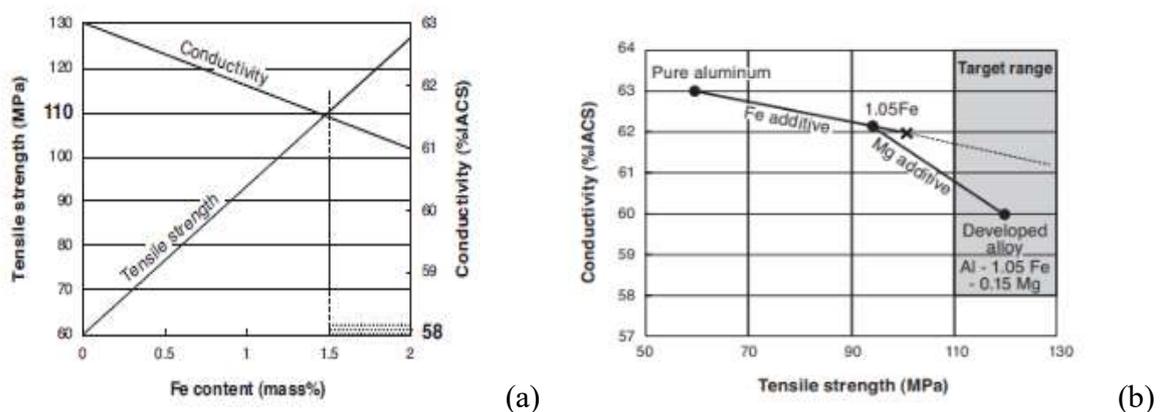
caso in cui il materiale possenga una conducibilità elettrica maggiore di quella del campione in rame [15].

Per l'alluminio, esso avrà dei valori di conducibilità elettrica diversi in funzione degli elementi alliganti presenti. Partendo da quello senza elementi aggiuntivi, avente valore di Al minimo che si attesta attorno al 99.95% [9], il valore posseduto è prossimo a 63 % IACS. All'aumentare della quantità degli elementi in lega, si può notare come tale valore crolla anche con pochi punti centesimali [16].

Non tutti gli elementi danno lo stesso contributo a questa diminuzione, e le figure 7 e 8 illustrano questa differenza.



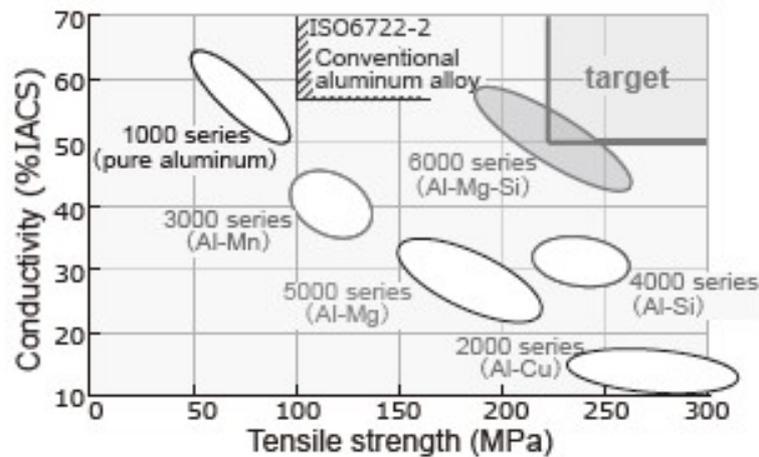
**Figura 7.** Diminuzione della conducibilità elettrica in funzione della quantità di alliganti presenti in lega (a) [16], (b) [17]



**Figura 8.** Confronto variazione conducibilità elettrica e resistenza a trazione della lega di alluminio AA1060 [2]

Sebbene l'aggiunta di elementi in lega comporti una diminuzione delle proprietà elettriche del materiale, spesso risulta indispensabile al fine dell'ottenimento di sufficienti proprietà meccaniche [18].

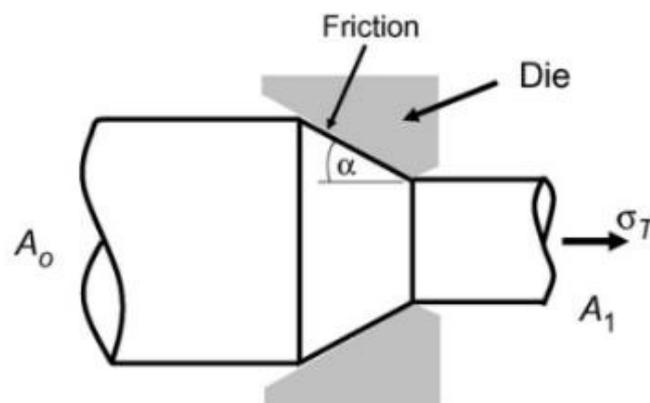
A seconda dell'applicazione per la quale il prodotto è destinato a funzionare, è bene trovare il giusto compromesso tra le proprietà meccaniche e quelle elettriche che il filo può garantire (Fig. 9).



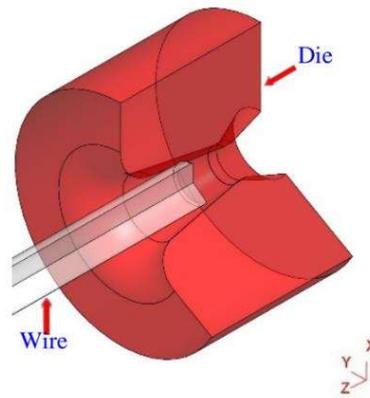
**Figura 9.** Confronto della conducibilità elettrica e della resistenza alla trazione nelle principali leghe di alluminio [18]

## 1.2 L'attribuzione della forma al filo

Il processo di deformazione plastica denominato “trafilatura”, consiste in un metodo di lavorazione a freddo dei materiali con lo scopo di fargli ottenere una forma filiforme con sezione definita [19] (Fig.10). Il materiale ottiene la forma finale perché è “costretto” a passare in una filiera (Fig.11), utensile installato nella macchina che ha il compito di ridurre la sezione del filo, passando dalla sezione  $A_0$  alla sezione  $A_1$ .



**Figura 10.** Schematizzazione del processo di deformazione plastica per trafilatura [19].



**Figura 11.** Disegno tridimensionale del processo di trafilatura [20]

Il materiale che viene lavorato è sottoposto ad una forza di tiro situata posteriormente alla filiera (Fig.10). La forma solitamente più ricercata per ottenere dei fili è quella circolare. A seconda delle applicazioni, è altresì possibile progettare un filo avente geometria differente: trapezoidale, triangolare e ulteriori [21].

La forza di tiro deve essere tarata appositamente per sollecitare il materiale in lavorazione con valori specifici, evitando rottura o stiramento eccessivo del filo [22].

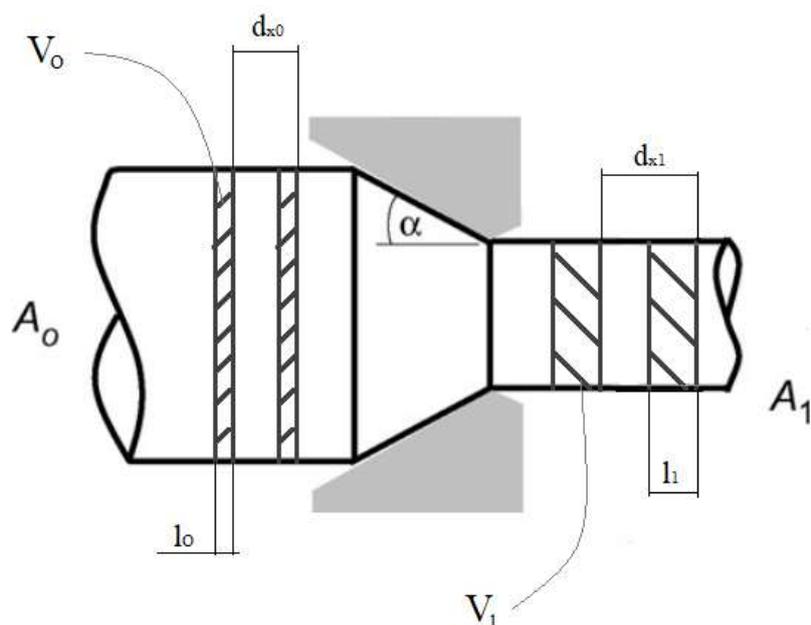
Essendo un processo che utilizza l'attrito tra due corpi per ottenere la deformazione plastica, il coefficiente di attrito è una variabile di fondamentale importanza, soggetta a continui studi e ricerche [23].

Uno dei metodi per ridurre il più possibile l'adesione filo-filiera e rendere più fluido il processo, è la predisposizione di lubrificante tra il filo in lavorazione e la filiera. Questo permette inoltre di rendere il processo più pulito e mantenere le temperature inferiori a valori critici [24].

Per calcolare il grado di riduzione percentuale del filo in lavorazione, viene utilizzata l'equazione 6 [25].

$$r = \left( \frac{A_0 - A_1}{A_0} \right) \times 100 = \left( 1 - \frac{A_1}{A_0} \right) \times 100 \quad \text{Equazione 6}$$

Durante la deformazione plastica, il volume del materiale non subisce variazione. Pertanto, ad una riduzione della sezione di materiale corrisponde un aumento proporzionale di lunghezza. Questo fenomeno è rilevabile durante un'analisi infinitesima del materiale in studio [26] illustrato in figura 12.



**Figura 12.** Analisi infinitesima del processo di trafilatura.

Secondo questo criterio, attraverso l'analisi di portata del materiale, si può concludere che il processo avanzerà con una velocità crescente del filo.

I due volumi infinitesimi  $V_0$  e  $V_1$  avanzeranno rispettivamente della quantità  $d_{x0}$  e  $d_{x1}$  in direzione longitudinale nello stesso lasso di tempo.

Esplicitando pertanto la velocità del filo prima ( $v_0$ ) e dopo ( $v_1$ ) aver ottenuto la sua deformazione plastica (Eq.7, Eq.8), e ricordando della costanza del volume ( $V_0=V_1$ ) si può dimostrare (Tab.2) che il processo porta ad un aumento della velocità secondo l'equazione 10.

**Tabella 2.** Dimostrazione incremento velocità del processo di trafilatura.

$$v_0 = \frac{l_0}{s} = \frac{\frac{V_0}{\frac{\pi * d_0^2}{4}}}{s} \quad \text{Equazione 7}$$

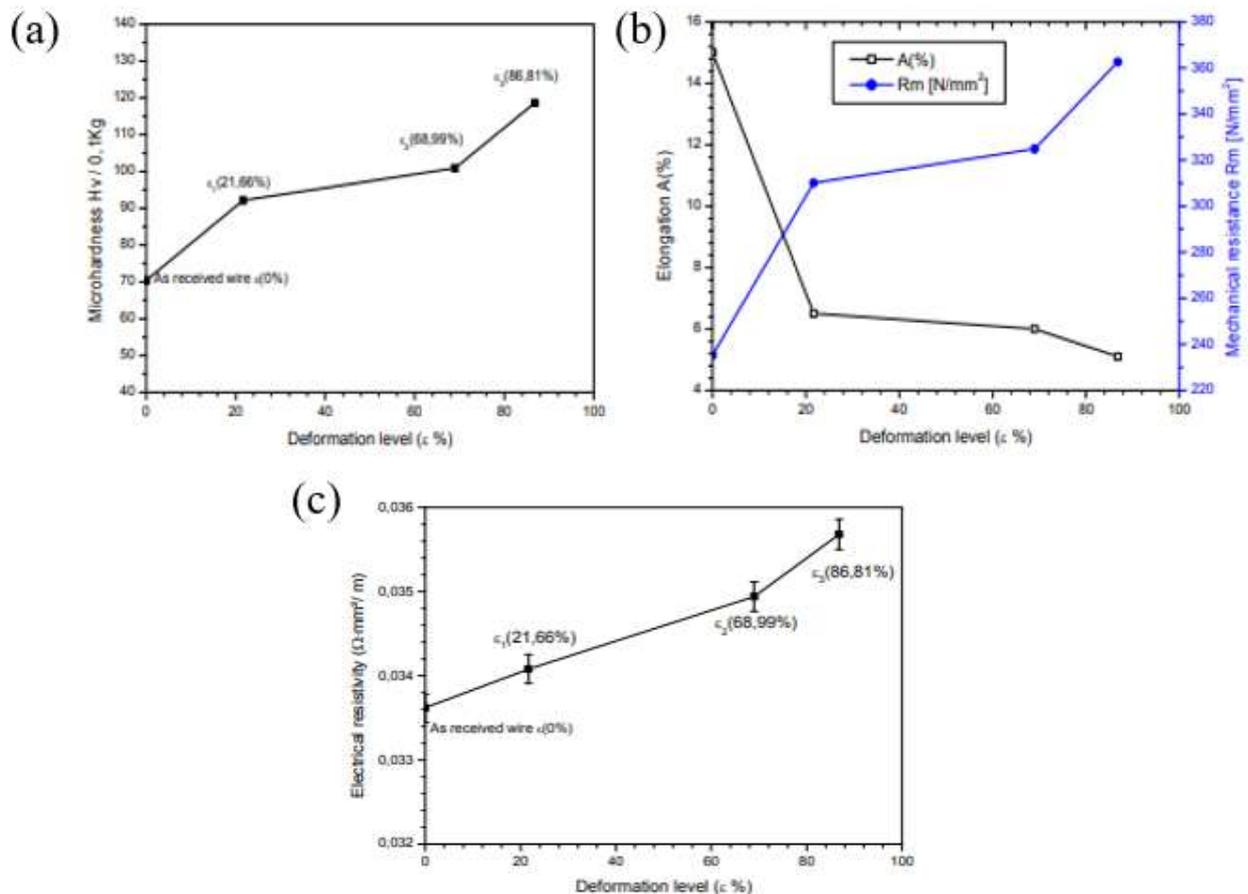
$$v_1 = \frac{l_1}{s} = \frac{\frac{V_1}{\frac{\pi * d_1^2}{4}}}{s} \quad \text{Equazione 8}$$

$$\frac{v_1}{v_0} = \frac{V_1 * 4}{\pi * d_1^2 * s} * \frac{\pi * d_0^2 * s}{V_0 * 4} \quad \text{Equazione 9}$$

$$\frac{v_1}{v_0} = \frac{d_0^2}{d_1^2} \quad \text{Equazione 10}$$

Essendo un processo durante il quale il materiale viene modellato per deformazione plastica a freddo, esso risentirà dell'effetto di incrudimento [27].

Tale fenomeno è inevitabile quando si supera un certo valore di sollecitazione a cui il materiale è soggetto durante la deformazione, provocando un aumento delle caratteristiche meccaniche (Fig. 13). Non sono solo le proprietà meccaniche ad essere influenzate a causa di questo processo, ma anche quelle fisiche, chimiche ed elettriche (Fig. 13c) [28].



**Figura 13.** Andamento della durezza (a), resistenza alla trazione ed allungamento (b), resistività elettrica (c) al variare della deformazione di una lega di alluminio [28]

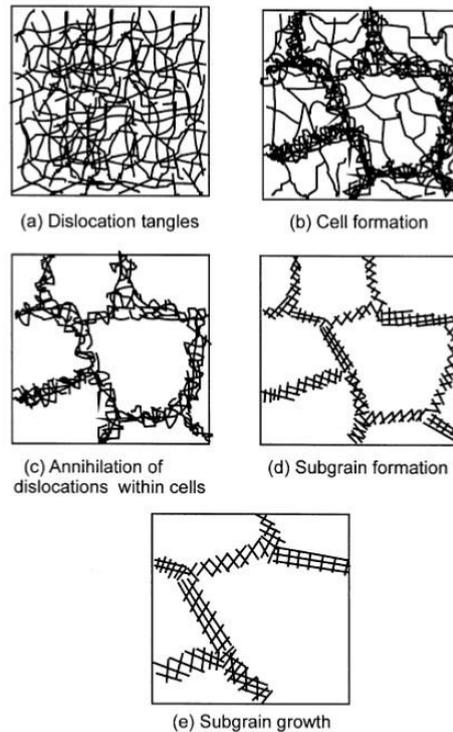
### 1.3 Il processo di ricottura

Con il termine trattamento termico si intende un ciclo termico a cui un materiale è sottoposto, con lo scopo di progettare una determinata microstruttura interna al materiale.

Per la fabbricazione di fili metallici, il trattamento termico maggiormente utilizzato è la ricottura. Tale lavorazione viene solitamente eseguita successivamente alla deformazione plastica a freddo di trafilatura, ed ha lo scopo di ridurre l'effetto di incrudimento a cui il filo è stato sottoposto per ripristinare le proprietà meccaniche, elettriche e chimiche.

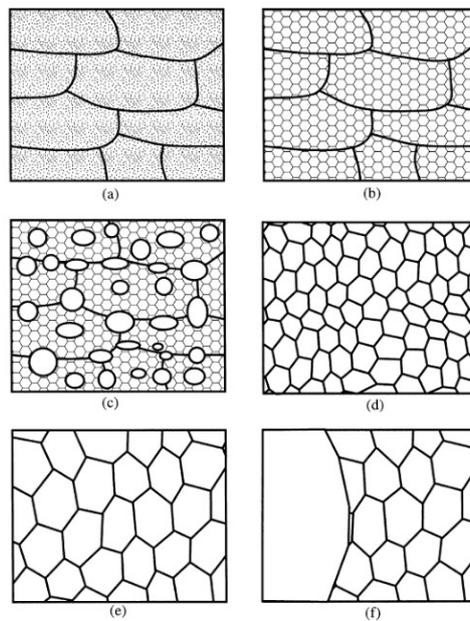
Analizzando il cambiamento della microstruttura del materiale durante tale processo, lo si può suddividere in tre fasi fondamentali: riassetto, ricristallizzazione primaria, ricristallizzazione secondaria [8].

Il riassetto, denominato più comunemente “recovery”, è la prima fase a cui è soggetto il materiale. In questa si può osservare un movimento delle dislocazioni fino alla loro riorganizzazione in sub-grani (Fig. 14d), che fungeranno da centri di nucleazione per le successive fasi. La densità delle dislocazioni non varia durante questo step, di conseguenza le proprietà meccaniche del materiale in trattamento sono poco influenzate. Si rileva una forte diminuzione delle tensioni interne al materiale ed un ripristino delle proprietà elettriche [29].



**Figura 14.** *Illustrazione grafica del movimento delle dislocazioni e della formazione di nuovi grani cristallini [29].*

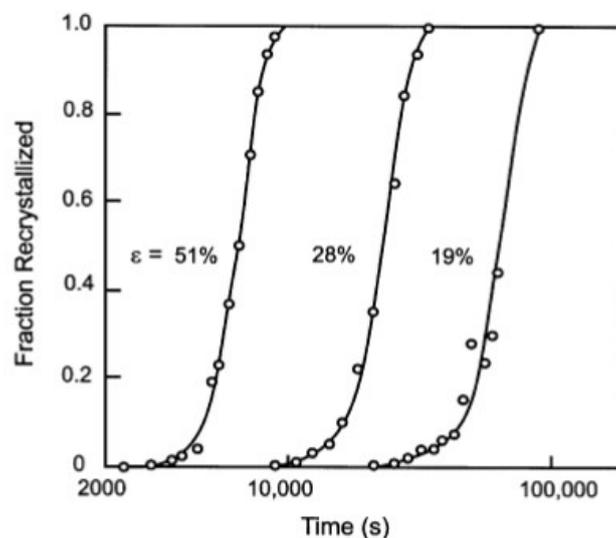
La fase di ricristallizzazione primaria è la fase cuore della ricottura. In questa si inizia ad osservare la formazione di nuovi grani cristallini (Fig.15c) a partire principalmente dai bordi grano e dai sub-grani formati dalla precedente fase. I nuovi grani formati causano un crollo della densità di dislocazioni, con rispettiva diminuzione delle proprietà meccaniche del filo e ripristino della conducibilità elettrica.



**Figura 15.** Illustrazione della variazione della dimensione dei grani durante un processo di ricottura di un generico materiale [29].

Aumentando il tempo durante il quale il materiale è sottoposto al trattamento, si noterà l'aumento delle dimensioni dei grani (Fig. 15f). Questa ulteriore fase è denominata ricristallizzazione secondaria, comunemente nota come “accrescimento del grano”. In questa fase i grani aumentano la loro dimensione e riducono notevolmente le proprietà resistenziali del materiale, a vantaggio delle duttilità.

L'inizio della ricristallizzazione nei materiali dipende anche dal grado di incrudimento a cui è stato soggetto il materiale durante la deformazione plastica. Si nota dalla figura 16 che i materiali maggiormente deformati ci impiegano meno tempo ad iniziare il cambio di microstruttura, fenomeno che può portare disuniformità all'interno di un prodotto.



**Figura 16.** Percentuale di ricristallizzazione in funzione del tempo di ricottura e del grado di incrudimento [29].

Nel settore della trafilatura, i metodi che attualmente vengono più utilizzati per effettuare il trattamento di ricottura al filo metallico sono due: ricottura in forno e ricottura in linea.

Il primo consiste in un processo statico descritto da una camera riscaldata (forno) in condizioni di sottovuoto, nella quale viene inserito il filo avvolto precedentemente in una bobina. Le temperature e i tempi di ricottura sono definiti in funzione delle caratteristiche fisiche che si desidera attribuire al materiale del filo (Fig. 17).



**Figura 17.** *Rappresentazione delle bobine di filo sottoposte a ricottura statica [30]*

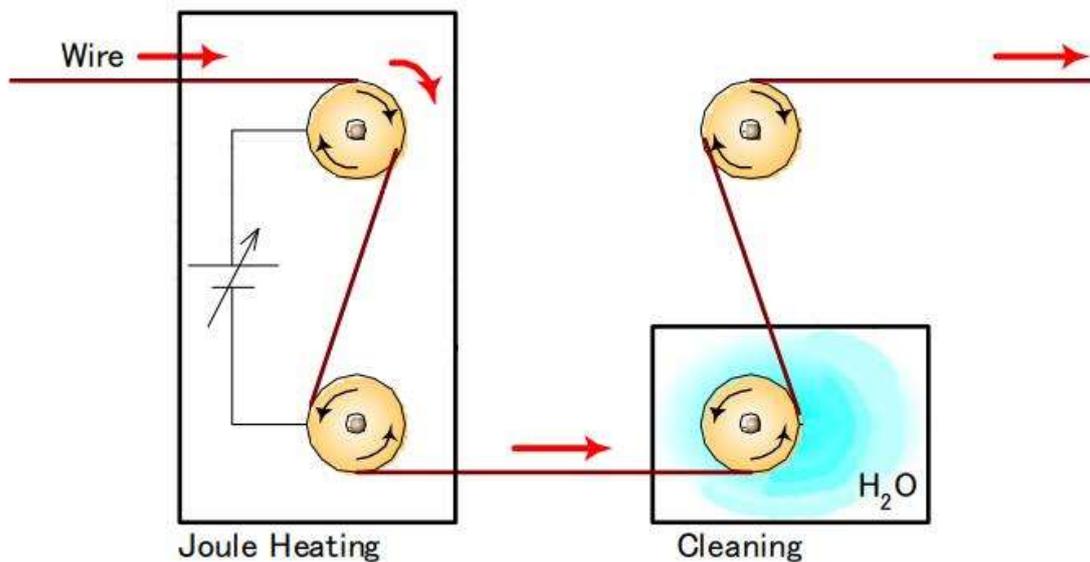
Differentemente la ricottura in linea, nota anche come ricottura in corto-circuito, è rappresentata da un vero e proprio processo dinamico per il quale il filo in costante movimento viene riscaldato tramite effetto joule e a fine del processo, tramite un avvolgitore, viene raccolto in una bobina [31].

La movimentazione e traiettoria del filo è regolata da una specifica organizzazione di organi meccanici di trasporto, ovvero pulegge ed anelli, grazie ai quali la continuità del moto è garantita da valori di velocità costanti, uguali a quelli dei processi precedenti (Fig.18)

L'effetto joule è il motore dell'innalzamento delle temperature e della ricottura del filo. Esso è determinato dalla differenza di potenziale elettrico presenti tra specifici organi di trasporto. Questa differenza di potenziale determina un passaggio delle cariche elettriche dalla zona a maggior potenziale elettrico verso quella a minor potenziale [32].

Questa tipologia di forno permette al filo di essere trattato in breve tempo (inferiore ad 1 secondo) e pertanto la differenza di potenziale elettrico dovrà essere appositamente calibrata per permettere la trasformazione della microstruttura [33].

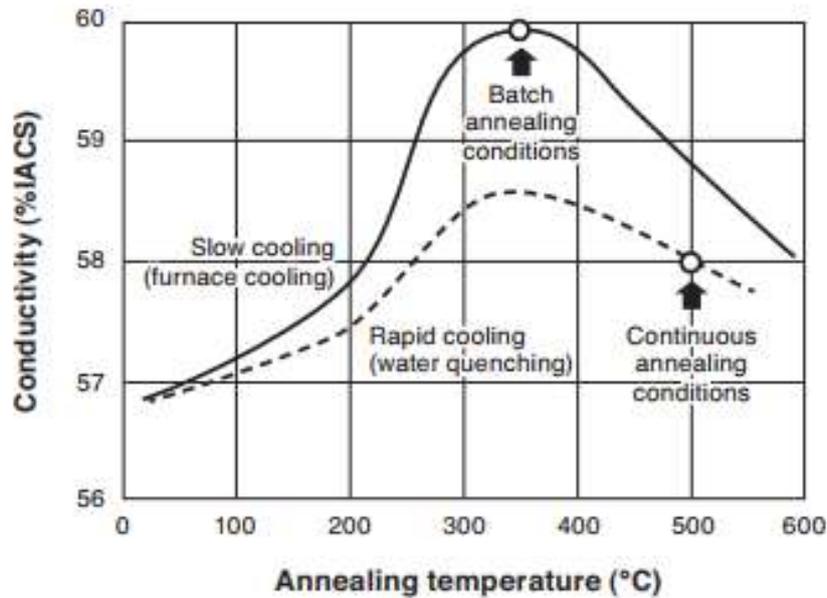
Grazie a questo metodo, le temperature risentite dal filo possono essere anche superiori a 400°C [32]. A causa di questo successivamente alla stazione di riscaldamento è posta quella di raffreddamento, per permettere un rapido raffreddamento del filo grazie l'utilizzo di una soluzione acquosa.



**Figura 18.** Schema di funzionamento di un generico forno di ricottura in linea [31]

Confrontando queste due metodologie di ricottura si riscontrarono differenti vantaggi e svantaggi. Per quanto riguarda il forno statico il vantaggio principale risiede nel fatto che non si avranno problemi di usura sull'attrezzatura utilizzata, dato che la bobina viene lasciata all'interno del forno senza movimentazione del filo. Inoltre, questo processo permette una migliore omogeneità della microstruttura ottenibile nel filo, potendo ottenere il ripristino della conducibilità elettrica fino al raggiungimento di valori maggiori rispetto alla ricottura in linea (Fig.19) [34]. Di contro, questo metodo causa un diverso ciclo termico a cui le spire della bobina sono soggette in funzione della loro posizione interna od esterna in essa, causando differenti proprietà nel prodotto finale. Differentemente, i vantaggi principali che riguardano il forno di ricottura in linea sono sia in merito alla garanzia di avere un prodotto finale con la struttura cristallina molto omogenea in tutta la bobina, sia la possibilità di accorciare i tempi per l'ottenimento del prodotto finito, in quanto il forno in linea viene installato successivamente alla macchina multifilo. Il principale svantaggio consiste nella presenza di problemi di usura in alcuni componenti di tale macchinario. Difatti, essendo una ricottura dinamica, è frequente rilevare fermi macchina a causa di problemi riguardanti l'usura dei componenti per il contemporaneo effetto meccanico ed elettrico.

La figura 19 illustra le proprietà elettriche acquisite dal filo formato da una particolare lega di alluminio, sottoposto ad entrambe le tipologie di ricotture descritte per differenti temperature di trattamento.

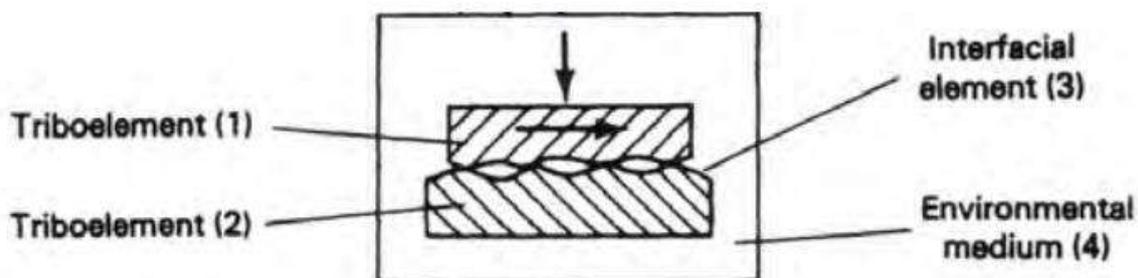


**Figura 19.** Andamento della conducibilità elettrica di una lega AA1060 in funzione della temperatura e metodo di ricottura

## 1.4 Tribologia: fenomeno dell'usura

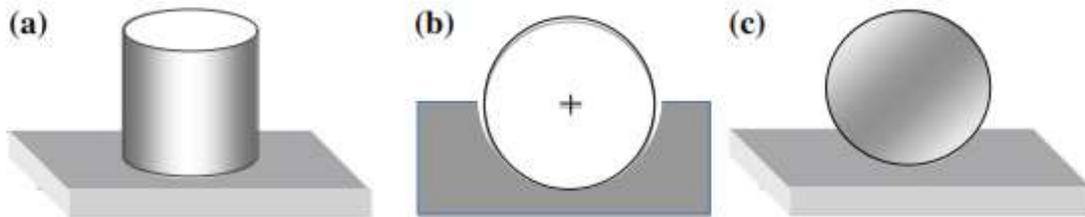
Con il termine tribologia si intende la scienza delle interazioni tra superfici a contatto, in moto relativo e sotto carico. È una terminologia relativamente giovane, in quanto solo nel 1966 è stato ufficialmente definito per la prima volta questo termine dall'inglese Peter Jost [35], ma sono stati scoperti alcuni studi antichi appartenenti agli Egizi ed al celebre Leonardo da Vinci, descrittivi della stessa teoria. [36]. Nello specifico, la tribologia si occupa dell'approfondimento dei fenomeni di attrito, usura e lubrificazione descrittivi del "sistema tribologico". Quest'ultimi devono sempre essere definiti avendo ben chiare le caratteristiche degli elementi che si stanno considerando, senza i quali i parametri sarebbero infondati.

Il sistema tribologico, o tribosistema, rappresenta l'insieme degli elementi che intercorrono durante un contatto fisico. Nello specifico in figura 20 vengono illustrati i componenti: due triboelementi (1-2), un elemento interfacciale (3), un ambiente (4) [37].



**Figura 20.** Generico sistema tribologico [37]

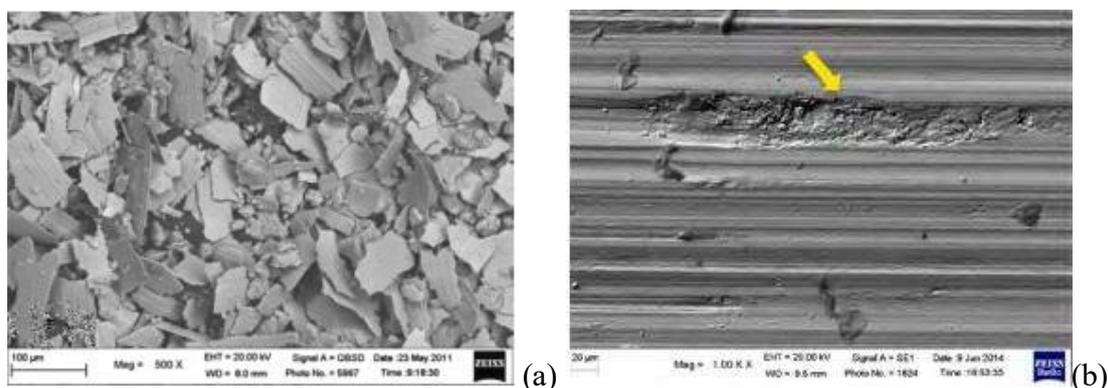
I triboelementi sono i corpi che entrano in contatto e per i quali può instaurarsi una velocità relativa. Il contatto può essere caratterizzato da due geometrie specifiche, denominate “conforme” o “non conforme”. La prima riguarda i contatti tra elementi che presentano una geometria definita da un’area ben definita (Fig. 21a), mentre la seconda riguarda quelle in cui l’area degenera in un punto o linea (Fig. 21b, 21c) [38].



