

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DEI MATERIALI

Tesi di Laurea in Ingegneria dei Materiali

**Conduttori elettrici aerei: studio sulle leghe
di alluminio**

Relatore: Prof. Enrico Bernardo
Correlatore: Prof. Andrea Zambon

Laureanda: DEBORA MIMO

ANNO ACCADEMICO 2016 – 2017

Riassunto

Questo lavoro di tesi prende le mosse dall'analisi e dal confronto tra le soluzioni attualmente utilizzate nel caso di conduttori elettrici aerei. Viene svolto un confronto accurato con l'applicazione di varie tecniche di selezione dei materiali riportate da Ashby nel suo libro *"Materials Selection in Mechanical Design"* guardando costantemente agli esempi pratici. Le proprietà su cui si basa il confronto sono calcolate basandosi sulle normative che regolano i conduttori e questo permette allo studio di essere particolarmente significativo anche dal punto di vista industriale. Il confronto tra i vari materiali ha messo in luce la possibilità di migliorare le prestazioni, in termini di conducibilità elettrica e di carico di rottura, di un particolare materiale già largamente utilizzato: le leghe di alluminio della serie 6000 (Al-Mg-Si). Si tratta infatti di leghe invecchiabili attraverso un trattamento termico; ottimizzando e modulando il trattamento a seconda delle proprietà che si vogliono ottenere, è possibile avere un netto miglioramento rispetto alle proprietà della stessa lega ottenute nella pratica industriale convenzionale. Vengono qui riportate le basi teoriche e i risultati sperimentali ottenuti presso l'azienda De Angeli Prodotti.

Indice

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1 – Generalità sulle linee elettriche aeree	3
1.1 GENERALITÀ	3
1.2 DEFINIZIONI E CLASSIFICAZIONI	5
1.3 NORMATIVE PER LA PROGETTAZIONE	7
1.4 CATENARIA	8
1.5 PRESENTAZIONE DEL CASO DI STUDIO	10
1.6 INTRODUZIONE SULLA SELEZIONE DEI MATERIALI PER CONDUTTORI ELETTRICI AEREI	12
CAPITOLO 2 – Selezione di materiali per linee elettriche aeree	15
2.1 SELEZIONE E GRAFICI	15
2.1.1 Grafici di compromesso	17
2.1.2 Funzione di penalizzazione	19
2.2 SELEZIONE CON I MATERIALI COMPOSITI	23
2.3 DISACCOPIAMENTO TRA PROPRIETÀ	26
CAPITOLO 3 – Selezione avanzata	28
3.1 CONDUTTORI ELETTRICI AEREI	28
3.2 SELEZIONE AVANZATA DEI MATERIALI OTTIMALI	34
CAPITOLO 4 – MODULAZIONE DELLE PROPRIETÀ DELLE LEGHE DI ALLUMINIO DELLA SERIE 6000 E PRATICA INDUSTRIALE	40
4.1 L'ALLUMINIO E LE SUE LEGHE	40
4.2 INDURIMENTO PER PRECIPITAZIONE	42
4.2.1 Indurimento per precipitazione nelle leghe 6000 (Al-Mg-Si)	44
4.3 CONDUCIBILITÀ ELETTRICA	44
4.4 MIGLIORAMENTO DELLA CONDUCIBILITÀ ELETTRICA E DEL CARICO DI ROTTURA	44
4.5 MATERIALI E PRATICA INDUSTRIALE	48
CAPITOLO 5 – RISULTATI SPERIMENTALI	52
5.1 TRATTAMENTO TERMICO CONVENZIONALE	52
5.2 DOPPIO TRATTAMENTO TERMICO	63
5.3 CONCLUSIONI SUI RISULTATI SPERIMENTALI	72
CONCLUSIONI	74
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	76

Introduzione

È noto che l'energia elettrica è un bene indispensabile per le attività quotidiane sia lavorative, che domestiche; tuttavia sono ben conosciuti i problemi legati ad essa; primo fra tutti si cita la sua produzione che spesso annovera l'utilizzo di fonti inquinanti (combustibili fossili) o che richiedono complicati sistemi di controllo (centrali nucleari). Fortunatamente, sta prendendo sempre più piede l'utilizzo delle fonti rinnovabili, ormai, per citare un esempio, il solare fotovoltaico è parecchio diffuso sia tra le utenze domestiche che tra le utenze aziendali. Dati gli sforzi per produrre energia elettrica, risulta importantissimo avere un'efficiente rete di trasmissione e di distribuzione che consenta la minima perdita di energia. In quest'ottica si inserisce il lavoro di tesi qui presentato il cui obiettivo finale è il miglioramento della conducibilità elettrica delle leghe di alluminio impiegate per conduttori elettrici aerei. De Angeli Prodotti, azienda presso cui si è svolto il lavoro, è azienda leader nella produzione di conduttori elettrici per le linee aeree, sia nel panorama italiano, che in quello europeo. Lo sviluppo di nuove tecnologie che la distinguano sul mercato, permette quindi all'azienda di essere sempre più competitiva verso i concorrenti. Il lavoro qui riportato non è stato sviluppato solo dal punto di vista sperimentale, ma si è inquadrato il problema in un'ottica più ampia, presentando i diversi conduttori elettrici aerei attualmente utilizzati considerando le principali caratteristiche richieste e facendone un confronto approfondito che ne ha messo in luce pregi e difetti. Da qui si è partiti nell'approfondimento delle leghe di alluminio della classe 6000 che si è dimostrato come, con opportuni studi sul trattamento termico, consentano ampi margini di miglioramento.

Dopo una parte introduttiva che riporta alcune generalità sulle linee elettriche, si passa alla presentazione del problema dal punto di vista della selezione dei materiali; il caso dei conduttori elettrici aerei è un caso molto interessante perché molti di essi si basano su due componenti: una parte centrale con la funzione di portante e una parte esterna con la funzione di trasmettere la corrente elettrica. Si è passato quindi alla presentazione delle varie tecniche di selezione utilizzate e al loro utilizzo per il confronto tra i diversi tipi di conduttori utilizzati nella pratica, sia quelli costituiti da due materiali (parte portante più parte che conduce la corrente) sia quelli costituiti da un solo materiale. A questo punto, il focus è stato messo sulle leghe di alluminio di cui è stata presentata la teoria alla base dell'invecchiamento artificiale che ne consente il raggiungimento delle caratteristiche elettriche e meccaniche volute. A questa parte teorica viene accostata la pratica industriale che permette l'ottenimento dei conduttori per linee aeree; partendo dal semilavorato, passando dai singoli fili e arrivando ai conduttori finiti veri e propri.

L'ultimo capitolo presenterà, infine, i risultati ottenuti confrontandoli con le proprietà delle leghe ottenute con il metodo convenzionale. Sono inoltre stati svolti degli studi metallografici sui vari campioni e se ne sono evidenziate le differenze.

Capitolo 1

Generalità sulle linee elettriche aeree

In questo capitolo vengono riportate le generalità sulla trasmissione dell'energia elettrica e sulle linee elettriche aeree di trasmissione. Inoltre viene presentato il caso di studio inquadrandolo all'interno dei progetti dell'azienda De Angeli Prodotti e anticipando il metodo di analisi utilizzato per lo studio del problema.

1.1 Generalità

Le tre fasi che vanno dalla produzione all'utilizzo dell'energia elettrica sono: la produzione (conversione di energia a partire da una fonte primaria di energia attraverso le centrali elettriche), la trasmissione (che si appoggia alla rete di trasmissione elettrica a grande distanza e ad alta tensione) e la distribuzione (che comprende le linee a media e a bassa tensione). Il ciclo si conclude con il cosiddetto "metering" cioè con le rilevazioni e misure dell'energia elettrica utilizzata.

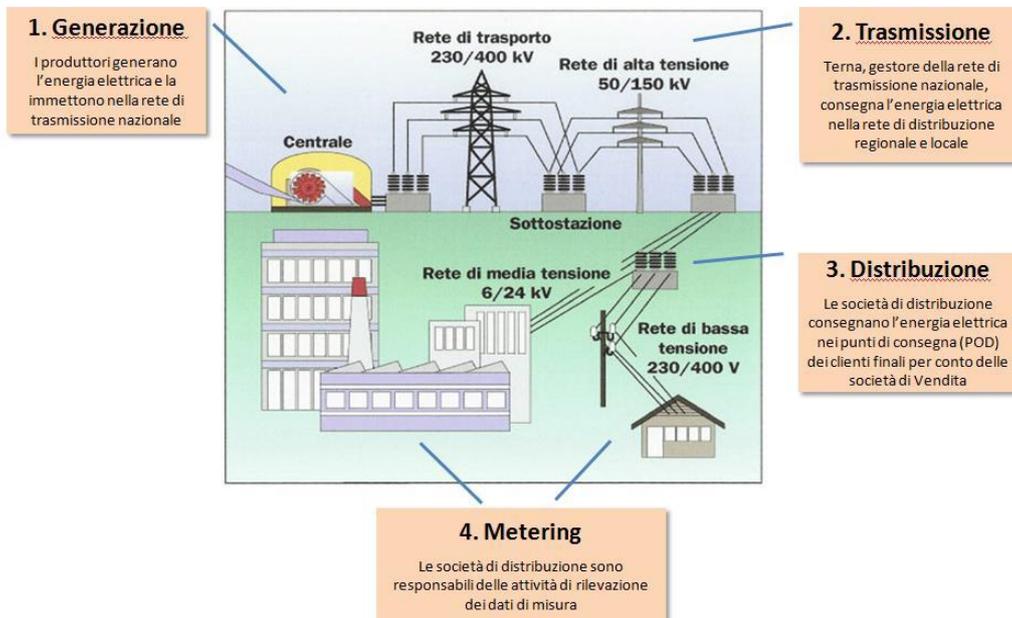
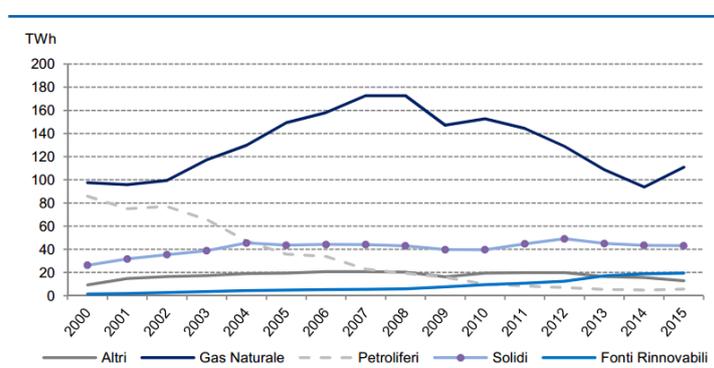


Fig. 1.1 Schema rete elettrica

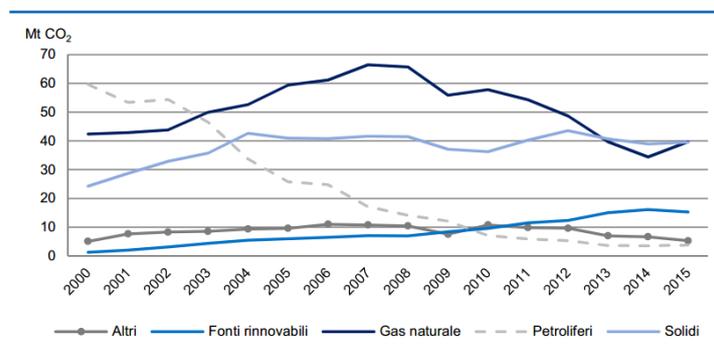
Generalmente si parla di corrente alternata e di sistema trifase. Per quanto riguarda la frequenza, in Europa è di 50 Hz mentre negli Stati Uniti è di 60 Hz. La rete nazionale di trasmissione dell'energia comprende oltre 72000 km di linee.

Per avere un'idea sui consumi nazionali di energia si riportano i dati dal sito di Terna, e più precisamente i dati che si trovano nello studio “Analisi sintetica dei dati elettrici più rappresentativi dell'anno 2015”. Risulta che nel 2015 ci sia stata una richiesta totale di 316,9 TWh, soddisfatta per l'85% da produzione nazionale e per il 15% da importazione dall'estero. La produzione nazionale è costituita per il 51% dalla produzione termica, per il 15% dalla produzione idroelettrica e le risorse rinnovabili (in particolare produzione fotovoltaica, eolica, da biomasse e geotermica) coprono il restante 19%.

I grafici seguenti mostrano le fonti di energia utilizzate per la produzione termoelettrica e le emissioni di CO₂ che competono ad ogni fonte energetica (per la produzione di energia elettrica totale).



Fonte: Terna



Fonte: Terna

Fig. 1.2 Fonti energetiche utilizzate per la produzione termoelettrica ed emissioni totali suddivise per fonte di energia elettrica utilizzata.

Si vede come la fonte più utilizzata per l'energia termoelettrica sia il gas naturale, seguito a una certa distanza dai cosiddetti combustibili “solidi”. Si vede come le fonti rinnovabili, pur registrando un certo aumento, coprono una percentuale abbastanza bassa delle fonti utilizzate per la produzione di energia termoelettrica.

Per quanto riguarda le emissioni, la parte preponderante è causata dall'utilizzo del gas naturale e dei combustibili solidi.

Il miglioramento delle linee elettriche di trasmissione e distribuzione, in termini di riduzione delle perdite, è un modo per diminuire il consumo di fonti energetiche per la produzione di energia elettrica, si traduce quindi in una diminuzione di costi e di emissioni.

Nei paragrafi successivi vengono trattate le linee elettriche e in particolare quelle aeree, vengono riportate definizioni, classificazioni, caratteristiche principali e cenni sulla progettazione.

1.2 Definizioni e classificazioni

Di seguito sono riportate alcune definizioni dalla norma CEI 11-4: “Esecuzione delle linee elettriche aeree esterne”.

Linee elettriche aeree esterne: sono le linee impiantate all’aperto, al di sopra del suolo e costituite dai conduttori, o dai cavi, con relativi isolatori, sostegni ed accessori.

Linee di classe zero: sono quelle linee telefoniche, telegrafiche, per segnalazione e comando a distanza in servizio di impianti elettrici, le quali abbiano tutti o parte dei loro sostegni in comune con linee elettriche di trasporto o di distribuzione o che, pur non avendo con queste alcun sostegno in comune, siano dichiarate appartenenti a questa categoria in sede di autorizzazione.

Linee di prima classe: sono le linee di trasporto o distribuzione di energia elettrica la cui tensione nominale è inferiore o uguale a 1000 V e le linee in cavo per illuminazione pubblica in serie la cui tensione nominale è inferiore o uguale a 5000 V.

Linee di seconda classe: sono le linee di trasporto o distribuzione di energia elettrica la cui tensione nominale è superiore a 1000 V ma inferiore o uguale a 30000 V e quelle a tensione superiore nelle quali il carico di rottura del conduttore di energia sia inferiore a 3434 daN (3500 kgf).

Linee di terza classe: sono le linee di trasporto o distribuzione di energia elettrica la cui tensione nominale è superiore a 30000 V e nelle quali il carico di rottura del conduttore di energia non sia inferiore a 3434 daN (3500 kgf).

Conduttori: le corde e i fili, nudi o rivestiti, tesi fra i sostegni delle linee elettriche e destinati a trasportare o a distribuire l’energia elettrica (fra essi compreso il conduttore neutro dei sistemi trifase a quattro fili) o destinati, per le linee di classe zero, alla trasmissione di segnali e comunicazioni.

Corde (o fili) di guardia o di terra: le corde e i fili tesi tra i sostegni delle linee elettriche, permanentemente collegati a terra e destinati a proteggere i conduttori dagli effetti delle sovratensioni di origine atmosferica e a migliorare il collegamento a terra dei sostegni.

Cavi aerei: cavi, comprese le eventuali funi portanti, tesi fra sostegni e costituiti da uno o più conduttori dotati di un rivestimento che assicuri l'isolamento e la protezione durevole nei confronti delle condizioni ambientali e meccaniche della posa all'aperto, e muniti per le linee di seconda e terza classe di uno schermo metallico, continuo, messo a terra. I cavi aerei possono essere autoportanti o non, intendendosi come autoportanti quelli nei quali la funzione portante è assicurata da tutti (o parte dei) conduttori costituenti il cavo stesso e che risultano quindi privi di fune portante apposita, interna o esterna al cavo.

Le linee elettriche si dividono in due categorie: le linee con conduttori nudi (generalmente per trasmissione) per media, alta e altissima tensione, e le linee in cavo (generalmente per distribuzione) per media e bassa tensione. In genere la classificazione delle linee secondo la tensione è la seguente: bassa tensione se è minore di 1 kV, media tensione se è compresa tra 1 e 40 kV, alta tensione se è compresa tra 40 e 150 kV e ad altissima tensione se è maggiore di 150 kV. La maggior parte della rete elettrica italiana è costituita dalle linee a media e bassa tensione (tensione 40 kV), che rappresentano lo stadio finale del processo di produzione, trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica. Mediamente i km di linee con tensione 40 kV rappresentano circa il 5% del totale.

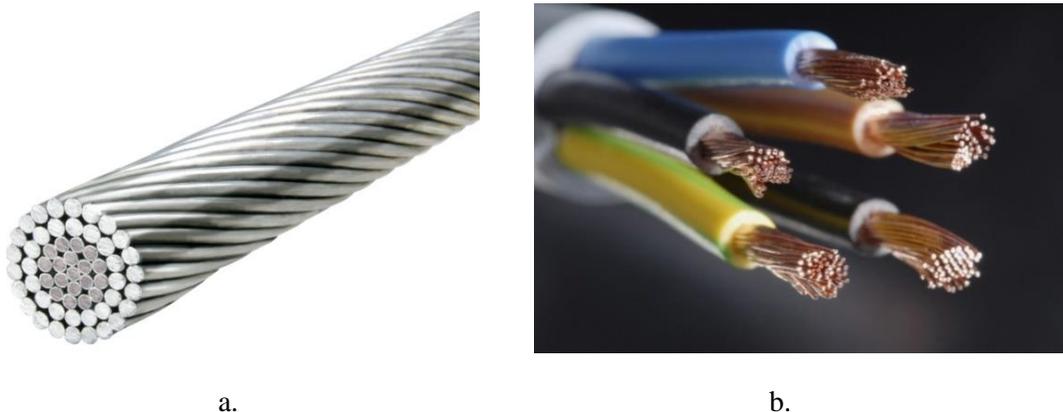


Fig. 1.3 a: esempio di conduttore nudo, b: esempio di conduttore per linee in cavo

Le linee con conduttori nudi sono costituite dalle seguenti parti: conduttori di potenza che servono per il trasferimento dell'energia e che sono tesi nell'aria, isolatori che sostengono meccanicamente e isolano verso il sostegno i conduttori di potenza, sostegni che svolgono una funzione di sostegno degli isolatori e dei conduttori di potenza. Di seguito si riporta il particolare di un traliccio usato come sostegni delle linee elettriche.