**Figura 21.** Esempi contatto conforme (a) e non conforme (b) (c) [38]

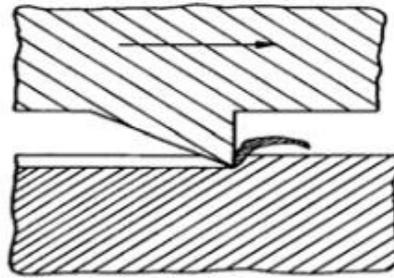
L’elemento interfacciale corrisponde alla sostanza che si pone tra i due triboelementi ed essa si pone come sostanza di separazione tra i due. Infine, l’ambiente è rappresentato dall’atmosfera nella quale i precedenti particolari sono immersi.

Nel campo della tribologia si definisce usura l’evento di danneggiamento in una superficie solida che provoca conseguentemente la perdita progressiva o istantanea di materiale. L’usura viene spesso dimensionata dal “tasso di usura”, espresso con la lettera  $W$  ed unità di misura  $\text{mm}^3/\text{m}$ , rapporto che identifica un certo volume di materiale asportato ( $\text{mm}^3$ ) dopo una certa distanza percorsa ( $\text{m}$ ) dai triboelementi [38]. A seconda della tipologia di contatto, sono definiti e distinti differenti “processi di usura” specifiche azioni di deterioramento di corpi in moto, ed i più comuni sono: strisciamento, abrasione, rotolamento, roto-strisciamento, fretting, erosione. I fenomeni fisici e chimici che determinano i processi di usura vengono definiti “meccanismi di usura”, solitamente classificati in quattro principali categorie: adesione, abrasione, fatica superficiale, tribo-ossidazione. L’adesione descrive il meccanismo di perdita di materiale a causa del fenomeno di microaggregazione chimica tra le particelle superficiali di uno dei due corpi sull’altro. I detriti presenti in questo meccanismo hanno una morfologia “a scaglie” (Fig. 22a), ed i tassi di usura presenti hanno alta incidenza sul sistema [38].



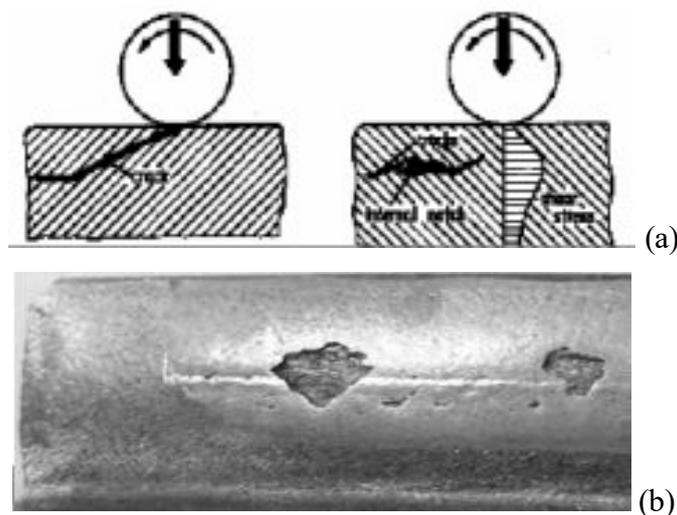
**Figura 22.** Detriti (a) e piste (b) di usura per il meccanismo di usura di adesione

Differentemente, il meccanismo di abrasione entra in gioco solo se la differenza di durezza dei corpi a contatto è maggiore di circa il 20-30%, il che può causare l'azione di taglio del componente a maggior durezza rispetto all'antagonista (Fig.23), come se fosse un utensile.



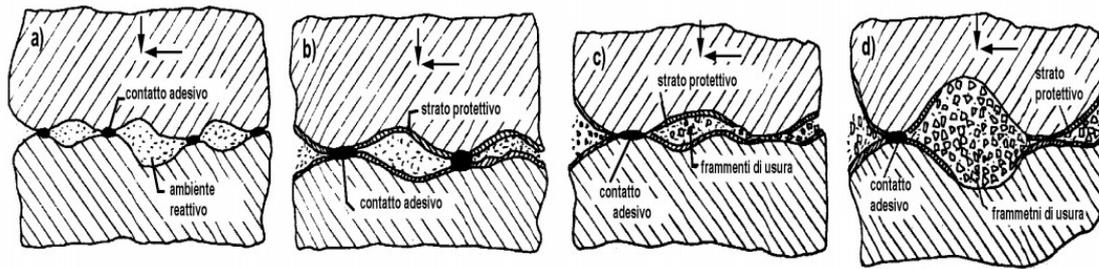
**Figura 23.** *Illustrazione meccanismo di usura di abrasione*

Il meccanismo di fatica superficiale è indotto da sollecitazioni superficiali causate da carichi ciclici. Così come il processo di fatica che normalmente avviene in corpi soggetti a carichi periodici, anche in questo meccanismo si notano le due fasi di nucleazione e propagazione di cricche, le quali però avvengono in prossimità della superficie (Fig. 24a).



**Figura 24.** *Propagazione della cricca (a) e pista di usura "a cratere" (b) in un meccanismo di usura di fatica superficiale.*

Il meccanismo di tribo-ossidazione è caratterizzato, oltre che dal contatto tra i triboelementi, da condizioni ambientali molto influenti che determinano fenomeni di ossidazione nelle superfici dei corpi. I tassi di usura che riguardano questo meccanismo sono dipendenti dalla velocità di ossidazione, potendo arrivare a valori elevati in caso di distacco di zone altamente ossidate. In figura 25 viene illustrato un tipico meccanismo di tribo-ossidazione, nel quale la zona superficiale dei triboelementi è soggetta ad una variazione chimica che causa un differente comportamento tribologico contro l'antagonista.



**Figura 25.** Illustrazione meccanismo di usura di tribo-ossidazione

Come anticipato, uno o più meccanismi di usura che agiscono contemporaneamente possono dare luogo ai processi di usura, metodi con i quali i corpi a contatto si degradano nel tempo. A seguire, la tabella 3 illustra come i meccanismi di usura possono combinarsi e dar luogo ai processi, come ad esempio quelli di strisciamento e di fretting, simili tra di loro.

Il processo di usura di strisciamento coinvolge principalmente i meccanismi di adesione e tribo-ossidazione, con la possibilità di ricadere in quella abrasiva a seconda dei valori di durezza delle superfici. Il processo di fretting è un caso specifico di usura per strisciamento per il quale i corpi a contatto posseggono un moto relativo di ampiezza impercettibile (1-100  $\mu\text{m}$ ), associabile ad una vibrazione. I meccanismi che intercorrono in questo particolare processo sono quelli di tribo-ossidazione e di fatica superficiale.

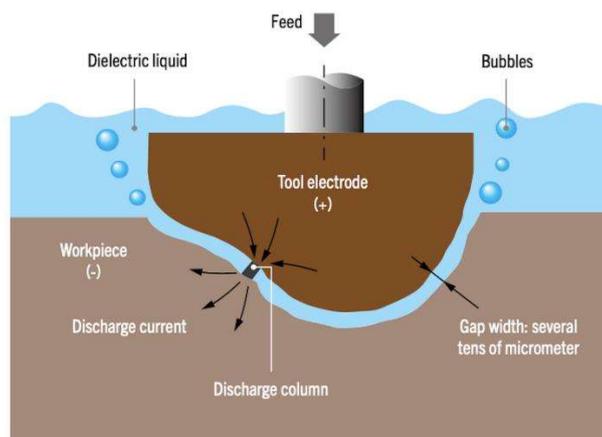
**Tabella 3.** Collegamento tra processi e meccanismi di usura

PROCESSO	MECCANISMO			
	Adesione	Abrasione	Tribossidazione	Fatica superficiale
Strisciamento	x	(x)	x	
Abrasione		x		
Rotolamento				x
Roto-strisciamento	x	(x)	x	x
Fretting	x		x	
Erosione		x		(x)

### 1.4.1 Usura elettrica

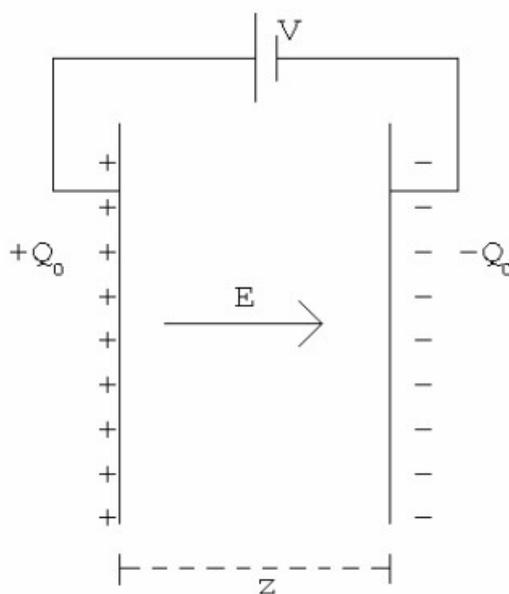
L'arco elettrico è un fenomeno fisico corrispondente al passaggio di carica elettrica tra due corpi aventi differente potenziale elettrico, generatore del passaggio della carica [12]. L'entità dell'arco può avere effetti dannosi sui corpi, tale da poterli portare ad un deterioramento. Questo comportamento può essere ricercato, come nel caso delle tecnologie di asportazione di materiale

descritte dal processo di elettroerosione (Fig. 26), viceversa non viene ricercato quando determina danni superficiali, a volte incontrollabili, ai materiali.



**Figura 26.** *Illustrazione processo di taglio per elettroerosione [39]*

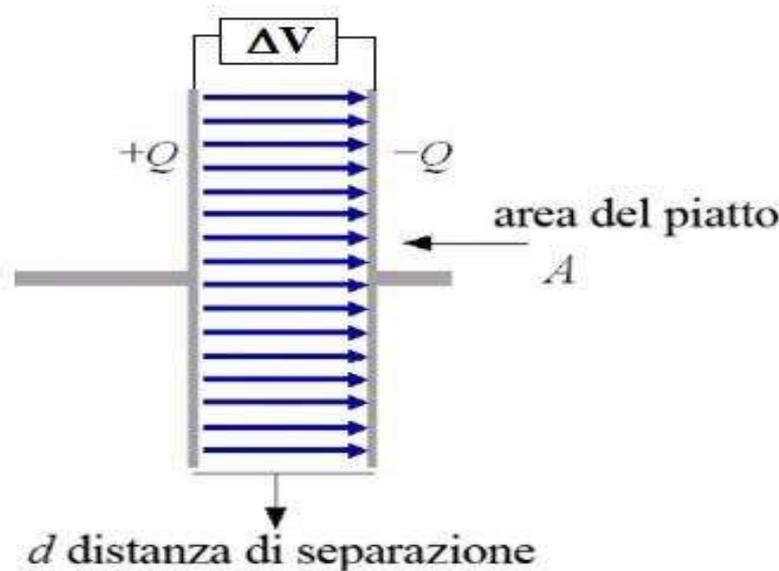
Tra i corpi con differente potenziale elettrico rappresentati dalle due superfici di figura 27, è solitamente presente una sostanza.



**Figura 27.** *Illustrazione di superfici verticali poste a differente potenziale elettrico*

Viene definito con il termine “dielettrico”, il fluido con caratteristiche elettriche variabili tra quelle isolanti o conduttive in funzione principalmente del valore della differenza di potenziale tra i corpi. Le caratteristiche isolanti sono possedute dal fluido quando il valore della differenza di potenziale è sotto un certo valore di soglia, definito “potenziale di rottura del dielettrico”. Se la differenza di potenziale dovesse raggiungere o superare tale soglia, avverrà la “rottura elettrica” del fluido, fenomeno che permetterà il passaggio di carica elettrica tra i due corpi. Questa caratteristica è intrinseca per ogni sistema, dipendente dal fluido presente tra i due corpi e dalla natura fisica di essi.

Il valore di resistenza a tale “penetrazione elettrica” viene definito con il termine “Rigidità Dielettrica” ( $E_r$ ). Tale valore si esprime nel Sistema Internazionale con l’unità di misura Volt su metro (V/m), anche se solitamente vengono preferiti i multipli di tale unità (MV/m) o altre combinazioni. A livello pratico, la Rigidità Dielettrica quantifica, ponendo le due superfici ad una distanza pari ad 1 metro, quanta differenza di potenziale ( $\Delta V$ ) deve esserci tra le due superfici per far avvenire il passaggio di carica elettrica (Fig. 28).



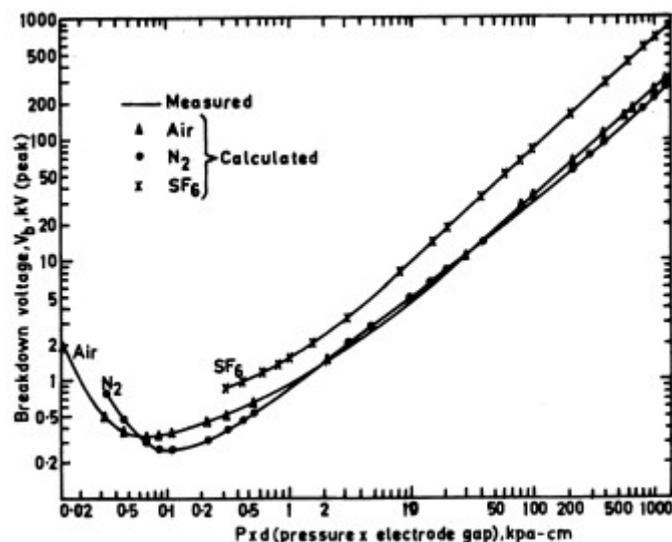
**Figura 28.** Illustrazione di un condensatore a facce piane e parallele

Nella tabella 4 verranno elencati alcuni valori tipici di sostanze riscontrabili in letteratura [12].

Nel 1889, Friedrich Paschen ha sviluppato un modello matematico per il calcolo del potenziale di rottura del dielettrico  $V_b$  [40]. Tale si misura in volt [V] e si presenta nella seguente formula:

$$V_b = \frac{B \times p \times d}{\ln(A \times p \times d) - \ln[\ln(1 + \frac{1}{\gamma_{se}})]} \quad \text{Equazione 11}$$

dove  $p$  è la pressione in Pascal,  $d$  è la distanza degli elettrodi in metri [m],  $\gamma_{se}$  è il coefficiente di emissione di elettroni secondari [41],  $A$  e  $B$  sono costanti specifiche in funzione del fluido utilizzato [42]. Si nota come il potenziale di rottura del dielettrico è una funzione del rapporto  $p \times d$ , mentre le altre costanti sono valori fissi dopo aver assegnato lo specifico sistema di sperimentazione [43].



**Figura 29.** Delimitazione della zona superficiale di componenti industriali [43]

L'andamento è simile tra l'azoto gassoso e l'aria, mentre l'esafluoruro di zolfo (SF<sub>6</sub>) è traslato verticalmente, segno di una maggiore resistenza nel farsi attraversare da cariche elettriche a parità del prodotto  $p \times d$  (Fig.29).

Un altro fenomeno che può essere simulato per approssimare l'usura elettrica è il comportamento di un condensatore elettrico. Per farlo risulta necessario introdurre la Permittività Elettrica definita anche con il termine "Costante dielettrica", e lo si fa analizzando il funzionamento di un condensatore avente facce piane e parallele. Esso è un dispositivo elettrico che permette di immagazzinare una certa carica elettrica (C) per poterla utilizzare in un secondo momento, se necessario. Analizzando la figura 28, si ipotizzi di installare due armature con geometrie piane di area A in un luogo posto nel vuoto, a distanza d. Prevedendo una certa differenza di potenziale tra le superfici del condensatore, è possibile far ottenere al condensatore una certa carica elettrica Q che segue l'equazione 13.

Il termine  $C_0$  rappresenta un valore intrinseco del condensatore, definito "capacità del condensatore" e viene misurato in Farad (F) nel Sistema di misura Internazionale con pedice 0 se lo si considera in presenza di vuoto. Tale valore è dipendente dalle caratteristiche geometriche del condensatore e da una costante fisica, definita "Costante Dielettrica".

Essa viene definita da un valore numerico che quantifica la tendenza della sostanza posta tra le due armature ad opporsi al campo elettrico nel quale è immerso e la si identifica con la lettera greca epsilon ( $\epsilon$ ). In presenza di vuoto, la costante viene indicata con il simbolo  $\epsilon_0$ , ed ha un valore costante pari ad  $8,8541878176 \times 10^{-12} \left[ \frac{C^2}{Nm^2} \right]$ .

Esiste una relazione che permette di calcolare la capacità del condensatore  $C_0$  in funzione della geometria delle due armature (Eq.14).

Da quest'ultima definizione, viene approfondita la proprietà di immagazzinamento delle cariche del condensatore, aggiungendo inoltre la possibilità del cambiamento di sostanza tra le due superfici.

Si nota come, mantenendo invariata la carica  $Q$  presente sulle armature e la forma geometria delle stesse, se si prevedesse l'installazione di una sostanza neutra, la differenza di potenziale  $\Delta V$  tra le due superfici risulterebbe essere minore, a causa della maggiore capacità  $C$  del condensatore rispetto a  $C_0$ .

Il rapporto tra le due capacità  $C/C_0$  viene definito "Costante Dielettrica Relativa", e si indica con la lettera  $\epsilon_r$ . Tale costante permette di confrontare, a parità di condizioni geometriche e di carica presente sulle armature, l'influenza di una determinata sostanza per le proprietà elettriche del condensatore.

Si parlerà quindi di "Costante Dielettrica Assoluta  $\epsilon$ " quando non è più previsto il vuoto tra le due armature, e tale valore viene calcolato con l'equazione 15.

Per calcolare la capacità di un condensatore  $C$  con una specifica sostanza posta tra le due armature, si farà quindi riferimento alla costante assoluta  $\epsilon$ , e non più al valore  $\epsilon_0$ , tramite l'equazione 16.

**Tabella 4.** Equazioni di riferimento del condensatore

$$Q = C_0 \times \Delta V \quad Q = C_0 \times \Delta V \quad \text{Equazione 12}$$

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \times A}{d} \quad C_0 = \frac{\epsilon_0 \times A}{d} \quad \text{Equazione 13}$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \times \epsilon_r \quad \epsilon = \epsilon_0 \times \epsilon_r \quad \text{Equazione 14}$$

$$C = \frac{\epsilon \times A}{d} \quad C = \frac{\epsilon \times A}{d} \quad \text{Equazione 15}$$

Le considerazioni illustrate permettono una migliore consapevolezza nell'importanza di tutti gli elementi presenti all'interno di un circuito elettrico, in questo caso paragonato ad un sistema capacitivo.

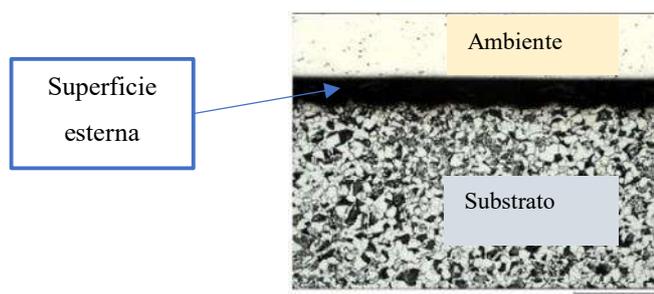
Nella tabella 5, verranno indicati diversi valori ricavati in letteratura [12] inerenti alla permittività elettrica relativa ed alla rigidità dielettrica.

**Tabella 5.** Permittività elettrica e rigidità dielettrica di alcuni fluidi

SOSTANZA	PERMITTIVITÀ ELETTRICA RELATIVA	RIGIDITÀ DIELETTRICA
	$\epsilon_r \left[ \frac{C^2}{N \times m^2} \right]$	$E_r \left[ \frac{kV}{mm} \right]$
Aria secca	1,0005364	3
Acqua distillata	/	15
Acqua pura	81.07	10-15
Azoto	1,0005480	/
Vetro	4-6	25-100
Olio minerale	2,2-2,5	7,5-16
Porcellana	6	12-30
Carta	2.3	6-8

### 1.5 Resistenza all'usura: deposizione di rivestimenti superficiali

Le superfici esterne dei materiali sono le aree maggiormente esposte all'ambiente esterno. Esse sono quelle più soggette ad alterazioni chimiche, dipendenti dalle caratteristiche dell'atmosfera circostante. A seconda delle condizioni di lavoro a cui i componenti sono soggetti, potrebbero essere progettate e costruite con differente metodologia rispetto al substrato (Fig. 30).

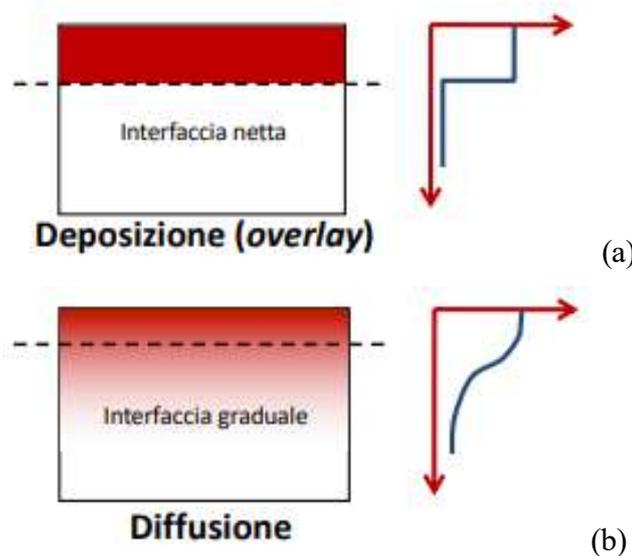


**Figura 30.** Delimitazione della zona superficiale di componenti industriali

Per certe applicazioni industriali, si può prevedere la modifica superficiale del materiale. Questo è reso possibile tramite due processi ampiamente diffusi: i trattamenti di modifica superficiale, nei quali gli atomi provenienti da una sorgente esterna si insediano all'interno del materiale modificandone la struttura chimica (Fig. 31.1a) e le deposizioni di rivestimenti in superficie, nei quali atomi provenienti da una sorgente esterna si sovrappongono a quelli già preesistenti, creando una crescita a strati (Fig. 31.1b).

I primi hanno come caratteristica quella di rilasciare una netta separazione tra il rivestimento applicato ed il materiale nel substrato, dovendo porre maggior attenzione nella zona di adesione tra la deposizione superficiale ed il materiale base.

I secondi permettono di avere un gradiente delle caratteristiche fisico-chimiche più moderato al variare della distanza rispetto la sommità dello stesso.



**Figura 31.** Andamento delle generiche caratteristiche in superficie al materiale avente rivestimento depositato (a) oppure per trattamento di diffusione (b)

È possibile che l'alterazione dello strato superficiale dei materiali avvenga per prevenire un comportamento aggressivo esercitato da un antagonista esterno e questo è reso possibile tramite trattamenti che ne permettono una maggiore resistenza.

Le principali tipologie di trattamenti eseguiti per aumentare la resistenza all'usura di componenti industriali sono i metodi di deposizione di rivestimenti superficiali, classificati in tre famiglie in funzione dello spessore depositabile: le deposizioni di rivestimenti a basso, medio o alto spessore.

### 1.5.1 Deposizione di spessori sottili

Questa categoria si suddivide in due tecnologie di deposizione [44]:

- PVD (Physical Vapor Deposition), o deposizione fisica;
- CVD (Chemical Vapor Deposition), o deposizione chimica.

Le tecnologie PVD basano il trattamento sulla vaporizzazione della sostanza da depositare all'interno di una camera sottovuoto. La bassa pressione impostata nella camera ( $10^{-4}$ - $10^{-7}$  mbar) permette il passaggio dallo stato solido a quello vapore anche a temperature non estremamente alte, solitamente comprese tra 50 e 500 °C. Tramite una differenza di potenziale presente tra il pezzo da rivestire e la sorgente, i vapori dei materiali ionizzati si diffondono all'interno della camera di deposizione e vengono attratti dal materiale da rivestire.

Diversamente, le tecnologie CVD basano la propria tecnica di deposizione su una reazione chimica. Nello specifico, in una camera di reazione a pressione e temperatura controllata i gas reagenti vengono sottoposti ad una reazione chimica che, attraverso la deposizione e successiva condensazione sul substrato da rivestire, formerà lo strato finale. Il limite di questo processo è rappresentato dalla velocità della reazione chimica. Negli ultimi anni questo ha comportato lo sviluppo di nuove tecnologie a favore della velocità del processo chimico, reso possibile soprattutto grazie ad un aumento della temperatura interna alla camera e nell'utilizzo di atmosfera ionizzata.

Entrambe le tecnologie sfruttano la deposizione di atomi in sommità al substrato, e lo spessore di materiale depositabile non è superiore a 10  $\mu\text{m}$ . Tale valore dipende fortemente dalla tipologia di atomi trattati, ma ad oggi è molto difficile superare tale soglia.

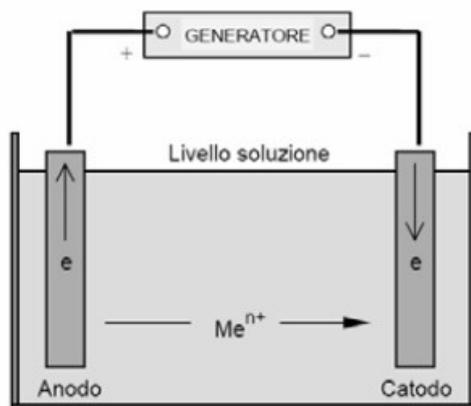
Le sostanze che vengono solitamente depositate utilizzando queste tecnologie permettono di ottenere valori di durezza superficiale notevolmente alta, superiore anche a 3000 HV e ricoprono la famiglia dei materiali ceramici.

Un ulteriore categoria che si sta facendo spazio nelle applicazioni antiusura sono i cosiddetti rivestimenti DLC (Diamond Like Carbon). Essi sono costituiti da soli atomi di carbonio, reticolati tra di loro con particolari legami atomici in funzione delle caratteristiche finali richieste alla superficie [45].

### 1.5.1 Deposizione di spessori medi

Durante questo processo, il materiale da trattare viene immerso in un bagno liquido, formato dagli elementi chimici che si vogliono far depositare in superficie al componente.

Questa tecnologia di deposizione sfrutta una reazione chimica ossidoriduttiva tra il catodo, nel quale avviene la semi-reazione di riduzione e l'anodo, nel quale avviene quella di ossidazione (Fig.32). La reazione di ossidoriduzione è quindi formata da due semi-reazioni che agiscono contemporaneamente in soluzione, entrambe necessarie al fine del desiderato risultato finale.

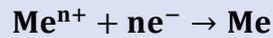


**Figura 32.** Cella galvanica alimentata da generatore, nella quale avviene la reazione di ossidoriduzione

La semi-reazione di ossidazione (Eq.16) avviene nell'anodo e si verifica attraverso la cessione di elettroni assorbiti dal catodo che, contemporaneamente, si riduce (Eq.17). La reazione degli elettroni con il catodo formerà l'elemento neutro che si depositerà sul substrato da rivestire.

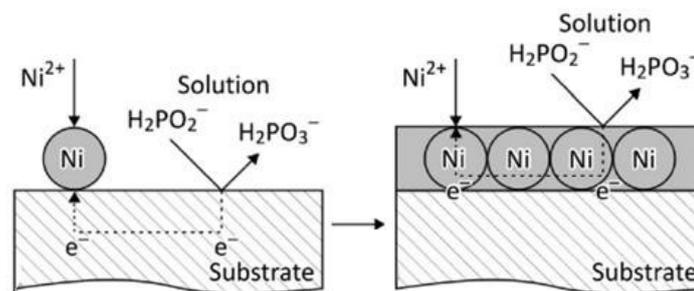


**Equazione 16**



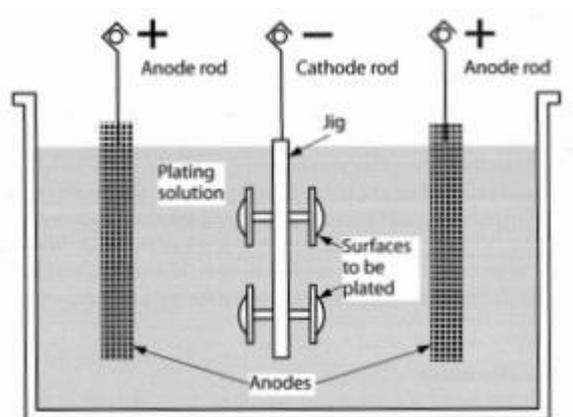
**Equazione 17**

In funzione di come viene iniziata e propagata la reazione chimica, si distinguono due tecnologie: la reazione chimica autocatalitica e l'elettrodeposizione. La prima consiste in una reazione chimica che si instaura grazie ad una soluzione liquida, nella quale sono presenti sia i cationi del materiale da depositare ( $\text{Me}^{n+}$ ) sia un opportuno agente riducente che fornisce gli elettroni ( $n\text{e}^{-}$ ). La reazione deve avvenire inizialmente in sommità al substrato e successivamente propagarsi in sommità al rivestimento in crescita, come mostrato (Fig.33). Inoltre, deve essere controllato che tale reazione non avvenga dentro la soluzione, lontano dal substrato, perché altrimenti avverrebbe la formazione di polvere di materiale senza che essa aderisca al substrato.



**Figura 33.** Illustrazione deposizione chimica autocatalitica [37]

Come anticipato, anche l'elettrodeposizione [46] consiste in una reazione di ossidoriduzione, che viene generata da una differenza di potenziale instaurata tra un anodo ed un catodo. Così facendo si determina un flusso di elettroni verso il materiale da rivestire, che verrà appositamente collegato al polo negativo del generatore (Fig. 34). Il polo positivo del generatore verrà collegato ad un elemento sacrificale con lo scopo di far cedere elettroni che verranno messi a disposizione per il catodo. I cationi del materiale da depositare ( $\text{Me}^{n+}$ ) sono presenti nel bagno liquido.

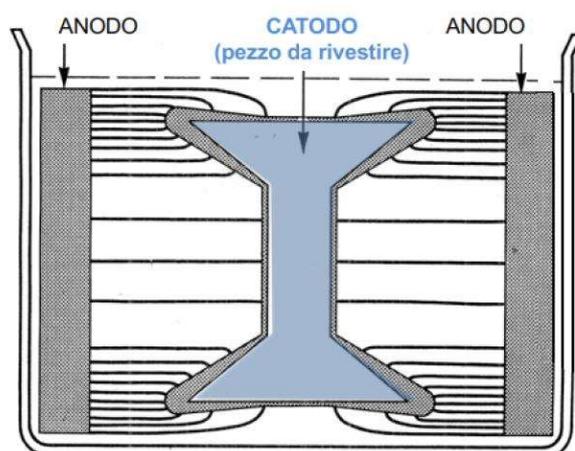


**Figura 34.** *Illustrazione deposizione elettrolitica*

Tramite questi metodi industriali illustrati è possibile depositare molte famiglie di materiali, metallici come: cromo, zinco, nichel, argento, cadmio, che non metallici: fosforo, calcio e ulteriori.

Lo spessore di materiale depositabile tramite queste tecnologie si attesta in valori compresi tra 10 e 100  $\mu\text{m}$ , ma è possibile prevedere spessori maggiori progettando i bagni liquidi con composti additivati da elementi che ne permettono una crescita più rilevante.

La velocità con la quale il rivestimento cresce è fortemente influenzata dal posizionamento degli anodi all'interno del bagno fuso. La crescita avviene in maniera più veloce nelle zone in cui c'è meno distanza tra anodo e catodo, creando disomogeneità nel caso di una geometria complessa del materiale da rivestire (Fig. 35). Dunque, è importante, in funzione della geometria del materiale da rivestire, prevedere degli anodi progettati con forme adeguate. Questo fenomeno non avviene durante la deposizione autocatalitica, in quanto il materiale da rivestire non risente della direzionalità data dal flusso di elettroni in quanto la reazione avviene in maniera omogenea in tutta la superficie del materiale.



**Figura 35.** *Effetto della distanza anodo-catodo sulla crescita del rivestimento [37]*

## 1.5.1 Deposizione di spessori elevati

I rivestimenti che vengono compresi in questa categoria sono quelli che possono essere depositati con spessori maggiori tra tutte le tipologie di deposizione e con tante sostanze a disposizione. In questa classificazione vengono considerate due macrofamiglie che utilizzano due principi fisici differenti per la deposizione dei rivestimenti da depositare, denominati rivestimenti termospruzzati e rivestimenti saldati.