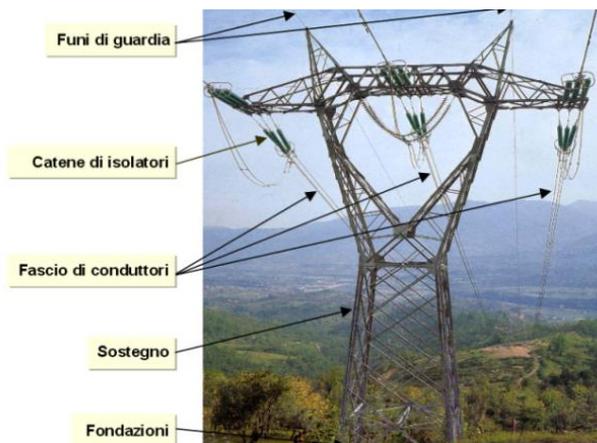


Fig.1.4 Traliccio e linea elettrica esterna

Le linee in cavo sono realizzate con: uno o più conduttori che servono per il trasferimento dell'energia, un isolante solido che circonda il conduttore e che garantisce l'isolamento, una guaina di protezione. Sono impiegate nelle linee di trasmissione e negli impianti in media e bassa tensione; possono essere in posa sotterranea o sottomarina, principalmente, od anche aerea.

1.3 Normative per la progettazione

I requisiti che i materiali, le macchine, le apparecchiature e gli impianti elettrici devono possedere per garantire il rispetto delle regole della buona elettrotecnica, sono stabiliti in Italia dal Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI).

Nell'intento di giungere ad una normalizzazione per quanto possibile uniforme, sono sorti l'International Electrotechnical Commission (IEC), che raccoglie i paesi industrializzati del mondo, il Comitato Europeo di Normazione (CEN) ed il Comitato Europeo per la Normalizzazione Elettrotecnica (CENELEC). Il CENELEC emette documenti di armonizzazione (HD) i cui contenuti tecnici devono essere introdotti nelle norme dei paesi membri, oppure norme europee (EN) che devono essere tradotte ed adottate quali norme nazionali.

Considerando le linee esterne, nella progettazione è necessario tenere conto dell'impatto degli agenti atmosferici, come ad esempio vento (come indicato sempre nella norma CEI 11-4), umidità (infatti viene richiesta una certa resistenza a corrosione), sovraccarichi dovuti al ghiaccio.

Per la messa in opera è necessario considerare le seguenti distanze (da norma CEI 11-4): distanziamento minimo dei conduttori ai punti di attacco ai sostegni di linea, distanza minima delle parti sotto tensione verso le parti a terra dei sostegni, altezza minima dei conduttori sul

terreno e sulle acque, distanze minime tra i conduttori, distanze minime tra i sostegni, distanze minime dai fabbricati.

Per quanto riguarda le verifiche meccaniche, come indicato dalla norma CEI 11-4, la verifica della sollecitazione meccanica dei conduttori e delle corde di guardia deve essere effettuata nelle ipotesi di calcolo:

- 1- conduttori scarichi a 15 °C
- 2- condizioni di temperatura seguenti:

Tab. 1.1 Condizioni di temperatura e di carico per la progettazione di linee elettriche aeree

Linee in zona	Temperatura (°C)	Vento orizzontale agente in direzione normale (km/h)	Manicotto di ghiaccio (densità 0.92) dello spessore di (mm)
A	-5	130	-
B	-20	65	12

La zona A comprende le località ad altitudine non superiore agli 800 m s.l.m. dell'Italia centrale, meridionale ed insulare, la zona B comprende tutte le località dell'Italia settentrionale e le località ad altitudine superiore a 800 m s.l.m. dell'Italia centrale, meridionale ed insulare.

Nelle ipotesi di calcolo descritte le sollecitazioni dei conduttori e delle corde di guardia non devono superare i seguenti limiti:

- nell'ipotesi 1: il 25% del carico di rottura per conduttori e corde di guardia massicci o per conduttori e corde di guardia cordati in condizioni di conduttore assestato; il 30% del carico di rottura per conduttori e corde di guardia cordati in condizioni di conduttore non assestato
- nell'ipotesi 2: il 50% del carico di rottura per conduttori e corde di guardia delle linee di terza classe; il 40% del carico di rottura per conduttori e corde di guardia delle linee di classe zero, prima e seconda

Le sollecitazioni di cui sopra devono essere calcolate in base alle caratteristiche dei conduttori indicate nelle apposite Norme CEI e dalle tabelle UNEL o risultanti da prove dei collaudi dei conduttori stessi.

1.4 Catenaria

Per la progettazione delle linee elettriche ci si basa sulla teoria del filo teso tra due estremi A e B. La configurazione del filo teso è detta catenaria, la cui definizione è la seguente: particolare curva piana dall'aspetto simile a una parabola, il cui andamento è quello

caratteristico di una fune i cui due estremi sono vincolati, lasciata pendere e soggetta soltanto al suo stesso peso. Con le ipotesi iniziali che il filo sia perfettamente flessibile e calibrato (peso per unità di lunghezza costante) e non estensibile, che la campata sia a livello (i cui estremi di fissaggio siano posti a una stessa altezza rispetto a un piano orizzontale) e ponendo l'origine degli assi di riferimento nella mezzeria della campata, l'equazione della campata risulta:

$$y = a \left(\cosh \frac{x}{a} - 1 \right) = \frac{a}{2} (e^{x/a} + e^{-x/a}) \quad (1.1)$$

Dove:

$a = T/q$ [m], con T pari alla componente orizzontale del tiro [N] che risulta costante in ogni punto e q pari al peso proprio del conduttore per unità di lunghezza [N/m];

x [m] rappresenta l'ascissa, poiché la distanza tra gli estremi di fissaggio è posta uguale a 1, essa può variare tra $-1/2$ e $1/2$;

y [m] indica la distanza verticale di ciascun punto della curva dal suo punto più basso ($x = 0$).

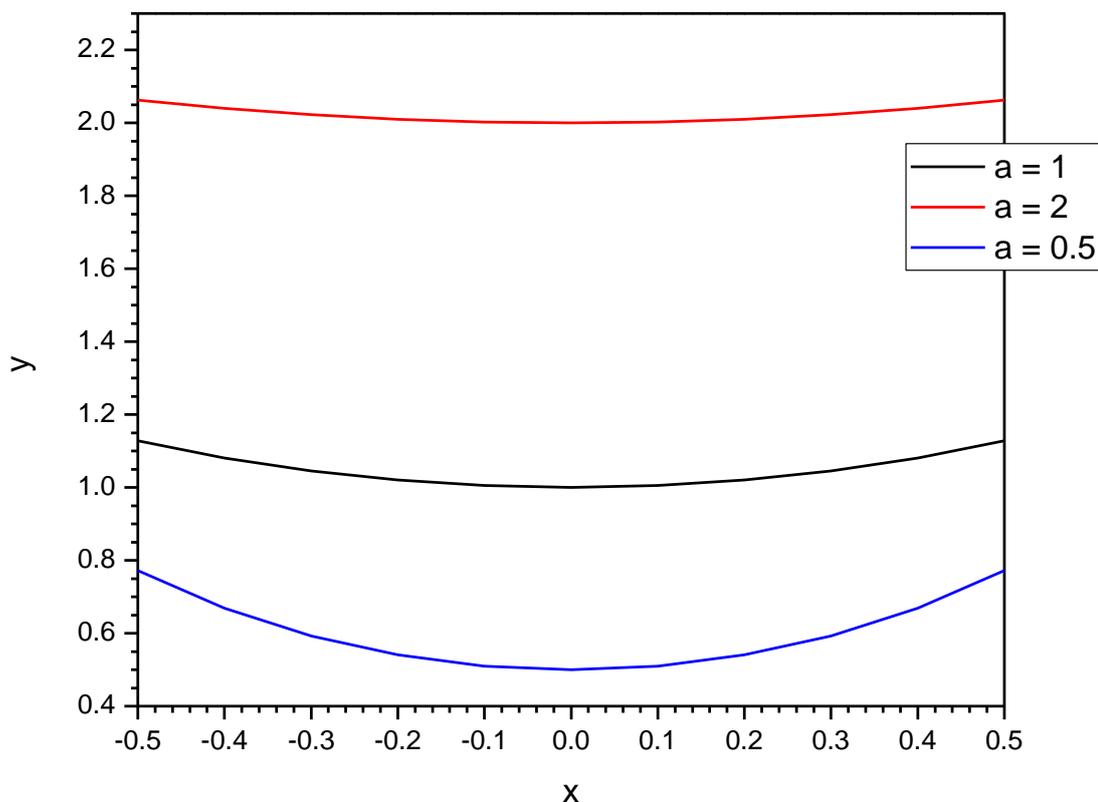


Fig. 1.5 Rappresentazione della catenaria

Considerando le ipotesi precedenti, ogni punto del conduttore è sottoposto a sollecitazioni di pura trazione, nella mezzeria coincide con la componente orizzontale T , negli altri punti la risultante è composta dalle componenti orizzontale e verticale (pari alla forza che compensa il peso del conduttore compreso tra 0 e x). Il tiro tangente alla curva (T') sarà in ogni punto:

$$T' = T \cosh \frac{x}{a} \quad (1.2)$$

La trazione massima si avrà quindi in corrispondenza di A e B e sarà:

$$T_{max} = T'_A = T'_B = T \cosh \frac{l/2}{a} = T + qf \quad (1.3)$$

dove con f si identifica la freccia della campata in mezzeria.

Inoltre la lunghezza di un arco di catenaria compreso tra $x = 0$ e un punto generico di ascissa x è:

$$L_x = a \sinh \frac{x}{a} \quad (1.4)$$

E quindi la lunghezza dell'intera fune (tra gli estremi A e B) sarà:

$$L = 2a \sinh \frac{l}{2a} \quad (1.5)$$

1.5 Presentazione del caso di studio

De Angeli Prodotti è un'azienda leader nella produzione di conduttori elettrici. I suoi settori principali sono quello metallurgico e quello metalmeccanico. All'interno del settore metallurgico si ha la produzione di conduttori elettrici aerei standard ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced) e AAAC (All Aluminium Alloy Conductors), affiancati da conduttori innovativi quali ad esempio gli ACCC (anima in carbonio e mantello in alluminio), fig. 1.6.

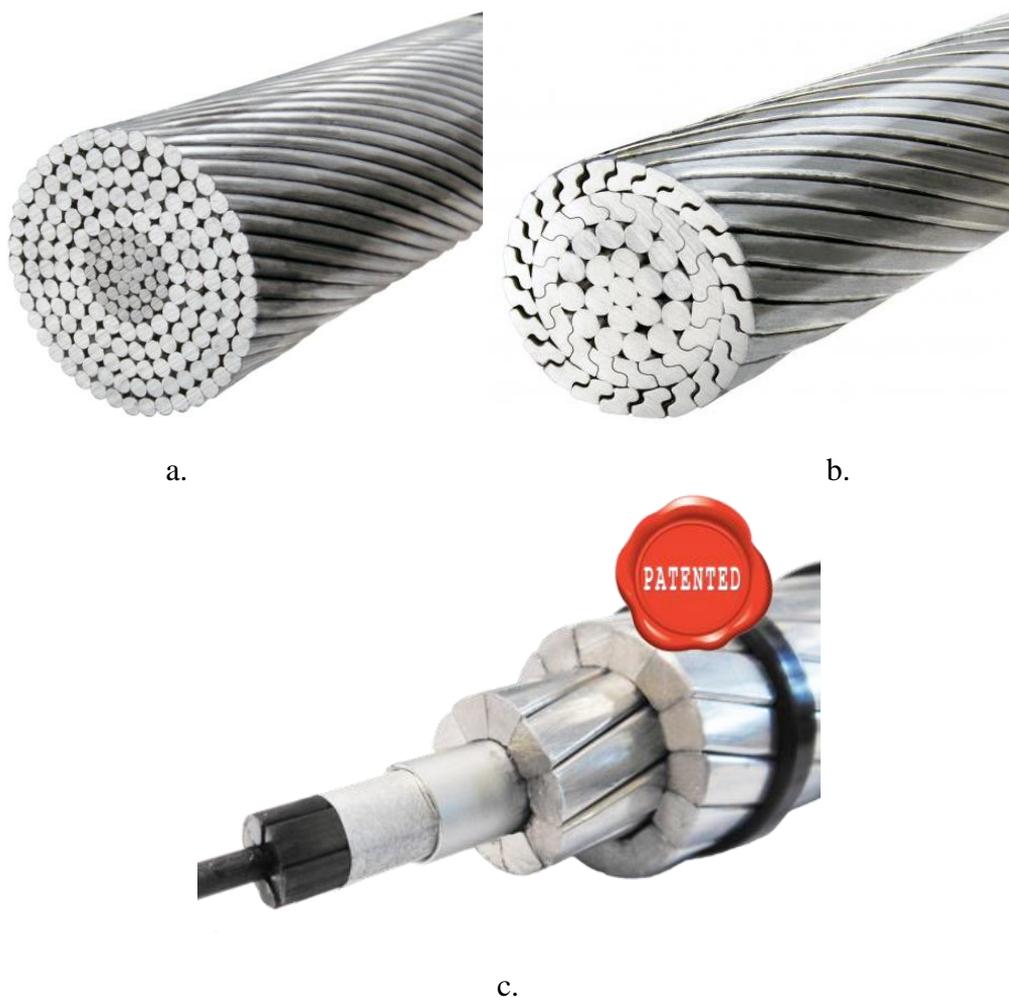


Fig. 1.6 Conduttori elettrici aerei realizzati da De Angeli Prodotti; a. tipico conduttore ACSR, b. conduttore AAAC, c. conduttore ACCC

I conduttori ACSR sfruttano la resistenza meccanica dell'acciaio la conducibilità elettrica dell'alluminio per garantire le proprietà meccaniche ed elettriche richieste; per quanto riguarda i conduttori AAAC invece, l'intero conduttore è fatto in lega di alluminio (serie 6000). Sugli AAAC ci sono tuttora parecchi studi finalizzati all'ottenimento di una migliore combinazione di conducibilità elettrica e resistenza meccanica in modo da minimizzare le perdite e garantire la maggiore efficienza possibile nel trasporto di energia elettrica. In quest'ottica si inserisce lo studio qui riportato, l'obiettivo è infatti il miglioramento della conducibilità elettrica delle leghe di alluminio della serie 6000, in particolare della lega 6101 attraverso un'ottimizzazione del trattamento termico e uno studio sulla composizione. Lo studio sulla lega vera e propria verrà preceduto da un confronto tra i materiali attualmente utilizzati per conduttori elettrici aerei che ne evidenzierà le caratteristiche e i vantaggi.

1.6 Introduzione sulla selezione di materiali per i conduttori elettrici aerei

Come già accennato, i materiali che costituiscono le linee elettriche aeree devono possedere due caratteristiche principali: una conducibilità elettrica più elevata possibile insieme a una resistenza meccanica più elevata possibile per permettere la maggiore distanza possibile tra i tralicci. Si ottiene quindi il seguente grafico di compromesso, dove sulle ascisse è riportata la resistività elettrica, mentre nelle ordinate è riportato il reciproco della resistenza meccanica. Dovendo quindi minimizzare entrambe le proprietà riportate nel grafico, i materiali migliori si trovano nella parte in basso a sinistra.

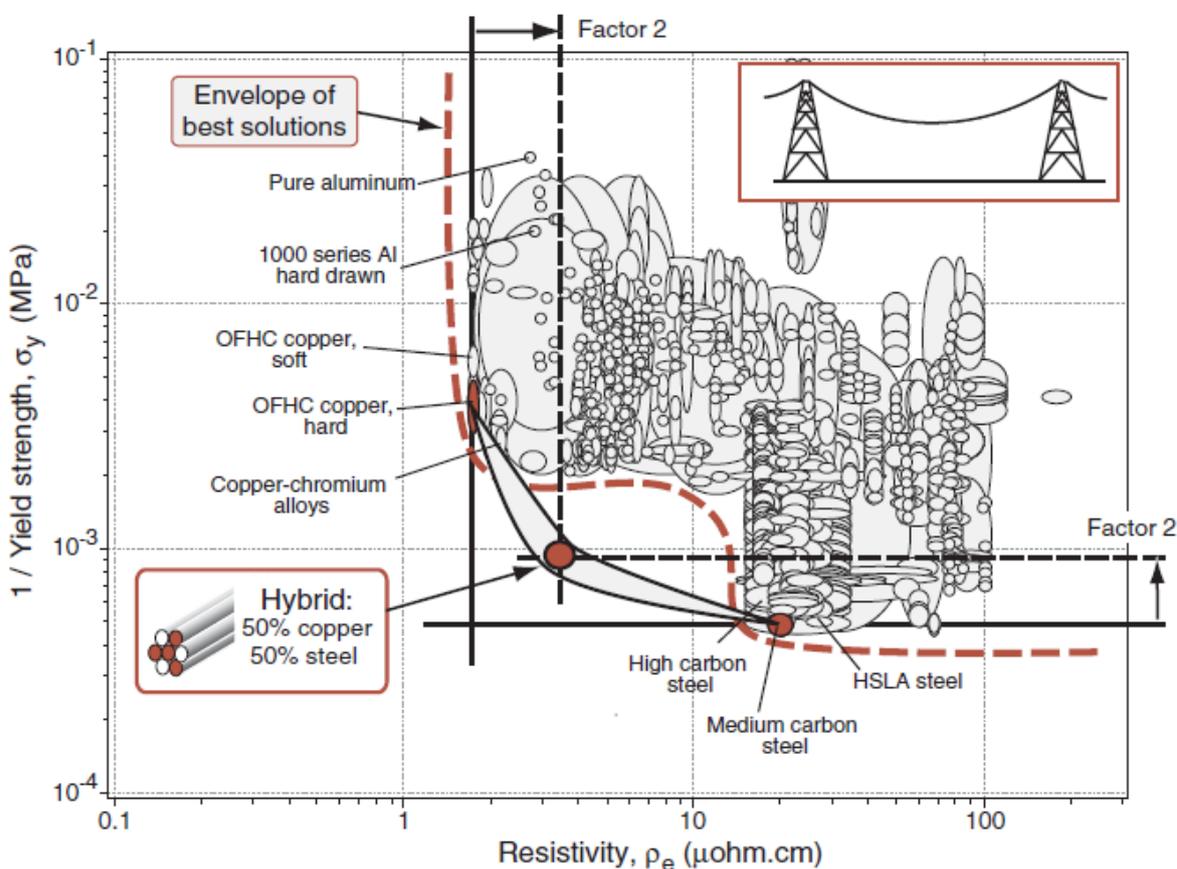


Fig. 1.7 Grafico di compromesso

Si nota però come l'andamento della linea tratteggiata in rosso, che rappresenta la linea di compromesso, nei dintorni della quale si trovano i migliori materiali nel caso in esame, evidenzia una mancanza di materiali proprio nella parte in basso a sinistra. Si vede infatti come i materiali con la minore resistività elettrica (rame e alluminio) non abbiano una resistenza

meccanica elevata, e i materiali con migliori caratteristiche meccaniche (acciaio al carbonio) abbiano una scarsa conducibilità elettrica.

Ipotizzando un cavo composto per il 50% della sezione da rame e per il 50% da acciaio e ipotizzando che l'acciaio non conduca elettricità e il rame non contribuisca alla resistenza meccanica (quindi un caso estremo) si ottiene il materiale indicato all'interno del grafico. Come si vede esso occupa una parte di grafico al di sotto della linea di compromesso, quindi ha proprietà migliori rispetto a tutti gli altri materiali riportati. Questa strategia si può attuare con altri materiali come ad esempio con acciaio e alluminio o carbonio e alluminio (di cui sono stati già presentati esempi pratici) e ottenere proprietà diverse ma sempre migliori rispetto al caso di monomateriale.