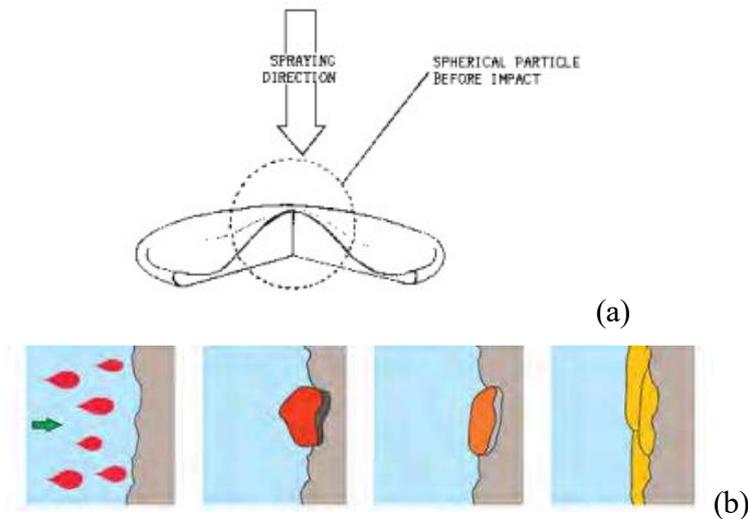
I primi riguardano tutte le tecnologie di deposizione nelle quali il materiale da depositare (sotto forma di polvere o filo) viene riscaldato fino al punto di fusione e viene proiettato ad alta velocità contro il materiale da ricoprire, il quale mantiene la temperatura ambiente e non è soggetto ad una variazione né di stato né della microstruttura.

I secondi riguardano le tecnologie di deposizione che rendono possibile l'adesione del materiale da deporre con il materiale da ricoprire utilizzando un'unione molecolare tra i due materiali, resa possibile tramite una variazione dello stato fisico della materia in entrambi i componenti.

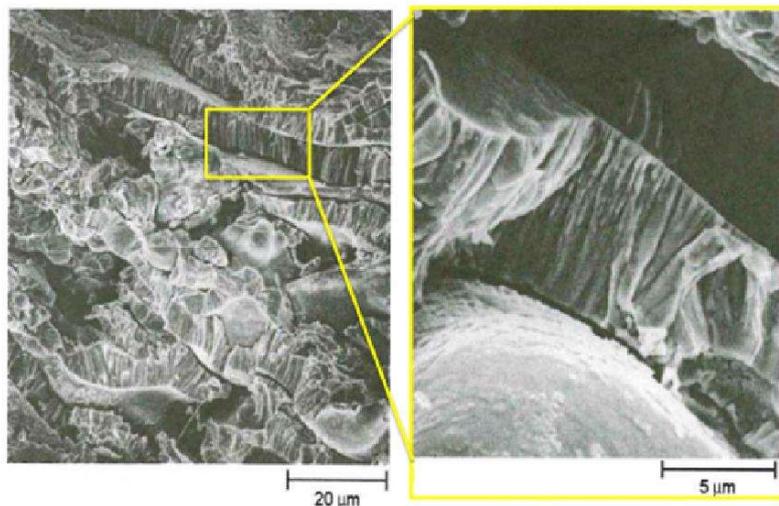
### 1.5.1.1 Rivestimenti termospruzzati

Il materiale da depositare è presente sotto forma di polvere o filo metallico e viene depositato sul substrato secondo diverse tecnologie [47], ma il processo al quale le particelle sono soggette in fase di deposizione è simile tra tutte: le particelle vengono riscaldate vicino il suo punto di fusione e vengono proiettate ad alta velocità contro la superficie da rivestire.

A causa di questa modalità, la microstruttura del rivestimento risente di una forte anisotropia, dipendente dalla direzione del flusso delle particelle. In fase di solidificazione le particelle tendono ad ottenere una forma lamellare “a disco” (Fig. 36, Fig.37).



**Figura 36.** Morfologia del rivestimento depositato per termospruzzatura



**Figura 37.** Analisi al microscopio elettronico a scansione per un rivestimento termospruzzato

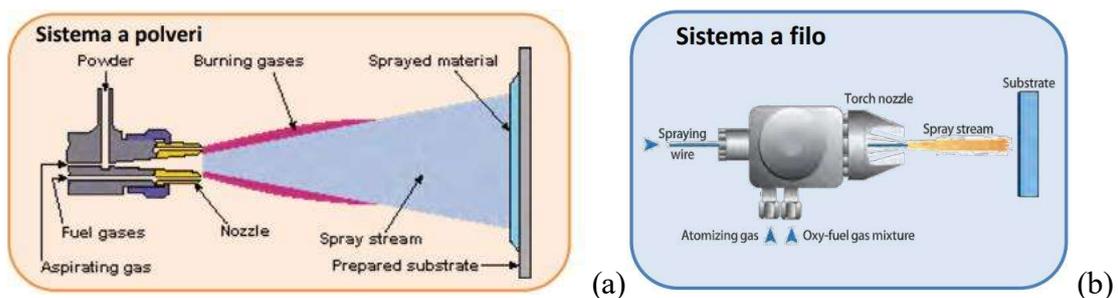
Il forte vantaggio che accomuna queste modalità di deposizione riguarda l'elevata versatilità nel poter applicare una vasta gamma di materiali, con l'unica prerogativa di dover essere riscaldati fino al loro punto di fusione. Un ulteriore è relativo alla velocità di deposizione, che raggiunge i valori più elevati rispetto tutte le famiglie di deposizione di materiali.

Essendo però un metodo che sfrutta l'elevata velocità per la deposizione, il valore della finitura superficiale del rivestimento sarà grossolano, prevedendo ulteriori trattamenti meccanici per l'ottimizzazione della rugosità se ritenuto necessario. Un altro aspetto da considerare riguarda la densità finale del rivestimento. Attraverso queste tecnologie, è elevato il grado di porosità che si crea in fase di deposizione, rischiando di non essere accettabile per certe applicazioni.

L'elevata anisotropia e direzionalità che rilasciano queste tecnologie nel rivestimento sono quindi aspetti critici.

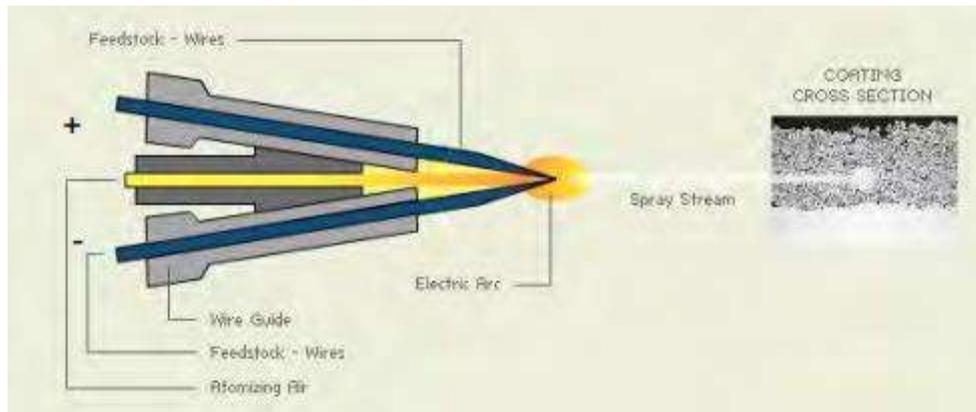
Tra le principali tecnologie di termospruzzatura si mettono in risalto le seguenti metodologie:

- Spruzzatura a fiamma (Flame Spraying): il materiale da depositare può essere presente sia in forma di polvere (Fig.38a) che a forma di filo (Fig.38b). L'aumento di calore che porta al riscaldamento del materiale avviene grazie ad una combustione a cielo aperto, ed il combustibile utilizzato per questi fini è solitamente un idrocarburo. Possiede elevati limiti di temperatura e velocità di deposizione a causa dell'assenza di protezione del fluido in combustione.



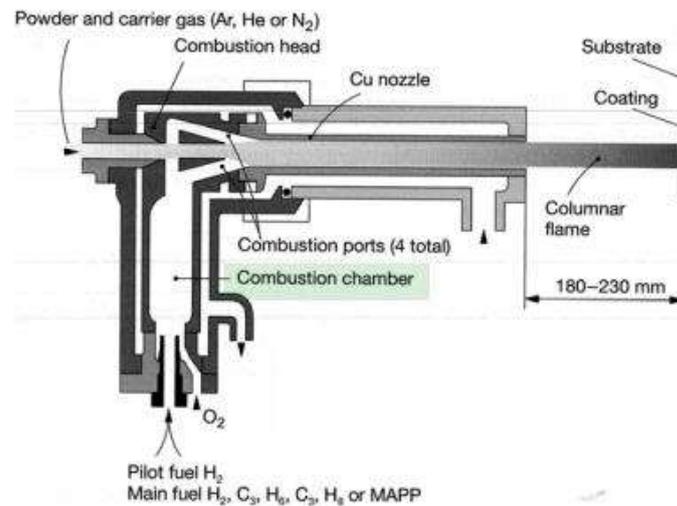
**Figura 38.** Illustrazione della tecnologia di spruzzatura a fiamma

- Spruzzatura ad arco (Arc Spraying): questa famiglia di tecnologie per termospruzzatura sfrutta una differenza di potenziale elettrico tra due fili (Fig.39), tarata in maniera che si faciliti la fusione del filo e tramite aria compressa, avvenga la sua deposizione sulla superficie da rivestire. La temperatura e velocità di deposizione raggiungibili tramite questa modalità sono maggiori rispetto alla termospruzzatura a fiamma, ma lo svantaggio principale risiede nel fatto che i fili devono essere composti da materiali conduttori o comunque idonei a garantire la differenza di potenziale elettrico.



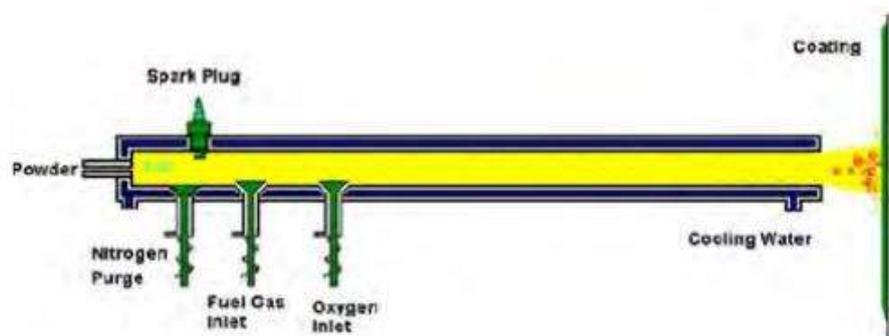
**Figura 39.** *Illustrazione della tecnologia di spruzzatura ad arco*

- Spruzzatura HVOF (High Velocity Oxy Fuel): questa tecnica di deposizione sfrutta la reazione che avviene in una camera di combustione isolata (Fig.40), nella quale reagiscono ossigeno ed un combustibile (ad esempio idrocarburi o idrogeno). I gas prodotti che possiedono temperature e pressioni molto elevate vengono fatti passare in un ugello insieme alla polvere che si vuole far depositare sul substrato. Le particelle raggiungono temperature e velocità molto elevate (fino alla velocità del suono) e vengono proiettate sul materiale da ricoprire. Grazie all'elevata densità di energia che si sviluppa nella camera di combustione che si ripercuote in uscita dell'ugello sotto forma di energia cinetica e termica, lo strato depositabile ha un aspetto molto denso, liscio ed aderente. L'alta velocità di deposizione porta ad un'impossibilità nel manovrare manualmente la torcia di deposizione, dovendosi inevitabilmente affidare ad una piattaforma robotizzata.



**Figura 40.** *Illustrazione della tecnologia di spruzzatura HVOF*

- Spruzzatura a detonazione (Detonation Gun): l'attrezzatura è composta da una struttura circolare a sezione tubolare avente diametro pari ad un pollice (25,4 mm) e lunghezza pari ad un metro (Fig.41). All'interno di tale struttura viene introdotta miscela ossiacetilenica e la polvere da depositare sul substrato. Tramite l'accensione di una scintilla, avviene lo scoppio all'interno della camera ed il calore e l'onda d'urto che seguono la combustione, espellono le particelle ad una velocità maggiore di due volte quella del suono verso il materiale da rivestire. Anche questa attrezzatura deve essere manipolata tramite un sistema robotizzata, sempre a causa delle condizioni estreme che sono soggette in fase di applicazione del materiale.



**Figura 41.** *Illustrazione della tecnologia di spruzzatura a detonazione*

- Spruzzatura al plasma (Plasma Spraying): questa attrezzatura utilizza scariche ad alta frequenza tra due elettrodi per generare un plasma a forma di dardo (Fig. 42), che direziona la polvere iniettata verso la superficie da rivestire. A causa dell'alta direzionalità data dalla forma della zona ad alta densità di energia, è usuale mantenere ferma la torcia e movimentare il materiale da rivestire tramite un sistema robotizzato.

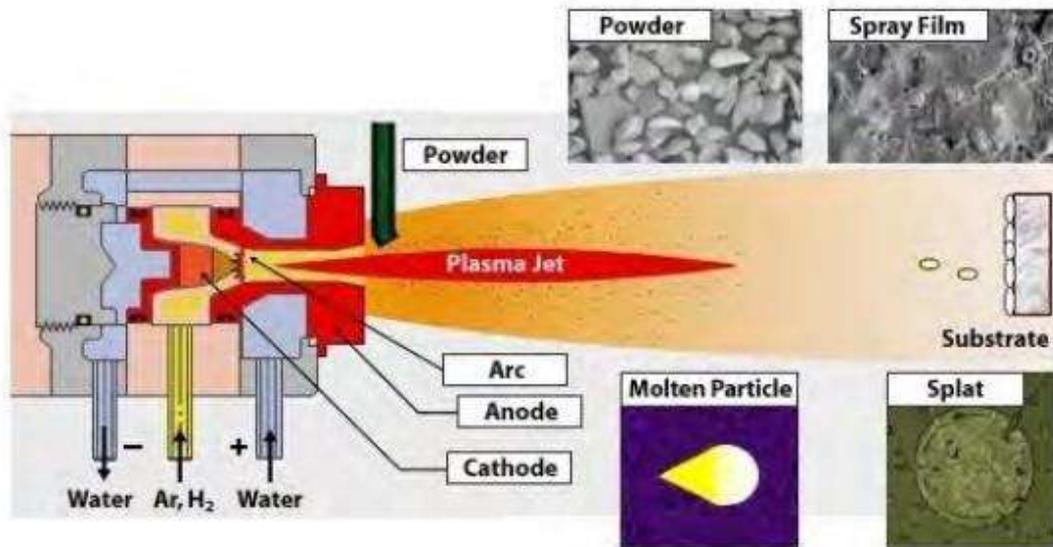


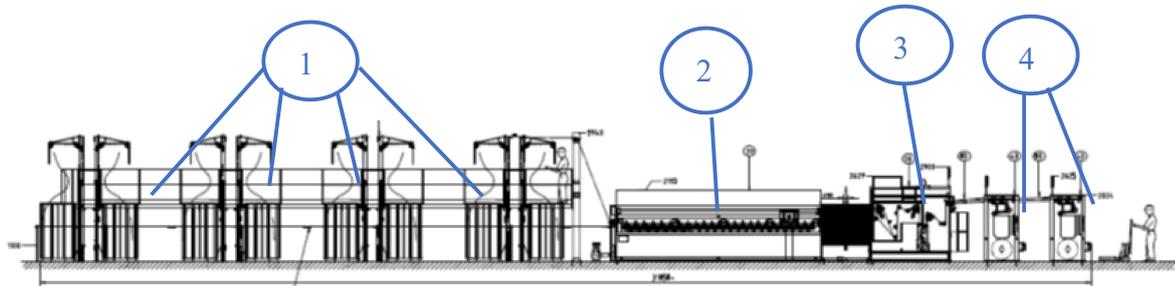
Figura 42. Illustrazione della tecnologia di spruzzatura al plasma



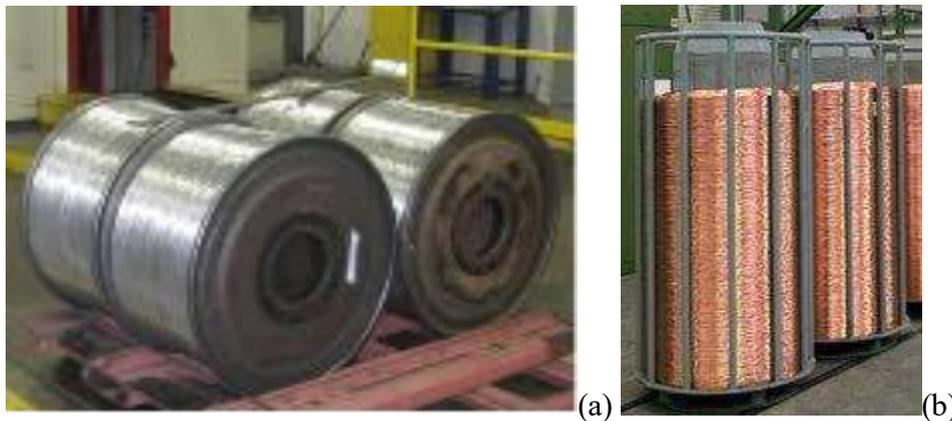
## 2 LINEA PRODUTTIVA AZIENDA SAMP

### 2.1 Analisi linea di produzione del filo

Presso l'azienda Samp s.r.l. è stata studiata la linea di produzione del filo in alluminio illustrata in figura 43. Tale linea è stata progettata e costruita per ottenere il filo di alluminio di diametro pari a 0,5mm con buone proprietà di duttilità.



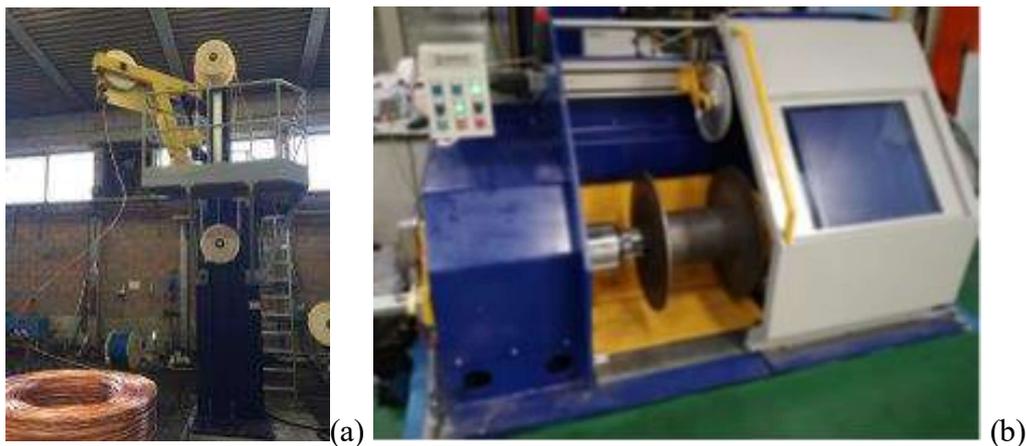
**Figura 43.** Layout linea di produzione filo in alluminio



**Figura 44.** Bobina di filo di alluminio (a) e fusto di filo di rame (b)

Nella parte iniziale della linea, il filo si presenta avvolto attorno a diversi fusti (Fig. 44b), ottenuti da una precedente lavorazione. Esso possiede un diametro di circa 2 mm e le lavorazioni successive gli permetteranno la riduzione fino a valori richiesti dal cliente.

Nel layout mostrato (Fig. 43), il filo viene svolto dai macchinari presenti nella parte iniziale della linea, denominati “svolgitori” (Fig.43 n.1), mostrati nella figura 45a. Successivamente, il filo entra nella “macchina multifilo” (Fig.43 n.2), nel “forno di ricottura in linea” (Fig.43 n.3) e termina la linea passando per gli “avvolgitori” (Fig.43 n.4), ultimo step del processo con scopo di avvolgimento del filo nella bobina.

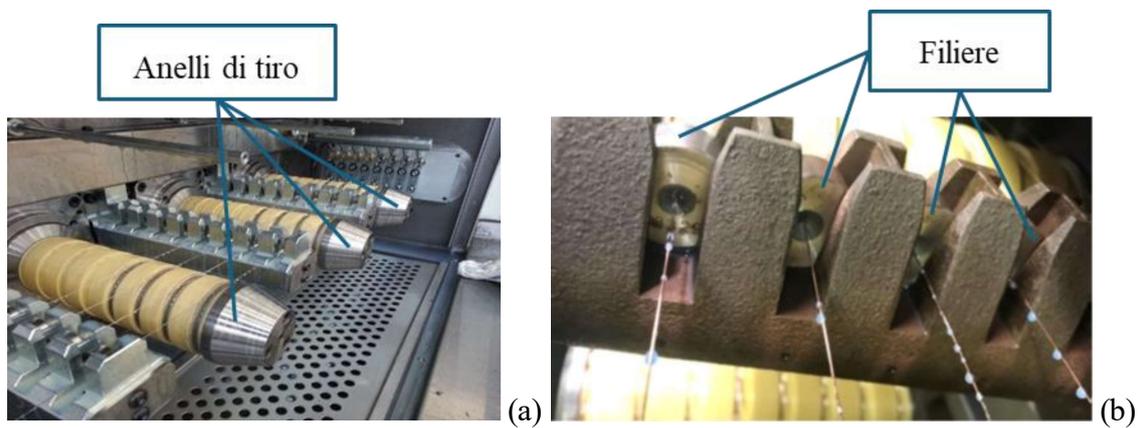


**Figura 45.** Sistema svolgitore (a) ed avvolgitore (b) del filo

Gli svolgitori (Fig. 45a) hanno il compito di svolgere il filo e renderlo pronto per l'ingresso alla successiva macchina, riducendo il più possibile gli stress meccanici sul filo agevolando tale fase. In seguito alla fase di svolgimento, i fili vengono inseriti nella macchina di trafilatura multifilo e sono pronti per la successiva lavorazione di deformazione plastica tramite il passaggio in filiere, organi che permettono la riduzione del diametro del filo. Il movimento del filo è reso possibile grazie alla forza di tiro esercitata dagli anelli di tiro (Fig. 47a) installati subito dopo le filiere.



**Figura 46.** Macchina di trafilatura multifilo

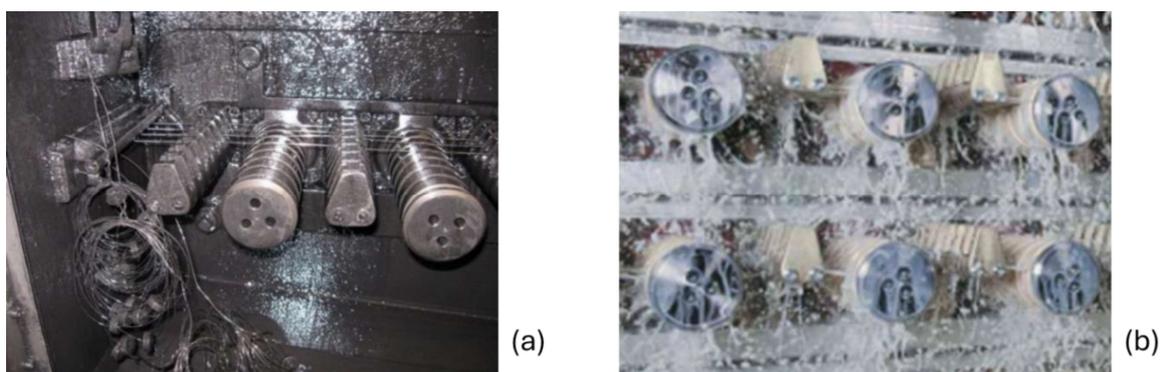


**Figura 47.** Anelli di tiro (a) e filiere (b) installate nella macchina di trafilatura multifilo

Per ridurre il più possibile gli stress meccanici e termici a cui i fili sono soggetti, viene impiegato un lubrificante liquido che viene fatto scorrere nella zona di lavorazione meccanica. Il fluido che si utilizza avrà proprietà specifiche a seconda della tipologia di metallo che si vuole deformare. Si osservano due situazioni di lavoro differenti a seconda del lubrificante utilizzato: l'olio (Fig.48a) o l'emulsione (Fig.48b).

L'olio è il lubrificante che permette di avere una maggiore efficienza di processo, migliore qualità superficiale del filo al termine della fase di deformazione e minore formazione di polvere metallica derivante dalla deformazione del filo.

L'emulsione è invece una miscela composta da un mix di acqua ed olio. Questo fluido permette di avere miglior dissipazione di calore durante la deformazione del filo e migliore pulizia della macchina di trafilatura. Ha come svantaggio quello di rendere più polverosa la macchina durante la deformazione del filo a causa di minore assorbimento delle impurità e polvere metallica conseguente alla deformazione plastica. Viene comunque spesso utilizzato a causa del ridotto costo comparato all'olio di lubrificazione.



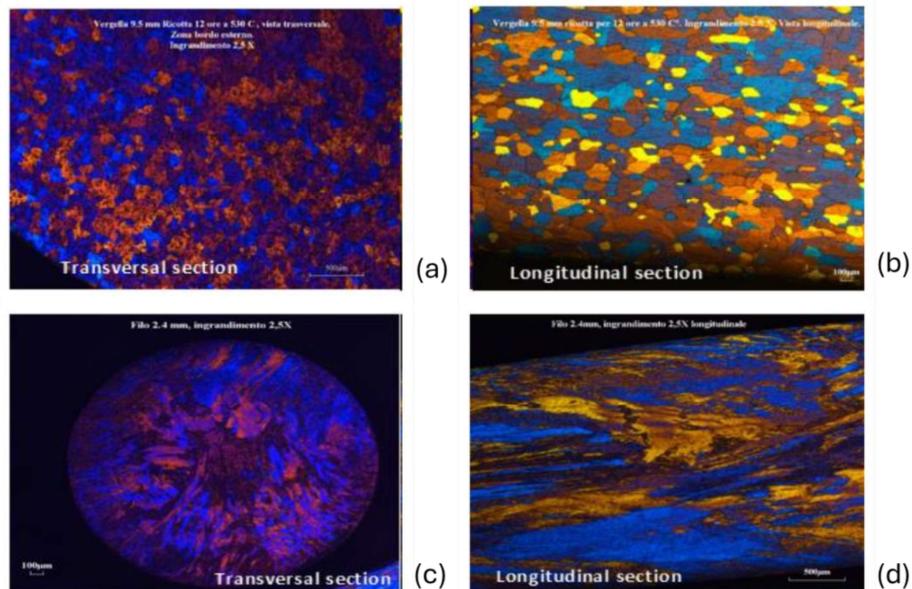
**Figura 48.** Aree di lavoro sottoposte ad olio (a) o emulsione (b)

Si vuole focalizzare l'attenzione sul fatto che i processi descritti portano ad un elevato grado di sporcizia ed impurità che si ripercuoterà sia sul filo che sui componenti interni del macchinario.

Il filo che viene lavorato durante questa fase è soggetto ad una modifica della forma dei propri grani cristallini. Prima della lavorazione la microstruttura risulta essere più omogenea, con i grani del

materiale di forma tondeggianti visibili tramite un'analisi al microscopio sia in sezione trasversale (Fig. 49a) che longitudinale (Fig. 49b).

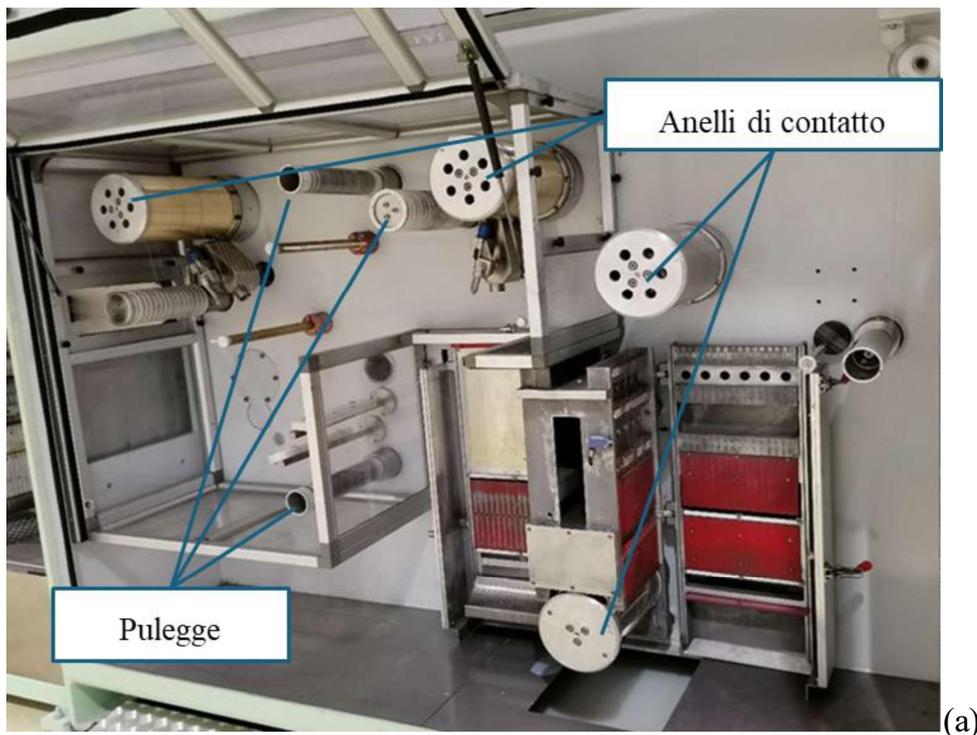
Negli step finali della lavorazione, quando il filo ha subito la deformazione plastica fino all'ottenimento della sezione finale, i grani tendono ad ottenere una forma maggiormente allungata in direzione longitudinale all'asse del filo, visibili in maniera chiara nella sezione longitudinale del filo (Fig. 49d).



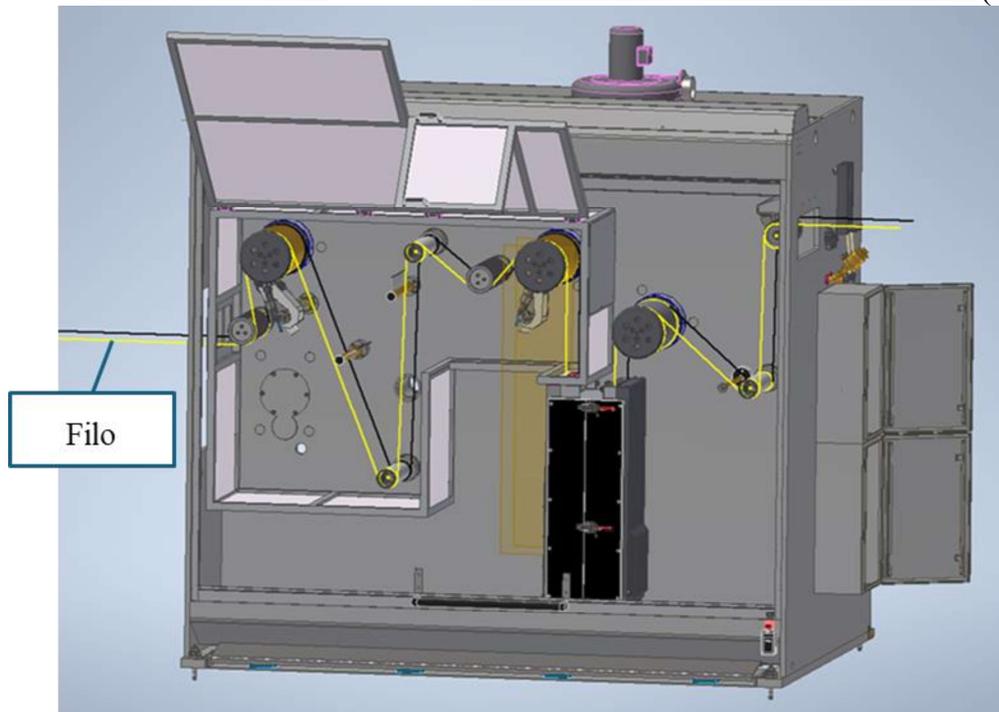
**Figura 49.** Analisi microstrutturale del filo prima (a, b) e dopo (c, d) la deformazione plastica a freddo

Questa morfologia ha una forte influenza sulle proprietà meccaniche, elettriche e chimiche del materiale; in particolare esso rileverà una riduzione della conducibilità elettrica e ad un aumento della fragilità dopo aver subito la deformazione plastica.