In alternativa alla creazione di materiali ibridi appena presentati, si possono trovare altri materiali che stanno al di sotto della linea di compromesso, ottimizzando quelli già esistenti per arrivare a una conducibilità elettrica maggiore insieme a una migliore resistenza meccanica.

Capitolo 2

Selezione di materiali per linee elettriche aeree

In questo capitolo vengono trattati i metodi di selezione in generale e precisati in seguito quelli utilizzati per selezionare e confrontare i materiali più adatti per la costruzione dei conduttori per linee elettriche aeree. Una selezione più approfondita verrà svolta nel capitolo successivo dove verrà anche fatta una presentazione generale dei conduttori utilizzati nelle linee elettriche.

2.1 Selezione e grafici

Per selezionare un materiale da utilizzare in una determinata applicazione, è necessario tener conto sia delle sue proprietà intrinseche, sia delle caratteristiche geometriche. Se si considera ad esempio la resistenza elettrica (R) di un materiale, essa è definita come:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (2.1)$$

dove ρ è la resistività elettrica, l è la lunghezza del conduttore e A la sezione.

Per migliorare la resistenza del conduttore si hanno quindi due strade possibili, una è utilizzare il materiale con minore resistività elettrica, l'altra è variare le proprietà geometriche del conduttore. Se le variabili geometriche vengono raggruppate in un unico fattore, detto *fattore di struttura* (FS), per due materiali A e B, che devono avere la stessa resistenza, si può scrivere:

$$R = \rho_A \cdot FS_A = \rho_B \cdot FS_B \quad (2.2)$$

Risulta chiaro quindi che per compensare una minore resistività di un materiale è possibile ricorrere ad esempio a una sezione più elevata ed ottenere la stessa resistenza.

Il ragionamento visto per la resistenza elettrica può essere applicato alle altre proprietà che caratterizzano il componente e quindi per un miglioramento della prestazione è necessario

concentrarsi sulle proprietà del materiale ma allo stesso tempo anche sulla geometria del componente in esame.

Per avere una rappresentazione di tutti i materiali in un solo grafico per un confronto completo, risulta interessante che per tutte le proprietà si possono fare dei grafici dove sono rappresentati tutti i materiali con l'accortezza di utilizzare una scala logaritmica. Per quanto riguarda la resistività elettrica, il grafico che si ricava è il seguente:



Fig. 2.1 Resistività elettrica per le diverse classi di materiali

I grafici rappresentati in questo capitolo e nel prossimo sono stati ottenuti utilizzando il Software CES EduPack 2016.

Già da questa prima semplice rappresentazione si vedono i materiali migliori che sono costituiti da metalli (le resistività elettriche minori sono mostrate da argento, oro e rame).

In uno stesso grafico è inoltre possibile fare un confronto tra i materiali considerando due proprietà, i grafici così ottenuti sono indicati con “grafici bi-proprietà”. I materiali sono in questo caso rappresentati da ellissi, i semiassi dell’ellisse rappresentano le variazioni statistiche nelle due proprietà, la variabilità non è rappresentata da un rettangolo poiché è improbabile trovare varianti di uno stesso materiale con proprietà estreme (vertici del

rettangolo) come ad esempio valori massimi per entrambe le proprietà. Un esempio può essere, nel caso di conduttori aerei, un grafico che rappresenta le proprietà di resistività elettrica e di carico di rottura. Questo poichè è necessario garantire un carico sufficiente perché i conduttori supportino il loro peso e resistano alle sollecitazioni atmosferiche.

2.1.1 Grafici di compromesso

Nella rappresentazione si ricorre ai cosiddetti grafici di compromesso, di cui un esempio è stato riportato nella fig. 1.7 nel capitolo precedente. Viene qui approfondito, oltre al loro significato, il metodo per ricavare i grafici di compromesso, che verranno poi utilizzati per lo studio dei materiali più vantaggiosi per i conduttori elettrici aerei. Nel grafico seguente la proprietà rappresentata sull'asse delle ascisse è il reciproco del carico di rottura, mentre sull'asse delle ordinate la resistività elettrica. Entrambe le proprietà sono quindi da minimizzare. Rispetto al capitolo precedente, è stato utilizzato il carico di rottura invece che quello di snervamento perché le norme su cui si basa la progettazione dei conduttori elettrici aerei riportano il carico di rottura minimo e non lo snervamento. La curva che si ottiene dalla prova di trazione dell'alluminio non dà infatti un chiaro snervamento e risulta quindi molto più facile basarsi sul carico di rottura. Va inoltre ricordato che carico di snervamento e carico di rottura sono in relazione tra loro. Nella figura seguente sono rappresentate le varie classi di materiali.

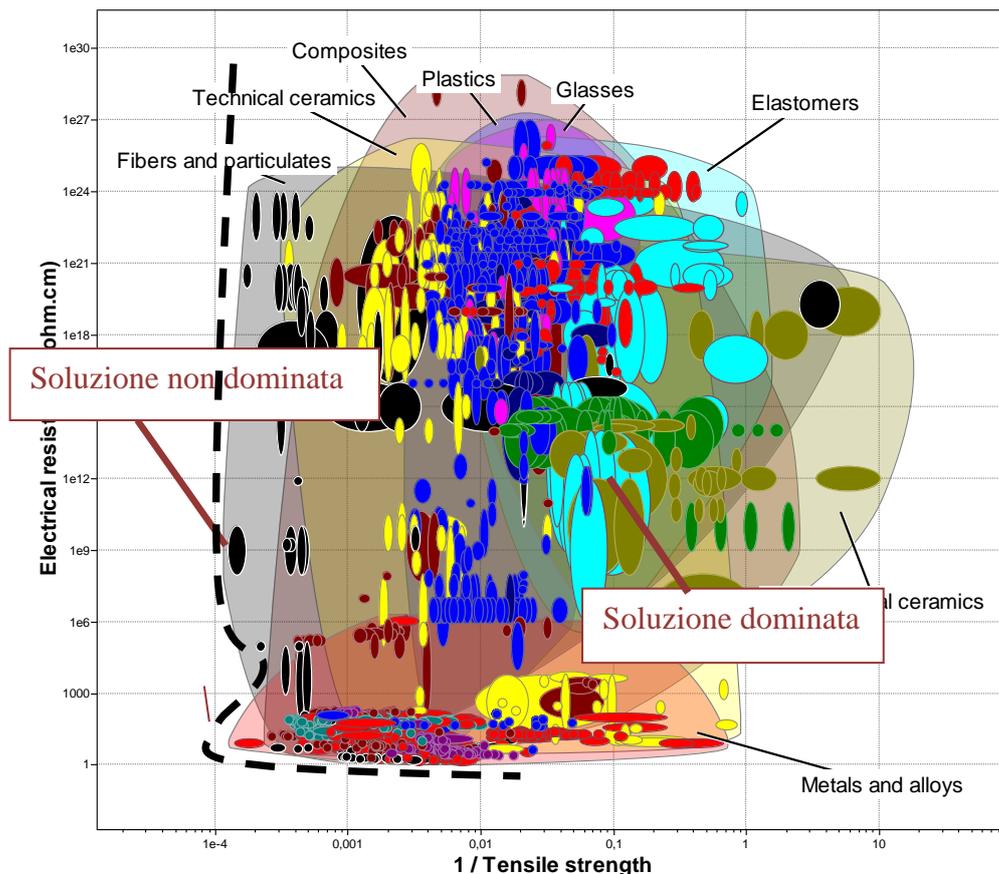


Fig. 2.2 Grafico di compromesso

La curva nera tratteggiata rappresenta la curva di compromesso. Considerando la curva di compromesso si possono identificare soluzioni dominate e soluzioni non dominate. Con soluzione dominata si intende una soluzione rispetto alla quale è possibile trovare soluzioni migliorative, sia per quanto riguarda la resistività elettrica che il carico di rottura. Con soluzione non dominata si intende invece una soluzione per la quale non è possibile trovare un materiale migliorativo per quanto riguarda il carico di rottura considerando lo stesso valore di resistività o viceversa.

Per ottenere un grafico rappresentativo delle soluzioni attuabili, è necessario però considerare l'effettivo caso in esame; i materiali non devono infatti essere fragili, né essere troppo deformabili, questo porta quindi ad eliminare i materiali ceramici e gli elastomeri. Inoltre è necessario fare considerazioni sul costo data l'estensione dei cavi; il prezzo massimo viene ipotizzato 7 €/Kg. Con questi vincoli è possibile avere un'idea dei materiali più convenienti, fig. 2.3.

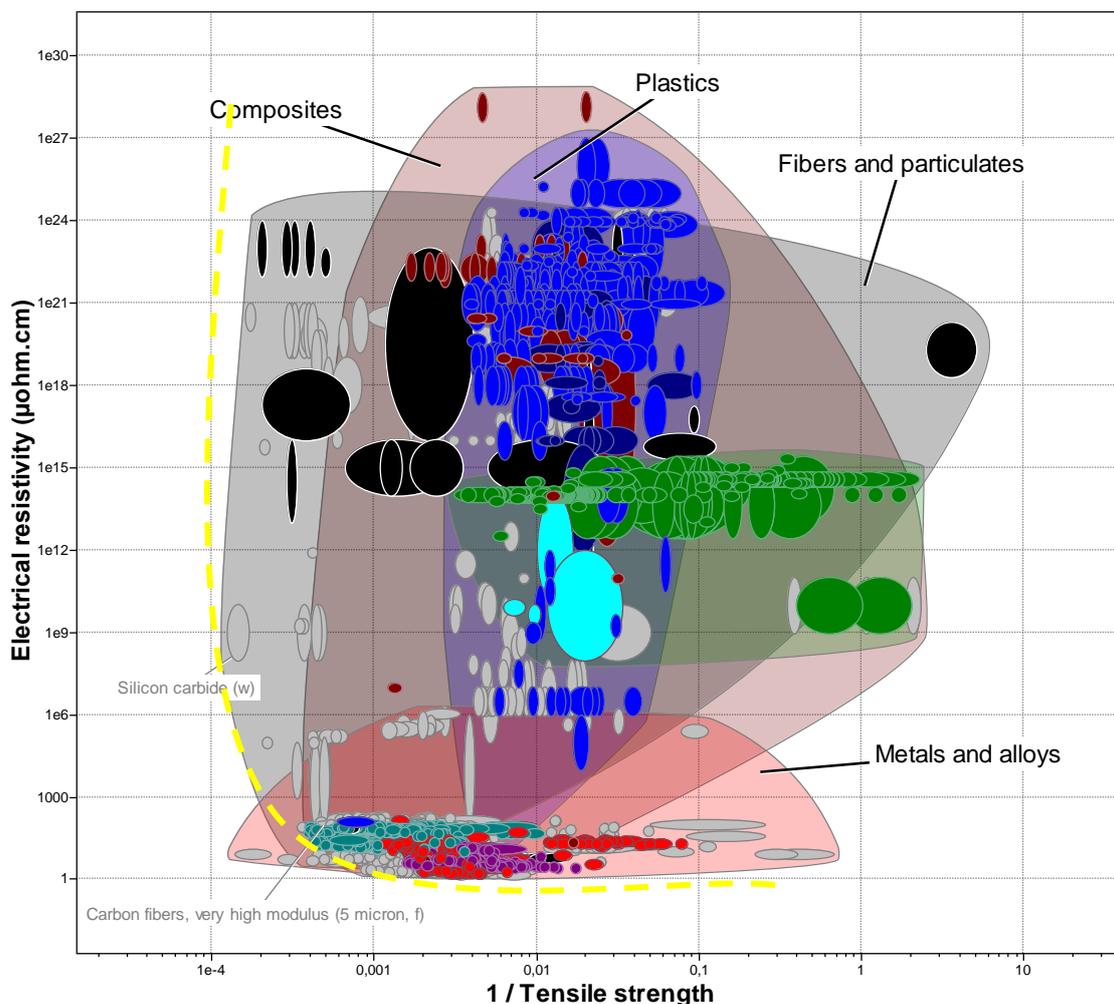


Fig. 2.3 Grafico bi-proprietà che rappresenta i materiali migliori per i conduttori elettrici aerei

I materiali migliori si posizioneranno nella parte del grafico in basso a sinistra dovendo avere la minore resistività elettrica possibile e le migliori proprietà meccaniche. Sono i metalli ancora una volta a dare i migliori risultati; oltre a una bassa resistività infatti hanno anche elevate proprietà meccaniche; considerando la curva di compromesso (in giallo) infatti, si vede che appartengono alla classe dei metalli le soluzioni non dominate aventi resistività elettrica minore. Si nota che le fibre di carbonio, eliminate nel grafico avendo imposto limitazioni sul costo, si posizionano vicino ai metalli; questo pone le basi per utilizzare materiali compositi che sfruttino le prestazioni di quest'ultimo.

2.1.2 Funzione di penalizzazione

La selezione grafica può essere ulteriormente sviluppata considerando una funzione cosiddetta "funzione di penalizzazione". La funzione di penalizzazione (Z) ha la seguente struttura:

$$Z = P_1 + \alpha \cdot P_2 \quad (2.3)$$

Dove P_1 e P_2 sono le proprietà e α è una costante di scambio che rappresenta l'impatto della seconda proprietà nella valutazione della convenienza rispetto alla proprietà P_1 e inoltre ne raccorda le unità di misura. Il materiale migliore, o meno penalizzato, risulta quello avente il valore della funzione di penalizzazione minore.

Nel nostro caso la funzione di penalizzazione diventa:

$$Z = \frac{1}{\sigma_R} + \alpha \cdot \rho_{el} \quad (2.4)$$

dove σ_R è il carico di rottura e ρ_{el} è la resistività elettrica. Volendo dare più importanza alla resistività elettrica, verrà dato un valore elevato alla costante di scambio α .

Si può a questo punto rappresentare la funzione di penalizzazione all'interno del grafico di compromesso trasformandola con semplici passaggi nell'equazione seguente:

$$\rho_{el} = -\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{1}{\sigma_R} + \frac{Z}{\alpha} \quad (2.5)$$

Rappresentandola nel grafico di compromesso in scala lineare si otterrebbe quindi una retta ma, poiché la scala utilizzata è logaritmica, la funzione di penalizzazione risulta rappresentata da una curva. Nei grafici seguenti vengono considerati solamente i materiali appartenenti alla categoria dei metalli essendo essi i più vantaggiosi, come detto in precedenza.

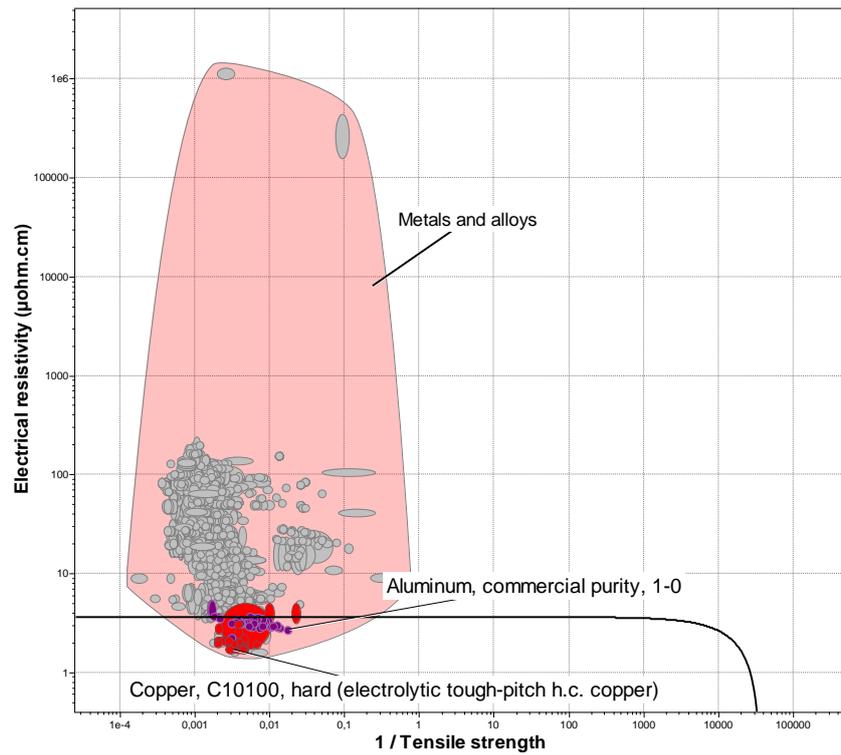


Fig. 2.4 Grafico di compromesso con funzione di penalizzazione, a elevato (resistività elettrica più importante)

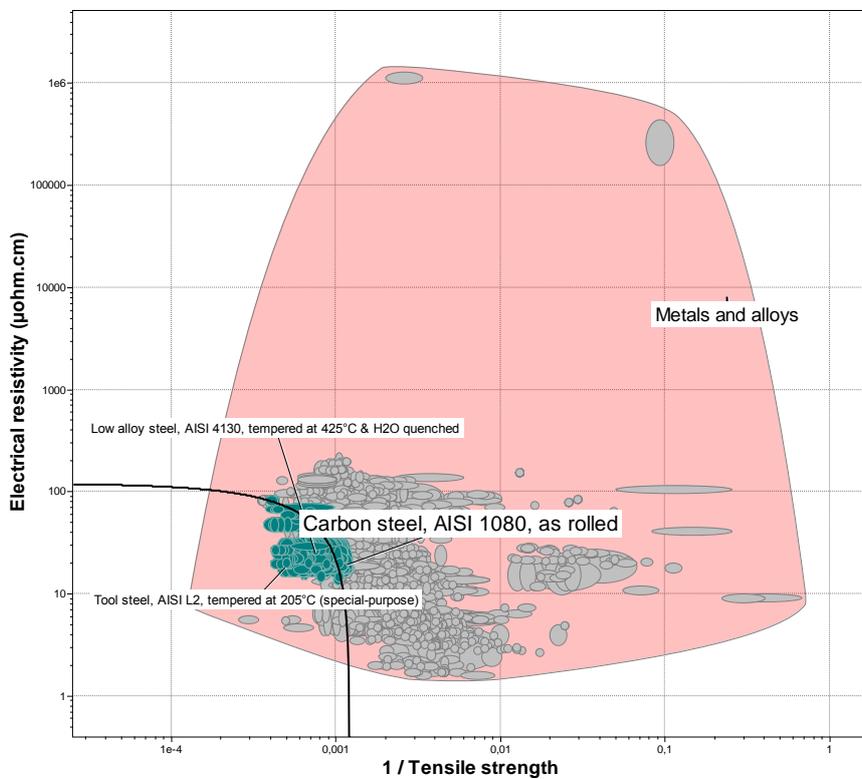


Fig. 2.5 Grafico di compromesso con funzione di penalizzazione, a basso (carico di rottura più importante)

Nella fig. 2.4 il fattore α ha un valore elevato; i materiali che risultano più vantaggiosi per quanto riguarda la minimizzazione della resistività elettrica sono rame e alluminio. In fig. 2.5 invece viene data importanza maggiore alla massimizzazione del carico di rottura e i metalli vantaggiosi in questo caso sono gli acciai.