Per migliorare le proprietà elettriche del filo è necessario prevedere un successivo trattamento termico che permetta il ripristino delle caratteristiche elettriche nella situazione antecedente alla lavorazione. È questo il compito del forno di ricottura in linea (Fig. 50), installato successivamente alla macchina di deformazione plastica.



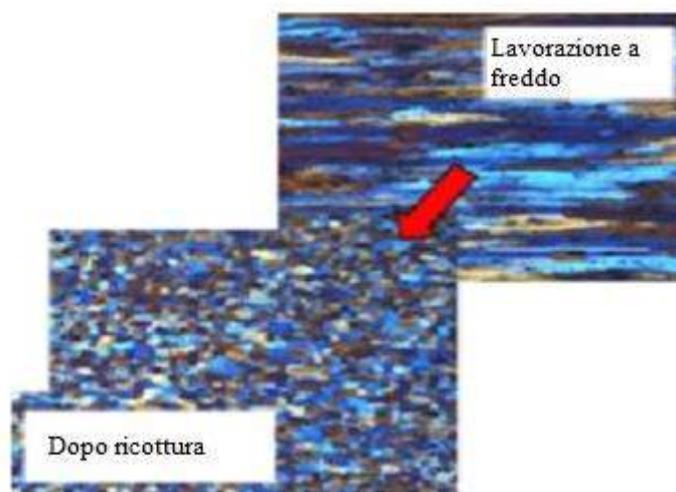
(a)



(b)

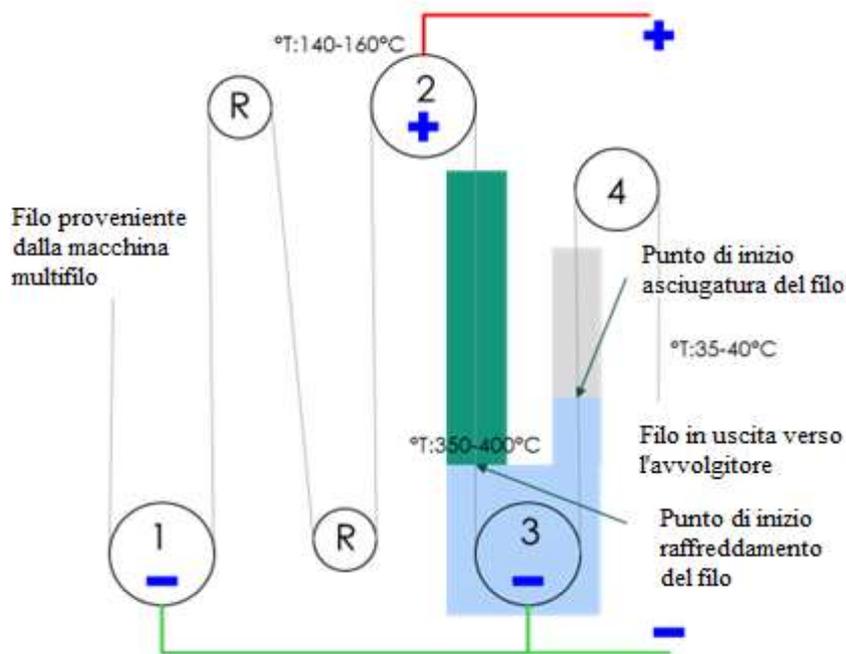
**Figura 50.** Forno in linea per la ricottura del filo metallico, reale (a) e virtuale (b).

La tecnologia utilizzata per trattare termicamente i fili in questo macchinario è quella della ricottura per effetto joule, che comporta un aumento di temperatura internamento al filo grazie al passaggio di corrente elettrica. Grazie a questo processo, la microstruttura del filo si modifica, ripristinando le caratteristiche come prima della deformazione (Fig. 51).



**Figura 51.** *Variazione microstrutturale dei grani dopo il processo di ricottura* [8]

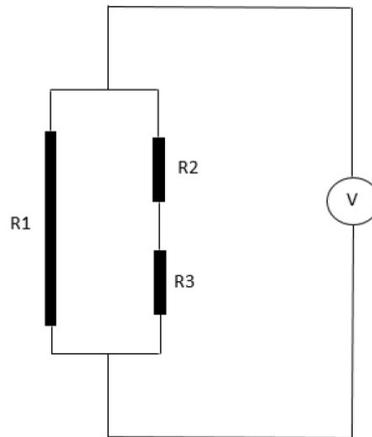
All'interno del forno di ricottura, il filo esegue un percorso passando tramite la superficie esterna di diversi organi di movimento con specifica velocità di rotazione per favorire il movimento del filo. Gli anelli di contatto (Fig.50), progettati nello specifico per questo scopo, sono collegati ad un generatore di tensione e posseggono diverso potenziale elettrico. Quando il filo, durante il suo movimento, collegherà due anelli aventi differente potenziale, esso formerà un circuito elettrico (Fig.52), rilevando un trasferimento di carica elettrica all'interno del filo che ne provocherà l'aumento di temperatura.



**Figura 52.** *Schema percorso del filo all'interno del forno di ricottura*

È importante prevedere la corretta differenza di potenziale elettrico tra gli anelli in maniera da progettare l'adeguata temperatura alla quale il filo sarà sottoposto durante la ricottura, in funzione del diametro del filo e della velocità con la quale lo si vuole produrre.

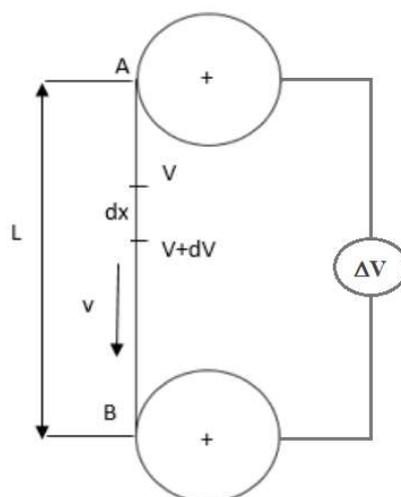
Il generatore di tensione eroga una corrente continua tramite due circuiti disposti in parallelo (Fig.53): il primo possiede la resistenza teorica  $R1$  e corrisponde ad un preliminare riscaldamento dall'anello 1 all'anello 2 di figura 52, mentre il secondo è idealmente soggetto alle due resistenze  $R2$  ed  $R3$ , rispettive del tratto dall'anello 2 all'anello 3.



**Figura 53.** Schema elettrico semplificato del forno di ricottura [48]

Le resistenze idealizzano l'assorbimento elettrico causato dal filo nei tratti precedentemente descritti. Il valore delle resistenze viene idealmente progettato per permettere riscaldamento al filo ad una temperatura inferiore a quella di ricristallizzazione ( $140-160^{\circ}\text{C}$ ). Successivamente, nel secondo tratto di riscaldamento (dall'anello 2 all'anello 3 di figura 52), il filo è sottoposto ad una temperatura maggiore ( $350-400^{\circ}\text{C}$ ), necessaria per la completa ricottura. Questo aumento graduale di temperatura permette la ricottura del filo nel tempo sufficiente per ripristinare la microstruttura iniziale del filo (filo ricotto con microstruttura omogenea).

Samp s.r.l. ha sviluppato un modello matematico per il calcolo dei principali parametri elettrici riscontrabili in queste fasi.



**Figura 54.** Schematizzazione di un circuito elettrico tra due anelli

Il principio si basa sull'ipotesi che l'energia fornita sotto forma di energia elettrica tra due anelli generici sottoposti a diverso potenziale elettrico (Fig. 54) viene trasformata ed assorbita dal filo sotto forma di energia termica.

Si considera una porzione di filo di lunghezza  $dx$  lungo il tratto compreso tra due anelli di contatto. Tale tratto di filo sarà sottoposto alla differenza di potenziale  $dV$  ed avrà velocità costante pari a  $v$ . Si vuole studiare come tale differenza di potenziale alteri la temperatura del materiale.

L'energia dissipata dalla porzione di filo  $dx$  viene espressa dall'equazione 17, nella quale compaiono i termini di calore specifico ( $C_p$ ), corrente elettrica ( $I$ ), densità del materiale ( $\rho$ ) e di sezione del filo ( $S$ ).

Si nota che tale modello non è lineare a causa della dipendenza del calore specifico e della densità dalla temperatura, definite rispettivamente dall'equazioni 18 e 19 tramite una dipendenza lineare per facilitare il proseguo della dimostrazione [49].

Integrando da A fino B l'equazione 17 si ottiene l'equazione 20 che, tramite elaborazione numerica e considerazione dei valori di riferimento per l'alluminio (Tab.7), permette una illustrazione grafica della dipendenza della differenza di potenziale dalla variazione di temperatura (Fig.55).

**Tabella 6.** Equazione descrittive della conservazione dell'energia

$$I \times dV = \rho(T) \times S \times \frac{dx}{dt} \times c_p(T) \times dT \quad \text{Equazione 17}$$

$$C_p = C_{p0} \times (1 + \alpha \times \Delta T) \quad \text{Equazione 18}$$

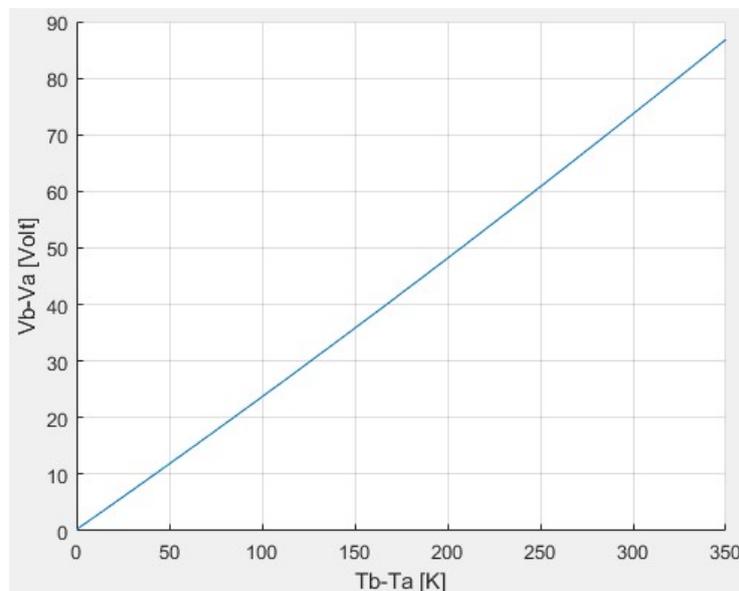
$$\rho = \rho_{20} \times (1 + k \times \Delta T)^{-1} \quad \text{Equazione 19}$$

$$\frac{I}{\rho_{20} \times S \times v \times c_{p0}} \times (V_b - V_a) = \frac{(k-\alpha)}{k^2} \times \ln(T_b k + 1) + \frac{(\alpha-k)}{k^2} \times \ln(T_a k + 1) + \frac{\alpha \times (T_b - T_a)}{k} \quad \text{Equazione 20}$$

**Tabella 7.** Valori di riferimento per l'alluminio

SIMBOLO	VALORE	U.D.M
$\rho_{20}$	2700	kg/m <sup>3</sup>
S	$3.14 \times 10^{-6}$	m <sup>2</sup>
v	15	m/s
$c_{p0}$	880	J/kg*K
k	$7.2 \times 10^{-5}$	K <sup>-1</sup>
$\alpha$	$5.46 \times 10^{-4}$	K <sup>-1</sup>

Il valore dell'intensità di corrente circolante nel circuito è stato ipotizzato costante per mettere maggiormente in risalto la dipendenza del potenziale elettrico dalla temperatura, senza considerare altre variabili al sistema. La figura 55 dimostra la dipendenza lineare crescente tra la variazione di temperatura e di potenziale elettrico, per indicare che per ottenere maggiore temperatura nel filo occorre fornire maggiore tensione elettrica.



**Figura 55.** Variazione della differenza di potenziale tra due anelli in funzione della differenza di temperatura

Con l'aumento della temperatura in fase di ricottura si facilita l'ossidazione del filo metallico, fenomeno non gradito a causa della riduzione della conducibilità elettrica del filo quando lo strato di ossido diventa rilevante. Per evitare questo fenomeno è previsto che la zona soggetta ad alta temperatura venga completamente immersa in un'atmosfera ricca di azoto (Fig.56), elemento chimicamente inerte che riduce la possibilità della formazione di ossido di alluminio nella fase di preriscaldamento [26].



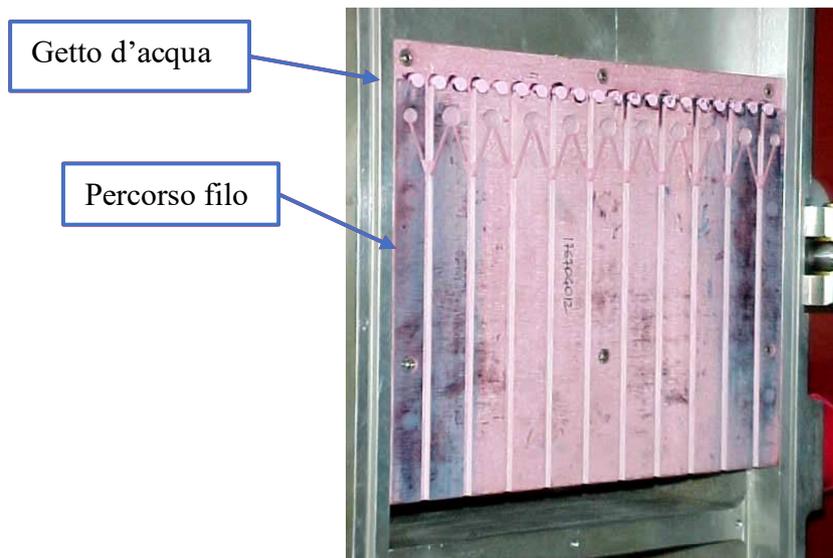
**Figura 56.** Focus sulla zona ad atmosfera isolata nel forno di ricottura

Nella zona di ricottura dove le temperature possono raggiungere i 400°C il problema della formazione di ossido è ancora più importante e per prevenire il problema sono progettate delle piastre in ceramica (Fig.57) all'interno delle quali è insufflato un mix di azoto e vapore.



**Figura 57.** Piste in ceramica guidafile nel circuito di riscaldamento

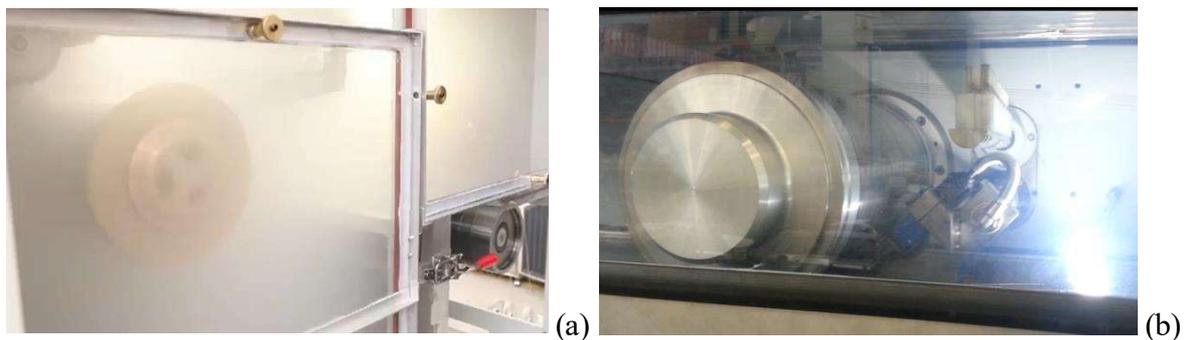
L'ultimo step del percorso del filo all'interno del forno di ricottura riguarda la fase di raffreddamento ed asciugatura. Queste avvengono tramite il passaggio del filo in una zona completamente immersa in un liquido di raffreddamento in prossimità dell'anello 3 (Fig.52), successivamente alla quale è presente la zona di asciugatura del filo che avviene tramite il passaggio in ugelli di aria ad alta pressione (Fig.58).



**Figura 58.** Sistema di raffreddamento del filo

Una volta terminato l'ultimo step, il filo è pronto per essere avvolto nella bobina della successiva macchina di avvolgimento del filo (Fig.45b).

La tipologia di lubrificante scelto in fase di trafilatura influenzerà l'ambiente che si formerà in fase di ricottura. Residui di olio in superficie al filo possono causare, se riscaldati ad alte temperature, un'atmosfera nebulosa (Fig.59a) che può portare ulteriore impurità.



**Figura 59.** Atmosfera nel forno di ricottura impostando olio (a) oppure emulsione (b) come liquido lubrificante nella precedente macchina di trafilatura

## 2.2 Difetti di usura e possibili soluzioni

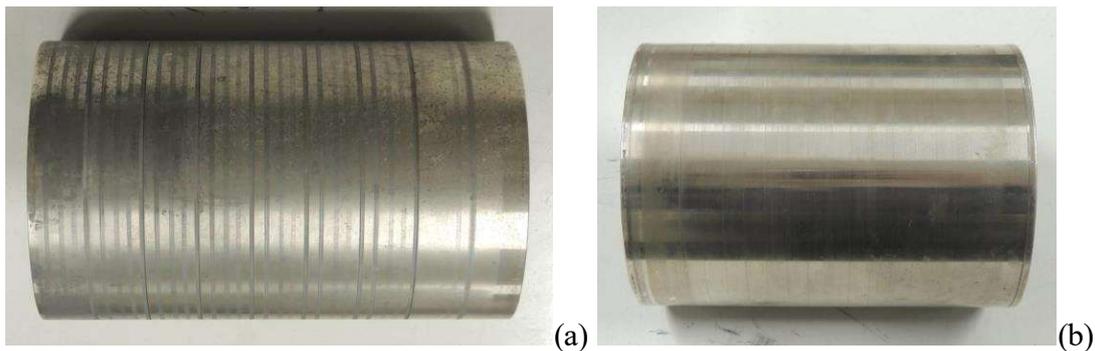
Il difetto di produzione che è stato riscontrato riguarda l'eccessiva usura a cui gli anelli di contatto (Fig.60) sono soggetti. Questo comportamento provoca una variazione del percorso e della distensione dei fili durante la fase di ricottura, causa di possibili stress meccanici imprevedibili e incontrollabili al filo, che possono causargli la rottura.



**Figura 60.** Tipici anelli di contatto utilizzati per la ricottura in linea di fili metallici

Questi componenti (Fig. 60) richiedono una frequente sostituzione, con eccessivi fermi macchina da parte dei clienti. Gli anelli che vengono attualmente utilizzati sono formati da un materiale base ed un rivestimento superficiale in Nichel, elemento che permette sia la conduzione di carica elettrica al filo che adeguata durezza superficiale.

Tramite il laboratorio di controllo ed analisi “Remet Controlli s.a.s.”, sono state sviluppate analisi a due anelli che sono stati soggetti alla produzione di filo in alluminio (Fig. 61a) e rame (Fig. 61b). Sono anelli prodotti con lo stesso metodo elencato sopra, il primo (Fig.61a) di diametro esterno pari a 200mm è stato utilizzato per la produzione di filo in alluminio ed il secondo (Fig.61b) di 140mm utilizzato per il filo di rame.



**Figura 61.** Anelli di contatto dopo essere stati sottoposti alla produzione di filo di alluminio (a) e rame (b)

Per analizzare il materiale base utilizzato per la costruzione dei due anelli, è stata eseguita un'analisi chimica (Tab.8) e delle prove di durezza (Tab.9) che non hanno mostrato elevata differenza tra i due

**Tabella. 8.** Composizione chimica dei materiali base dell'anello Ø200 (a) e Ø140 (b)

Elemento	ANELLO Ø200 mm (% in massa)	E355 UNI EN 10297-1 (% in massa)
C	0,17	max. 0,22
Si	0,24	max. 0,55
Mn	1,35	max. 1,60
P	0,012	max. 0,030
S	0,001	max. 0,035
Cr	0,13	/
Mo	0,022	/
Ni	0,075	/
Al	0,025	/
Co	0,013	/
Cu	0,12	/
Nb	0,022	/
Ti	0,009	/
V	0,006	/
B	0,002	/
Fe	97,70	Resto

(a)

Elemento	ANELLO Ø140 mm (% in massa)	E355 UNI EN 10297-1 (% in massa)
C	0,17	max. 0,22
Si	0,25	max. 0,55
Mn	1,31	max. 1,60
P	0,013	max. 0,030
S	0,009	max. 0,035
Cr	0,051	/
Mo	0,016	/
Ni	0,066	/
Al	0,028	/
Co	0,013	/
Cu	0,20	/
Nb	< 0,004	/
Ti	0,002	/
V	0,001	/
B	0,001	/
Fe	97,75	Resto

(b)

**Tabella 9.** Durezza dei materiali base dell'anello Ø200 (a) e Ø140 (b)

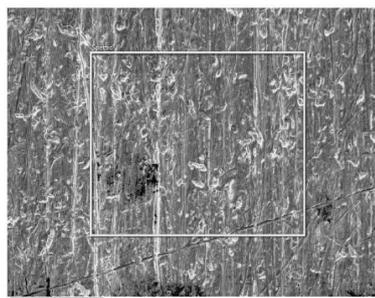
HBW2,5/187,5	
VALORI RILEVATI	MEDIA
156 – 158 – 161	158

(a)

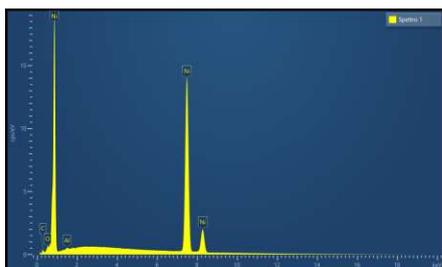
HBW2,5/187,5	
VALORI RILEVATI	MEDIA
156 – 153 – 155	155

(b)

Non ci sono elevate differenze nemmeno nelle composizioni chimiche dei due rivestimenti superficiali, analizzate tramite strumentazione SEM-EDS (Fig.62, Fig.63).



(a)

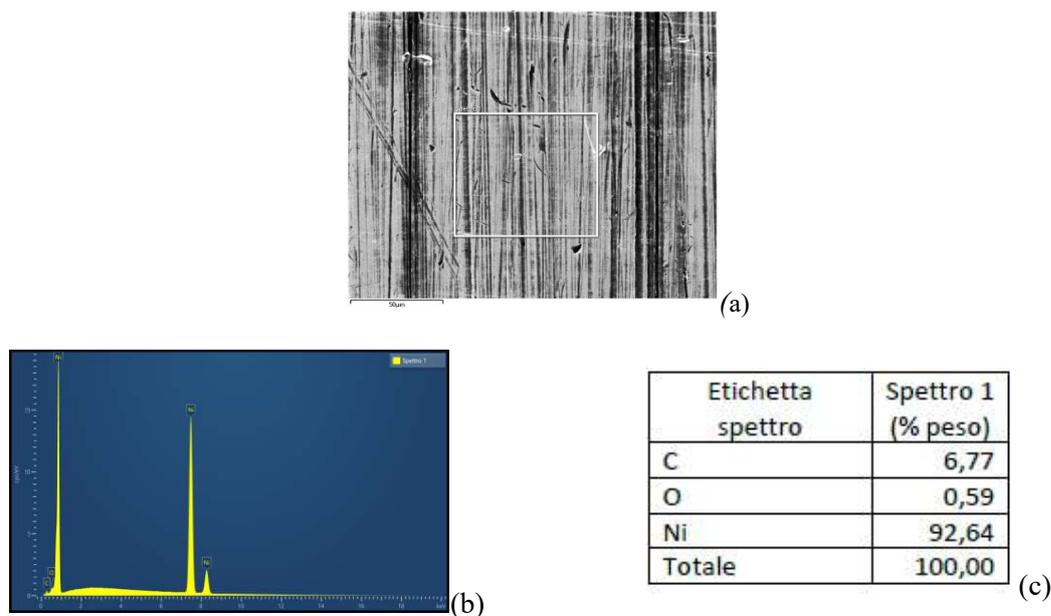


(b)

Etichetta spettro	Spettro 1 (% peso)
C	5,98
O	0,78
Al	0,31
Ni	92,94
Totale	100,00

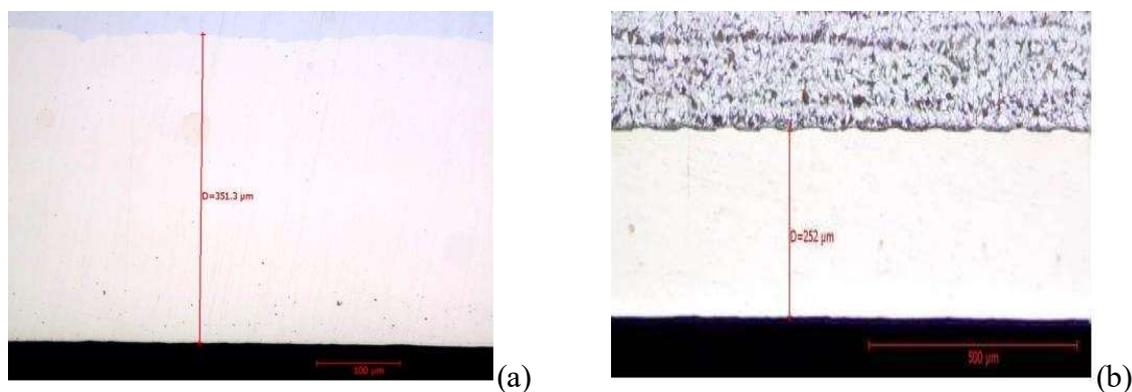
(c)

**Figura 62.** Analisi SEM-EDS superficiale dell'anello Ø200 nella zona non usurata



**Figura 63.** Analisi SEM-EDS superficiale dell'anello Ø140 nella zona non usurata

La caratteristica che differenzia maggiormente i due anelli riguarda lo spessore dei due rivestimenti superficiali e, tramite analisi al microscopio ottico, sono state rilevate i valori di riferimenti per i due anelli (Fig.64), ottenendo 350µm per l'anello a diametro maggiore e 250µm per quello minore. Questa differenza di spessore si ripercuote anche nel valore di durezza superficiale del rivestimento esterno, ottenendo pertanto valore maggiore per l'anello a diametro maggiore (Tab.10).



**Figura 64.** Misura dello spessore dei rivestimenti superficiali dell'anello Ø200 (a) e Ø140 (b)

**Tabella 10.** Durezza dei rivestimenti superficiali dell'anello Ø200 (a) e Ø140 (b)

HV0,1	
VALORI RILEVATI	MEDIA
560 – 541 – 519	540

(a)

HV0,1	
VALORI RILEVATI	MEDIA
309 – 297 – 307	304

(b)

Sono state eseguite anche delle analisi di rugosità superficiale dei due anelli, rilevando simile rugosità media (Ra) ma differente rugosità Rz (Tab.11), conseguenza di una possibile lucidatura finale del componente.

**Tabella 11.** Misura della rugosità superficiale dell'anello Ø200 (a) e Ø140 (b)

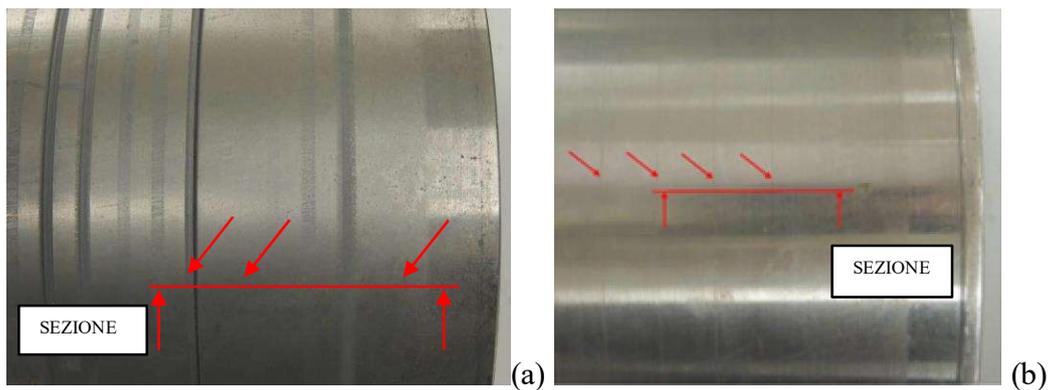
PARAMETRO	Ra	Rt	Rz
VALORE RILEVATO (µm)	0,34	2,96	2,60

(a)

PARAMETRO	Ra	Rt	Rz
VALORE RILEVATO (µm)	0,28	2,68	2,00

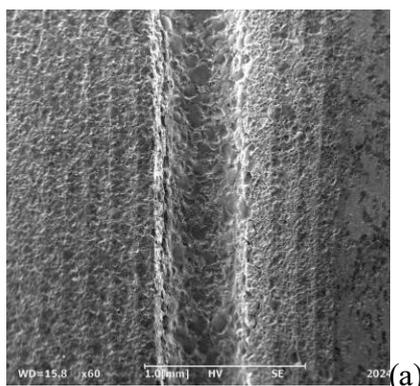
(b)

Nei due anelli sono stati prelevati dei campioni in prossimità delle piste di usura (Fig.65) per analizzare la causa di tale degradazione.

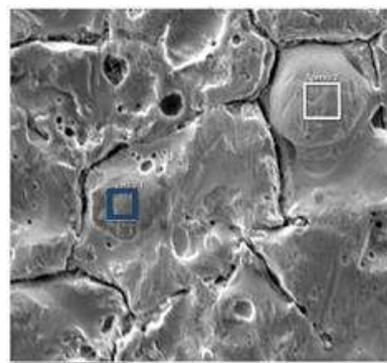


**Figura 65.** – Sezione di campionamento dell'anello Ø 200 mm

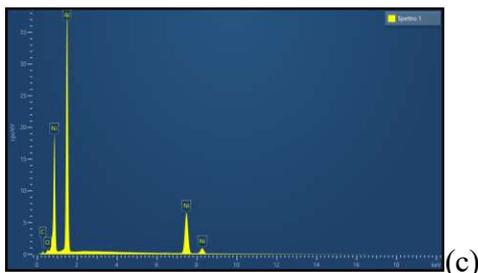
L'anello sottoposto alla lavorazione di alluminio rileva delle piste di usura di maggiore entità (Fig.65). Le analisi SEM-EDS eseguite sia in direzione longitudinale delle piste di usura (Fig.66) che in quella trasversale (Fig.67) del primo anello (Fig.65a), è stata riscontrata una considerevole percentuale di alluminio (Fig.66d, Fig. 67d).