Se è invece necessario fare un'analisi più completa, considerando più proprietà, è possibile selezionare il materiale migliore utilizzando una “funzione di penalizzazione generalizzata”. Dopo aver selezionato i materiali più opportuni considerando la proprietà (o la combinazione di proprietà) ritenuta più importante, si può effettuare un confronto identificando tutte le proprietà importanti per la funzione per cui deve essere utilizzato il materiale. La funzione di penalizzazione generalizzata (Z) ha la seguente struttura:

$$Z = \sum_{i=1}^N \pi_i \cdot (P_n)_i \quad (2.6)$$

dove con P_n si intendono le proprietà normalizzate e π_i i cosiddetti fattori peso. Nel caso di funzione di penalizzazione, le proprietà vengono normalizzate rispetto al valore massimo, cioè per proprietà da minimizzare:

$$P_n = \frac{P}{P_{max}} \quad (2.7)$$

La normalizzazione è necessaria per eliminare le unità di misura; i fattori peso π_i infatti sono adimensionali. A differenza della costante di scambio α hanno un valore compreso tra 0 e 1 poiché la loro sommatoria è assunta uguale a 1.

Nella funzione di penalizzazione tutte le proprietà devono essere decrescenti cioè da minimizzare, nel caso una proprietà sia crescente basterà prendere il suo reciproco.

Si riporta un esempio trattato considerando 3 diverse proprietà (P):

$$Z = \pi_1 \cdot P_1 + \pi_2 \cdot P_2 + \pi_3 \cdot P_3 + \pi_4 \cdot P_4 \quad (2.8)$$

dove con π si rappresentano i pesi calcolati per ogni proprietà mentre con P si indicano le proprietà normalizzate al valore massimo. Essi sono calcolati facendo un confronto tra le proprietà a due a due: se le proprietà sono considerate di uguale importanza viene dato entrambe il numero 1, se la prima è considerata più importante della seconda i numeri che vengono dati sono rispettivamente 2 e 1, se la prima è considerata molto più importante i numeri diventano rispettivamente 3 e 1 e così via. A questo punto vengono sommati tutti i numeri dati a ogni singola proprietà e il totale viene rapportato alla somma di tutti i totali

(ottenuta sommando le somme per ogni proprietà). In questo modo vengono calcolati i coefficienti π che risultano quindi compresi tra 0 e 1 e la cui somma risulta 1. I fattori peso sono dimensionati secondo un metodo detto “*digital logic*”, esso consiste nel decidere un ordine di importanza delle proprietà e a seconda di questo ordine dare dei valori numerici confrontando le proprietà a due a due.

Di seguito viene riportato un esempio dove l’ordine di importanza tra le proprietà è: $P_1 > P_2 > P_3 = P_4$

Tab. 2.1 Calcolo dei coefficienti della funzione di penalizzazione

Proprietà				TOTALE	π
P_1	2 3 3			8	$8/19 = 0,42$
P_2	1	2 2		5	$5/19 = 0,26$
P_3	1	1	1	3	$3/19 = 0,16$
P_4	1	1	1	3	$3/19 = 0,16$

Se si considerano invece proprietà da massimizzare, la funzione viene detta “funzione di prestazione”, la funzione assume la stessa forma della funzione di penalizzazione, questa volta la normalizzazione P/P_{\max} avviene con le proprietà crescenti.

Nel capitolo successivo si userà una funzione di prestazione generalizzata per confrontare i materiali utilizzati nella pratica per costruire i conduttori elettrici aerei.

Per calcolare le proprietà di tutti i materiali utilizzati, è necessario considerare come si calcolano le proprietà dei materiali compositi, come viene riportato nel paragrafo seguente.

2.2 Selezione con i materiali compositi

I compositi sono materiali formati da due o più materiali, detti fasi. Generalmente all’interno del composito si distinguono una matrice e un rinforzo organizzati in diverse “architetture”. La matrice è di solito costituita da una fase continua omogenea con il compito di racchiudere il rinforzo e che il rinforzo abbia la corretta dispersione. Il rinforzo è la fase dispersa e in generale ha il compito di fornire resistenza meccanica e rigidità. I compositi si possono classificare in diverse categorie a seconda del rinforzo e dell’architettura: compositi fibro rinforzati (fibre lunghe, fibre corte allineate o disperse casualmente, tessuti), compositi rinforzati da particelle, compositi strutturati (pannelli sandwich, compositi segmentati, strutture trabecolari).



Fig. 2.6 Esempio di corda bimetallica per conduttori elettrici aerei

La composizione tra due o più materiali comporta l'ottenimento di nuove combinazioni di proprietà, calcolate secondo specifiche formule. Verranno di seguito trattati i ragionamenti per ricavare le proprietà più importanti nel caso di corde bimetalliche composte cioè da una parte centrale (anima) costituita dal materiale con elevata resistenza meccanica e da fili sovrapposti di materiale conduttore (mantello), come verrà spiegato in dettaglio nel capitolo successivo. Per quanto riguarda il calcolo del modulo di elasticità E del conduttore per quanto riguarda la direzione delle fibre, il ragionamento da seguire è il seguente. Ipotizzando che non sia possibile lo scorrimento relativo tra anima e mantello, lo sforzo totale risulta:

$$\sigma \cdot S = \sigma_a \cdot S_a + \sigma_m \cdot S_m \quad (2.9)$$

Dove σ , σ_a , σ_m sono rispettivamente il carico sul conduttore completo, quello sull'anima centrale e il carico sul mantello [MPa] e S , S_a e S_m la sezione del conduttore, dell'anima e del mantello (m^2).

Ricordando che

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.10)$$

dove con ε si indica la deformazione; poiché la deformazione è la stessa per anima, mantello e conduttore completo, si può scrivere:

$$\varepsilon = \varepsilon_a = \varepsilon_m \quad (2.11)$$

dove ε , ε_a e ε_m sono le deformazioni rispettivamente del conduttore completo, dell'anima e del mantello, e si può quindi riscrivere la prima espressione come:

$$E \cdot S = E_a \cdot S_a + E_m \cdot S_m \quad (2.12)$$

Da cui si ricava:

$$E = \frac{E_a \cdot S_a + E_m \cdot S_m}{S} \quad (2.13)$$

Indicando con V_a il rapporto tra sezione dell'anima e sezione totale del conduttore e con V_m il rapporto tra la sezione del mantello e quella totale del conduttore, si può infine scrivere:

$$E = E_a \cdot V_a + E_m \cdot V_m \quad (2.14)$$

che tiene quindi conto delle proprietà del singolo materiale e della frazione volumetrica.

Per quanto riguarda la densità la formula diventa

$$\rho = \rho_a \cdot V_a + \rho_m \cdot V_m \quad (2.15)$$

Per il calcolo del coefficiente di dilatazione termica (λ) il ragionamento è il seguente: suppongo un aumento di temperatura da T_1 a T_2 con sollecitazione costante. Il coefficiente di dilatazione dell'alluminio è $23 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, quello dell'acciaio è $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$; l'alluminio si dilaterà più dell'acciaio e causerà quindi un aumento di sollecitazione su di esso e quindi un aumento dello sforzo interno dell'acciaio. Poiché la sollecitazione del conduttore è costante, la maggiore sollecitazione nell'acciaio è compensata da una minore sollecitazione nell'alluminio:

$$(\lambda_m - \lambda) \cdot (T_2 - T_1) \cdot E_m \cdot S_m = (\lambda - \lambda_a) \cdot (T_2 - T_1) \cdot E_a \cdot S_a \quad (2.16)$$

Dove λ , λ_m e λ_a sono rispettivamente il coefficiente di dilatazione termica del conduttore completo, del mantello in alluminio e dell'anima in acciaio.

E quindi

$$\lambda = \frac{\lambda_m E_m S_m + \lambda_a E_a S_a}{E_m S_m + E_a S_a} \quad (2.17)$$

Come si vede dalle equazioni si ottengono nuove proprietà, modulate dalla frazione volumetrica di matrice e rinforzo; di conseguenza nei grafici bi-proprietà saranno coperte nuove aree rispetto a quelle coperte dai materiali standard.

2.3 Disaccoppiamento tra proprietà

Come accennato nel paragrafo precedente, i conduttori elettrici aerei sono composti da fili assemblati insieme, a formare delle corde. Questa “architettura” permette il disaccoppiamento tra resistenza meccanica e rigidità assiali e flessionali. La prestazione assiale è infatti garantita dalla sezione complessiva del cavo (somma delle sezioni dei fili), mentre la flessibilità è garantita proprio dalla geometria a “trefolo”.

Per la rigidità flessionale vale infatti il ragionamento di seguito riportato: poiché la rigidità flessionale, per una lunghezza data, dipende dal prodotto EJ (dove E è il modulo di Young e J è il momento di inerzia), per uno stesso materiale l'unico parametro che può essere modificato per variare la rigidità risulta essere il momento d'inerzia J .

Si suppone di avere la stessa sezione di una trave standard (lato b), formata da n fili di raggio r (fig. 2.4)

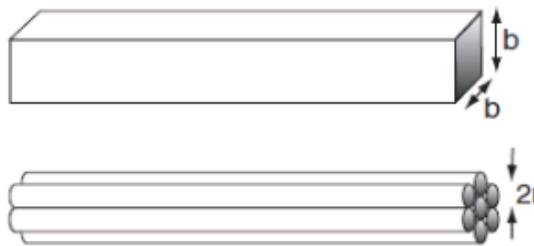


Fig. 2.4 Schematizzazione di trave monolitica e struttura a trefolo

si ottiene:

$$A = b^2 = n \cdot \pi \cdot r^2 \quad (2.18)$$

il momento d'inerzia per la struttura a trefolo diventa quindi

$$J = \frac{n \cdot \pi \cdot r^4}{4} = n \cdot \pi \cdot \frac{b^4}{4 \cdot n^2 \cdot \pi^2} = \frac{b^4}{4 \cdot \pi \cdot n} \quad (2.19)$$

e poiché il momento di inerzia per una trave è

$$J_0 = \frac{b^4}{12} \quad (2.20)$$

il fattore di forma diventa

$$\Phi = \frac{J}{J_0} = \frac{3}{\pi \cdot n} \approx \frac{1}{n} \quad (2.21)$$

Ragionamento analogo vale per la resistenza dove a parità di forza applicata, punto di applicazione della forza e materiale, l'unico fattore che resta da poter modulare è sempre il momento di inerzia.

Capitolo 3

Selezione avanzata

In questo capitolo, dopo una prima descrizione dei conduttori elettrici aerei e delle proprietà richieste ai materiali che li costituiscono, vengono confrontate le soluzioni migliori per quanto riguarda i materiali, continuando il ragionamento riportato nel capitolo precedente.

3.1 Conduttori elettrici aerei

I conduttori elettrici aerei sono costituiti da fili, vedi Fig. 3.1, realizzati in diversi materiali a seconda delle specifiche caratteristiche richieste nelle diverse applicazioni. Le proprietà fondamentali che i materiali devono soddisfare sono un'elevata conducibilità elettrica unita a resistenza meccanica; inoltre, devono avere un'elevata resistenza a corrosione e dilatazioni termiche contenute, soprattutto se si tratta di conduttori composti da più materiali. I conduttori elettrici aerei infatti, possono essere costituiti non solo da un singolo materiale (corde monometalliche), ma, come spiegato in precedenza, possono anche essere dei compositi dove la funzione di fornire una sufficiente resistenza meccanica viene svolta da un certo materiale, e, quella di condurre l'elettricità, da un altro (corde bimetalliche). Oltre alle caratteristiche tecniche, l'altro parametro fondamentale da considerare è rappresentato dal costo; data infatti l'enorme estensione delle linee elettriche, risulta indispensabile un costo contenuto. La struttura generale dei conduttori aerei è riportata nella figura seguente; più fili vanno a comporre una corda caratterizzata da un certo passo. I diametri dei fili possono essere diversi a seconda delle applicazioni.



Fig. 3.1 Struttura di una corda di conduttore aereo

Le corde monometalliche sono costituite da fili tutti dello stesso diametro; la corda è realizzata avvolgendo sul filo centrale un primo strato di 6 fili, un secondo di 12 avvolti in senso contrario, poi di 18 e così via, a multipli di 6. Gli strati presentano un senso di cordatura alternato; questo per evitare torsioni nella corda e per mantenere serrati i fili stessi. Le norme prescrivono che il senso di cordatura dello strato più esterno sia destro (tale che la sagoma del conduttore disegni l'asta mediana della lettera Z).

Le corde bimetalliche sono costituite da una corda portante (di materiale con elevate caratteristiche meccaniche) e da un mantello (di materiale conduttore) cordato con un numero di fili per strato multiplo di 6.

In Europa le tecnologie utilizzate sono diverse. Se infatti in Italia la maggior parte delle corde è costituita da anima in acciaio e parte esterna in alluminio, in Francia e nei Paesi del Nord Europa si predilige un conduttore costituito completamente da lega di alluminio. Di seguito si presentano diversi tipi di conduttori e le loro principali caratteristiche.

Conduttori di alluminio: sono composti da uno o più strati di alluminio della serie 1000 sottoposto a incrudimento (1350-H19), la sua conducibilità elettrica arriva a 61% IACS (International Annealed Copper Standard) ma a causa della scarsa resistenza meccanica viene utilizzato solo per brevi distanze. È caratterizzato da elevata resistenza a corrosione. La norma a cui sono sottoposti è la CEI IEC (60)889 che riporta una conducibilità elettrica minima di 28,264 nΩ m e i seguenti carichi di rottura a seconda dei diametri del filo:

Tab. 3.1 Carichi minimi di rottura per i fili di alluminio

Diametro nominale		Carico di rottura minimo (MPa)
Superiore a (mm)	Inferiore a (limite compreso) (mm)	
-	1,25	200
1,25	1,50	195
1,50	1,75	190
1,75	2,00	185
2,00	2,25	180
2,25	2,50	175
2,50	3,00	170
3,00	3,50	165
3,50	5,00	160

Conduttori di rame e leghe di rame: sono costituiti da fili di rame crudo o ricotto o leghe di rame e sono regolarizzati dalla norma CEI 7-1. Per i fili in rame crudo il carico di rottura non deve essere inferiore ai valori riportati nella tabella seguente:

Tab. 3.2 Carichi minimi di rottura per i fili in rame crudo

Diametro teorico del filo crudo (mm)	Carico minimo di rottura (daN/mm²)
da 1 fino a 2	43,2
oltre 2 fino a 3	42,2
oltre 3 fino a 4	40,2
oltre 4 fino a 6	39,2
oltre 6 fino a 8	37,2

Per i fili di rame ricotto il carico di rottura non deve essere inferiore a 21,6 daN/mm².

Hanno ottima conducibilità elettrica, per il rame crudo è infatti consentita una conducibilità non minore rispetto a 97% IACS (IACS cioè la conducibilità elettrica del rame ricotto preso come standard corrisponde a $59,6 \times 10^6$ S/m). Il problema principale è l'elevata densità (8900 kg/m³) che può causare problemi soprattutto se si tratta di conduttori di dimensioni elevate.

Conduttori ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*): con questo nome vengono designati i conduttori costituiti da anima in acciaio zincato (10-15% della sezione) e parte esterna in alluminio (1350-H19). Il rivestimento di zinco della parte in acciaio è necessaria per prevenire la corrosione galvanica. L'anima è la parte che dà la resistenza meccanica, mentre la parte in alluminio è quella che garantisce l'elevata conducibilità elettrica. Questi conduttori sono quelli che garantiscono le migliori caratteristiche meccaniche e la maggiore affidabilità grazie alla presenza dell'acciaio che assicura ampi margini di sicurezza. I principali svantaggi sono la limitata resistenza a corrosione e la limitata temperatura massima di utilizzo (intorno agli 80 °C), questo perché l'alluminio è utilizzato allo stato incrudito (in questo modo contribuisce alla resistenza meccanica) e a temperature più elevate avviene la ricottura.

Conduttori ACSS (*Aluminium Conductor Steel Supported*): è un'evoluzione dei precedenti, in quanto tutta la resistenza meccanica è fornita dall'acciaio (che viene ricoperto da una lega Al-Zn), l'alluminio è utilizzato allo stato ricotto. Questo permette di avere una maggiore conducibilità elettrica e di raggiungere una temperatura di utilizzo anche fino a 210-250 °C. Uno dei principali svantaggi è che poiché la resistenza meccanica è data solo dall'acciaio, è necessaria una sezione maggiore; per risolvere questo problema sono utilizzate diverse

geometrie rispetto a quella dei fili a geometria circolare, quali ad esempio quella trapezoidale, per aumentare il rapporto di superficie occupata dall'acciaio. Questo si converte generalmente in un costo più elevato.

Conduttori AAAC (*All Aluminium Alloy Conductor*): i conduttori di questo tipo sono costituiti completamente da lega di alluminio. La lega impiegata è una lega della serie 6000 (Al-Mg-Si), in particolare la 6101. Hanno una buona resistenza a corrosione ma la loro massima temperatura di utilizzo arriva a 80 °C. Questi conduttori sono oggetto del presente lavoro; la lega di alluminio utilizzata verrà trattata nel Capitolo 2. Per le caratteristiche di questi conduttori ci si rifà alla norma CEI EN 50183, dove sono definite varie classi con le proprietà richieste.

Tab. 3.3 Caratteristiche conduttori in lega di alluminio secondo la norma CEI EN 50183

Tipo	Conduttività nominale	Diametro nominale (mm)		Resistenza minima alla trazione (N/mm ²)		Allungamento massimo dopo la rottura su 250 mm	Resistività massima (nΩ m)	
		da	fino a e incluso	dei singoli fili	media di un lotto		%	dei singoli fili
AL 2	52,5	1,50	3,50	325	-	3,0	32,84	-
		3,50	5,00	315	-			
AL 3	53,0	1,50	5,00	295	-	3,5	32,53	-
		3,50	5,00	315	330			
AL 4	52,9	1,50	3,50	325	342	3,0	32,9	32,6
		3,50	5,00	315	330			
AL 5	55,25	1,50	5,00	295	-	3,5	32,2	31,2
		3,50	5,00	314	-			
AL 6	55,6	1,50	3,50	314	-	3,5	31,5	31,0
		3,50	5,00	304	-			
AL 7	57,5	1,50	2,50	300	-	3,0	30,5	30,0
		2,50	3,00	290	-			
		3,00	3,50	275	-	3,0	30,5	30,0
		3,50	4,00	265	-			
		4,00	5,00	255	-	3,0	30,5	30,0

Conduttori ACAR (*Aluminium Conductor Alloy Reinforced*): questi conduttori sono

costituiti da alluminio puro all'esterno e lega di alluminio all'interno che conferisce le caratteristiche meccaniche.

Conduttori AACSR (*Aluminium Alloy Conductor Steel Reinforced*): questi conduttori sono caratterizzati da un'anima in acciaio e da una parte esterna costituita da lega di alluminio. Avranno quindi caratteristiche meccaniche molto elevate ma una conducibilità tra le più basse (poiché la conducibilità elettrica della lega di alluminio è minore di quella dell'alluminio puro) rispetto ai conduttori descritti finora.

Conduttori GAP: sono costituiti da un'anima in acciaio e da una parte esterna di lega di alluminio Al-Zr ad alta resistenza termica; tra di essi però è posto uno strato di grasso che ne impedisce lo strisciamento reciproco. Rispetto al conduttore ACSR si ha un minore incurvamento, una maggiore capacità di corrente a parità di superficie, buone proprietà meccaniche e buone temperature di massimo utilizzo (180-210 °C). I principali svantaggi sono però la difficile messa in opera per la possibile perdita di grasso e il costo elevato (7-8 k€/km).

Conduttori con INVAR: l'anima è costituita da una lega Fe-Ni (INVAR) con funzione di rinforzo e la parte esterna da una lega Al-Zr ad alta resistenza termica. L'anima è rivestita di alluminio per aumentare la resistenza a corrosione. I vantaggi sono che l'INVAR ha un coefficiente di espansione termica molto basso e quindi l'incurvamento dei cavi risulta ridotto, inoltre le proprietà meccaniche sono mantenute fino alla temperatura di 200 °C. I costi però sono superiori rispetto ai conduttori ACSR.

Conduttori ACCC: sono costituiti da un'anima in composito ibrido di fibre di carbonio e vetro su cui sono avvolti fili di alluminio ricotto di forma trapezoidale.

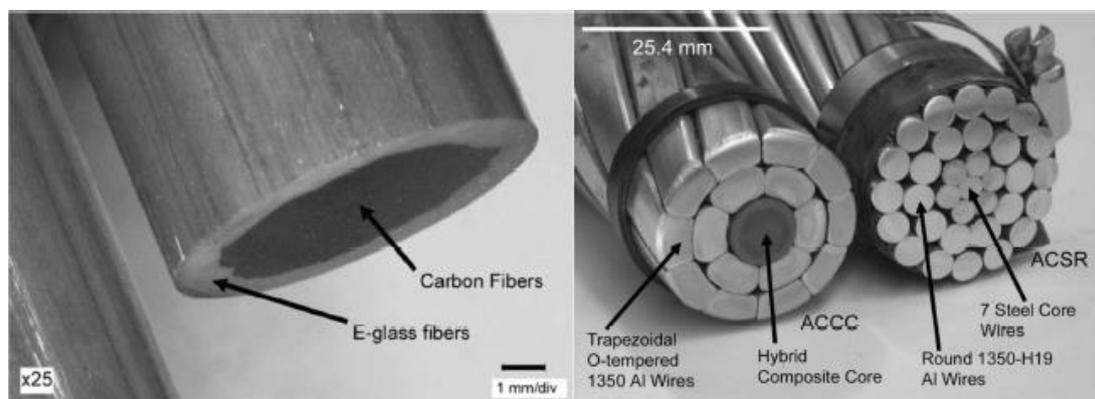


Fig. 3.2 Sezione cavo in fibra di carbonio

La resistenza meccanica è data dal cuore centrale che è costituito da una parte centrale in fibra di carbonio e uno strato esterno di fibre di vetro; quest'ultimo ha lo scopo di prevenire la corrosione galvanica tra carbonio e alluminio e di aumentare leggermente flessibilità e resistenza a compressione. Il carbonio oltre alle elevate proprietà meccaniche, grazie alle quali è possibile aumentare la quantità di alluminio con conseguente maggiore capacità di corrente, è anche caratterizzato da un basso peso e bassissimo coefficiente di espansione termica, che porta a un minore incurvamento. La massima temperatura di utilizzo è 150-180 °C. Le principali criticità da tenere in considerazione sono la corrosione galvanica tra carbonio e alluminio, la fragilità delle fibre di carbonio nell'accoppiamento conduttore-traliccio, poichè le fibre di carbonio risultano fragili a compressione e taglio. Per questo, come accennato, si rende necessario l'utilizzo di uno strato intermedio di fibre di vetro. Un'ulteriore criticità è che la matrice epossidica che contiene le fibre di carbonio resiste fino a temperature relativamente basse (come detto intorno ai 150 °C). Nella seguente tabella si riporta un confronto tra un conduttore con anima in acciaio e uno con anima in fibra di carbonio. I vantaggi sono evidenti per quanto riguarda il coefficiente di dilatazione termica, la resistenza al creep e la temperatura massima di esercizio. La temperatura di inizio degrado è però bassa per il conduttore AAAC.

Tab. 3.5 Confronto tra un conduttore con anima di acciaio e uno con anima di carbonio

Proprietà	acciaio	ACCC core	Range utile
Modulo Elastico tensionale (GPa)	210	50-250	100-250
Carico di rottura (GPa)	1,5-2,5	2-2,5	>2,0
Allungamento a rottura (%)	1-3	1,5	>1,5
Coeff. dilatazione termica (10^{-6} /°C)	11,5	2,77	0-10
Creep rate 125 °C/20% UTS (%/anno)	$4 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$< 1 \cdot 10^{-3}$
Allungamento finale per creep (%)	0,16	0,004	< 0,04
Temperatura di inizio degrado (°C)	>>600	140	>150
Resistenza agli agenti atmosferici	Ossidazione	Ossidazione	-
Temperatura massima di esercizio (°C)	80	150-180	80-150
Assorbimento d'acqua (%)	-	1	< 1

Dopo una descrizione generale dei conduttori aerei è interessante continuare con un confronto accurato tra i vari tipi, considerando tutte le proprietà ritenute importanti.

3.2 Selezione dei materiali ottimali

Riprendendo il ragionamento del paragrafo precedente, la prima proprietà da considerare è la conducibilità elettrica, la seconda è il carico di rottura (UTS); un'ottima conducibilità deve essere infatti accompagnata da un sufficiente UTS per permettere al cavo di resistere al pretensionamento iniziale e supportare il proprio peso durante la vita in esercizio. Per fare un confronto tra i conduttori elettrici aerei si considerano le loro proprietà e in particolare le minime proprietà richieste per queste applicazioni, riportate nelle norme. I fili che compongono le corde sono infatti ottenuti dopo una lavorazione meccanica e un eventuale trattamento termico; risultano quindi avere proprietà diverse rispetto a quella del materiale base dati i fenomeni di incrudimento e indurimento per precipitazione per quanto riguarda le leghe di alluminio. Nel grafico seguente si riportano i materiali utilizzati per i conduttori elettrici aerei, in particolare si confrontano le loro proprietà (carico di rottura e resistività elettrica) con quelle dei metalli e delle fibre di carbonio, visti nel capitolo precedente essere i più vantaggiosi.

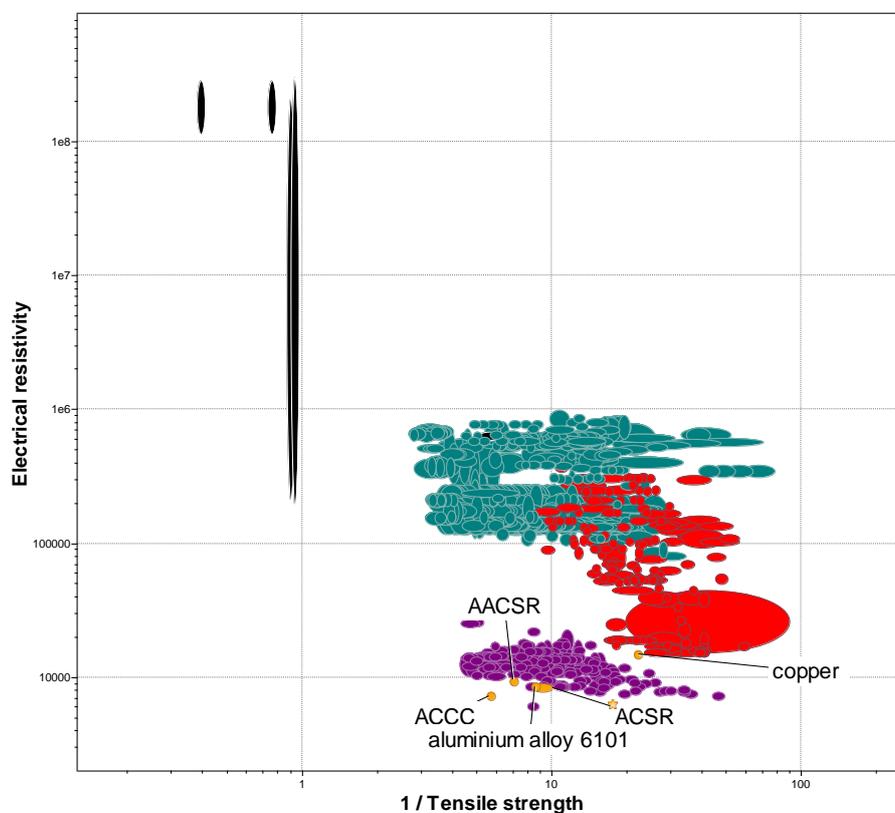


Fig. 3.3 Confronto tra i materiali metallici dal grafico di fig. 2.2 e i materiali effettivamente utilizzati per conduttori elettrici aerei.

Si vede quindi che i materiali migliori sono il rame che presenta la minore resistività elettrica, seguito dal composito alluminio/carbonio che ha una resistività elettrica vicina a quella degli altri materiali utilizzati ma risulta spostato a sinistra e quindi presenta un carico di rottura maggiore.

I risultati cambiano però se vengono considerate le proprietà ottenute considerando la densità, come rappresentato nel grafico sottostante.

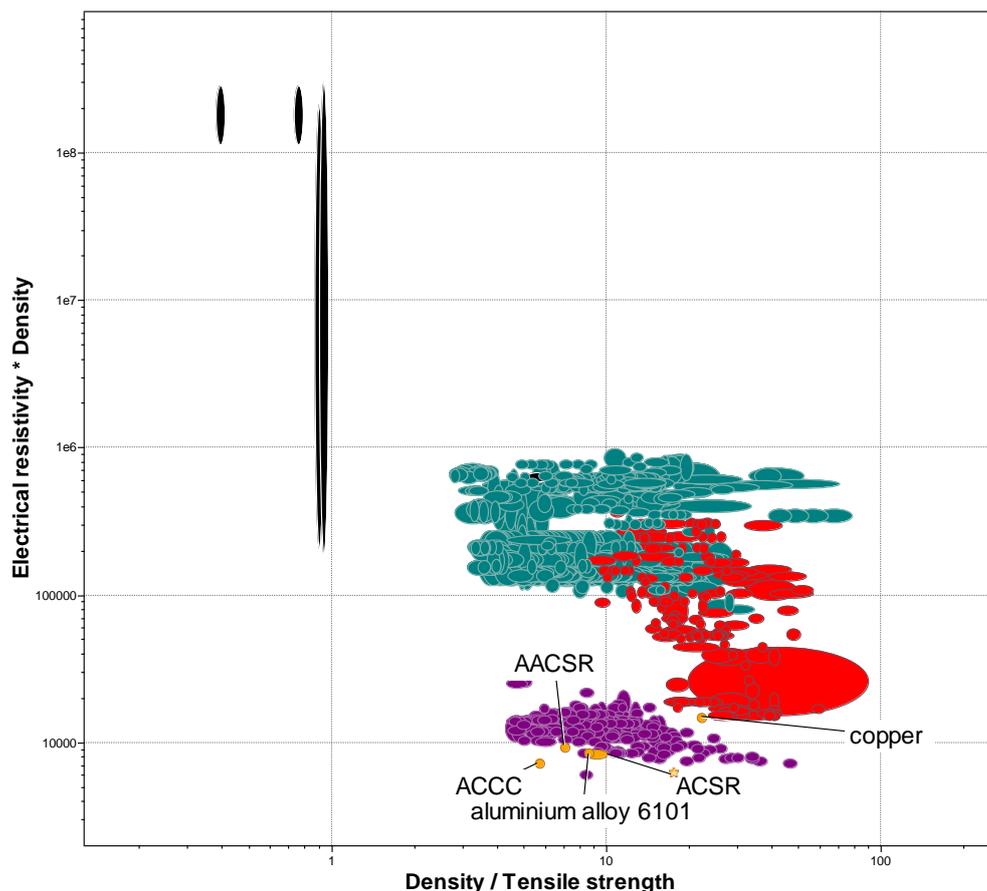


Fig. 3.4 Correzione del grafico in fig. 3.3 considerando la densità dei materiali

Si vede quindi come il composito in fibra di carbonio dia le migliori prestazioni seguito da ACSR e lega di alluminio 6101 e ACSR. Il rame risulta in questo caso peggiorativo rispetto a tutti gli altri materiali utilizzati per i conduttori elettrici aerei avendo una conducibilità specifica maggiore di quella degli altri materiali. Nel caso si voglia avere un elevato carico di rottura il composito ACSR risulta superato solamente dal composito in fibra di carbonio. Per visualizzare più chiaramente i risultati si riportano di seguito due grafici di compromesso. Si considera prima la conducibilità specifica come proprietà più importante dando un valore al fattore α elevato, mentre in seguito si dà più importanza alla caratteristica meccanica, prendendo un valore di α basso.

Riprendendo la funzione di penalizzazione (Z) dal capitolo precedente, essa risulta:

$$Z = \frac{\rho}{\sigma_R} + \alpha \cdot \rho \cdot \rho_{el} \quad (3.1)$$

dove con ρ è indicata la densità, con σ_R il carico di rottura e con ρ_{el} la resistività elettrica.

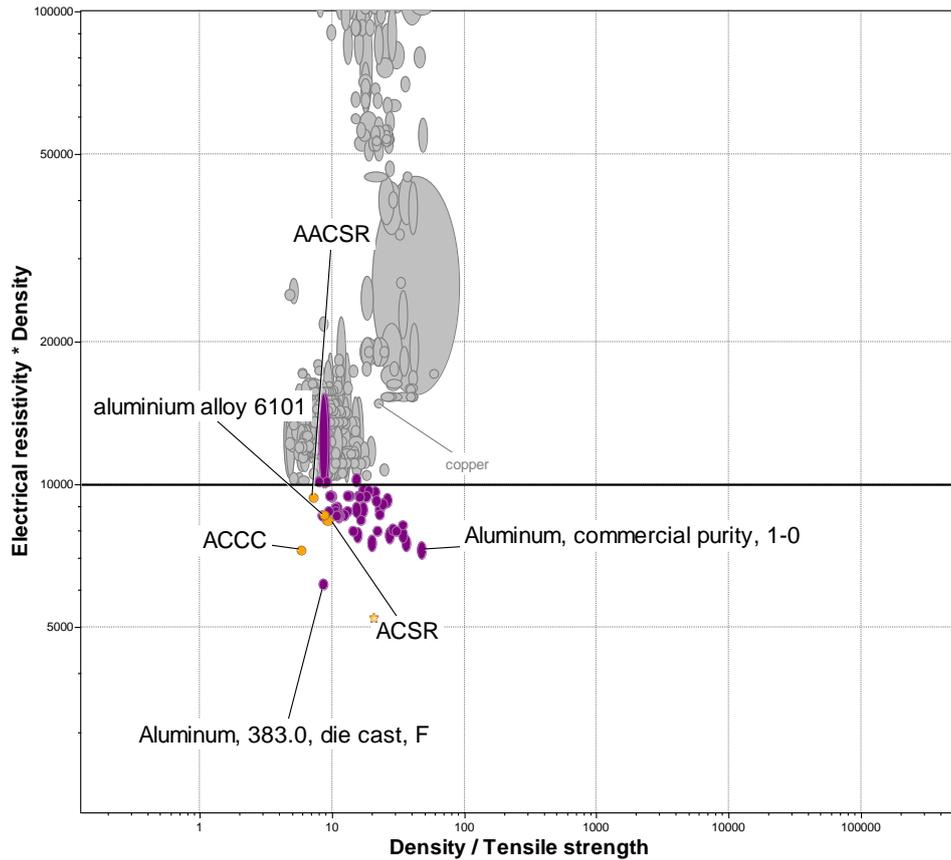


Fig. 3.5 Grafico di compromesso con funzione di penalizzazione, α elevato (conducibilità elettrica specifica più importante)

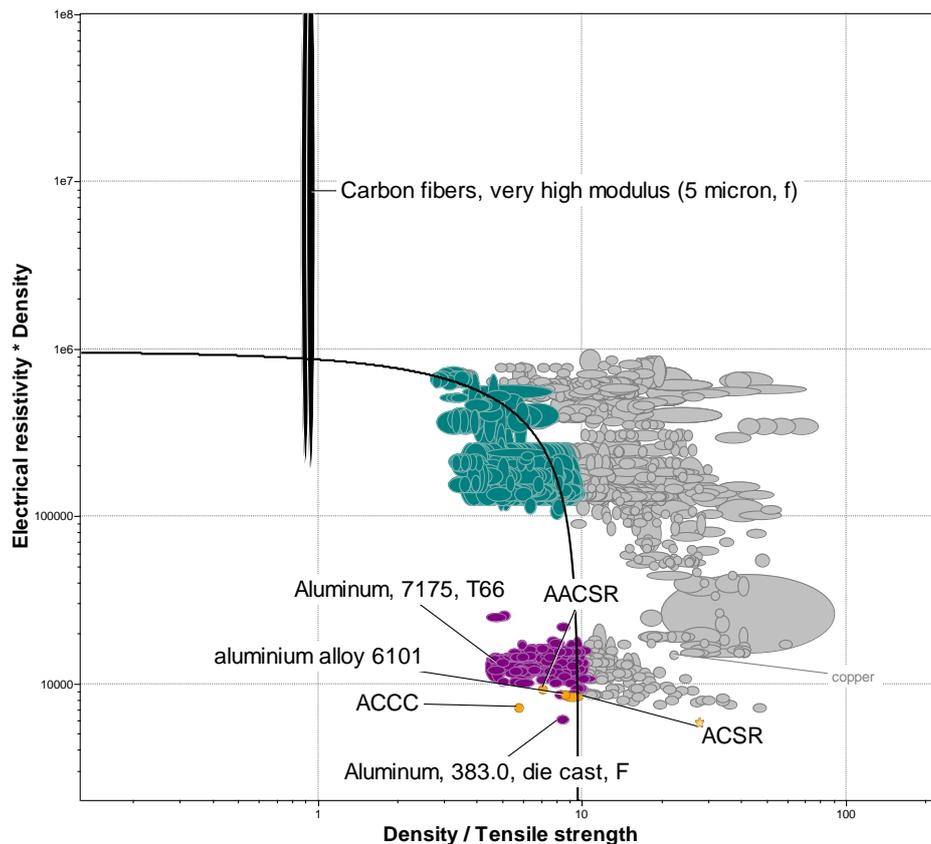


Fig. 3.6 Grafico di compromesso con funzione di penalizzazione, a basso (carico di rottura specifico più importante)

A questo punto si vuole procedere con il confronto, considerando le varie proprietà importanti e attribuendo un certo peso a ognuna di esse per costruire una funzione di prestazione. Le proprietà considerate sono resistività elettrica (ρ_{el}), resistenza meccanica (UTS), densità (ρ), modulo elastico (E), coefficiente di dilatazione termica lineare (λ) e costo (c). La funzione di prestazione, dove tutti i termini devono essere massimizzati per ottenere il materiale migliore, è la seguente:

$$Z = \pi_1 * \left(\frac{1}{\rho_{el}}\right)_{norm} + \pi_2 * UTS_{norm} + \pi_3 * \rho_{norm} + \pi_4 * E_{norm} + \pi_5 * \lambda_{norm} + \pi_6 * c_{norm} \quad (3.2)$$

I materiali considerati per il confronto sono: alluminio, lega di alluminio (AAAC), rame e i compositi alluminio/acciaio (ACSR) e lega di alluminio/acciaio (AACSR). Non viene considerato il composito con fibre di carbonio perché si preferisce fare un confronto con i materiali utilizzati attualmente; i compositi alluminio/carbonio presentano caratteristiche decisamente buone, come mostrato nei grafici precedenti, ma non è possibile avere un valore preciso del costo dato che sono ancora in fase di sperimentazione. Qui non

viene considerato il costo di fabbricazione, ma solo quello che deriva dal costo dei materiali; si ipotizza infatti che le tecnologie di produzione siano ottimizzate.