(a)



(b)

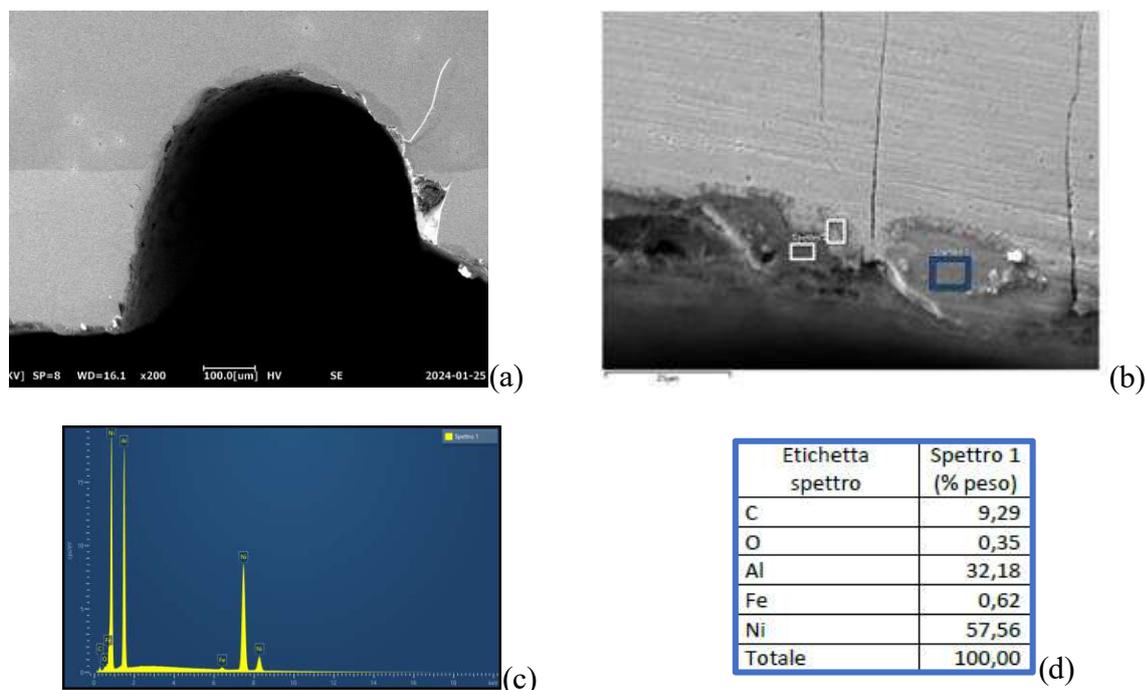


(c)

Etichetta spettro	Spettro 1 (% peso)
C	10,00
O	1,03
Al	49,49
Ni	39,48
Totale	100,00

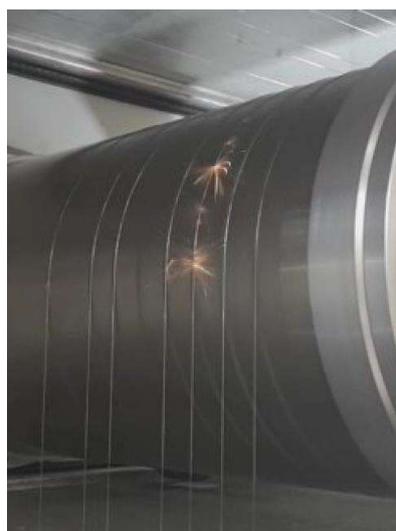
(d)

**Figura 66.** Analisi SEM-EDS in superficie dell'anello Ø200 nella zona usurata



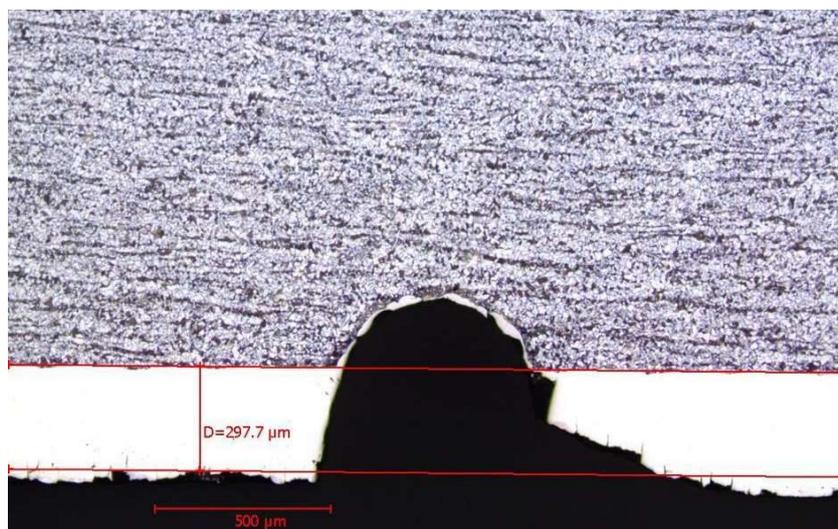
**Figura 67.** Analisi SEM-EDS in sezione dell'anello Ø200 nella zona usurata

Tale risultato è causato dalla microfusione e solidificazione di particelle di alluminio nella parte esterna dell'anello a causa delle alte temperature generate dalla formazione di scariche elettriche (Fig.68) che si instaurano tra i due componenti durante il processo di ricottura. Tali scariche, oltre a formare uno strato di alluminio indesiderato sull'anello di contatto, provocano una condizione di elettroerosione, causa principale dei crateri di usura osservati nelle analisi al microscopio (Fig.66a, Fig. 67a).



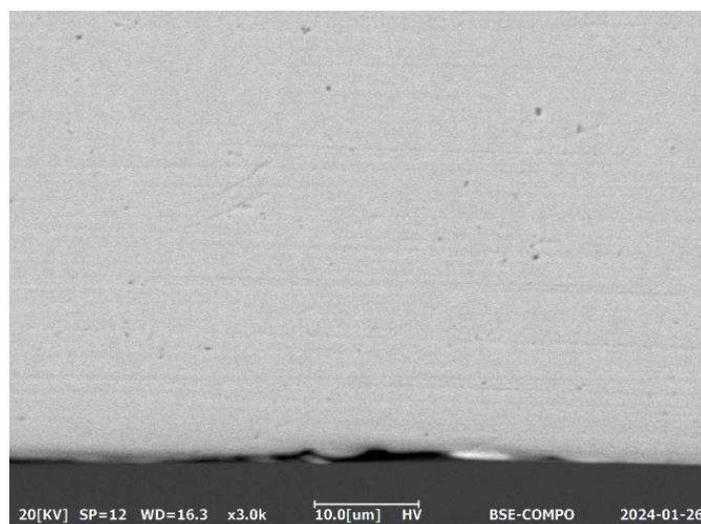
**Figura 68.** Immagine della generazione scariche elettriche durante la ricottura del filo

Nella sezione trasversale dell'anello Ø200 l'usura raggiunge tassi elevati fino a deteriorare completamente il rivestimento esterno dell'anello (Fig. 69).



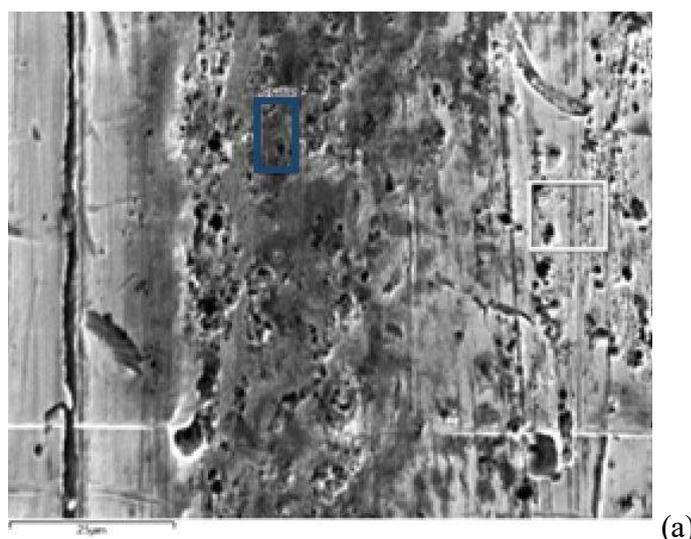
**Figura 69.** *Analisi dello spessore di rivestimento in prossimità della pista di usura*

Le analisi effettuate sull'anello sottoposto alla lavorazione del filo di rame hanno rilevato piste di usura meno invasive (Fig. 70), quantificabili a pochi  $\mu\text{m}$  dalle analisi al microscopio.

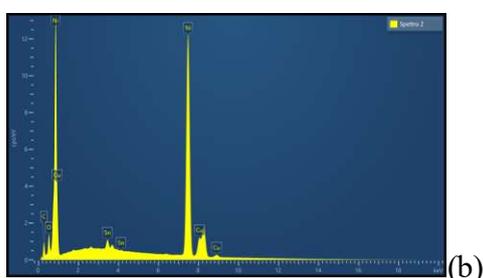


**Figura 70.** *Analisi al microscopio dell'anello  $\varnothing$  140 mm*

Dalle analisi SEM-EDS sono state rilevate tracce di rame e stagno (Fig.71c) in superficie dell'anello, causa della particolare lega di filo lavorata.



(a)



(b)

Etichetta spettro	Spettro 2 (% peso)
C	15,80
O	3,79
Ni	71,32
Cu	7,03
Sn	2,07
Totale	100,00

(c)

**Figura 71.** Analisi SEM-EDS in superficie dell'anello Ø140 nella zona usurata

In conclusione a queste analisi possiamo affermare che la produzione del filo in alluminio porta a maggiore deterioramento della superficie esterna dell'anello di contatto, e la causa di ciò è dovuta principalmente alla formazione di scariche elettriche che si generano tra anello e filo (Fig. 68) dovute a fenomeni chimico-fisici.

È stato riscontrato che la generazione di tale fenomeno elettrico è contemporaneamente causato sia dalle impurità presenti in sommità al filo sia dalla velocità relativa che si crea tra il filo e l'anello durante il processo di ricottura. Questa situazione porta alla formazione di scariche elettriche tra il filo e l'anello di contatto che usurano il rivestimento esterno dell'anello.

### 2.2.1 Prima soluzione: *tipologia rivestimento sull'anello di contatto*

Il rivestimento superficiale degli anelli di contatto è un elemento di fondamentale importanza, in quanto è la zona dell'anello direttamente a contatto con il filo.

La configurazione che meglio approssima il contatto reale è di tipo non conforme tra due forme cilindriche, il filo di alluminio e l'anello di contatto. La velocità relativa che si crea tra di essi causa, oltre ai citati fenomeni elettrici, processi di usura di strisciamento e di fretting.

Se la velocità di traslazione del filo fosse correttamente sincronizzata con la velocità di rotazione dell'anello di contatto, non ci sarebbe velocità relativa tra i due componenti, con tassi di usura più moderati.

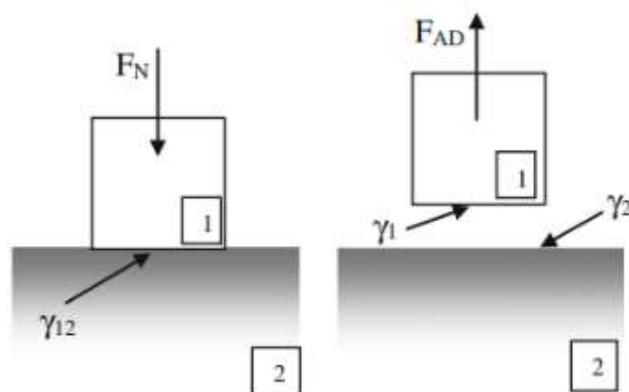
Nel ricercare un rivestimento superficiale che migliori la configurazione tribologica, si deve tenere in considerazione anche la sua compatibilità con il materiale base, che funge da supporto. Come primo criterio di miglioramento si è focalizzata l'attenzione sul fattore di adesione che si instaura tra i due triboelementi, da un lato l'alluminio (filo) e dall'altro il Nichel (anello). Sperimentalmente, Rabinowicz ha analizzato [50] la tendenza a formare giunzioni adesive tra gli elementi chimici, rilevando le coppie che tendono maggiormente a formare maggiore aderenza (Fig.72).

	W	Mo	Cr	Co	Ni	Fe	Nb	Pt	Zr	Ti	Cu	Au	Ag	Al	Zn	Mg	Cd	Sn	Pb	In
In				□	□	□		△	△	□	△	△	△	□	□	△	△	△	△	■
Pb	□	□	□	□	□	□	□	△	△	△	□	□	□	□	□	□	□	△	■	
Sn	□		□	□	□	□	□	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	■		
Cd			□	□	□	□		△	△	△	△	△	△	△	△	△	■			
Mg		□		□	□	□	□		△	△	△	△	△	△	△	■				
Zn		□	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	■				
Al	△	□	△	□	△	△	△	△	△	△	△	△	△	■						
Ag	□	□	□	□	□	□	□	△	△	△	△	△	■							
Au	△	□	△	△	△	△		△	△	△	△	■								
Cu	□	□	□	△	△	△	△	△	△	△	■									
Ti	△	△	△	△	△	△	△	△		■										
Zr	□	△	□	△	△	△	△	△	■											
Pt	△	△	△	△	△	△	△	■												
Nb	△	△	△	△	△	△	■													
Fe	△	△	△	△	△	■														
Ni	△	△	△	△	■															
Co	△	△	△	■																
Cr	△	△	■																	
Mo	△	■																		
W	■																			

□	<i>Incompatible</i>
○	<i>Partially incompatible</i>
□	<i>Partially compatible</i>
△	<i>Compatible</i>
■	<i>Identical</i>

Figura 72. Mappa di Rabinowicz [38]

Indio, Piombo, Cadmio e Stagno sono gli elementi più incompatibili quando vengono accoppiati con l'alluminio, pertanto suggeriti per diminuire l'adesione. Per quantificare il valore della forza di adesione  $F_{AD}$  è usuale riferirsi all'equazione 21[38], nella quale compaiono i termini del lavoro di adesione ( $W_{12}$ ), della forza normale alle due superfici ( $F_N$ ) e della durezza del materiale più tenero degli elementi di sistema ( $H$ ) (Fig. 73).



**Figura 73.** Schematizzazione prova di adesione tra due corpi [38]

$$F_{AD} \propto W_{12} \times \frac{F_N}{H}$$

**Equazione 21**

Riducendo la forza normale alle due superfici ( $F_N$ ) nel contatto tribologico tra filo ed anello, la forza di adesione diminuirebbe, ma questa modifica potrebbe causare l'allentamento del filo nel percorso con conseguenze peggiorative, date le alte velocità possedute dal filo durante il processo.

Sono stati riscontrati alcuni rivestimenti a base rame che posseggono buone caratteristiche all'opposizione della generazione di scariche elettriche contro un'antagonista polarizzato, leghe utilizzate perlopiù nelle apparecchiature dell'alta tensione [51]

Come secondo criterio di miglioramento, sono stati considerati rivestimenti con maggiore durezza rispetto quello attuale. Se si scegliesse di applicare un rivestimento con queste caratteristiche, bisognerebbe tenere in considerazione anche il grado di fragilità che i rivestimenti molto duri posseggono, rischiando di portare un risultato peggiorativo. Inoltre, non ci deve essere nemmeno troppa differenza di durezza tra il rivestimento esterno ed il materiale base, in quanto tale differenza potrebbe velocemente portare ad un distacco del rivestimento a causa della sua ridotta deformabilità (effetto "ghiaccio su fango" [37]). Se si volesse optare per un rivestimento con elevata durezza, dovrebbe essere inevitabilmente previsto un interstrato tra il materiale base e quello superficiale avente caratteristiche intermedie tra i due, che rilasci un gradiente di durezza più omogeneo.

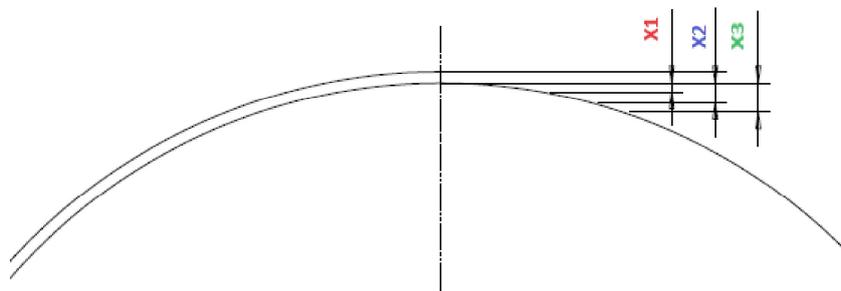
Il terzo criterio di miglioramento riguarda il miglioramento delle proprietà elettriche del rivestimento. Lo scopo principale dell'anello di contatto è quello di condurre carica elettrica al filo, di conseguenza non verranno considerate le famiglie di rivestimenti che rilasciano una superficie elettricamente isolante all'anello. Le famiglie dei ceramici e dei polimeri non saranno quindi proposte, in quanto sono materiali aventi proprietà isolanti.

### 2.2.2 Seconda soluzione: *controllo atmosfera nel forno di ricottura*

Un'ulteriore caratteristica del sistema sulla quale poter far affidamento per ridurre i tassi di usura è la proprietà di isolamento elettrico del fluido presente all'interno del forno di ricottura.

Come anticipato, attualmente si utilizza azoto gassoso in fase di preriscaldamento del filo, ed è già stato provato che tale gas permette di ridurre i tassi di usura sugli anelli di contatto [48]. Questo fluido ha lo scopo di conferire un'atmosfera inerte e di ridurre l'ossidazione del filo ma di non renderla elettricamente isolante. Si vuole invece ricercare un fluido che permetti il miglioramento delle proprietà di isolamento elettrico dell'atmosfera presente all'interno del forno di ricottura.

L'azoto e l'ossigeno sono i due elementi che sono stati finora installati all'interno della stazione di ricottura del filo di alluminio. Le proprietà di isolamento elettrico di questi due elementi sono simili, riscontrabile tramite un confronto tra le loro due costanti di rigidità dielettrica in bibliografia [52], permettendo di affermare che, a parità di differenza di potenziale elettrico presente tra i due antagonisti, l'atmosfera è soggetta alla rottura del dielettrico quando i due hanno una distanza pressoché simile. Data la configurazione del percorso del filo (Fig.74) all'interno del forno di ricottura, la distanza tra esso e l'anello di contatto tenderà a zero in prossimità del contatto, con conseguente formazione di una zona in cui le caratteristiche di isolamento del fluido verranno a mancare con formazione di scarica elettrica.



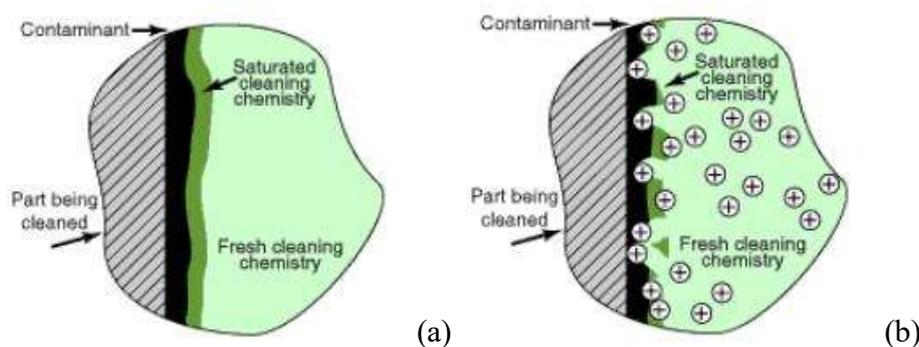
**Figura 74.** Schematizzazione distanza di formazione delle scintille elettriche tra filo ed anello di contatto

L'effetto ricercato con un nuovo fluido è quello del mantenimento dello stato di isolamento elettrico più a lungo possibile, investigando sulla costante di rigidità dielettrica dei fluidi. Tale valore quantifica la possibilità di opporsi alla chiusura del circuito elettrico quando due elementi con differente potenziale elettrico vengono avvicinati, fino al tendere a zero della loro distanza. Maggiore sarà il valore di tale costante minore dovrà essere la distanza tra i due elementi affinché si generi il passaggio di carica elettrica attraverso il fluido. I fluidi utilizzati per ottimizzare al massimo questa caratteristica vengono impiegati quotidianamente nell'industria petrolchimica e nelle centrali di produzione di energia elettrica, dove è richiesta un'elevata sicurezza a causa della pericolosità dell'ambiente. Il più diffuso fluido utilizzato in tali settori è l'esafluoruro di zolfo ( $\text{SF}_6$ ). Esso possiede un'elevata costante di rigidità dielettrica ed è molto efficace quando è necessario garantire un ambiente non esplosivo [53]. Un grande svantaggio, oltre il suo valore economico, è l'alto indice di

tossicità per l'uomo e di inquinamento atmosferico necessario alla sua produzione, tali da aver già fatto avviare ricerche per lo studio di sostituti a basso impatto ambientale [53] [54]. Risulta quindi necessario non solo focalizzare l'attenzione sulle proprietà ricercate, ma anche considerare tutte le altre caratteristiche di contorno che potrebbero rendere inefficace o insicura l'applicazione. Alcuni fluidi, pur possedendo maggiori costanti dielettriche, possono avere altre peculiarità che li renderebbero inadatti per questa applicazione. Ne sono un esempio tutti quei composti gassosi a base idrogeno o carbonio ( $\text{SH}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HI}$ ,  $\text{CH}_4$ , ...) che causerebbero effetti nocivi sia per l'uomo che per l'ambiente circostante [52]. Dato che il forno di ricottura non prevede una chiusura ermetica della camera di preriscaldamento, questi fattori sono di fondamentale importanza.

### 2.2.3 Terza soluzione: *grado di pulizia superficiale del filo*

Per garantire un'elevata efficienza del forno di ricottura è importante che la conduzione elettrica tra l'anello di contatto ed il filo avvenga senza fattori contaminanti che potrebbero ridurre il rendimento del processo. È pertanto importante prevedere un sufficiente stato di pulizia del filo in ingresso alla stazione di ricottura, progettando eventualmente dispositivi su misura che ne permettano la pulizia. La tecnologia ad ultrasuoni viene utilizzata come metodo di decontaminazione in diversi settori, ne sono un esempio quelli chirurgici o di studi dentistici. La tecnologia focalizza il suo meccanismo sul bombardamento (Fig.75) della superficie da pulire con ioni ed elettroni [55]. Tali particelle vengono prelevate dalla soluzione nella quale l'oggetto da pulire è immerso e, tramite un dispositivo ad alta frequenza, la superficie esterna viene pulita.



**Figura 75.** *Illustrazione pulizia superficiale con macchinario ad ultrasuoni*

Dovendo essere installato all'interno del processo di produzione del filo, la pulizia dovrebbe avvenire durante il movimento dello stesso, portando ad una completa rivisitazione del layout dello strumento. In commercio esistono già delle macchine adibite alla pulizia di fili che utilizzano questa tecnologia [56], ed esse sono applicabili sia ad un singolo filo (Fig. 76b) che ad un numero maggiore (Fig. 76c).



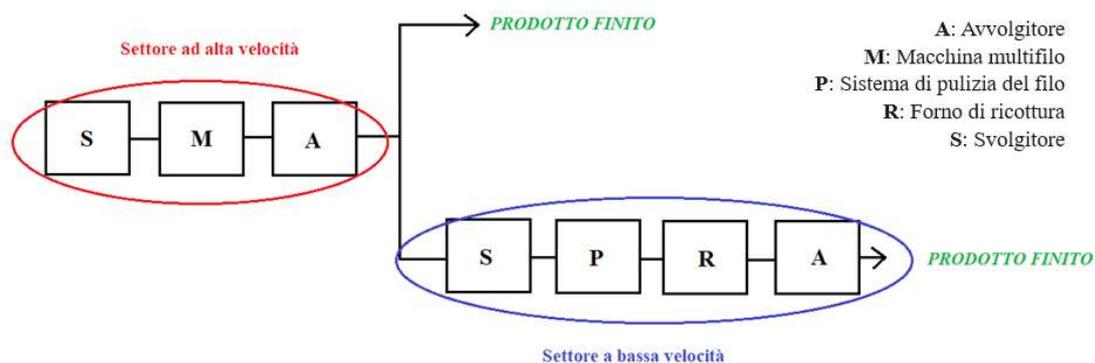
**Figura 76.** *Macchinari ad ultrasuoni per la pulizia del singolo(a)(b) e multiplo (c) filo [57]*

Un ulteriore tecnologia che potrebbe essere utilizzata per ricercare un miglioramento del grado di pulizia del filo, potrebbe essere quella dell'alta pressione. La tecnologia (Fig.77) è diversa rispetto quella ad ultrasuoni, ma l'efficienza e la velocità di trattamento del filo sono simili.



**Figura 77.** *Macchinario ad alta pressione per la pulizia del singolo filo*

I primi studi riguardanti questa tecnologia risultano essere degli anni '70 [58], indice di una ricerca già sviluppata in questo settore. Nel caso in cui la velocità di trattamento di pulizia del filo fosse notevolmente inferiore rispetto quella adottabile dagli altri macchinari che compongono la linea, sarebbe necessario suddividere il processo di produzione del filo in più step (Fig.78), localizzando le fasi aventi stessa velocità di trattamento del filo garantendo comunque la produzione oraria richiesta.



**Figura 78.** Layout linea di produzione del filo a due settori paralleli

Altre soluzioni che potrebbero essere installate per la pulizia del filo riguardano l'effetto meccanico attraverso organi meccanici. Ne sono un esempio il sistema di pulizia tramite spazzole metalliche rotanti (Fig.79a) o il sistema di pulizia a nastro (Fig.79b), entrambi già presenti sul mercato per fili di diametro più elevato.



(a)

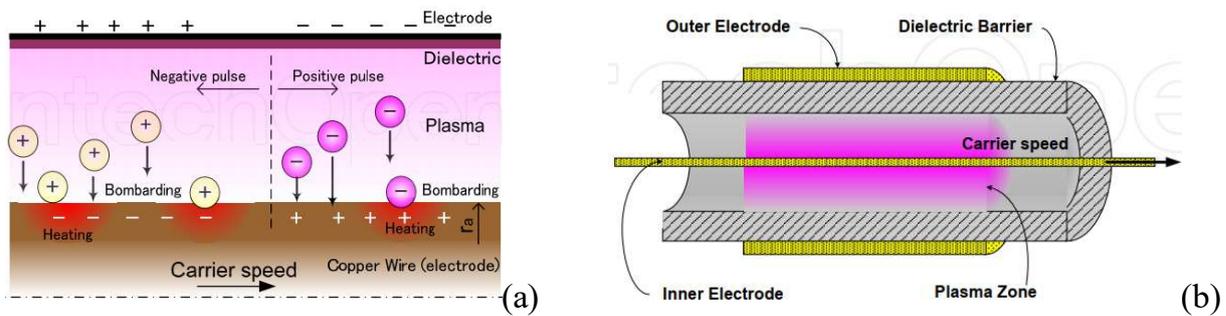


(b)

**Figura 79.** Spazzole metalliche per la pulizia del filo

#### 2.2.4 Quarta soluzione: *variazione metodo di ricottura del filo*

Per migliorare la condizione di ricottura del filo, garantendo la stessa qualità del prodotto, è stata considerata una diversa tecnologia di trattamento termico del filo. Essa utilizza un fluido elettricamente carico allo stato gassoso per trattare termicamente il filo, utilizzando un'atmosfera isolata per favorire la carica dei suoi ioni [59]. Le particelle cariche presenti nell'atmosfera vengono caricate elettricamente mediante l'utilizzo di un elettrodo esterno. Esse vengono proiettate ad alta frequenza sulla superficie esterna del filo che lo riscalda, trasformando l'energia cinetica posseduta dalle particelle in energia termica (Fig.80). A differenza del classico metodo di ricottura a corto circuito, questa tecnologia non utilizza alcuna differenza di potenziale tra due elementi posti a contatto tra di loro aventi movimento relativo. Questa tecnologia permette inoltre una contemporanea pulizia della superficie esterna al filo, rilasciando un'ottima finitura superficiale [31].



**Figura 80.** Schematizzazione processo di ricottura al plasma del filo [31]

Lo svantaggio principale riguarda la velocità di trattamento del filo, che risulta essere molto ridotta rispetto alla ricottura in linea a causa della modalità del riscaldamento [60].

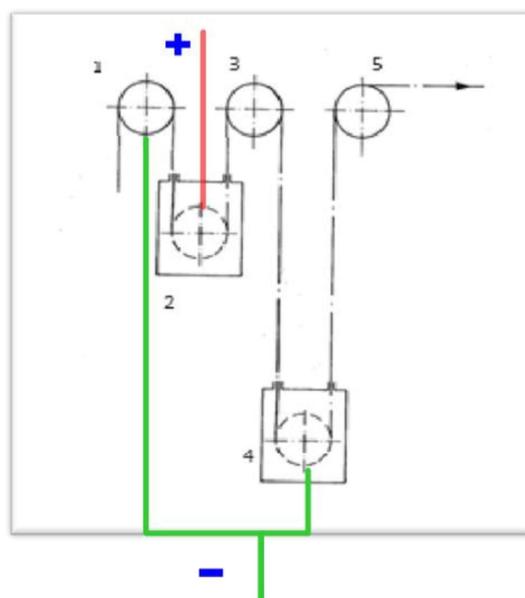
Un'ulteriore tecnologia di ricottura che potrebbe essere utilizzata per modificare il metodo di ricottura del filo riguarda la ricottura ad induzione elettromagnetica. Tale tecnologia sfrutta il passaggio del filo da trattare all'interno di una bobina percorsa da corrente elettrica (Fig.81) [26]. Il campo magnetico che si genera all'interno della bobina crea un campo magnetico indotto all'interno del filo, tale da generare un campo elettrico interno al filo responsabile del trattamento termico [61].



**Figura 81.** Sistema di ricottura ad induzione per filo

### 2.2.5 Quinta soluzione: protezione anello con liquido dielettrico

Come ulteriore metodo per aumentare l'efficienza della stazione di ricottura, è stato proposto un adattamento dell'attuale layout del forno di ricottura in linea tramite l'immersione dell'anello in una zona contenente liquido dielettrico (Fig.82). Durante la conduzione di carica elettrica dall'anello al filo, il liquido ha lo scopo sia di ridurre la generazione delle scariche elettriche sia quello di mantenere un certo grado di pulizia superficiale al filo. I liquidi sono fluidi con maggiore costante di rigidità dielettrica rispetto alle sostanze gassose [62], e questa caratteristica potrebbe essere utilizzata per questo scopo. Particolare attenzione andrebbe posta nel sistema di isolamento e messa a terra del macchinario, per evitare che il fluido possa condurre elettricità a parti indesiderate e provocare scariche elettriche nocive.



**Figura 82.** Schematizzazione circuito di ricottura del filo con anello 2 protetto

In questa configurazione (Fig. 46.2), gli anelli immersi in una zona contenente liquido dovranno presentare i fori di uscita ed ingresso del filo nella zona superiore, per evitare che il liquido fuoriesca dalla vasca andando a compromettere il macchinario.

### 2.3 Conclusioni preliminari inerenti alle soluzioni proposte

Sono stati stabiliti dei fattori qualitativi che permettono di confrontare le modifiche proposte: essi aiuteranno nelle conclusioni stabilendo un valore qualitativo che le modifiche propongono al nuovo sistema.

I fattori qualitativi che sono stati scelti come metro di confronto sono i seguenti:

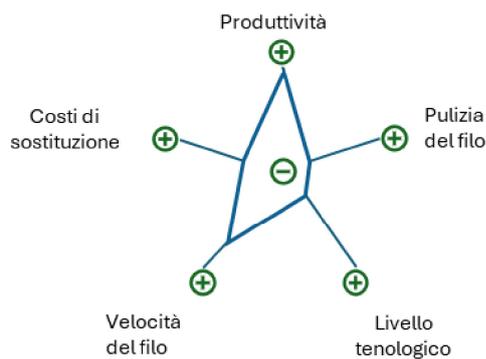
- **Produttività:** è il fattore che stima la quantità di materiale (volume produttivo) che può essere prodotto dopo la modifica, con valore positivo se ne aumenta la caratteristica;
- **Costo di sostituzione:** è il fattore che indica quanto è rilevante il costo della modifica per installare la modifica proposta, con valore positivo se ne aumenta le spese;
- **Velocità del filo:** è il fattore che indica quanto influisce la modifica nella velocità di movimento del filo nella linea di produzione, con valore positivo se ne aumenta la caratteristica;
- **Livello tecnologico della modifica:** è il fattore che indica il valore aggiunto che il prodotto finale acquisisce se viene lavorato dalla nuova linea di produzione;
- **Pulizia del filo:** è il fattore che indica il grado di pulizia rilasciato al filo al termine della produzione nella linea modificata, con valore positivo se lo rende più pulito.

È stato scelto di indicare questi fattori perché sono quelli a cui si fa più affidamento in fase di progettazione ed ottimizzazione della linea di processo per la produzione di fili. I risultati che sono

stati tratti sono stati idealizzati non solo ipotizzando una nuova configurazione prototipale della linea, ma già dopo aver ipotizzato la sua installazione in un'organizzazione reale di processo.

1. La progettazione di un nuovo rivestimento per gli anelli di contatto è un metodo di miglioramento che non richiede un elevato investimento se confrontato alle altre soluzioni, poiché il layout della linea rimarrà invariato. Il fattore di produttività, nel caso in cui si riescano a ridurre i tassi di usura rilevabili nel sistema tribologico, risulterebbe migliorato in quanto verranno ridotti i fermi macchina necessari per la sostituzione dei particolari (Fig. 83).

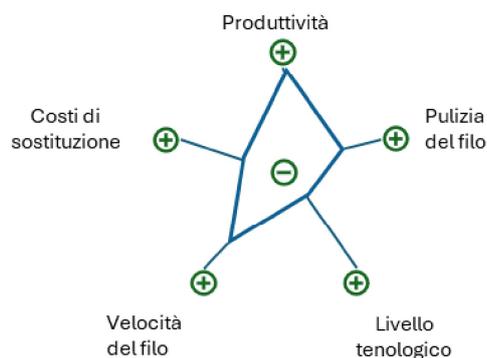
### 1\_Nuovo rivestimento



**Figura 83.** Conclusione qualitativa sul cambio di rivestimento

2. La modifica del gas di isolamento all'interno del forno di ricottura comporterà la sostituzione del serbatoio (o generatore di gas) esterno alla macchina e sarà pertanto una sostituzione poco invasiva che non influenzerà il layout della linea. Questa soluzione potrebbe aumentare l'isolamento elettrico tra filo e l'anello di contatto, riducendo l'adesione tra i due (Fig. 84).