Tabella 3.6 Proprietà dei materiali conduttori scelti per il confronto

Materiale	σ_{el} (nS m)	UTS (MPa)	ρ (kg/m ³)	costo (€/dm ³)	E (GPa)	λ (μ strain/°C)
Al	0,036	160	2600	5,2	65	23,0
Lega alluminio	0,031	315	2700	6,75	71,3	24,0
Cu	0,060	402	8900	48,95	122,5	17,2
ACSR	0,043	361	3400	6,52	89,5	19,3
AACSR	0,037	493	3500	8,16	90,35	20,0

A questo punto, per calcolare la funzione di prestazione, è necessario calcolare i fattori peso (indicati con π). L'ordine di importanza considerato è: $\sigma_{el} > \text{UTS}$, ρ , costo $> E$, λ .

Tabella 3.7 Calcolo dei fattori peso della funzione di prestazione

						TOTALE	π
σ_{el}	2 2 2 3 3					12	0,28
UTS	1	1 1 2 2				7	0,16
ρ	1	1	1 2 2			7	0,16
costo	1	1	1	2 2		7	0,16
E	1	1	1	1	1	5	0,12
λ	1	1	1	1	1	5	0,12

I valori della funzione di prestazione che ne risultano sono i seguenti:

Tabella 3.8 Funzione di prestazione

Materiale	Z
alluminio	0,701318
lega di alluminio	0,682167
rame	0,714271
ACSR	0,763399
AACSR	0,746322

I materiali che risultano più vantaggiosi, quindi per i quali il valore della funzione di prestazione è maggiore, sono i conduttori ACSR e AACSR. Come si vede però, non si ha una netta differenza tra i valori ottenuti per i diversi materiali; in particolare con questo ragionamento non si tiene in dovuta considerazione la differenza di densità. Come già fatto con l'analisi grafica si fa un confronto utilizzando le proprietà specifiche. Le proprietà considerate in questo caso sono: UTS/ρ , σ_{el}/ρ , E , costo ($\text{€}/\text{dm}^3$), λ . L'ordine di importanza è $\sigma_{el}/\rho > UTS/\rho$, costo $> E$, λ .

Tabella 3.9 Calcolo dei fattori peso della funzione di prestazione

					TOTALE	π
σ_{el}/ρ	2 2 3 3				10	0,333
UTS/ρ	1	1 2 2			6	0,20
costo	1	1	2 2		6	0,20
E	1	1	1	1	4	0,133
λ	1	1	1	1	4	0,133

Tabella 3.10 Funzione di prestazione considerando conducibilità elettrica e carico di rottura specifici

Materiale	Z
alluminio	0,795195
lega di alluminio	0,766484
rame	0,510148
ACSR	0,825999
AACSR	0,791911

Si vede in questo caso il netto vantaggio nell'utilizzare alluminio e i conduttori ACSR e AACSR invece che rame.

Per quanto riguarda l'utilizzo delle leghe di alluminio, va sottolineato che hanno una resistenza a corrosione, proprietà non considerata nell'analisi precedente, maggiore perché si tratta di un corda costituita da un solo materiale e non da due materiali diversi. Inoltre le leghe di alluminio risultano molto più versatili dato che le loro proprietà di conducibilità elettrica e carico di rottura sono modulabili attraverso il trattamento termico, come verrà spiegato nel capitolo seguente. Proprio a questo scopo, come detto in precedenza, viene svolto il presente lavoro.

Capitolo 4

Modulazione delle proprietà delle leghe di alluminio della serie 6000 e pratica industriale

In questo capitolo, dopo una breve introduzione sull'alluminio e le sue leghe che riporta proprietà e caratteristiche principali, viene riportata la teoria dell'invecchiamento artificiale e la pratica industriale che permette di ottenere i conduttori attualmente utilizzati

4.1 L' alluminio e le sue leghe

L'alluminio è un metallo leggero, duttile, con buona conducibilità elettrica e termica, con ottima resistenza alla corrosione e con temperatura di fusione relativamente bassa. Viene ricavato dalla bauxite, un ossido/idrossido misto dalla composizione molto variabile a seconda dei giacimenti, può contenere Al_2O_3 (40-60%), H_2O (12-30%), SiO_2 (1-15%), Fe_2O_3 (7÷30%), e altri composti quali ossidi di titanio, vanadio, fosforo, o fluoruri. Viene prodotto con un procedimento che comprende due stadi: il primo permette la produzione di allumina dalla bauxite (processo Bayer) mentre il secondo prevede l'elettrolisi di allumina fusa in criolite (processo di Hall-Héroult). Le principali proprietà dell'alluminio sono riportate nella tabella seguente:

Tab. 4.1 Proprietà dell'alluminio

Densità (kg/m^3)	2600
Punto di fusione ($^{\circ}\text{C}$)	660
Modulo elastico (GPa)	65
Carico di snervamento (MPa)	Purezza 99,99%: 10
	Purezza 99,80%: 20
	Purezza 99,60%: 30
Carico di rottura a trazione (MPa)	Purezza 99,99%: 45
	Purezza 99,80%: 60
	Purezza 99,60%: 70
Conducibilità termica ($\text{W}/(\text{m K})$)	237
Conducibilità elettrica (S/m)	$37,7 \times 10^6$ (62% IACS)
Coefficiente di espansione termica lineare ($1/^{\circ}\text{C}$)	23×10^6

Date le scarse proprietà meccaniche dell'alluminio puro, vengono aggiunti altri elementi come alliganti; a seconda del tipo di alligante le proprietà della lega così formata variano di molto sia rispetto all'alluminio puro, che rispetto alle altre leghe. I principali elementi alliganti sono: Cu, Si, Zn, Mg e Mn.

Il miglioramento delle caratteristiche meccaniche che si ottiene aggiungendo elementi alliganti all'alluminio causa però una diminuzione di conducibilità elettrica. Questo perché la mobilità degli elettroni è impedita dalle particelle estranee nella matrice.

A seconda della percentuale di altri elementi, le leghe di alluminio si dividono in leghe da trasformazione plastica e da fonderia.

Per quanto riguarda le leghe da trasformazione plastica si individuano le seguenti categorie (dette *serie*):

Serie 1000 (Al 99%-99,99%): l'alluminio ha basse caratteristiche meccaniche (carico di rottura tra 100 e 150 MPa) e presenta la possibilità di essere indurito per incrudimento. Altra importante caratteristica è l'ottima resistenza a corrosione che la rende adatta ad usi alimentari e l'elevata conducibilità elettrica (62% IACS, IACS sta per "International Annealed Copper Standard" quindi 100% IACS corrisponde alla conducibilità elettrica del rame), sono inoltre estrudibili a ponte;

Serie 2000: (Al-Cu, Al-Cu-Pb, Al-Cu-Bi): sono leghe trattabili termicamente, in questo modo raggiungono caratteristiche meccaniche abbastanza elevate (300-480 MPa) e si possono trovare nello stato T4 (trattamento di solubilizzazione seguito da invecchiamento naturale), T6 (solubilizzazione e invecchiamento artificiale). Presentano buona elasticità e resilienza. A causa della loro scarsa resistenza a corrosione non sono adatte all'uso alimentare. Non sono estrudibili a ponte né anodizzabili. Presentano una lavorabilità ottima ma non sono saldabili;

Serie 3000 (Al-Mn): presentano caratteristiche meccaniche basse (carico di rottura tra 150 e 250 MPa) e sono leghe da incrudimento, sono estrudibili a ponte e adatte all'uso alimentare grazie alla loro resistenza alla corrosione;

Serie 4000 (Al-Si): sono leghe da tempra (trattabili termicamente come le 2000) e arrivano a buone caratteristiche meccaniche (carico di rottura tra 300 e 400 MPa), hanno buona elasticità e resilienza ma non sono estrudibili a ponte;

Serie 5000 (Al-Mg): sono leghe da incrudimento con caratteristiche meccaniche medie (150-300 MPa), sono resistenti a corrosione quindi adatte all'uso alimentare, non sono estrudibili a ponte ma sono saldabili e possono avere lavorabilità da discreta a ottima;

Serie 6000 (Al-Mg-Si): sono leghe trattabili termicamente e arrivano a carichi di rottura di 200-300 MPa, sono estrudibili a ponte, saldabili, con lavorabilità da discreta a ottima e resistenti a corrosione quindi adatte all'uso alimentare;

Serie 7000 (Al-Zn e Al-Zn-Cu): le leghe Al-Zn sono trattabili termicamente e hanno carichi di rottura tra 320 e 400 MPa, hanno lavorabilità ottima, sono saldabili, anodizzabili ed estrudibili a ponte ma sono poco resistenti a corrosione; le leghe Al-Zn-Cu sono trattabili

termicamente e presentano elevate caratteristiche meccaniche (carico di rottura tra 480 e 700 MPa), hanno lavorabilità ottima ma non sono saldabili, inoltre non sono facilmente anodizzabili.

Con leghe trattabili termicamente si intende che possono essere indurite mediante invecchiamento (naturale o artificiale) come viene spiegato nel seguente paragrafo.

4.2 Indurimento per precipitazione

Di seguito sono presentate le teorie alla base dell'invecchiamento per precipitazione a cui sono soggette le leghe di alluminio e la teoria che spiega la resistività elettrica.

4.2.1 Teoria dell'indurimento per precipitazione

Perché sia possibile la precipitazione, le particelle di soluto in soluzione devono superare il limite di solubilità alle specifiche temperature di invecchiamento. In particolare, la forza motrice aumenta all'aumentare della sovrassaturazione e quindi al diminuire della temperatura; c'è però da tenere conto che al diminuire della temperatura diminuisce la diffusione degli atomi di soluto.

Le particelle di soluto si trovano in soluzione grazie ai trattamenti di solubilizzazione, dove il materiale viene portato a una temperatura di 550 °C per permettere la solubilizzazione dei precipitati, e successiva tempra, dove il materiale viene raffreddato rapidamente per mantenere la microstruttura ottenuta anche a temperatura ambiente. La maggior parte delle leghe presentano il fenomeno chiamato "invecchiamento naturale": la precipitazione avviene mantenendo la lega a temperatura ambiente. La portata del fenomeno dipende dalla lega; può iniziare immediatamente o dopo un certo tempo e si può raggiungere una condizione di stabilità in pochi giorni come in alcuni anni. Portando invece le leghe a una temperatura maggiore rispetto alla temperatura ambiente, si accelera il processo e viene aumentato l'indurimento, questo processo è chiamato "invecchiamento artificiale" o "indurimento per precipitazione".

Se si considera per esempio la lega 2014 allo stato T4 per differenti trattamenti termici si vedono i seguenti comportamenti⁽¹⁾:

- a temperatura ambiente (invecchiamento naturale) avviene un continuo aumento di carico a rottura fino ad arrivare a un plateau
- il trattamento a temperature che competono all'invecchiamento artificiale mostra un andamento diverso, cioè un incremento iniziale, il raggiungimento del massimo e un successivo decremento. Quando le proprietà meccaniche iniziano a diminuire durante il trattamento, si parla di sovra invecchiamento.

Questi comportamenti sono verificabili per tutte le leghe di alluminio induribili per precipitazione.

Per quanto riguarda la microstruttura, se prima del trattamento di invecchiamento gli elementi in lega si trovano per lo più solubilizzati all'interno della matrice di alluminio, durante le prime fasi del trattamento (cioè quando si ha un aumento delle proprietà meccaniche) gli atomi di soluto iniziano a ridistribuirsi all'interno del reticolo a formare le cosiddette zone di Guinier-Preston, particolarmente ricche in soluto. Esse causano una distorsione dei piani reticolari sia all'interno di queste zone che nei piani atomici vicini della matrice. All'aumentare del numero e della densità di queste zone, aumenta ulteriormente la distorsione del reticolo; l'indurimento e l'aumento del carico avvengono a causa dell'impedimento al movimento delle dislocazioni dato da queste distorsioni e dalle irregolarità nel reticolo cristallino. Al procedere dell'invecchiamento queste zone sono convertite o rimpiazzate da fasi con una propria struttura cristallina, diversa da quella della soluzione solida e diversa anche dalla struttura di equilibrio, queste strutture sono indicate con "precipitati di transizione". Nella maggior parte delle leghe, hanno orientazioni cristallografiche che sono parzialmente in comune con la soluzione solida in modo che le fasi rimangano coerenti su certi piani attraverso una deformazione elastica locale della matrice. A questo stato l'effetto di indurimento è dato da un doppio ostacolo al movimento delle dislocazioni: il primo è dovuto alla distorsione del reticolo cristallino e il secondo alle particelle di precipitato. Al procedere dell'invecchiamento avviene una crescita dei precipitati, finché il legame interfacciale tra matrice e precipitato viene rotto (distorsione troppo elevata) e di conseguenza avviene una crescente perdita di coerenza. Si formano così le strutture di equilibrio (precipitati di equilibrio) e con la perdita di coerenza diminuisce anche l'effetto di rafforzamento. Successivamente i precipitati di equilibrio si accrescono e a questo corrisponde un'ulteriore diminuzione delle caratteristiche meccaniche.

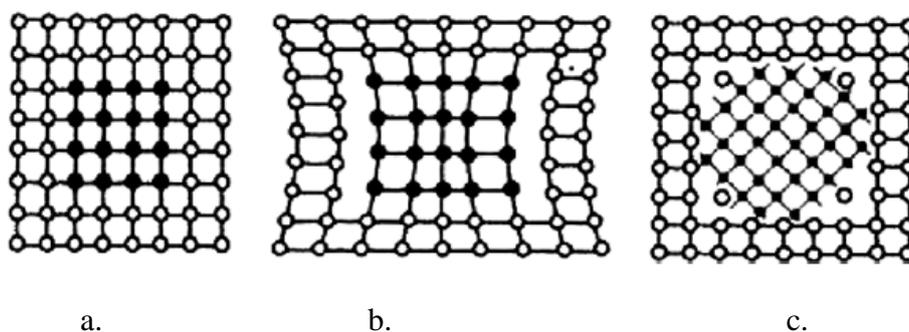


Fig. 4.2. Rappresentazione della precipitazione al procedere dell'invecchiamento: a. Precipitazione coerente, b. precipitazione semi-coerente, c. precipitazione incoerente (sopra invecchiamento)⁽²⁾

Un corretto trattamento di tempra risulta fondamentale. Se la tempra non è sufficientemente rapida e quindi tale da mantenere gli atomi di soluto in soluzione, si formano precipitati intergranulari. Queste particelle hanno un effetto decisamente minore nel rafforzamento; una velocità di tempra sufficientemente rapida permette quindi di avere una precipitazione più uniforme e di conseguenza una maggiore quantità di siti che danno indurimento allo stesso punto del trattamento di invecchiamento. Altro importante motivo per cui la velocità di tempra è importante è la resistenza alla corrosione, soprattutto se il materiale è sottoposto a sforzi di trazione. Accanto ai bordi grano si sviluppa infatti una zona in cui si ha una carenza di precipitati, rispetto al corpo del grano; ci sono quindi le basi perché avvenga la corrosione intergranulare detta “stress corrosion cracking”.

4.2.2 Precipitazione nelle leghe 6000 (Al-Mg-Si)

La sequenza di precipitazione è la seguente:



dove con SS si indica la soluzione solida, con GP la formazione delle zone di Guinier-Preston, con β' si designano i cosiddetti precipitati di non equilibrio e infine con β si indicano i precipitati di equilibrio. Il massimo indurimento compete alla fase β' .

4.3 Conducibilità elettrica delle leghe di alluminio

Secondo la regola di Matthiessen la resistività elettrica totale (ρ_{tot}) risulta essere:

$$\rho_{tot} = \rho + \rho_i + \rho_d \quad (4.2)$$

dove ρ è la resistività dovuta al contributo delle vibrazioni termiche del reticolo, ρ_i indica il contributo delle impurezze quali atomi di soluto o segregazioni, ρ_d i difetti del reticolo quali dislocazioni e bordi grano. La resistività elettrica è quindi aumentata da qualsiasi impedimento al movimento degli elettroni. Le maggiori fonti di scattering degli elettroni, in particolare, sono gli atomi di soluto e le zone di Guinier Preston rispetto agli altri contributi.

4.4 Miglioramento di carico di rottura e conducibilità elettrica

Dato l'utilizzo di leghe di alluminio come materiale per conduttori elettrici, sono stati sviluppati vari metodi per migliorare la combinazione tra carico di rottura e conducibilità elettrica. Come spiegato in precedenza, infatti, le proprietà sono strettamente correlate;

giocando sul tempo e sulla temperatura del trattamento di invecchiamento si può infatti ottenere una diversa microstruttura: se ho molti precipitati di dimensioni contenute avrò un elevato carico di rottura ma una bassa conducibilità, andando invece avanti con il trattamento si ha una coalescenza dei precipitati e di conseguenza una diminuzione del carico di rottura e un aumento di conducibilità elettrica.

Per migliorare la combinazione tra queste due proprietà un metodo è inoculare composti AlB_2 o AlB_{12} nel fuso prima che arrivi nella paniera⁽²⁾, dove è possibile eliminarli. Il boro infatti forma composti con Cr, V, Ti e Zr (TiB_2 , ZrB_2 , CrB_2 e VB_2) che si trovano nella matrice di alluminio, questi composti hanno infatti l'effetto di diminuire la conducibilità, come è riportato nel grafico sottostante, fig. 4.3.

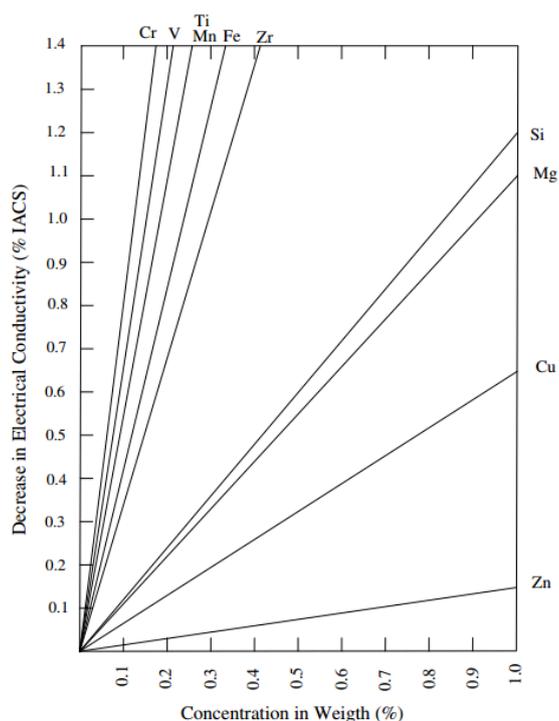


Fig. 4.3 Effetto delle impurezze sulla conducibilità

In questo modo è possibile diminuire la durata del trattamento di invecchiamento e ottenere la stessa conducibilità poiché ho una minore quantità di impurezze. Diminuendo la durata del trattamento termico si ottiene un maggiore carico di rottura poiché limito la coalescenza dei precipitati; questi essendo quindi dispersi, ostacolano il movimento delle dislocazioni. La pratica di aggiungere composti del boro si è rivelata pratica diffusa nelle fonderie di alluminio; in effetti la composizione della lega finale risulta avere una quantità di impurezze quali Cr, V e Ti molto limitata.