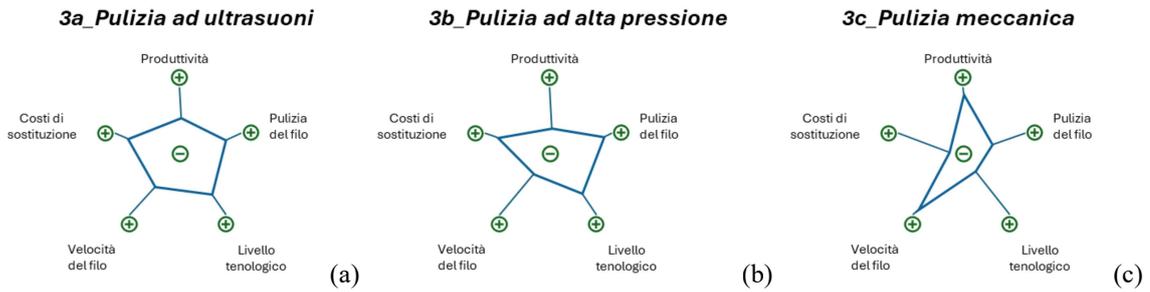
### 2\_Nuovo gas di isolamento



**Figura 84.** Conclusione qualitativa sul cambio di gas di isolamento

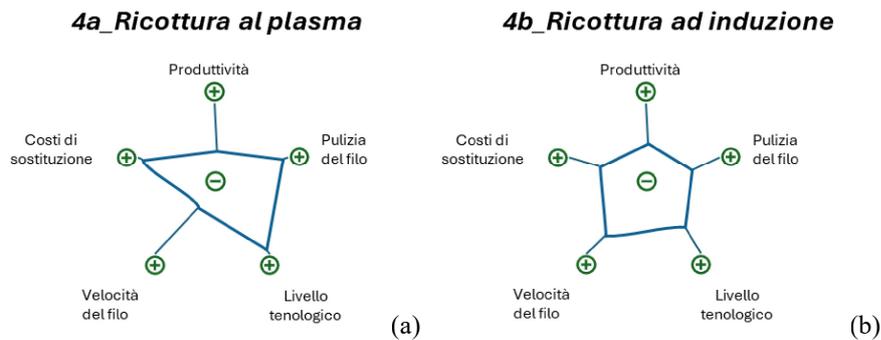
3. L'installazione di una nuova stazione per la pulizia del filo che precede la fase di ricottura porterebbe ad avere un filo notevolmente più pulito rispetto alla situazione attuale, portando a mantenere un certo grado di pulizia nella successiva stazione di ricottura grazie alla riduzione delle impurità presenti in superficie del filo. Il fattore negativo riguarda la ridotta

velocità di trattamento di queste tecnologie, non sempre accettabile con le richieste di produttività dei clienti (Fig. 85).



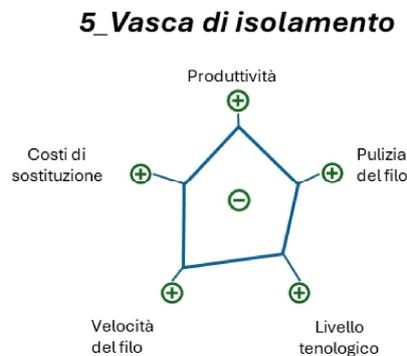
**Figura 85.** Conclusione qualitativa sull'aggiunta del macchinario di pulizia del filo

4. L'installazione di un nuovo metodo di ricottura potrebbe eliminare il difetto di usura presente sugli anelli di contatto grazie al differente metodo di trasferimento di calore al filo. Questa tecnologia richiederebbe una velocità di processo molto lenta, con la possibilità di trattare un filo alla volta. Questo porterebbe inevitabilmente una riprogettazione del layout e della produttività delle linee (Fig. 86).



**Figura 86.** Conclusione qualitativa sul cambio del metodo di ricottura

5. La soluzione che stabilisce la progettazione dell'anello polarizzato immerso in un liquido aumenterebbe il livello tecnologico della macchina, portando maggiori costi e tempi di installazione. Possiederebbe come efficace vantaggio quello di essere immerso in un fluido avente costante di rigidità dielettrica notevolmente maggiore rispetto quella dell'attuale fluido (azoto oppure ossigeno), con conseguente isolamento elettrico tra i due elementi (Fig. 87).



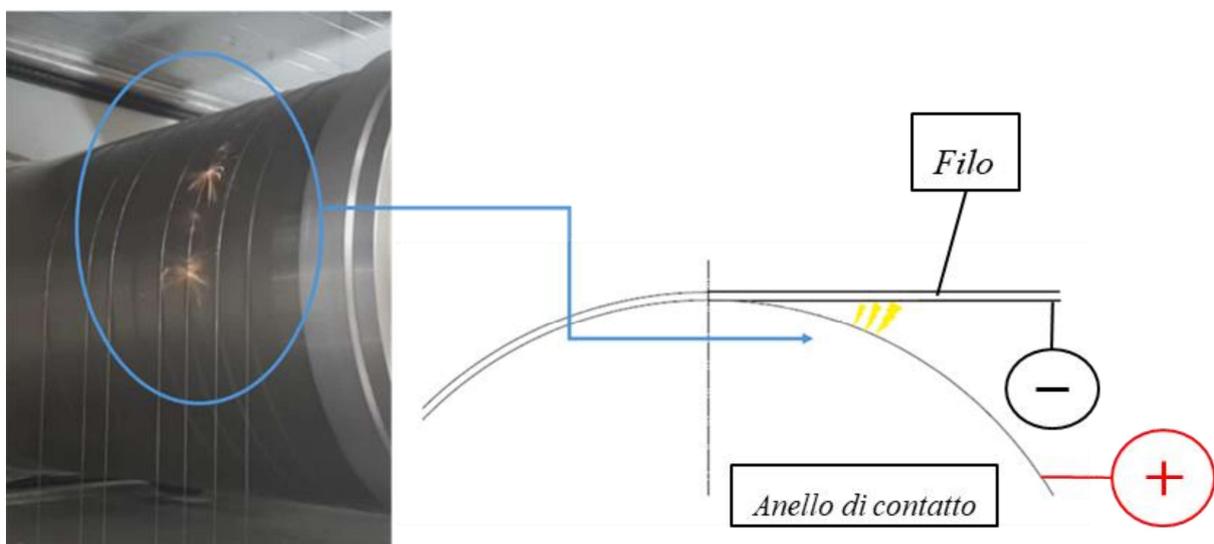
**Figura 87.** Conclusione qualitativa sull'aggiunta della vasca di isolamento nell'anello di contatto

## 3 RICERCA E SVILUPPO

### 3.1 Progettazione banco prova

Attraverso questo lavoro di ricerca è stato valutato più approfonditamente l'applicazione di un nuovo rivestimento per far fronte alle problematiche d'usura rilevate, testando differenti tipologie di materiali tramite la progettazione di un banco prova. Il vantaggio principale che si vuole ottenere con l'utilizzo del banco prova risiede nella possibilità di prevedere il comportamento che gli anelli di contatto potranno avere in opera, evitando di effettuare un investimento importante senza conoscerne preventivamente la migliore soluzione ottenibile. È importante tenere in considerazione che i risultati che si otterranno risulteranno preliminari ed ulteriori analisi dovranno definitivamente affermare la scelta più appropriata per il componente industriale. Le prove avranno lo scopo di selezionare i rivestimenti che otterranno i risultati più performanti tramite il banco prova e, successivamente, di applicarli ad un anello di contatto soggetto ad una condizione reale di trattamento termico del filo. Se anche queste successive analisi daranno esiti positivi, i rivestimenti studiati potranno effettivamente essere dichiarati affidabili per il miglioramento dell'usura nel forno di ricottura.

Come primo oggetto di approfondimento di progettazione, è stata centrata l'attenzione sul contatto filo-anello presente durante il movimento del filo per analizzare la generazione delle scariche elettriche. Osservando il fenomeno, è stata verificata la maggior generazione delle scariche elettriche nella zona di avvicinamento e di allontanamento del filo dall'anello di contatto (Fig. 88). Questa situazione può essere approfondita studiando il fenomeno di rottura del dielettrico dell'atmosfera presente nel tribosistema, in funzione della distanza di avvicinamento/allontanamento del filo all'anello di contatto.



**Figura 88.** *Illustrazione generazione scariche elettriche durante la produzione di filo*

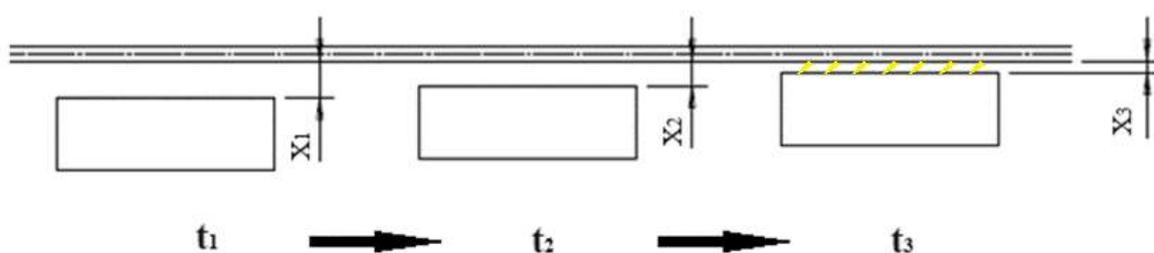
Tra gli i punti chiave che sono stati considerati al fine della progettazione del banco prova viene citata la presenza di un contatto non conforme tra una geometria filiforme e cilindrica, la presenza di una differenza di potenziale elettrico tra gli elementi e la presenza di un movimento relativo di accostamento specifico tra gli elementi.

Il banco prova (Fig. 90) è stato progettato focalizzando l'attenzione sulla simulazione della distanza alla quale avviene la rottura del dielettrico tra il filo e l'anello di contatto, potendo fare un confronto tra diversi rivestimenti superficiali osservando quale ha una minor propensione alla generazione delle scariche elettriche. Durante le prove viene concentrata l'attenzione sulla distanza istantanea presente tra i due componenti, il filo, mantenuto in posizione statica e disteso tramite un morsetto, ed un provino, che simuli l'anello di contatto, con applicazione superficiale di uno specifico rivestimento conduttivo.

Per generare la scarica elettrica tra i due componenti è stato installato un generatore di tensione, collegando il polo positivo al filo e quello negativo al provino.

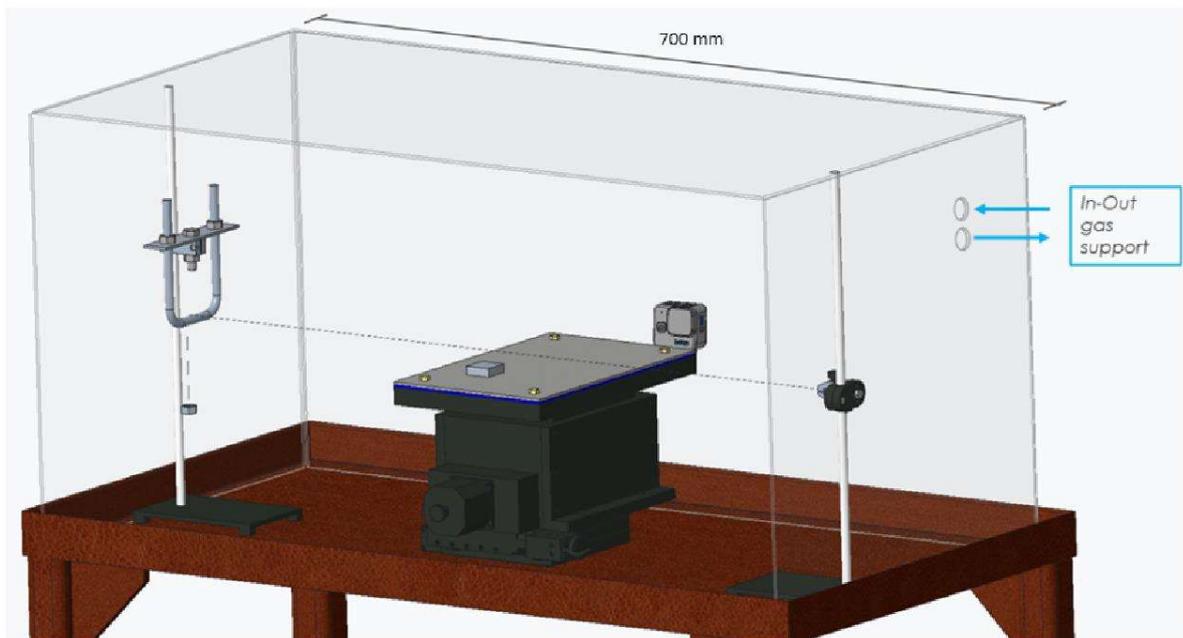
Per garantire l'isolamento della zona in analisi, potendo inoltre prevedere uno specifico fluido di isolamento, è stata progettata una teca come oggetto di isolamento con l'ambiente esterno.

Il provino metallico verrà bloccato in sommità ad una tavola motorizzata che, tramite un software dedicato, ha permesso la progettazione del movimento nelle tre direzioni XYZ. Verranno eseguiti dei movimenti di accostamento ed allontanamento del provino dal filo in alluminio, osservando l'esatta distanza per la quale si avrà la rottura del dielettrico e confrontando tale risultato tra più rivestimenti superficiali (Fig. 89).



**Figura 89.** *Variazione della distanza tra provino e filo durante le prove*

Questo movimento simula la riduzione della distanza tra l'anello di contatto ed il filo nella fase di ricottura (Fig. 88).



**Figura 90.** Banco prova sperimentale

L'attrezzatura è composta dai seguenti componenti (Fig.91):

1. Piastra metallica per il supporto dei provini
2. Piastra in plastica per isolare la tavola motorizzata
3. Tavola motorizzata XYZ
4. Componenti per il supporto del filo
5. Massa per la distensione del filo
6. Teca per l'isolamento dell'atmosfera
7. Asta da supporto
8. **Filo**
9. Supporto per il morsetto
10. **Provino**
11. Morsetto per il bloccaggio del filo
12. Videocamera per la registrazione delle scariche elettriche

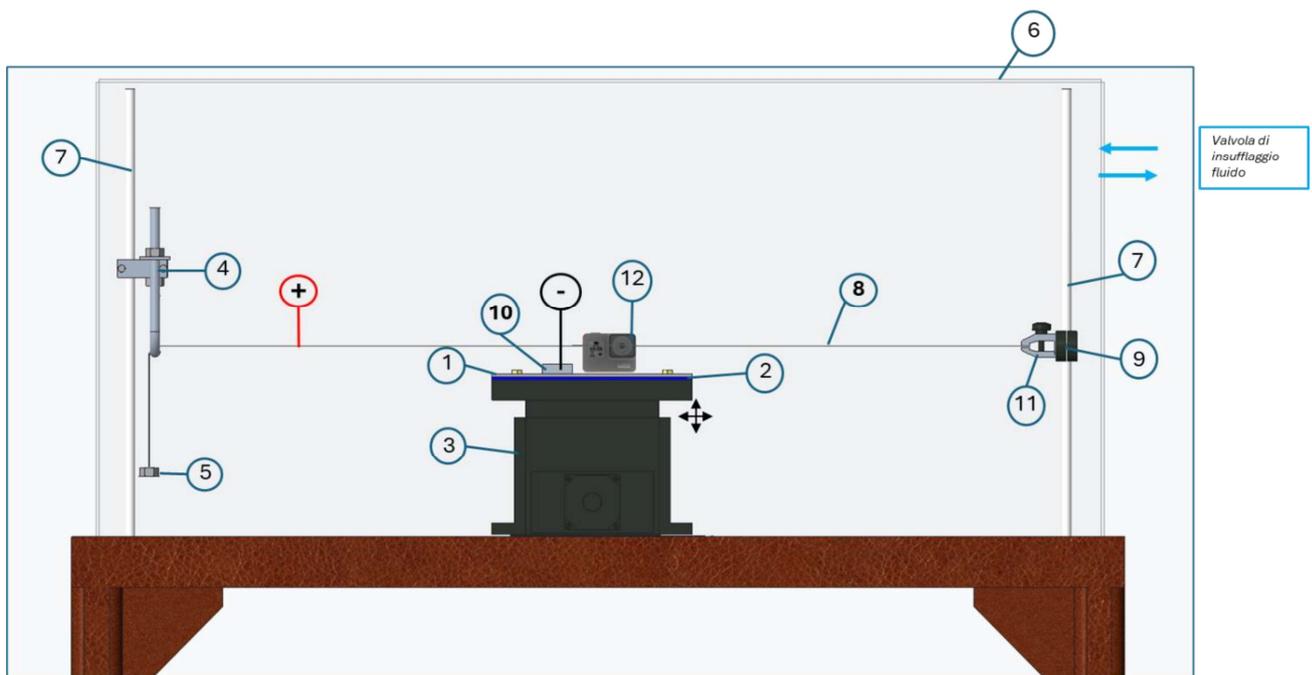


Figura 91. Prototipo sperimentale con numerazione componenti

### 3.1.1 Analisi rivestimenti e progettazione provini

Come già precedentemente approfondito, il rivestimento maggiormente utilizzato nell’anello di contatto ha come elemento predominante il Nichel. Sono stati seguiti i seguenti punti chiave per studiare quali rivestimenti superficiali possano essere più idonei per questa applicazione:

- I. **Conduzione elettrica:** l’anello ha come obiettivo principale quello della conduzione elettrica al filo, per consentirne il trattamento termico. Pertanto, sarebbe inopportuno se si depositasse del materiale con proprietà isolanti. Anche se questa soluzione potrebbe prevedere una forte riduzione di scariche elettriche, non consentirebbe il trattamento termico e non garantirebbe l’obiettivo principale. Le famiglie di materiali che verranno pertanto esclusi sono quelle dei polimeri e dei ceramici, note per le loro proprietà isolanti.
- II. **Durezza superficiale:** è importante garantire sufficiente durezza in superficie all’anello di contatto per possedere resistenza all’usura meccanica, a causa del processo di strisciamento e fretting presente tra i due triboelementi. Optare per un rivestimento molto duro potrebbe però essere inefficace, in quanto potrebbe instaurarsi il fenomeno “ghiaccio su fango” [37].
- III. **Compatibilità chimica tra elementi:** è necessario prevedere delle famiglie di elementi che non abbiano alta compatibilità chimica con l’antagonista, che in questo sistema è l’alluminio. Gli elementi più consigliati per questi scopi sono i seguenti: Indio, Piombo, Cadmio, Stagno.

Sono stati contattati diversi fornitori per l’approvvigionamento dei provini e, nell’allegato A, sono state illustrate le tipologie di rivestimenti che hanno suggerito per queste analisi. Non tutti i rivestimenti suggeriti verranno analizzati e quelli che sono stati scelti sono indicati nella tabella 12.

Tabella 12. Riferimento ai rivestimenti scelti

Fornitori	Nr° del rivestimento scelto
A	3,4
F	1,2
H	3
I	1
L	1
M	3
O	5
P	3

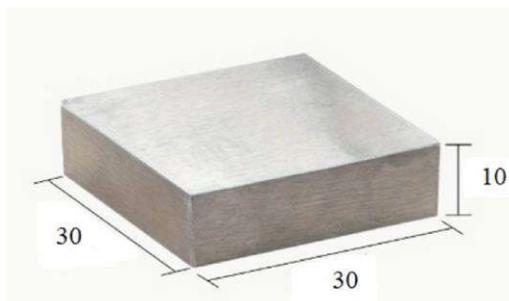
Le scelte che hanno portato alla scelta dei rivestimenti sono le seguenti, differenziate per fornitore:

- Fornitore A: il rivestimento al Cromo che non è stato scelto avrebbe rilasciato elevata durezza in superficie al materiale, portandolo ad avere delle caratteristiche non conformi a quelle ricercate. Il rivestimento al Nichel verrà fornito tramite un prelievo degli anelli già costruiti e messi a disposizione dall'azienda Samp s.r.l. e pertanto non verrà fornito da questo fornitore. I rivestimenti scelti verranno depositati con spessori limitati, ritenuti sufficienti per queste prime analisi ma inadeguati nel caso in cui si debba procedere con l'applicazione al componente industriale;
- Fornitore B: i rivestimenti che questa azienda avrebbe fornito non sarebbero stati soddisfacenti per le proprietà elettriche ricercate. Essi sono tutti materiali elettricamente isolanti, contrari con l'obbiettivo di queste analisi;
- Fornitore C: i rivestimenti proposti da questa azienda avrebbero previsto un sottile strato di rivestimenti superficiale (inferiore a 10  $\mu\text{m}$ ), perciò non idoneo con le caratteristiche ricercate;
- Fornitore D: questa azienda non permette la deposizione dei rivestimenti elencati a provini da laboratorio con dimensioni e quantità limitate come quelle illustrate;
- Fornitore E: il rivestimento proposto da questo fornitore rilascerebbe dei valori di durezza superficiale troppo elevati rispetto le caratteristiche ricercate, rischiando di rendere molto fragile la superficie esterna dell'anello;
- Fornitore F: la maggior parte dei rivestimenti proposti possiederebbe uno spessore di deposizione troppo sottile per l'obbiettivo prefissato, pertanto sono stati scartati. Gli unici che

sono stati ritenuti accettabili sono formati da elementi metallici conduttori aventi spessore adeguato;

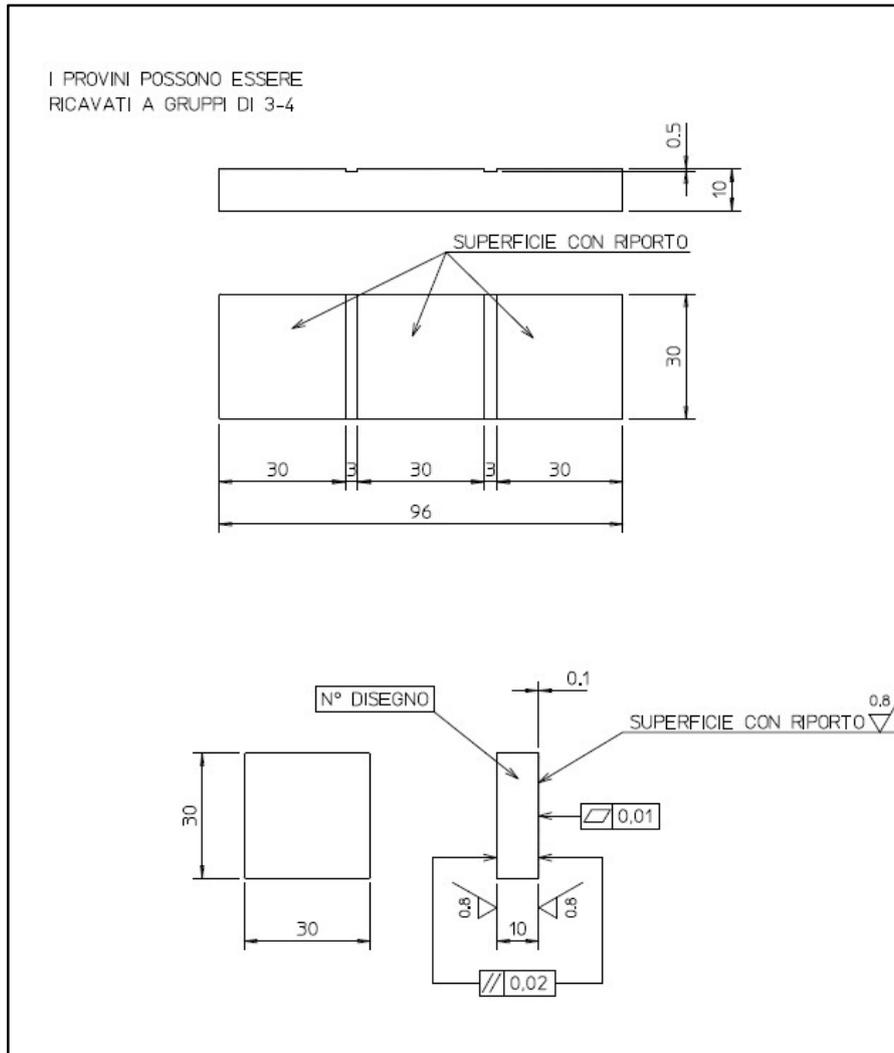
- Fornitore G: i rivestimenti proposti da questa azienda sarebbero solo per scopi di decorazione superficiale aventi spessori di pochi micron, ritenuti perciò insoddisfacenti;
- Fornitore H: la maggior parte dei rivestimenti che avrebbe fornito questa azienda avrebbero posseduto delle caratteristiche elettriche non ottimali e durezza superficiale elevata. L'unico che è stato ritenuto accettabile è una lega a base rame con alluminio e ferro come elementi alliganti;
- Fornitore I: è stato ritenuto accettabile il rivestimento proposto da questo fornitore poiché rilascia in superficie proprietà elettriche discrete e durezza modesta, maggiori di un normale trattamento galvanico di puro zinco. Lo spessore è sufficiente per queste prime prove sperimentali ma insufficiente nel caso di una reale applicazione industriale;
- Fornitore L: l'azienda si è proposta nell'applicazione di un rivestimento a base Nichel e Cromo, con l'aggiunta di altri elementi alliganti in percentuali molto basse, ritenuto accettabile per le analisi;
- Fornitore M: i rivestimenti che non sono stati ritenuti idonei avrebbero rilasciato sia elevata durezza in superficie al materiale sia avrebbero posseduto elementi alliganti non idonei per le caratteristiche ricercate per questa applicazione;
- Fornitore N: il rivestimento non è stato ritenuto accettabile a causa del basso spessore che avrebbe rilasciato in superficie
- Fornitore O: l'unico rivestimento che è stato deciso di accettare è l'unico che possiede caratteristiche conduttive e che non è già stato proposto da altri fornitori;
- Fornitore P: i rivestimenti non scelti sarebbero stati depositati con spessori molto sottili (inferiori a  $10\ \mu\text{m}$ ), ritenuti pertanto inaccettabili per lo scopo finale di questo studio.

Il provino è stato progettato per essere inserito nell'equipaggiamento con l'obiettivo principale di simulare il comportamento dell'anello di contatto presente nel forno di ricottura. È stato costruito partendo da una lastra di 10 mm in acciaio da costruzione S275/355JR EN10025, dalla quale è stato ritagliato una geometria a base quadrata (Fig. 92).

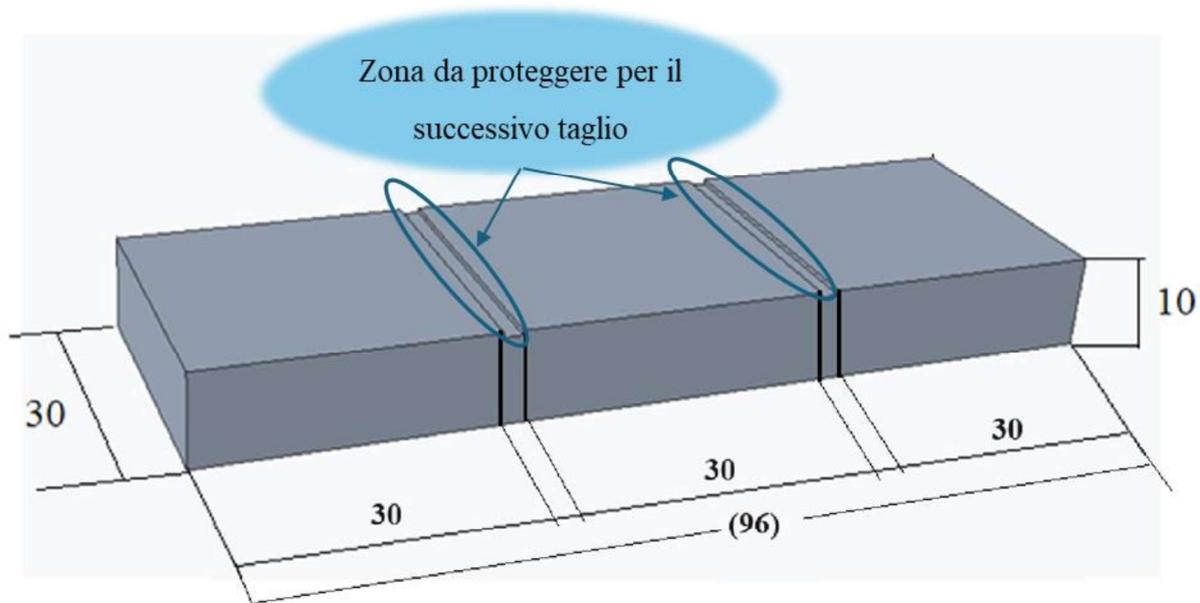


**Figura 92.** *Illustrazione provino*

Successivamente alla produzione del provino quadrato di partenza verrà depositato un sottile strato superficiale di rivestimento metallico, a seconda della disponibilità dei fornitori elencati precedentemente. Dato che verranno eseguiti 3 provini per ogni rivestimento che è stato scelto, per favorire e velocizzare l'applicazione del rivestimento è stata consigliata la deposizione su un provino avente maggiori dimensioni (Fig. 93) e successivo taglio per ricavare i tre provini aventi dimensioni finale prestabilita. Seguendo questo procedimento è importante assicurarsi che il taglio trasversale avvenga senza il distacco o eliminazione del rivestimento superficiale e, per facilitare questo, è stata predisposta una zona da proteggere durante l'applicazione superficiale (Fig.94, Fig.95b).



**Figura 93.** Disegno tecnico per la costruzione dei provini



**Figura 94.** *Disegno virtuale dei provini da costruire*

Questa progettazione è stata suggerita ai fornitori, esplicandone la motivazione che ha portato a questo risultato. Non tutti hanno ritenuto indispensabile il passaggio al provino a base rettangolare (Fig.95), in quanto favorevoli all'applicazione del rivestimento già a quello di dimensioni finali (Fig.96).



(a)



(b)

**Figura 95.** *Provino rivestito di una particolare lega, dal quale verranno successivamente ricavati 3 provini a base quadrata (a). Segni derivanti dalla protezione del provino durante l'applicazione del rivestimento (b).*



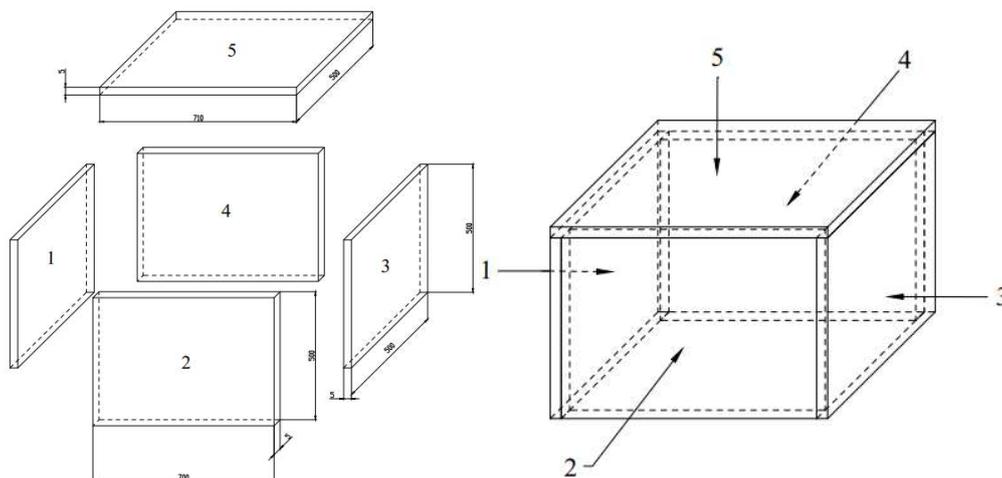
**Figura 96.** Singolo provino da analizzare.

### 3.1.2 Analisi atmosfera e progettazione teca

Come già introdotto, la progettazione di questa attrezzatura è stata fatta tenendo in considerazione la possibilità di analizzare le caratteristiche di generazione delle scariche elettriche potendo anche optare per dei fluidi differenti. Questa particolarità aggiunge una variabile in più al sistema tribologico, potendone permettere un approfondimento studiando soluzioni che non erano mai state prese in considerazione in questi macchinari.

Inizialmente, si è pensato di eseguire le prove potendo usufruire di due fluidi: l'aria atmosferica e l'azoto. La teca è stata progettata in funzione di tutto l'equipaggiamento che andrà inserito all'interno, pertanto di misura sufficiente per eseguire le analisi in completa sicurezza. È stata costruita partendo da una lastra di 5 mm in Policarbonato, tagliato a misura ed assemblato tramite giunzione adesiva (Fig.97). L'alternativa al collegamento adesivo porterebbe essere il collegamento mobile tramite viti, con il vantaggio del possibile smontaggio dopo l'utilizzo. Questa soluzione è inappropriata per il fornitore a causa del ridotto spessore posseduto dalla lastra di partenza (5 mm).

L'installazione dell'azoto sarà garantita grazie al generatore presente all'interno del laboratorio. Il suo continuo ricircolo all'interno della zona sperimentale è reso possibile grazie ai fori di collegamento che verranno previsti nella teca, i quali saranno collegati ai canali di mandata del generatore.



**Figura 97.** Disegno della teca

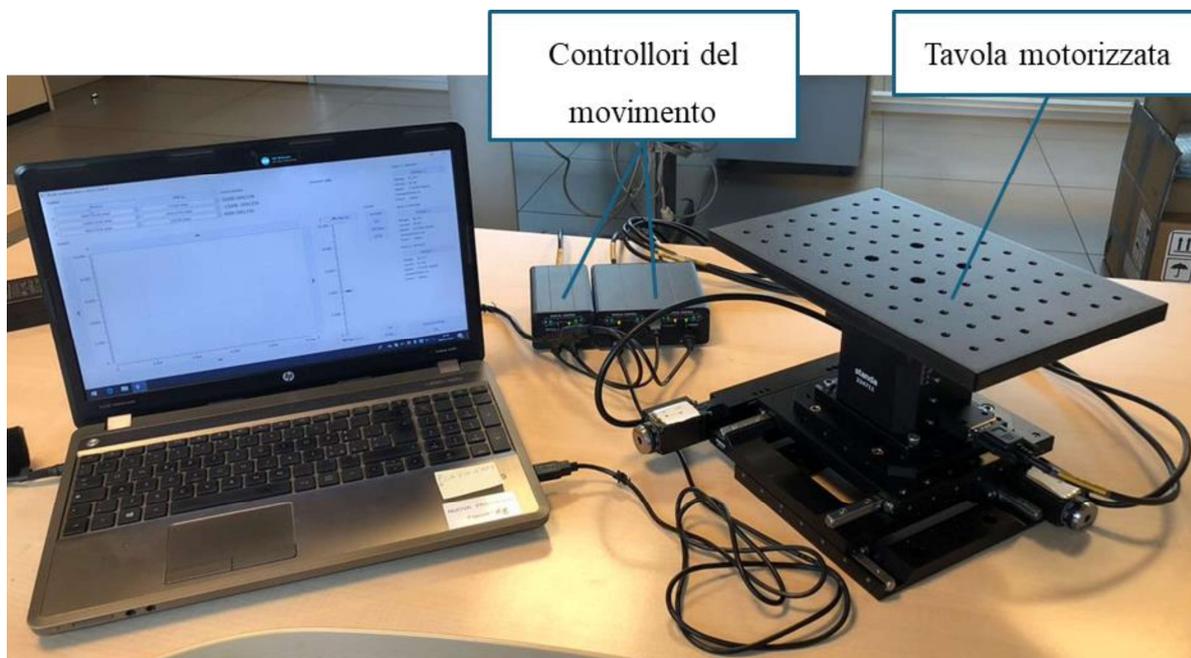
È stato scelto il Policarbonato come materiale per questo scopo per la sua trasparenza, resistenza agli urti e basso costo di fornitura, caratteristiche ideali per questa attrezzatura (Fig.98).



**Figura 98.** Teca in policarbonato

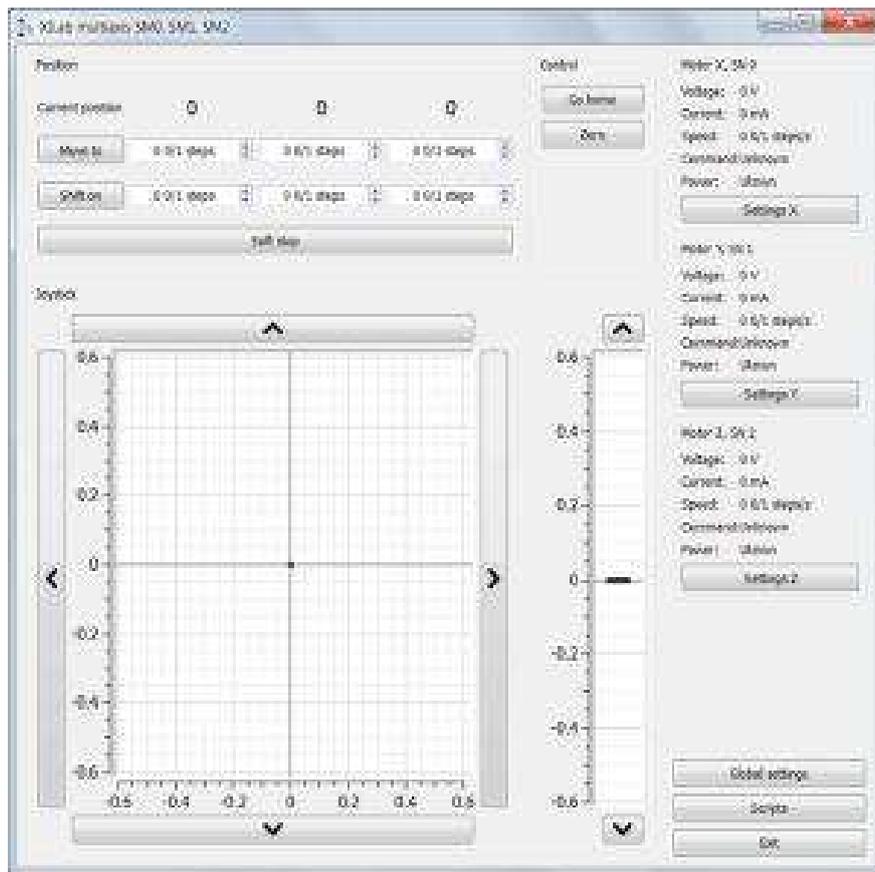
### 3.2 Installazione attrezzatura

La prima fase di installazione dell'attrezzatura è iniziata con l'assemblaggio della tavola motorizzata, organo di movimento dei provini che tramite controllori collegati al computer, rendono possibile la movimentazione della piattaforma (Fig.99).



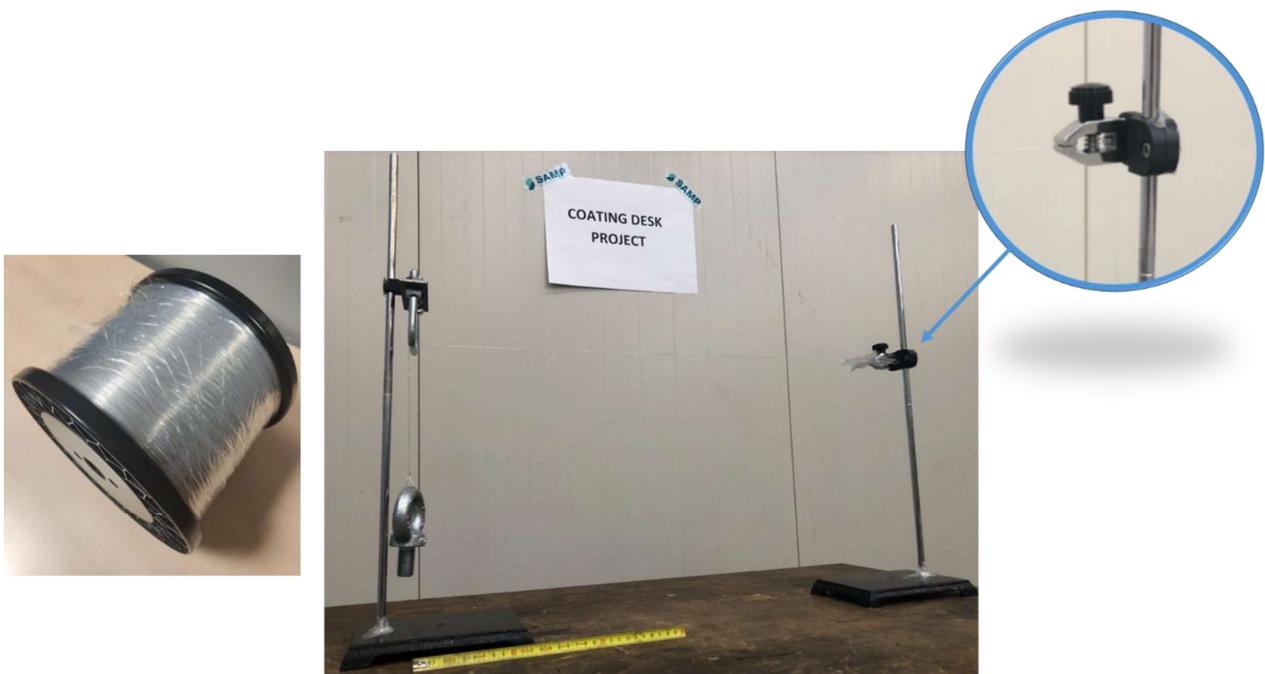
**Figura 99.** Progettazione del movimento della tavola motorizzata tramite software

Tramite il software di controllo della piattaforma, scaricato dal sito del produttore, è stato possibile eseguire i primi test di movimento tramite un'interfaccia molto semplice (Fig. 100).



**Figura 100.** *Interfaccia di controllo multiasse*

Il filo che verrà utilizzato per le prove è formato da una lega di alluminio puro al 99,8% (serie AA1070) avente diametro 0,5 mm. Il filo viene fornito in una bobina di diametro esterno 250 mm con un peso complessivo di 7 kg (Fig. 101). Con l'utilizzo dei componenti illustrati (Fig.91) è stato predisposto il posizionamento del filo (Fig.101).



**Figura 101.** *Bloccaggio e distensione del filo in alluminio*

La massa utilizzata per il posizionamento del filo è stata preventivamente misurata (Fig.102) per garantire contemporaneamente la sua corretta distensione senza che avvenga alcun tipo di rottura per sovra tensionamento. Aggiungendo la tavola motorizzata nell'equipaggiamento, viene calibrata la corretta distanza tra filo e provino (Fig.103).

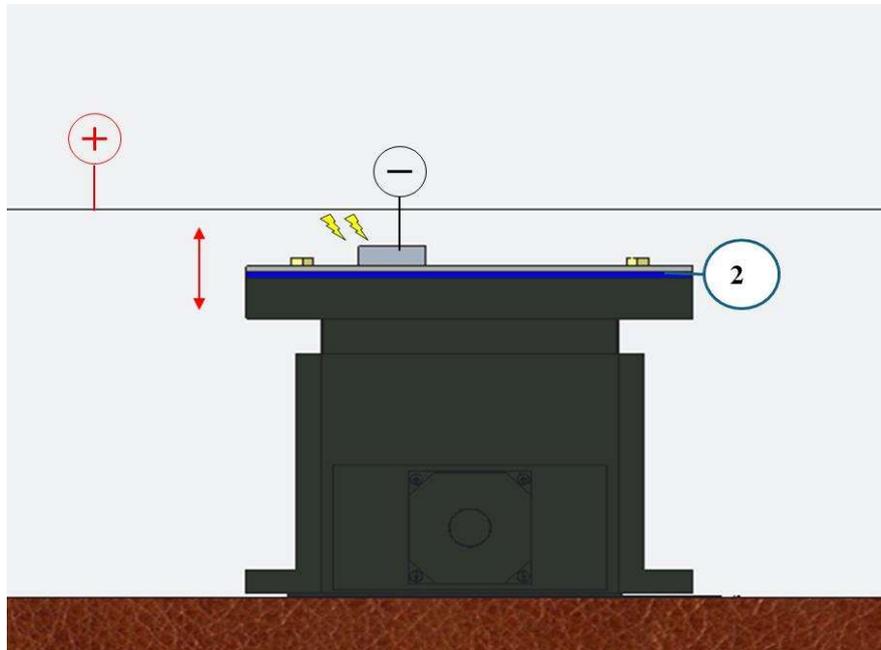


**Figura 102.** Bilancia che verifica la massa collegata al filo



**Figura 103.** Calibrazione della distanza tra il filo ed il provino

Per generare la differenza di potenziale elettrico tra i due componenti è necessario installare un generatore (Fig.105) di tensione collegando i due capi del generatore sugli elementi che si vogliono polarizzare (Fig.104).



**Figura 104.** *Illustrazione virtuale delle scariche elettriche durante le prove sperimentali*

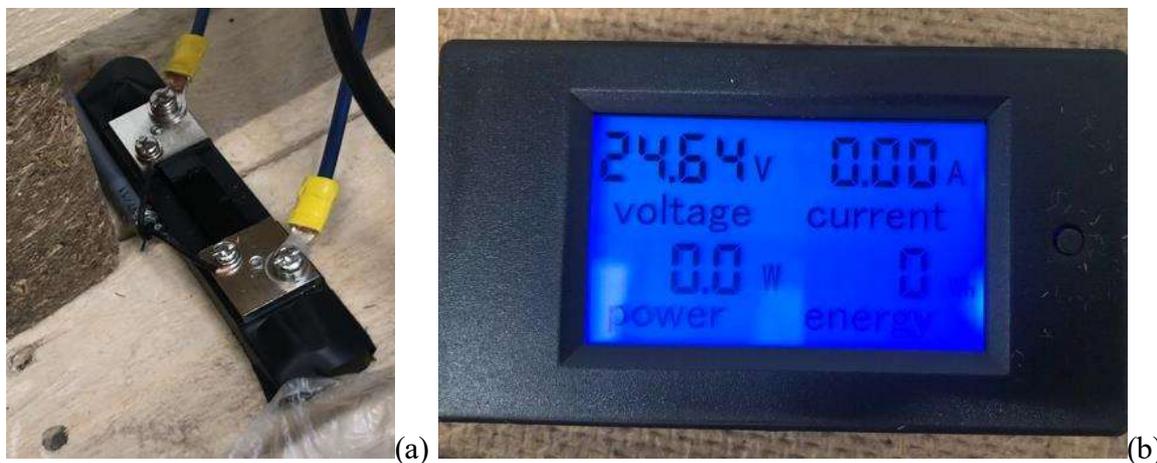
Durante l'avvenire della scarica elettrica, la piastra isolante nr.2 (Fig.104) permette l'isolamento della piattaforma da scariche vaganti, evitando che esse danneggino l'attrezzatura.

Tramite un generatore di tensione (Fig. 105) è stato possibile installare la differenza di potenziale tra i due componenti, con un valore iniziale di circa 25 Volt (Fig. 106b).

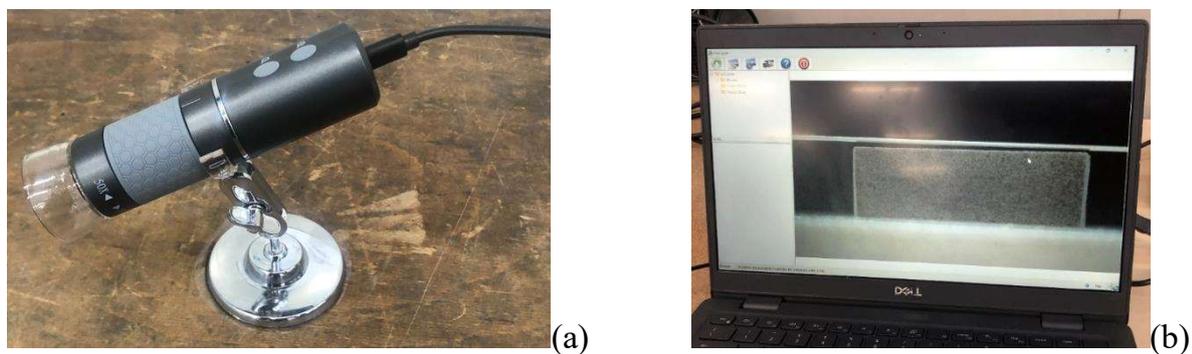


**Figura 105.** *Generatore di tensione trifase*

Nel circuito è stato inserito uno shunt elettrico (Fig. 106a) con display digitale (Fig. 106b), dispositivo paragonabile ad un resistore tarato con una certa resistenza, con lo scopo di controllare istante per istante i parametri elettrici presenti nel circuito. Fino al momento in cui la scarica elettrica tra i due componenti non avviene, il circuito non si chiude e pertanto non si noterà alcun valore di intensità di corrente circolante nel circuito.



**Figura 106.** *Shunt elettrico (a) e display digitale (b) per il controllo dei parametri elettrici nel circuito*  
 Successivamente, è stato terminato l’assemblaggio collegando la telecamera microscopica al computer (Fig.107), che permette l’analisi visiva qualitativa della distanza tra il filo ed il provino.



**Figura 107.** *Visione della distanza tra filo e provino tramite telecamera microscopica*  
 Sono stati isolati i componenti metallici del sistema a contatto con le parti collegate al generatore di tensione per evitare che, nel caso in cui il filo si dovesse rompere durante le analisi, esso vada a scaricare la carica elettrica su componenti indesiderati (Fig.108).



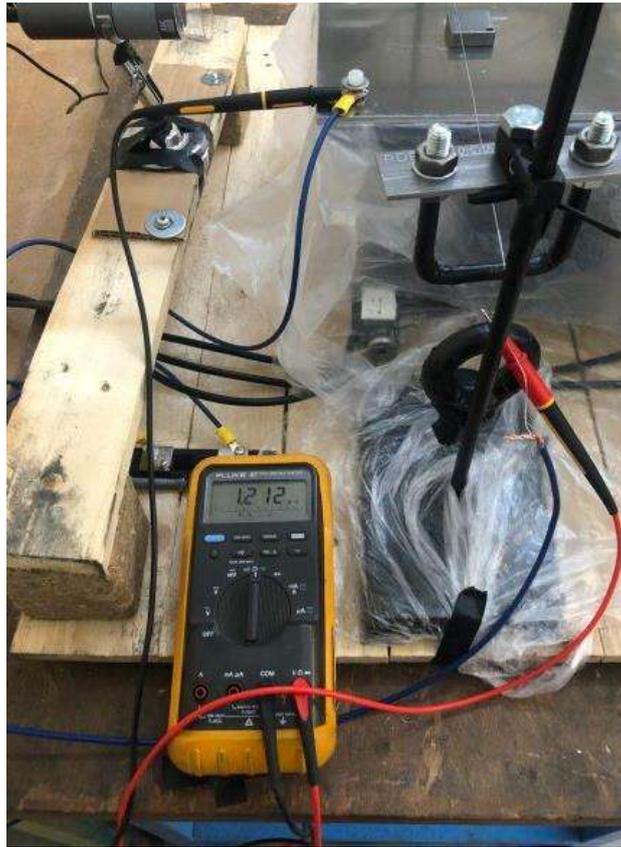
(a)



(b)

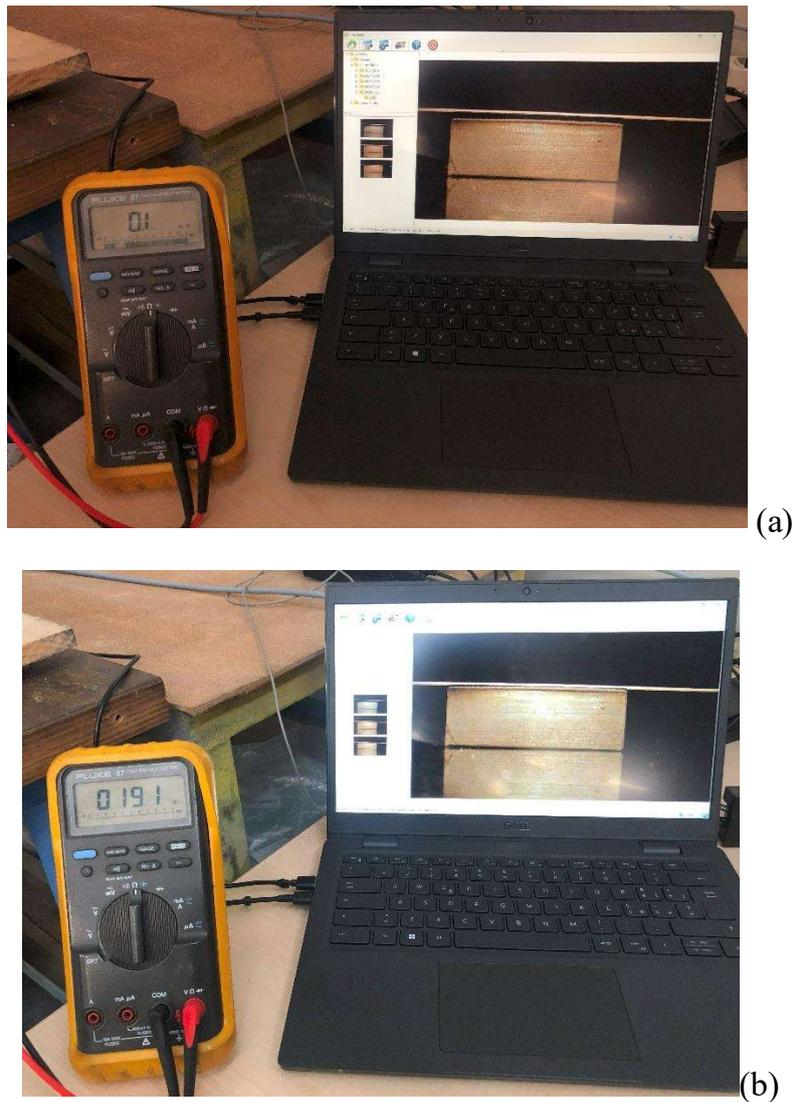
**Figura 108.** Isolamento della tavola motorizzata con film polimerico, vista frontale (a) e posteriore (b)

Prima di poter iniziare le analisi creando differenza di potenziale tra i due componenti, particolare attenzione è stata posta sul metodo di azzeramento della distanza tra il filo ed il provino, parte fondamentale per poter avere un punto di partenza uniforme tra tutti i provini. Tramite un tester digitale elettronico, si è posta attenzione sulla verifica elettrica del contatto tra provino e filo. Un morsetto del tester è stato collegato al filo mentre l'altro nella piastra di alluminio (o equivalentemente al provino, dato che i due sono in contatto).

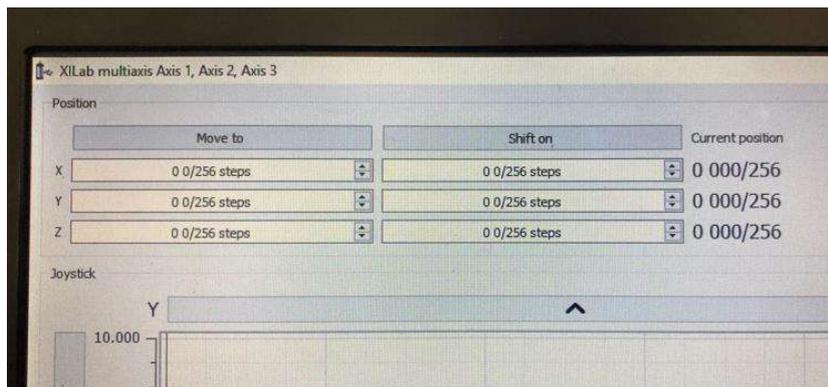


**Figura 109.** Metodo di controllo dell'allineamento tra filo e provino tramite tester digitale

Partendo da una condizione di non contatto tra i due (Fig.110a), è stato avvicinato il provino al filo con piccoli movimenti di accostamento, fino a quando il tester non ha rilevato una variazione delle condizioni elettriche, equivalenti ad un contatto tra i due elementi (Fig.110b). Tale punto viene registrato nel software di movimentazione della piattaforma e viene considerato come “punto di distanza zero” (Fig.111).



**Figura 110.** Movimento di accostamento del provino verso il filo per l'azzeramento della distanza

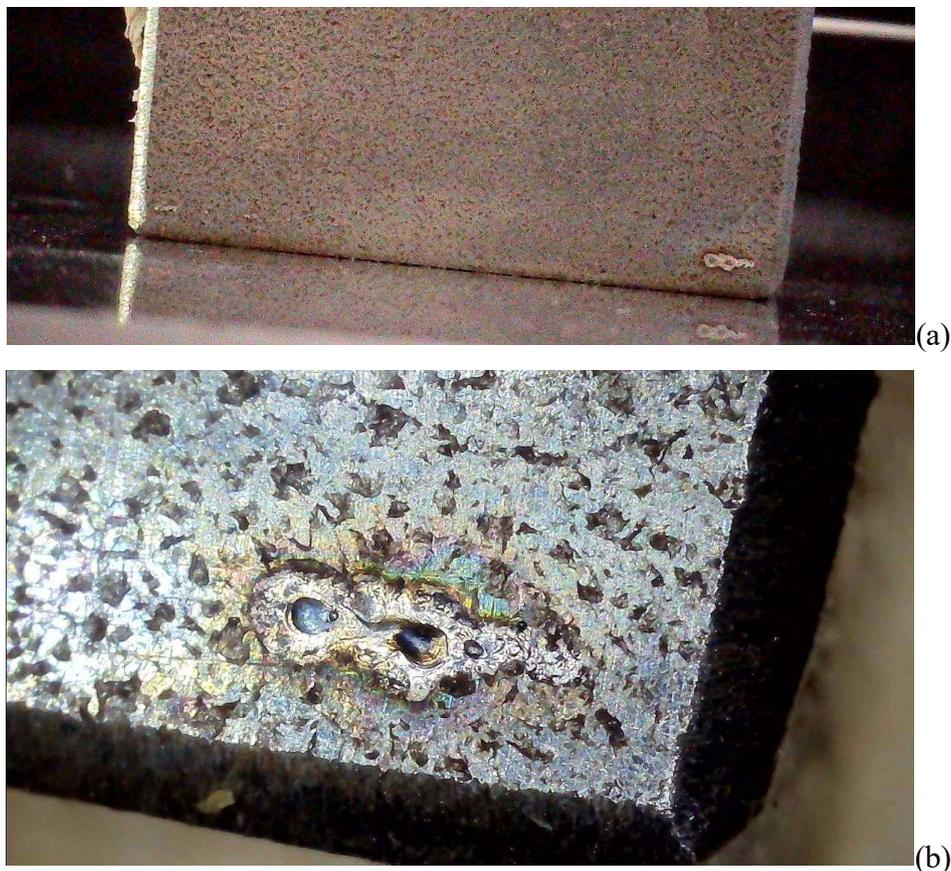


**Figura 111.** Azzeramento della posizione tramite software

È stato adottato questo metodo per l'azzeramento della distanza in quanto gli strumenti a disposizione per le prove non hanno permesso un miglior allineamento dei due componenti. Il procedimento descritto è stato effettuato senza alimentazione elettrica né del filo né del provino, in quanto tale condizione avrebbe causato una rottura del tester digitale.

### 3.2.1 Prove preliminari di funzionamento

È stata installata l'attrezzatura ed è stato analizzato il comportamento tramite alcune prove preliminari di funzionamento, che hanno rilevato la scarica elettrica nella zona laterale del provino, segnale di imperfetto allineamento dei due elementi (Fig.112).



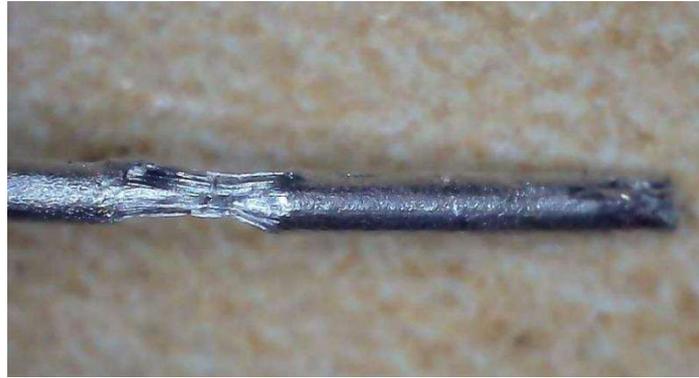
**Figura 112.** Zona laterale in superficie al provino usurata dalla scarica elettrica

Ingrandendo la zona di degradazione del provino (Fig.112b), si nota fortemente una morfologia a cratere, segno di un indistinguibile fenomeno di microfusione della parte superficiale del provino. L'imperfetto disallineamento dei due elementi causa una minor distanza nel lato laterale del provino, nel quale avviene in anticipo la scarica elettrica rispetto la restante parte. Durante le prove preliminari, eseguite su un provino senza deposizione di alcun rivestimento superficiale, la scarica elettrica ha conseguito la rottura del filo (Fig. 113).



**Figura 113.** Ingrandimento estremità del filo dopo l'avvenimento della scarica

In ulteriori prove preliminari, durante le analisi al microscopio del filo dopo l'avvenimento della scarica, è stata rilevata una porzione nella quale il filo è stato soggetto al fenomeno della strizione (Fig.114) a causa di un eccessivo carico di trazione contemporaneamente all'aumento di temperatura.

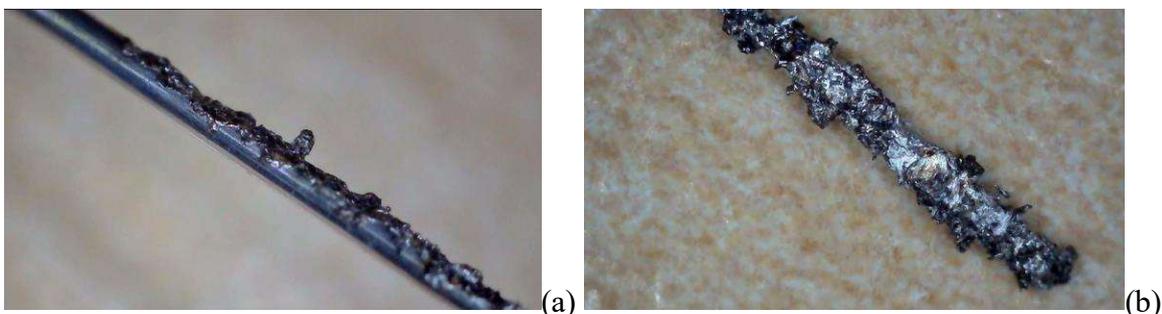


**Figura 114.** *Ingrandimento della zona di strizione del filo*

La bassa differenza di potenziale installata, associata ad una scarsa precisione di allineamento tra i due elementi, porta difficoltà nel riuscire ad analizzare la condizione di polarizzazione dell'atmosfera presente tra i due elementi. Il meccanismo è soggetto ad un continuo avvicinamento dei due elementi fino al punto in cui avviene il contatto, senza riuscire in maniera efficace ad osservare preventivamente la conduzione elettrica dell'atmosfera. Pertanto, un punto importante che deve essere migliorato, riguarda la condizione di allineamento degli elementi e dello studio per installare l'adeguata tensione nel circuito elettrico per poter osservare la condizione di polarizzazione dell'atmosfera senza raggiungere la rottura del filo per contatto.

Eseguendo le stesse prove, avendo però a disposizione il provino numerato 1L (Tab. 12), è stato interessante osservare il fenomeno di adesione del rivestimento superficiale in sommità al filo (Fig.115) successivamente alla scarica elettrica, segno del raggiungimento della condizione di fusione anche per il rivestimento superficiale.

È stata costruita la tabella 13 per poter tracciare le prove che verranno eseguite, con indicazione delle voci più importanti per l'identificazione dei rivestimenti superficiali, apportandoli in maniera semplice ed intuitiva.



**Figura 115.** *Estremità del filo con adesione del rivestimento superficiale*



**Figura 116.** Superficie del provino 1L dopo l'avvenimento della scarica elettrica

**Tabella 13.** Riferimento ai rivestimenti scelti

<b>Nr° rivestimento</b> (numero=nr° rivestimento; lettera=nr° fornitore)	<b>Elementi del rivestimento</b>	<b>Spessore</b> [ $\mu\text{m}$ ]	<b>Durezza</b> [HV]	<b>Caratteristica elettrica</b>	<b>Distanza di apparizione scarica</b> [ $\mu\text{m}$ ]
<b>3A</b>	Cu-Sn	10-20	400-450	Conduttore	
<b>4A</b>	Sn-Ni	2-4	400	Conduttore	
<b>1F</b>	Cu-Al	100	NR	Conduttore	
<b>2F</b>	Mo	100	NR	Conduttore	
<b>3H</b>	Cu-Al-Fe	500-600	200 (HV0,3)	Conduttore	
<b>1I</b>	Zn-Ni	10	NR	Conduttore	
<b>1L</b>	Ni-Cr	100	NR	Conduttore	
<b>3M</b>	Ni-Cr-Fe-Si-B	100	750-850 (HV0,3)	Conduttore	
<b>5O</b>	Cu	500-600	NR	Conduttore	
<b>3P</b>	Ni	100	NR	Conduttore	

## 4 CONCLUSIONI

### 4.1 Parametri qualitativi di miglioramento

Le conclusioni preliminari illustrate nel capitolo 2 (Fig.116) hanno permesso di elaborare un progetto che focalizzi i punti di miglioramento del problema su specifici obiettivi.