Sono stati inoltre svolti studi che analizzano l'influenza del rapporto di Si/Mg sulle proprietà meccaniche e sulla conducibilità elettrica⁽³⁾. Il rapporto in peso di Mg e Si nei precipitati

Mg_2Si è di 1,73; se è presente una maggiore quantità di magnesio, a causa della sua maggiore solubilità della matrice di alluminio rispetto a quella del silicio, non precipita ma resta solubilizzato nella matrice. In questo modo causa un'elevata distorsione reticolare. Il Si in eccesso invece precipita in piccole particelle a causa della sua limitata solubilità nella matrice di alluminio e ha quindi una minore influenza sulle distorsioni reticolari. Di conseguenza il magnesio dà un maggiore contributo alla diminuzione della conducibilità elettrica. Inoltre, la distorsione maggiore introdotta dal magnesio non ha una particolare influenza sull'aumento delle caratteristiche meccaniche.

Sempre per quanto riguarda la composizione, in letteratura sono riportati studi sull'effetto della presenza del Fe all'interno delle leghe Al-Mg-Si ⁽⁴⁾. Le proprietà però risultano dipendenti dalla composizione della lega. In generale, però, il Fe forma composti con Al e Si e di conseguenza rimarrà una maggiore quantità di Mg in soluzione rispetto alla medesima composizione in assenza di Fe.

Un ulteriore metodo proposto in letteratura per aumentare le proprietà meccaniche e la conducibilità elettrica delle leghe Al-Mg-Si è l'ottenimento di una grana ultrafina (400-600 nm) attraverso il metodo ECAP-C (Equal Channel Angular Pressing-Conform) ⁽⁵⁾. Il metodo è schematizzato in figura 4.4.

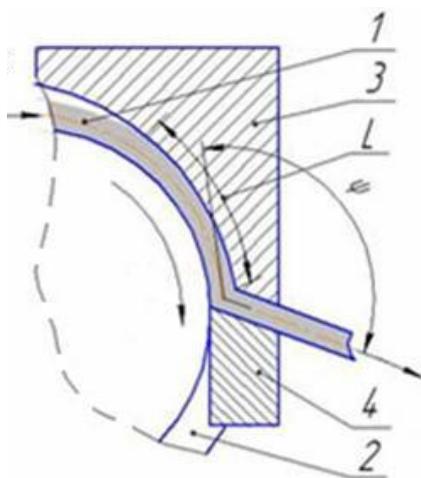


Fig. 4.4 Schematizzazione del metodo ECAP-C: 1-pezzo di vergella, 2-parte rotante della matrice, 3-parte fissa della matrice, 4-parte calibrante

Dopo il riscaldamento del pezzo di vergella, esso viene posto all'interno di un canale, da questo viene fatta passare grazie alla forza di attrito di una ruota che gira attraverso il canale di uscita che è posto a un certo angolo rispetto al canale precedente. Il procedimento viene ripetuto per più passaggi. Si riesce così ad ottenere un carico di rottura pari a 308 MPa e una conducibilità elettrica di 53,1% IACS. Un successivo invecchiamento artificiale può portare la conducibilità elettrica a 57,1% IACS. L'evoluzione micro strutturale risulta essere:

formazione di microstruttura ultrafine ed omogenea durante ECAP-C con le disorientazioni dei bordi grano ad ampio angolo risultanti in un'incremento della resistenza meccanica; la seguente precipitazione di fase β' non ha effetti significativi sulle proprietà meccaniche. Poiché durante l'invecchiamento non si ha una crescita dei grani, la variazione di proprietà è dovuta principalmente a due contributi: la ricristallizzazione causata da una considerevole diminuzione della densità di dislocazioni e l'indurimento per precipitazione dovuto alla formazione dei precipitati. Si nota inoltre che non si ha nessun indurimento o degradazione delle caratteristiche meccaniche con l'ulteriore trattamento di invecchiamento. Il trattamento di invecchiamento finale invece ha l'effetto di aumentare la conducibilità elettrica grazie alla decomposizione della soluzione solida e la conseguente precipitazione. Si nota però come questo metodo sia complesso da attuare nella pratica industriale oltre ad essere molto dispendioso in termini di tempo.

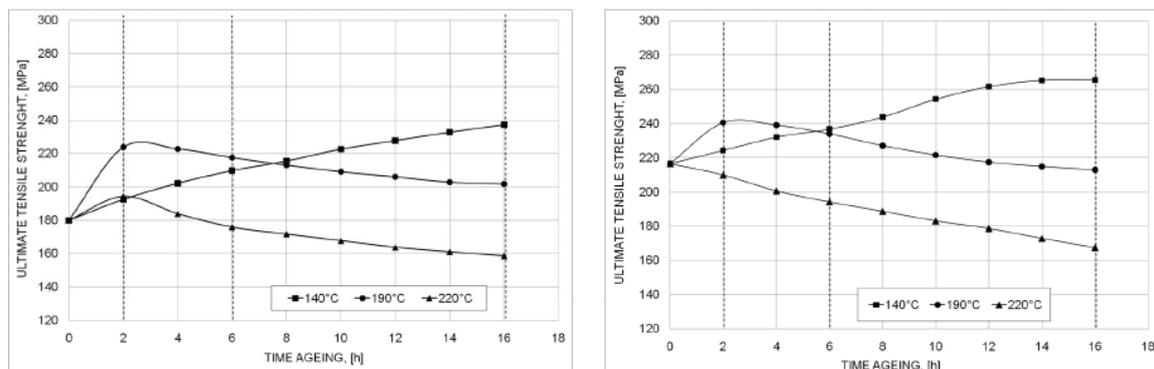
Un altro metodo per migliorare la combinazione di carico di rottura e conducibilità elettrica è una variazione nella sequenza delle lavorazioni meccaniche e dei trattamenti termici, come riportato in letteratura ⁽⁶⁾. Interrompendo infatti il trattamento di invecchiamento artificiale con una lavorazione meccanica, è possibile ottenere un valore maggiore della resistenza meccanica. I difetti del reticolo introdotti dalla deformazione a freddo hanno una profonda influenza nel modo in cui le particelle di soluto diffondono nei precipitati in crescita; in particolare la velocità di accrescimento viene accelerata e le caratteristiche dei precipitati vengono completamente modificate. Questo può essere spiegato con un modello proposto recentemente, secondo il quale il movimento delle dislocazioni e dei bordi grano trascina atomi di soluto; grazie a una diminuzione delle particelle di soluto nella matrice si ha anche un incremento della conducibilità elettrica. Ma il fatto importante è che la perdita della resistenza meccanica causata dall'ingrossamento dei precipitati è compensata dalle dislocazioni e dai bordi grano formati durante la deformazione meccanica; l'influenza di deformazioni reticolare è inoltre meno influente sulla conducibilità elettrica rispetto all'influenza degli atomi di soluto.

Questo articolo ha posto le basi per il procedimento sviluppato in questo lavoro; prendendo spunto dalla modificazione micro strutturale spiegata, infatti, è stato modificato il procedimento industrialmente applicato per la produzione di fili per i conduttori elettrici aerei. Esso prevede, partendo dalla vergella, una lavorazione meccanica di trafilatura per arrivare al diametro voluto e di seguito un trattamento termico di invecchiamento per ottenere la conducibilità elettrica voluta.

Si è pensato quindi di introdurre un trattamento termico precedentemente alla trafilatura seguita poi da un ulteriore invecchiamento. I risultati verranno presentati nel capitolo successivo.

Sono stati fatti studi accurati sull'influenza della temperatura e del tempo di trattamento termico e sull'influenza della composizione della lega sul prodotto finale ⁽⁷⁾. La temperatura

di trattamento della vergella consente di ottenere un diverso carico di rottura: per composizioni da 0,5% a 0,8% di Mg e Si è garantito un incremento di UTS (ultimate tensile strength) per trattamenti a temperature tra 140 e 190 °C, per un tempo di trattamento tra 2 e 16 ore. Temperature più elevate portano a una diminuzione di resistenza meccanica.



a.

b.

Fig. 4.5 UTS ottenuto per vari tempi e temperature di trattamento; a: lega di composizione 0,5% Si, 0,5% Mg; b: lega di composizione 0,8% Si, 0,8% Mg

Si vede quindi come una maggiore quantità di Si e Mg porti all'ottenimento di un carico di rottura maggiore. A seconda della composizione della lega utilizzata e delle proprietà finali che si vogliono ottenere è quindi fondamentale una scelta accurata di temperatura e tempo del trattamento di invecchiamento artificiale.

C'è da considerare, però, che prevedere le proprietà finali del filo dalle proprietà ottenute sulla vergella, dopo il trattamento di invecchiamento artificiale, non risulta semplice.

4.5 Materiali e pratica industriale

La composizione della lega utilizzata per i test è una tipica composizione della lega 6101: 0,6 Si, 0,6% Mg, 0,2% Fe, 0,05% Cu, Ti, V e altri elementi in piccolissime quantità. La pratica industriale per l'ottenimento della vergella di partenza prevede i seguenti step:

1. Fusione dei panetti di alluminio e affinazione
2. Colata e laminazione per ottenere la vergella del diametro voluto
3. Trattamento di omogeneizzazione (solubilizzazione)
4. Tempra per mantenere la microstruttura ottenuta con il trattamento di omogeneizzazione

Alla fine di queste operazioni la vergella ha un periodo di utilizzo massimo di 6 mesi; questo perché si verifica il fenomeno dell'invecchiamento naturale a temperatura ambiente. La vergella che si andrà a utilizzare si troverà quindi nello stato T4 (omogeneizzazione, tempra e invecchiamento naturale).



a.



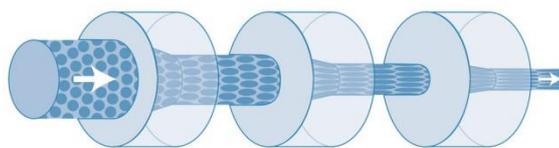
b.

Fig. 4.6 a: panetti di alluminio, b: vergella prodotta dopo la laminazione

La vergella mostrata in figura 4.6 è il semilavorato da cui si parte per l'ottenimento dei fili che andranno a formare le corde che costituiranno il conduttore.

I passaggi che vanno dalla vergella alla corda sono i seguenti:

1. Trafilatura. Più passaggi di trafilatura permettono l'ottenimento del diametro del filo voluto.



a.



b.

Fig. 4.7 a: schematizzazione del processo di trafilatura; b: esempi di filiere

2. Trattamento termico di invecchiamento; i rocchetti di filo vengono trattati termicamente a temperature di circa 160-170 °C per 10-15 ore, questo trattamento permette l'ottenimento delle proprietà volute: conducibilità elettrica, allungamento e carico di rottura.
3. I fili così ottenuti vengono cordati e si ha quindi la produzione della corda finale

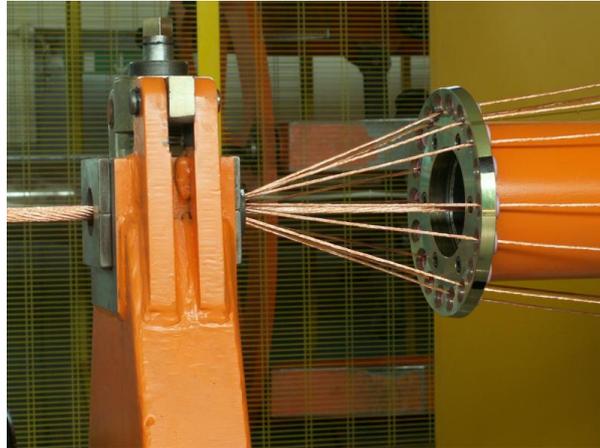


Fig. 4.8 Processo di cordatura; a destra si vedono i fili da cordare, mentre a sinistra si vede la corda appena costruita

La modificazione studiata in questo lavoro, come già accennato, prevede l'introduzione di un trattamento termico sulla vergella prima della trafilatura, in questo modo la vergella viene portata allo stato T6 (omogeneizzazione, tempra e invecchiamento artificiale). Il trattamento di invecchiamento artificiale viene quindi suddiviso in due stadi: il primo viene fatto sulla vergella mentre il secondo sul filo. Per chiarezza, si riporta l'elenco delle operazioni:

1. Trattamento termico di invecchiamento sulla vergella
2. Trafilatura
3. Trattamento termico di invecchiamento sul filo
4. Cordatura

Capitolo 5

Risultati sperimentali

Il seguente capitolo riporta i risultati ottenuti con il metodo convenzionale e con il nuovo metodo sviluppato, si pone particolare accento ai miglioramenti ottenuti. Viene anche riportata una breve analisi con tecniche da laboratorio (raggi X e microscopio ottico) svolta per avere un confronto tra i campioni ottenuti con procedura convenzionale e con procedura innovativa

5.1 Trattamento termico convenzionale

Come spiegato nel capitolo precedente, i trattamenti termici a cui viene sottoposta la lega 6101 sono prima la solubilizzazione in cui si porta il materiale a una temperatura superiore ai 500 °C per un tempo sufficiente a ottenere l'omogeneità, seguita da tempra (quindi un raffreddamento rapido per mantenere la struttura ottenuta con la solubilizzazione) e seguente trattamento termico di invecchiamento che porta all'ottenimento delle proprietà finali. L'invecchiamento, nel caso dei fili che costituiranno poi la corda del conduttore, avviene dopo trafilatura e le temperature utilizzate sono tra i 160 °C e i 170 °C a seconda del materiale specifico. In generale a temperature maggiori si ha un raggiungimento delle proprietà volute in un tempo più breve, mentre alle temperature minori si ha un maggiore controllo del processo perché le trasformazioni microstrutturali avvengono più lentamente.

Di seguito vengono riportati i risultati di resistività elettrica e carico di rottura ottenuti con il trattamento "convenzionale", costituito dalle seguenti operazioni:

1. La matassa di vergella si presenta nello stato solubilizzato e temprato
2. La matassa (vergella $\varnothing = 9,5$ mm) viene trafilata in filo ($\varnothing = 3,6$ mm)
3. Il filo viene trattato a una temperatura rispettivamente di 160 °C, 165 °C e 170 °C

Sono state misurate le proprietà a vari tempi di permanenza in forno (i tempi indicati indicano il tempo di permanenza alla data temperatura una volta che la suddetta temperatura è stata raggiunta):

I risultati ottenuti sono riportati nei grafici seguenti:

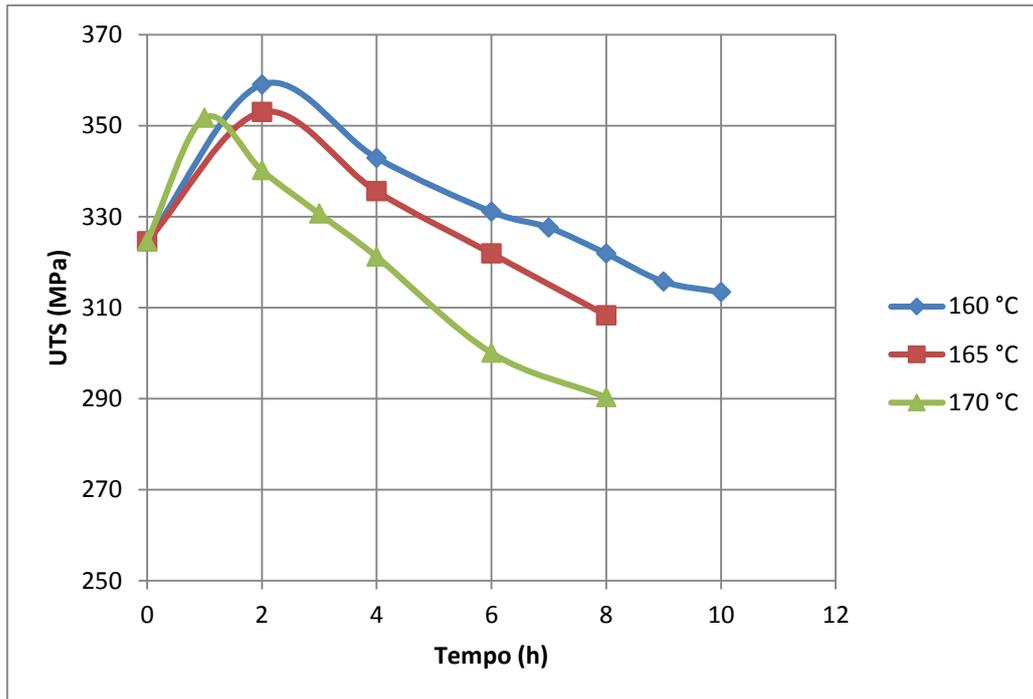


Fig. 5.1 Andamento del carico di rottura (UTS) all'aumentare della durata del trattamento termico in forno

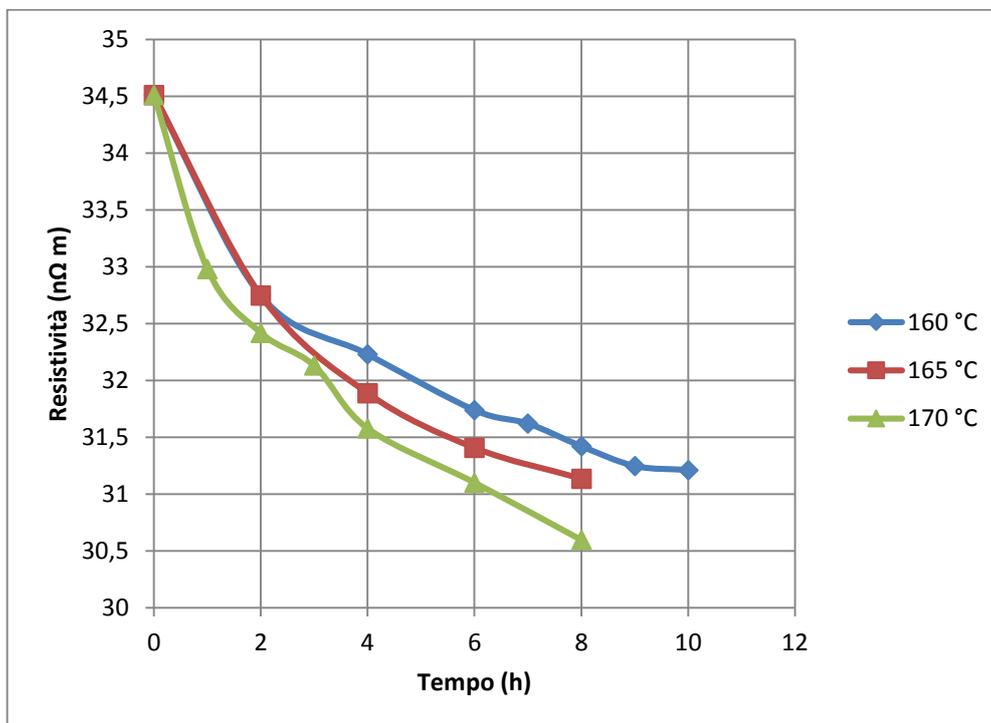


Fig. 5.2 Andamento della resistività elettrica all'aumentare della durata del trattamento termico in forno

La figura 5.1 mostra come l'andamento del carico di rottura sia inizialmente crescente e in seguito decrescente e come per la temperatura di 170 °C si raggiunga dopo 1 ora lo stesso

valore che si raggiunge in 2 ore alla temperatura di 165 °C. Si nota inoltre come la temperatura più bassa consenta di ottenere risultati migliori in termini di UTS. Il valore della resistività ottenuta con il trattamento a temperatura minore resta però a valori più elevati.