I fattori qualitativi indicati in figura 116 sono frutto di analisi bibliografiche ed elaborazioni tecniche idealizzate con i parametri dei macchinari, i quali hanno permesso di confrontare in maniera grafica ed intuitiva tanti aspetti di miglioramento non facilmente prevedibili quantitativamente, ma comunque da tenere in considerazione in fase di riprogettazione di una linea di prodotto.

Il metodo numero 1 illustrato in figura 116, con il quale è stata sviluppata la parte prototipale di questo elaborato, fa dell'intercambiabilità e della velocità di installazione del componente il suo vantaggio principale. La sostituzione degli anelli di contatto richiede minor tempo di manutenzione e progettazione rispetto le ulteriori modifiche proposte, motivo principale per il quale è stato deciso di proseguire con questa modifica. Inoltre, il fattore della produttività, della velocità di movimentazione del filo e del basso investimento economico della sostituzione sono quelli indicati di maggiore incidenza per questa soluzione (1 Fig.116).

Parallelamente a questo elaborato, potrebbero essere sviluppati altri progetti con lo stesso scopo di miglioramento della condizione di usura del componente.

L'installazione di una stazione preliminare di pulizia del filo tramite tecnologie sofisticate potrebbe essere un punto di partenza per approfondire un ulteriore fenomeno fisico, con diversa prospettiva ma medesimo punto di arrivo. In questo caso il parametro che si andrebbe a migliorare sarebbe il grado di pulizia del filo e del macchinario, modifica che richiederebbe maggiore costo e tempo di progettazione della linea (3a, 3b Fig.116).

Un ulteriore metodo per ottimizzare il grado di pulizia ed omogeneità microstrutturale ottenibile nel filo sarebbe il metodo di ricottura al plasma, la quale però, oltre a prevedere un elevato investimento economico per il macchinario, richiederebbe una riprogettazione dei parametri di produzione della linea a causa della sua ridotta velocità di elaborazione del filo (4a Fig.116).

La ricottura ad induzione è un metodo di ricottura del filo attualmente utilizzato da alcuni competitor di Samp s.r.l. per particolari prodotti. Lo svantaggio di questo metodo di ricottura riguarda la necessità nell'avere elevata precisione nel posizionamento dei fili da trattare rispetto all'induttore a causa dell'effetto elettromagnetico utilizzato in questa tecnologia, che provocherebbe forze elettromagnetiche agenti sul filo imprevedibili ed incontrollabili (4b Fig.116).

In merito all'atmosfera utilizzabile nella teca presente nell'attrezzatura, si potrebbe approfondire anche il metodo 2 di figura 116. Il banco prova permette la sperimentazione anche con un fluido non ancora utilizzato, potendo prevederne il comportamento prima dell'installazione nel forno di ricottura

in linea. È bene accertarsi di tutte le conseguenze che l’installazione di un fluido può portare poiché l’applicazione finale riguarderà una zona a contatto con gli operatori e con il macchinario, non dovendo pertanto causare effettivi nocivi su di essi.

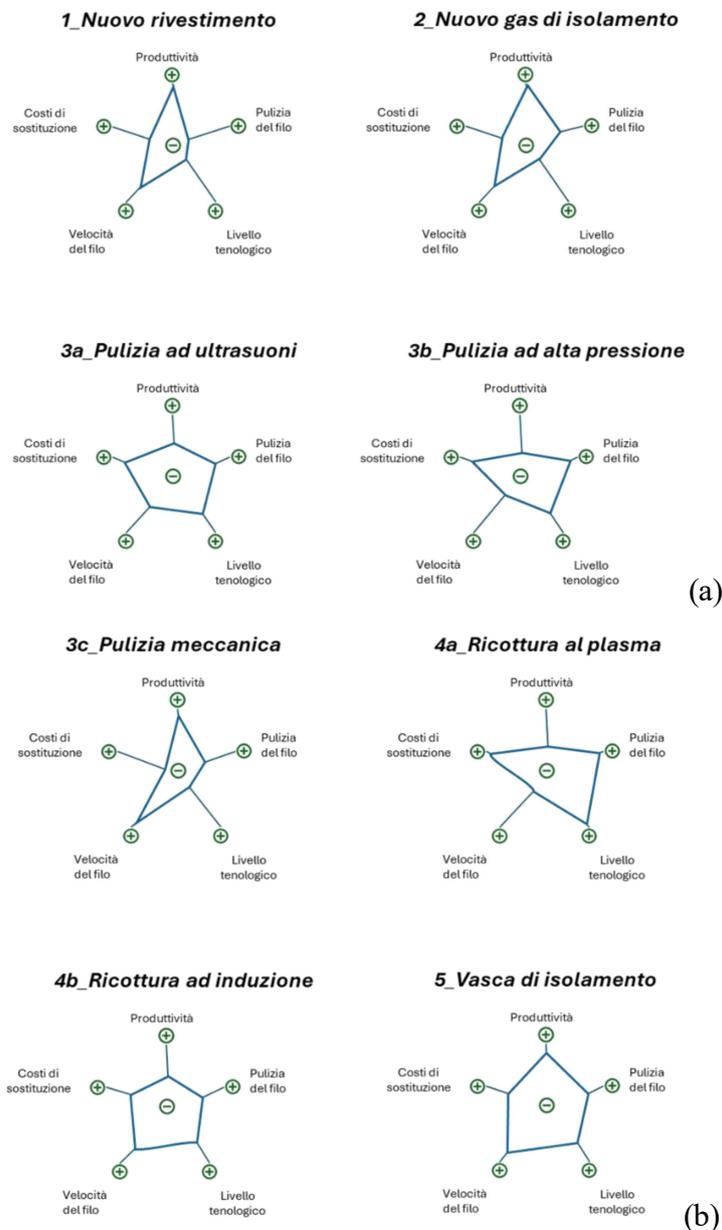


Figura 116. Analisi qualitativa per ottimizzare il processo di ricottura del filo in alluminio

## 4.2 Commenti e miglioramenti del banco prova

Le prime prove eseguite hanno riscontrato elevata difficoltà nell’azzeramento della distanza tra il filo ed il provino a causa dell’insufficiente risoluzione ottica posseduta dalla telecamera microscopica utilizzata in questo equipaggiamento. L’utilizzo del tester digitale migliora l’accuratezza in fase di azzeramento, ma è anch’esso soggetto ad imprecisione soprattutto quando si lavora in un luogo ad alto inquinamento acustico.

I dispositivi di bloccaggio del filo non permettono un posizionamento verticale ed allineamento tra i componenti molto preciso, in quanto sono componenti commerciali utilizzati per altri scopi e riadattati per queste esigenze. Il disallineamento rilevato tra la superficie del provino e del filo potrebbe essere causato anche dalla finitura superficiale, fattore molto influente quando la precisione richiesta è millesimale.

Un altro aspetto che non permette l'esatto allineamento delle due superfici riguarda la caratteristica di bassa tenacità posseduta dal filo a disposizione. Esso è presente in forma cruda, senza che sia stato soggetto al trattamento di ricottura perché si è voluto esattamente replicare la situazione presente nella fase di preriscaldamento del forno di ricottura in linea. Con queste caratteristiche il filo risulta essere difficilmente deformabile e la sua distensione non risulta essere perfettamente parallela al piano del provino. Se si volesse ottimizzare questo aspetto, si potrebbe prevedere l'installazione del filo di alluminio in condizione ricotta, in modo che risulti meno rigido e la sua distensione venga facilitata. Un ulteriore punto di miglioramento riguarderebbe l'installazione di un dispositivo di distensione del filo e di azzeramento della distanza notevolmente più sofisticato, che permetta un posizionamento più accurato del filo prevedendo eventualmente un componente ottico ad alta risoluzione ed un'attrezzatura di calibrazione specifica.

Un'altra condizione da dover migliorare per poter analizzare il fenomeno di rottura del dielettrico riguarda l'installazione di un dispositivo che rilevi il passaggio di carica elettrica tra i due componenti anche se non sono ancora entrati in contatto. Quello che dalle prime analisi è stato osservato è la formazione delle scariche elettriche quando i due sono molto vicini ma, data la vicinanza millesimale tra di essi, non è stato possibile rilevare se siano o meno già entrati in contatto. Tale attrezzatura non è in grado di rilevare la polarizzazione dell'atmosfera dielettrica ed il movimento di accostamento procede fino alla rottura del filo a causa dell'elevata corrente elettrica che circola al momento della scarica. Tramite un dispositivo ottico ad infrarossi ad alta frequenza potrebbe essere visivamente acquisibile il momento di conduzione dell'atmosfera, rilevando anche l'esatta distanza tra i componenti al momento della scarica elettrica.

Un'altra caratteristica del circuito che potrebbe essere modificata per aumentare la distanza alla quale avviene la rottura dell'atmosfera sarebbe l'aumento della tensione elettrica, attualmente mantenuta a valori bassi per motivi di sicurezza. Maggiore sarà tale parametro maggiore sarà la distanza alla quale la condizione di isolamento dell'atmosfera termina a favore della conduzione di carica elettrica.

Tramite la sostituzione dello shunt elettrico, accessorio tanto di facile impiego quanto di poca precisione, con un dispositivo che permetta di avere una frequenza di campionamento ed affidabilità maggiore, sarebbe possibile monitorare ed ottenere l'andamento dei parametri elettrici nel circuito durante l'intera prova, rilevando l'esatto valore di corrente elettrica che circola durante la scarica elettrica ed ottenendo il suo andamento quantitativo preliminarmente ad essa.

Un'altra condizione che potrebbe essere studiata in futuro sarebbe la simulazione dell'usura meccanica tra gli stessi componenti. La progettazione dell'attrezzatura è stata eseguita considerando anche la possibilità nel verificare il processo di usura strisciamento o fretting tramite un movimento planare della tavola motorizzata. Il software ed il dispositivo possiedono tutte le funzionalità per procedere anche con queste analisi, ampliando la simulazione del difetto rilevato.

In futuro anche altre sostanze potrebbero essere investigate tramite l'utilizzo del banco prova illustrato. A causa di una mancanza di reperibilità nel mercato italiano, alcuni materiali quali grafite ed indio non sono stati approfonditi, anche se potrebbero dare risultati performanti per questa applicazione.



## 5 ALLEGATI

### Allegato A

Fornitori	Rivestimenti										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>A</b>	<i>Lega</i>	Cr	Ni	Cu-Sn	Sn-Ni						
	<i>Tecnica di deposizione</i>	Deposizione galvanica	Deposizione chimica	Deposizione galvanica	Deposizione galvanica						
	<i>Spessore [<math>\mu\text{m}</math>]</i>	30-50	50-60	10-20	2-4						
	<i>Durezza</i>	850-1100 HV	450-500 HK100	400-450 HV	400 HV						
	<i>Caratteristica elettrica</i>	Conduttore	“	“	“						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>B</b>	<i>Lega</i>	CrO	Poliammide	CrO	Polimero antistatico	Polimero					
	<i>Tecnica di deposizione</i>	Thermal spray	“	“	“	“					
	<i>Spessore [<math>\mu\text{m}</math>]</i>	60-80	100-160	100-200	20-40	20-40					
	<i>Durezza</i>	60-70 HRC	71 HS	60-70 HRC	NR	NR					
	<i>Caratteristica elettrica</i>	Isolante	“	“	“	“					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>C</b>	<i>Lega</i>	Ni	Ni								
	<i>Tecnica di deposizione</i>	Deposizione galvanica	Deposizione chimica								
	<i>Spessore [<math>\mu\text{m}</math>]</i>	3-7	15								
	<i>Durezza</i>	NR	550 HV								
	<i>Caratteristica elettrica</i>	Conduttore	Conduttore								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>D</b>	<i>Lega</i>	Al	Ag	Cu-Sn	Cu-Zn	Cu	Cr	Ni	Sn	Zn	Zn-Ni
	<i>Tecnica di deposizione</i>	Deposizione galvanica	“	“	“	“	“	“	“	“	“

	<i>Spessore [μm]</i>	10	“	“	“	“	“	“	“	“	“
	<i>Durezza</i>	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
	<i>Caratteristica elettrica</i>	Conduttore	“	“	“	“	“	“	“	“	“
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>E</b>	<i>Lega</i>	Cr									
	<i>Tecnica di deposizione</i>	Deposizione galvanica									
	<i>Spessore [μm]</i>	100									
	<i>Durezza</i>	850-1050 HV									
	<i>Caratteristica elettrica</i>	Conduttore									
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>F</b>	<i>Lega</i>	Cu-Al	Mo	Ni-Cr	CrC	CrC	TiC	TiN	TiCN	Ag	Ni
	<i>Tecnica di deposizione</i>	Thermal spray	Thermal spray	Thermal spray	Thermal spray	PVD	PVD	PVD	PVD	PVD	Deposizione galvanica
	<i>Spessore [μm]</i>	100	100	100	100	1	1	1	1	1	10
	<i>Durezza</i>	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
	<i>Caratteristica elettrica</i>	Conduttore	Conduttore	Conduttore	Conduttore	Conduttore	Isolante	Isolante	Isolante	Conduttore	Conduttore
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>G</b>	<i>Lega</i>	Ni	Cr								
	<i>Tecnica di deposizione</i>	Deposizione galvanica	Deposizione galvanica								
	<i>Spessore [μm]</i>	1	1								
	<i>Durezza</i>	NR	NR								
	<i>Caratteristica elettrica</i>	Conduttore	Conduttore								
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>H</b>	<i>Lega</i>	Ni-Cr-Mo-Nb-Fe	Ni-Cr-Fe-B-Si-C	Cu-Al-Fe	Mo	Fe-Cr-C	Fe-C-Mn				
	<i>Tecnica di deposizione</i>	HVOF	HVOF	Wire flame spray	Wire flame spray	Wire flame spray	Wire flame spray				
	<i>Spessore [μm]</i>	500-600	500-600	500-600	500-600	500-600	500-600				
	<i>Durezza</i>	500 HV300	750-900 HV300	200 HV300	600 HV300	400-600 HV	500 HV300				

	<i>Caratteristica elettrica</i>	Conduttore	Conduttore	Conduttore	Conduttore	Conduttore	Conduttore				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>I</b>	<i>Lega</i>	Zn-Ni									
	<i>Tecnica di deposizione</i>	Deposizione galvanica									
	<i>Spessore [<math>\mu\text{m}</math>]</i>	10									
	<i>Durezza</i>	NR									
	<i>Caratteristica elettrica</i>	Conduttore									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>L</b>	<i>Lega</i>	Ni-Cr									
	<i>Tecnica di deposizione</i>	Thermal spray									
	<i>Spessore [<math>\mu\text{m}</math>]</i>	100									
	<i>Durezza</i>	NR									
	<i>Caratteristica elettrica</i>	Conduttore									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>M</b>	<i>Lega</i>	WC-Co-Cr	Co-Cr-W-C	Ni-Cr-Fe-Si-B							
	<i>Tecnica di deposizione</i>	HVOF	HVOF	HVOF							
	<i>Spessore [<math>\mu\text{m}</math>]</i>	100	100	100							
	<i>Durezza</i>	1000 HV0,3	600-750 HV0,3	750-850 HV0,3							
	<i>Caratteristica elettrica</i>	Conduttore	Conduttore	Conduttore							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>N</b>	<i>Lega</i>	Conduttore antistatico									
	<i>Tecnica di deposizione</i>	Thermal spray									
	<i>Spessore [<math>\mu\text{m}</math>]</i>	30-100									
	<i>Durezza</i>	NR									
	<i>Caratteristica elettrica</i>	Conduttore									

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>O</b>	<i>Lega</i>	Mo	Ossido di titanio - alluminio	Ni-Cr	CrC	Cu					
	<i>Tecnica di deposizione</i>	Thermal spray	Thermal spray	Thermal spray	Thermal spray	Thermal spray					
	<i>Spessore [<math>\mu\text{m}</math>]</i>	500-600	500-600	500-600	500-600	500-600					
	<i>Durezza</i>	1044 Hv0,2	63 HRC	NR	NR	NR					
	<i>Caratteristica elettrica</i>	Conduttore	Isolante	Conduttore	Conduttore	Conduttore					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>P</b>	<i>Lega</i>	a-C:H	Al-Cr-Ti-N	Ni							
	<i>Tecnica di deposizione</i>	PVD	PVD	Thermal spray							
	<i>Spessore [<math>\mu\text{m}</math>]</i>	3-6	3-7	100							
	<i>Durezza</i>	2600 HV	3000 HV	NR							
	<i>Caratteristica elettrica</i>	Isolante	Isolante	Conduttore							



8MTF-102LS05 – Motorized XY Scanning Stage

<b>Specifiche tecniche principali</b>	
<i>Intervallo di movimento</i>	102 x 102 mm
<i>Risoluzione</i>	1 passo = 2.5 $\mu\text{m}$ 1/8 passo = 0.31 $\mu\text{m}$
<i>Massima velocità</i>	10 mm/s
<i>Capacità di carico</i>	Orizzontale = 50kg Verticale = 6kg
<i>Peso</i>	3.6 kg



8MVT100-25-1 - Motorized Vertical Stages

<b>Specifiche tecniche principali</b>	
<i>Intervallo di movimento</i>	25 +1 mm
<i>Risoluzione</i>	1 passo = 5 $\mu$ m 1/8 passo = 0.625 $\mu$ m
<i>Massima velocità</i>	20 mm/s
<i>Capacità di carico</i>	Verticale = 8kg
<i>Peso</i>	2.2 kg



8SMC5-USB - Stepper & DC Motor Controller

**Specifiche tecniche principali**

<i>Numero di assi controllabili</i>	Da 1 a 4
<i>Tipologia di motori controllabili</i>	Passo passo, dc, servo
<i>Corrente</i>	Passo passo: 0.1-3 A
<i>Tensione</i>	12-48 V
<i>Velocità massima controllabile</i>	Passo passo: 35000 passi/s
<i>Controllo</i>	Anello chiuso

## 6 BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Auzanneau, “Wire troubleshooting and diagnosis: Review and perspectives,” *Progress In Electromagnetics Research B*, no. 49, pp. 253–279, 2013, doi: 10.2528/PIERB13020115.
- [2] “All the Wires in a Car.” [Online]. Available: <https://earthlymission.com/all-the-wires-in-a-car/>
- [3] M. V. Boniardi and A. Casaroli, “L’alluminio e le sue leghe,” *Dispensa*, Jan. 2011, [Online]. Available: [https://www.academia.edu/103615868/Lalluminio\\_e\\_le\\_sue\\_leghe](https://www.academia.edu/103615868/Lalluminio_e_le_sue_leghe)
- [4] Mario. Conserva, Franco. Bonollo, and Giancarlo. Donzelli, “Alluminio : manuale degli impieghi,” 2004, [Online]. Available: [https://books.google.com/books/about/Alluminio\\_Manuale\\_degli\\_impieghi.html?hl=it&id=NYEjAAAACAAJ](https://books.google.com/books/about/Alluminio_Manuale_degli_impieghi.html?hl=it&id=NYEjAAAACAAJ)
- [5] A. A. Yaroshevsky, “Abundances of chemical elements in the Earth’s crust,” *Geochemistry International*, vol. 44, no. 1, pp. 48–55, Jan. 2006, doi: 10.1134/S001670290601006X/METRICS.
- [6] D. Mombelli, “Riduzione di fanghi rossi d’allumina mediante fanghi d’altoforno per la produzione di ghisa,” 2016, [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11311/1015622>
- [7] S. K. Padamata, A. Yasinskiy, and P. Polyakov, “A Review of Secondary Aluminum Production and Its Byproducts,” *JOM*, vol. 73, no. 9, pp. 2603–2614, Sep. 2021, doi: 10.1007/S11837-021-04802-Y/TABLES/4.
- [8] Lorella Ceschini, “Metallurgia meccanica.” 2023.
- [9] The Aluminium Association, “International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys Use of the Information,” 2018, [Online]. Available: [www.aluminum.org](http://www.aluminum.org)
- [10] J. D. Jackson, *Classical electrodynamics*. 1998. [Online]. Available: [https://archive.org/details/classicalelectro0000jack\\_e8g9](https://archive.org/details/classicalelectro0000jack_e8g9)
- [11] G. Bergamini, *Sistemi e automazione*, vol. 1. 2016.
- [12] C. Mencuccini and V. Silvestrini, *Fisica Generale 2 Elettromagnetismo E Ottica*. 1988. [Online]. Available: <https://archive.org/details/FisicaGenerale2ElettromagnetismoEOttica/page/n105/mode/2up>
- [13] “Leggi di Ohm e Resistenza Elettrica - Scienza Fisica.” [Online]. Available: <https://www.scienzafisica.it/leggi-di-ohm-e-resistenza-elettrica/>
- [14] K. Susai, S. Sekiya, and S. Takamura, “Development of aluminum wire for automotive harnesses,” *International Wire & Cable Symposium*, 2011.

- [15] United States Department of Commerce, *Copper wire tables - The national bureau of standards*. 1966.
- [16] T. Knych, M. Piwowarska-Uljasz, and P. Uljasz, "Aluminium alloys with zirconium additions, in the range from 0.05 to 0.32%, intended for applications in the overhead electrical power engineering," *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 59, no. 1, pp. 339–343, 2014, doi: 10.2478/amm-2014-0056.
- [17] C. Bunte, G. Anteri, M. Zurbriggen, L. Zamboni, and M. Glassel, "Development of alternative process of manufacture the aluminum alloy cables for its application in the electrical industry," 2008.
- [18] K. Taguchi, T. Shimada, J. Yoshimoto, T. Kuwabara, and Y. Akasofu, "High-Strength Aluminum Wires for Low-Voltage Automotive Engine Wiring Harnesses," *Sei technical review*, 2017.
- [19] H. A. González Rojas, J. V. Calvet, and V. I. Bubnovich, "A new analytical solution for prediction of forward tension in the drawing process," *J Mater Process Technol*, vol. 198, no. 1–3, pp. 93–98, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.06.053.
- [20] J. J. Sheu and B. S. Wang, "The Optimization Wire Drawing Die Design for Aluminum A1050 and A1070," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Oct. 2019. doi: 10.1088/1757-899X/644/1/012019.
- [21] Z. Lin, B. Shen, F. Sun, Z. Zhang, and S. Guo, "Numerical and experimental investigation of trapezoidal wire cold drawing through a series of shaped dies," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 76, no. 5–8, pp. 1383–1391, Feb. 2015, doi: 10.1007/s00170-014-6356-8.
- [22] B. Moharana and B. Kumar Kushwaha, "Breakage Analysis of Aluminum wire rod in Drawing Operation," *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2017, [Online]. Available: [www.irjet.net](http://www.irjet.net)
- [23] A. Haddi, A. Imad, and G. Vega, "Analysis of temperature and speed effects on the drawing stress for improving the wire drawing process," *Mater Des*, vol. 32, no. 8–9, pp. 4310–4315, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2011.04.010.
- [24] S. Duff, "How to increase the performance of aluminum alloy rod drawing by using emulsions," *Wire journal international*, 2014.
- [25] Roger N. Wright, *Wire Technology: Process Engineering and Metallurgy*. 2011. [Online]. Available: <https://books.google.it/books?id=t7Z0BgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=it#v=onepage&q&f=false>
- [26] Herzog Martin, *Copper wire drawing*. 2019.

- [27] K. Lange, "Chapter 5 - Fundamentals of technical plasticity theory," in *HANDBOOK OF METAL FORMING*, 1994. [Online]. Available: [https://books.google.com/books/about/Handbook\\_of\\_Metal\\_Forming.html?hl=it&id=npXgAAAAMAAJ](https://books.google.com/books/about/Handbook_of_Metal_Forming.html?hl=it&id=npXgAAAAMAAJ)
- [28] M. Zidani, L. Bessais, H. Farh, M. D. Hadid, and S. Messaoudi, "Study of texture, mechanical and electrical properties of cold drawn AGS alloy wire," *Steel and Composite Structures*, vol. 22, pp. 745–752, 2016, doi: <https://doi.org/10.12989/scs.2016.22.4.745>.
- [29] A. Rollett, F. Humphreys, G. S. Rohrer, and M. Hatherly, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*. Elsevier Ltd, 2004. doi: 10.1016/B978-0-08-044164-1.X5000-2.
- [30] J. A. S. de León and L. Alanís-López, "A Mathematical Model for the Prediction of the Scale Layer Formation on ASTM A510/A853 Cold-Drawn Hypoeutectoid Steel Wire After Batch Annealing," *Oxidation of Metals*, vol. 97, no. 5–6, pp. 539–558, Jun. 2022, doi: 10.1007/S11085-022-10101-X/TABLES/4.
- [31] N. D. Tran, N. Harada, T. Sasaki, and T. Kikuchi, "Effect of Dielectric in a Plasma Annealing System at Atmospheric Pressure," in *Dielectric Material*, InTech, 2012. doi: 10.5772/50594.
- [32] Y. Zhao, L. Li, Z. Lu, G. Teng, L. Shaochen, and H. Zhiliu, "The effect of annealing temperature on the recrystallization and mechanical properties of severe plastic deformed commercial pure aluminium during ultra-fast annealing," *Mater Res Express*, vol. 8, no. 4, p. 046515, Apr. 2021, doi: 10.1088/2053-1591/ABF3E3.
- [33] L. F. Roehmann and E. Hazan, "Short-Time Annealing Characteristics of Electrical Conductors," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 82, no. 69, pp. 1061–1068, 1963, doi: 10.1109/TPAS.1963.291493.
- [34] Y. Yamano *et al.*, "Development of Aluminum Wiring Harness," 2011.
- [35] Great Britain - Department of Education and Science, "Lubrication (tribology)." [Online]. Available: [https://books.google.it/books/about/Lubrication\\_tribology\\_Education\\_and\\_Rese.html?id=IkRUAAAAYAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.it/books/about/Lubrication_tribology_Education_and_Rese.html?id=IkRUAAAAYAAJ&redir_esc=y)
- [36] I. M. Hutchings, "Leonardo da Vinci's studies of friction," *Wear*, vol. 360–361, pp. 51–66, Aug. 2016, doi: 10.1016/J.WEAR.2016.04.019.
- [37] Martini Carla, "Trattamenti superficiali e rivestimenti per materiale metallici." 2023.
- [38] G. Straffelini, *Friction and Wear - Methodologies for Design and Control*. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/11693>

- [39] “Ottimizzazione di macchine EDM grazie ai motori lineari.” [Online]. Available: <https://www.meccanicaneews.com/2021/02/13/ottimizzazione-di-macchine-edm-grazie-ai-motori-lineari/>
- [40] M. A. Lieberman, “Principles of plasma discharges and materials processing [electronic resource],” 2005, [Online]. Available: [https://yorsearch.york.ac.uk/primo-explore/fulldisplay?docid=44YORK\\_ALMA\\_DS51273646240001381&context=L&vid=44YORK-NUI&lang=en\\_US&search\\_scope=default\\_scope&adaptor=Local Search Engine&tab=default\\_tab&query=any,contains,lieberman michael&offset=0](https://yorsearch.york.ac.uk/primo-explore/fulldisplay?docid=44YORK_ALMA_DS51273646240001381&context=L&vid=44YORK-NUI&lang=en_US&search_scope=default_scope&adaptor=Local Search Engine&tab=default_tab&query=any,contains,lieberman michael&offset=0)
- [41] D. M. Newson, R. Kadokura, S. J. Brawley, M. Shipman, and G. Laricchia, “Statistical nature of secondary electron emission,” *Nucl Instrum Methods Phys Res B*, vol. 536, pp. 119–125, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.NIMB.2023.01.008.
- [42] D. Marić, M. Radmilović-Radenović, and Z. L. Petrović, “On parametrization and mixture laws for electron ionization coefficients,” *The European Physical Journal D - Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics 2005 35:2*, vol. 35, no. 2, pp. 313–321, Jun. 2005, doi: 10.1140/EPJD/E2005-00172-Y.
- [43] E. Husain and R. S. Nema, “Analysis of Paschen Curves for Air, N<sub>2</sub> and SF<sub>6</sub> Using the Townsend Breakdown Equation,” *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-17, no. 4, pp. 350–353, 1982, doi: 10.1109/TEI.1982.298506.
- [44] Paracchini Luigi, “Capitolo 2 - Processi di deposizione superficiale di film sottili,” in *Manuale di Trattamenti e Finiture*, 2003. [Online]. Available: <https://books.google.it/books?id=qddeZgxS6OkC&printsec=frontcover&hl=it#v=onepage&q&f=false>
- [45] R. D. Evans, “Carbon-Base (Diamondlike and Diamond) Coatings,” *Friction, Lubrication, and Wear Technology*, pp. 571–582, Dec. 2018, doi: 10.31399/ASM.HB.V18.A0006360.
- [46] Paracchini Luigi, “Capitolo 3 - Trattamenti galvanici,” in *Manuale di Trattamenti e Finiture*, 2003. [Online]. Available: <https://books.google.it/books?id=qddeZgxS6OkC&printsec=frontcover&hl=it#v=onepage&q&f=false>
- [47] Paracchini Luigi, “Capitolo 4 - La deposizione di film spessi con processi thermal spray,” in *Manuale di Trattamenti e Finiture*, 2003. [Online]. Available: <https://books.google.it/books?id=qddeZgxS6OkC&printsec=frontcover&hl=it#v=onepage&q&f=false>
- [48] A. Benni, “Experimental and numerical analysis of wire drawing process of aluminum alloys for the evaluation of microstructural evolution,” Master’s thesis, Alma Mater Studiorum, 2015.

- [49] M. W. , Jr. Chase, “NIST-JANAF Thermochemical Tables, Fourth Edition,” *J. Phys. Chem. Ref. Data, Monograph 9*, pp. 1–1951, 1998.
- [50] E. Rabinowicz, *Friction and wear of materials*. 1965. [Online]. Available: <https://archive.org/details/frictionwearofma00rabi>
- [51] R. G. Chelariu, C. Bejinariu, M. A. Bernevig, S. L. Toma, A. M. Cazac, and N. Cimpoesu, “Analysis of non-sparking metallic materials for potentially explosive atmospheres,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 343, p. 10014, 2021, doi: 10.1051/mateconf/202134310014.
- [52] D. R. Lide and H. P. R. Frederikse, “Handbook of chemistry and physics,” 1993, [Online]. Available: [https://books.google.com/books/about/CRC\\_Handbook\\_of\\_Chemistry\\_and\\_Physics.html?hl=it&id=q2qJId5TKOkC](https://books.google.com/books/about/CRC_Handbook_of_Chemistry_and_Physics.html?hl=it&id=q2qJId5TKOkC)
- [53] C. M. Cooke and A. H. Cookson, “The nature and practice of gases as electrical insulators,” 1978.
- [54] A. Mangarella, “Eco-friendly alternatives to replace SF6 in high voltage gas-insulated transmission lines: a comparative study,” Tesi di Laurea, Università degli studi di Padova, 2020.
- [55] F. J. Fuchs, N. Main, and S. Jamestown, “Ultrasonic Cleaning: Fundamental Theory and Application,” 2002.
- [56] “Geo Reinigungstechnik GmbH - Ultrasonic wire cleaning system.” [Online]. Available: <https://www.geo-reinigungstechnik.de/en/products/wire-cleaning-equipment/aqueous-cleaning-with-ultrasound-high-pressure-or-steam/wire-cleaning-with-high-performance-ultrasonic-systems/>
- [57] “Hielscher Ultrasonics GmbH - Ultrasonic wire cleaning system.” [Online]. Available: <https://www.hielscher.com/it/uscm700-ultrasonic-inline-cleaning-machine.htm>
- [58] Billy F. Fuqua, “US 3,595,045 - Wire cleaning means and method”
- [59] R. Ye, Y. Uchida, and W. Zheng, “Annealing of aluminum wire with radio frequency discharge plasma under atmospheric pressure,” in *Current Applied Physics*, Sep. 2011. doi: 10.1016/j.cap.2011.06.012.
- [60] “Amind Italia sas - Linee di riscaldamento al Plasma Plasmait.” [Online]. Available: [https://www.aminditalia.com/it/dettaglioProdotti/8/linee\\_di\\_riscaldamento\\_al\\_plasma\\_plasmait.html](https://www.aminditalia.com/it/dettaglioProdotti/8/linee_di_riscaldamento_al_plasma_plasmait.html)
- [61] “Inductotherm Heating & Welding Ltd - What is induction?” [Online]. Available: <https://www.inductothermhw.com/what-is-induction/>
- [62] A. Kosonen, “US 3,717,745 - Continuous resistance annealing method for wires.”