I tempi di permanenza massimi sono stati scelti in accordo con la pratica industriale; essa prevede un mantenimento in forno di 13 ore complessive che corrispondono a circa 8 ore a regime, alla temperatura di 165 °C; per la temperatura di 160 °C si è deciso di prolungare il trattamento per cercare di avvicinarsi alle stesse proprietà ottenute con le altre temperature di trattamento.

Per avere un'idea precisa della microstruttura, è stato utilizzato un microscopio elettronico a scansione (SEM) che ha permesso di ottenere le immagini riportate di seguito, sono inoltre riportati i confronti tra gli spettri XRD. I campioni analizzati sono ottenuti con il trattamento a 165 °C.

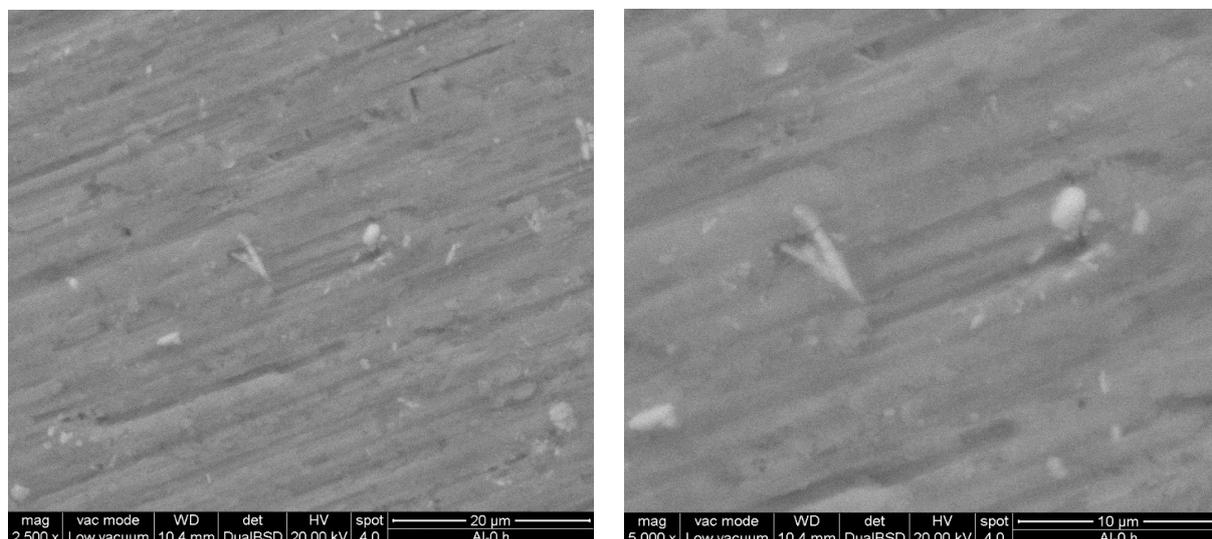


Fig. 5.3 Microstruttura della sezione della vergella

Queste immagini presentano la microstruttura della vergella dopo solubilizzazione e tempra; si vede come la struttura sia abbastanza disomogenea; i precipitati hanno dimensioni diverse e sono distribuiti in modo disomogeneo.

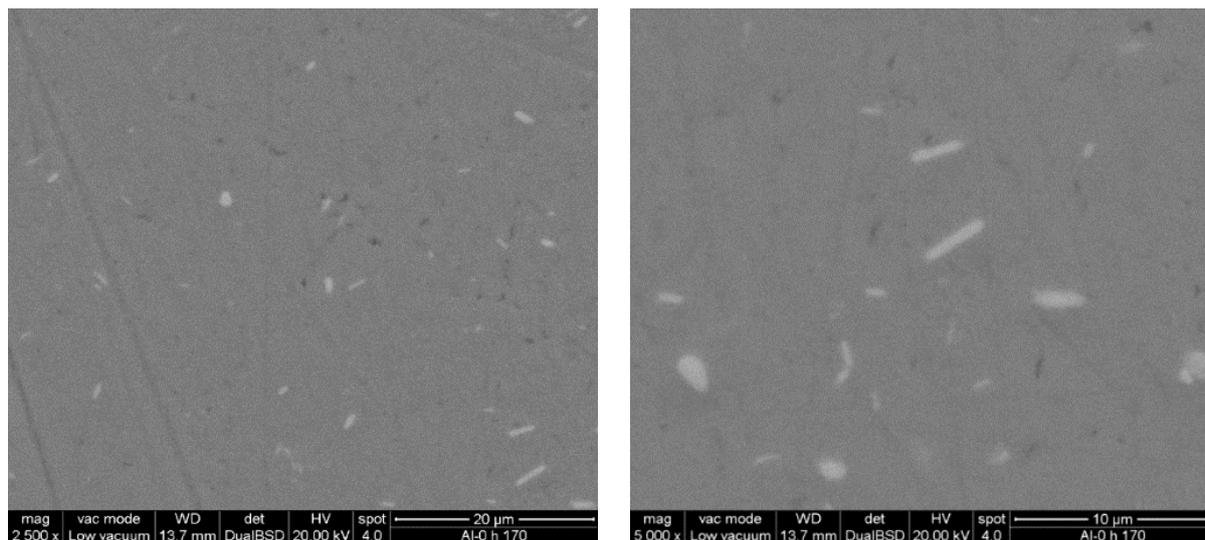


Fig. 5.4 Microstruttura della sezione del filo dopo trafilatura

Le immagini mostrano la microstruttura del filo dopo trafilatura e prima del trattamento termico; si nota come i precipitati siano di dimensioni intorno ai 2-4 μm e risultino abbastanza allungati.

Di seguito sono riportate le micrografie ottenute al microscopio ottico su vergella e filo dopo trafilatura

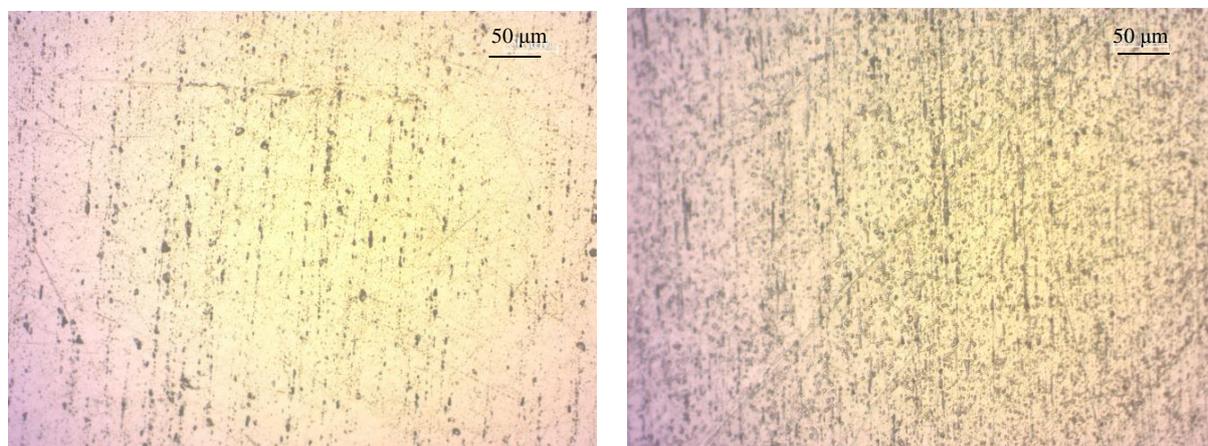


Fig. 5.5 Micrografie da microscopio ottico. A sinistra micrografia della vergella, a destra micrografia del filo trafilato.

Le micrografie mostrano la matrice con all'interno i precipitati; in entrambi i casi risultano orientati lungo la direzione della lavorazione meccanica (laminazione nel primo caso e trafilatura nel secondo). Si vede però come nel secondo caso i precipitati siano molto più vicini a causa della diminuzione di sezione causata dalla trafilatura.

Si è a questo punto fatta una stima delle dimensioni dei grani e della distorsione del reticolo con un'analisi XRD dei campioni. Lo spettro XRD dell'alluminio è il seguente:

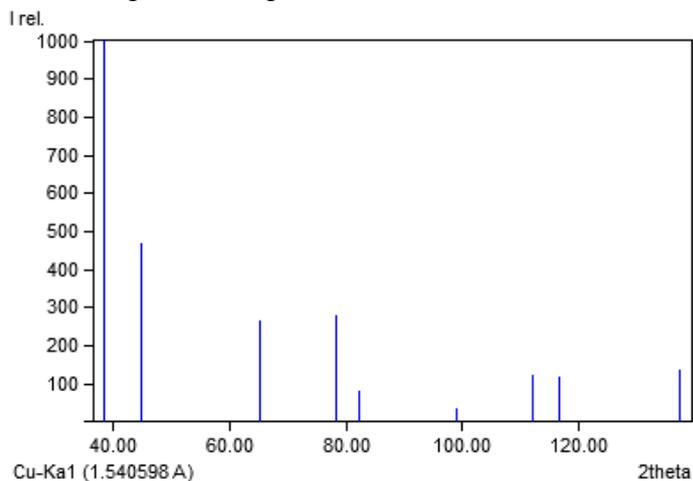


Fig. 5.6 Spettro XRD dell'alluminio

Partendo da questo spettro, per l'analisi si è considerato l'intervallo $35^\circ - 48^\circ$ ottenendo i risultati seguenti.

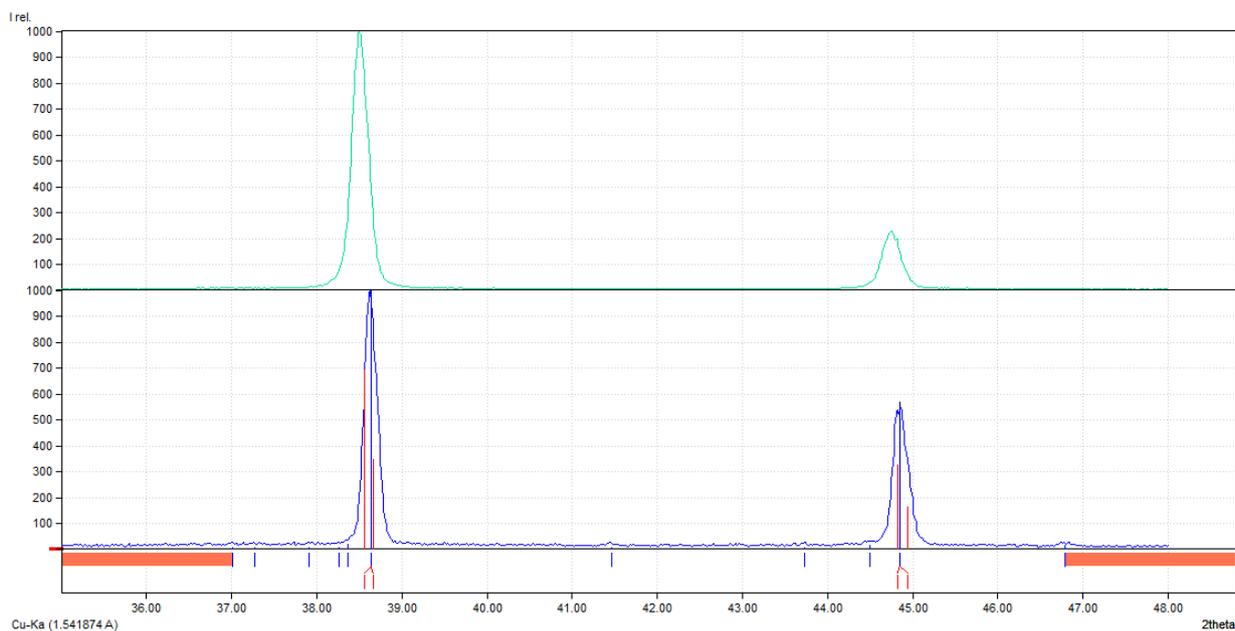


Fig. 5.7 Spettro XRD normalizzato. In basso: spettro del campione di vergella; in alto: spettro del campione di filo dopo trafilatura.

Nella parte sotto è riportato lo spettro XRD ottenuto dalla vergella, mentre nella parte superiore lo spettro XRD del filo dopo trafilatura. I picchi corrispondenti all'alluminio sono riportati in rosso. Se si considera la legge di Bragg:

$$n\lambda = 2D \sin \theta \quad (5.1)$$

dove n è una costante multipla dell'unità, λ è la lunghezza d'onda del fascio di raggi X, D è la dimensione dei grani e θ è l'angolo di diffrazione.

Uno spostamento a sinistra dei picchi corrisponde a una diminuzione delle dimensioni dei grani. Questo è quello che ci si aspettava dato che con la lavorazione di trafilatura si ha un allungamento dei grani in direzione longitudinale e quindi una diminuzione delle dimensioni in senso trasversale.

Una stima delle dimensioni dei grani si può avere utilizzando la formula di Scherrer:

$$D = k \cdot \lambda / (\cos\theta \cdot FWHM) \quad (5.2)$$

dove D è la dimensione dei cristalli [nm], k è una costante (pari a 0,9 nel caso in esame), λ è la lunghezza d'onda dei raggi X incidenti [nm] = 0,15414 (nel caso in esame), θ è l'angolo del picco di diffrazione [rad], $FWHM$ = ampiezza a mezza altezza del picco di diffrazione [rad].

Di seguito vengono riportati gli spettri XRD ottenuti all'aumentare del tempo di trattamento termico.

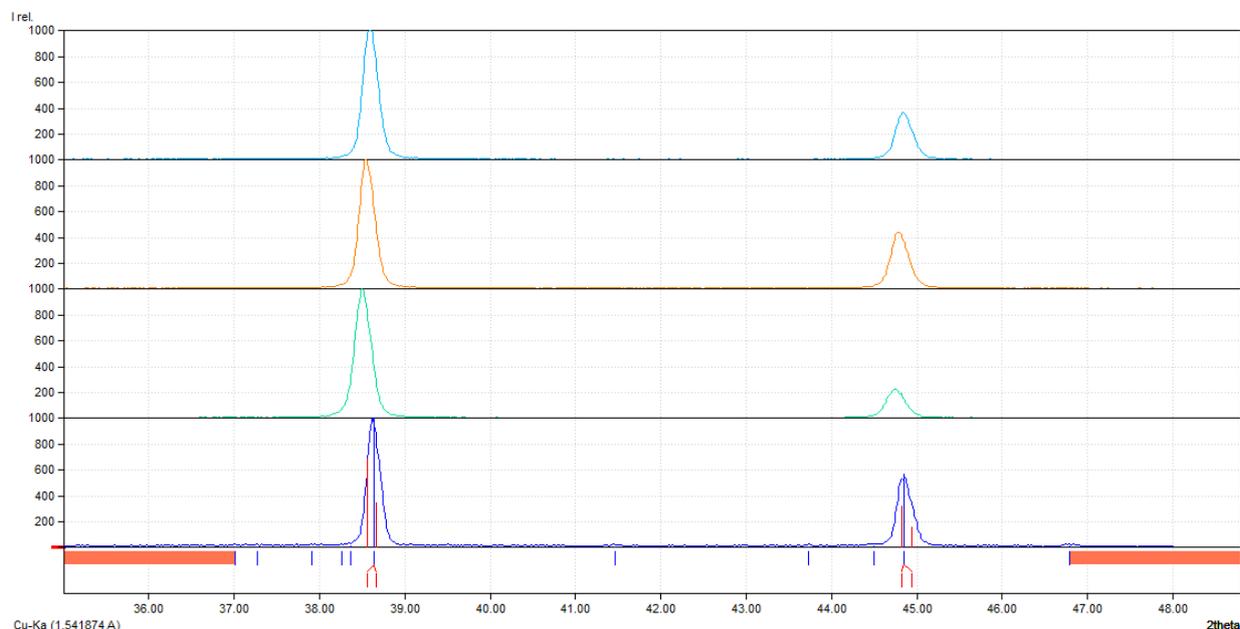


Fig. 5.8 Spettri XRD. Dal basso: vergella, filo dopo trafilatura, filo dopo 2 h di trattamento a regime, filo dopo 8 h di trattamento a regime

Gli spettri XRD mostrano che rispetto allo spettro del filo dopo trafilatura, all'aumentare del tempo di trattamento la posizione dei picchi si avvicina a quella dei picchi dell'alluminio; questo dimostra che la deformazione del reticolo diminuisce con il trattamento termico. Si riportano i dati ottenuti dagli spettri XRD.

Tab. 5.1 Calcolo delle dimensioni dei grani della vergella e del filo dopo trafilatura

	θ (°)	FWHM (°)	Dimensioni (nm)	Dimensioni medie (nm)
Vergella	38,62	0,18	56,5	56,3
	44,86	0,2	56,1	
Filo dopo trafilatura	38,5	0,22	46,2	44,6
	44,74	0,26	43,0	
Filo dopo 2 h di trattamento	38,54	0,2	50,82	48,7
	44,78	0,24	46,66	
Filo dopo 8 h di trattamento	38,6	0,2	50,86	48,8
	44,84	0,24	46,71	

Si vede quindi come effettivamente le dimensioni diminuiscano dopo trafilatura; oltre allo spostamento dei picchi si vede che la larghezza a mezza altezza dei picchi aumenta. Le dimensioni non sono da considerare in senso assoluto in quanto è necessario considerare che per l'alluminio non ci sarà un valore netto dell'angolo a cui si ha il picco, ma una banda; sottraendo la larghezza di questa banda (che dipende dalla macchina di misura) alla larghezza a mezza altezza, le larghezze effettive sarebbero quindi inferiori e le dimensioni maggiori.

Per avere una misura reale delle dimensioni del grano il campione è stato attaccato con una soluzione denominata WEK, solamente sulla vergella trattata termicamente ha evidenziato i bordi-grano e si è ottenuta la micrografia seguente al microscopio ottico (100x):

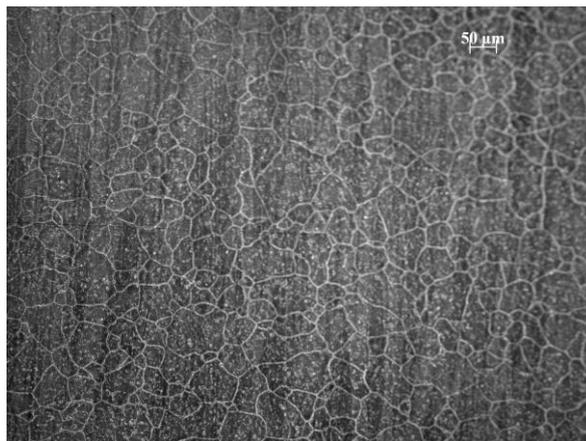


Fig. 5.9 Micrografia della vergella ottenuta con attacco chimico (microscopio ottico 100x)

Utilizzando la norma ASTM, le dimensioni dei grani stimati sono risultate essere 78,4 μm . Conoscendo il valore relativo ottenuto con analisi XRD è stato quindi possibile convertire le misure relative trovate dagli spettri XRD in misure assolute, riportate nella seguente tabella:

Tab. 5.2 Dimensioni assolute della vergella di partenza e del filo dopo trafilatura e dopo 2 e 8 ore di trattamento termico

	Dimensioni assolute (μm)
Vergella	77,14
Filo dopo trafilatura	61,12
Filo dopo 2 ore di trattamento	66,78
Filo dopo 8 ore di trattamento	66,84

Di seguito si riportano le immagini ottenute al SEM per i vari tempi di trattamento.

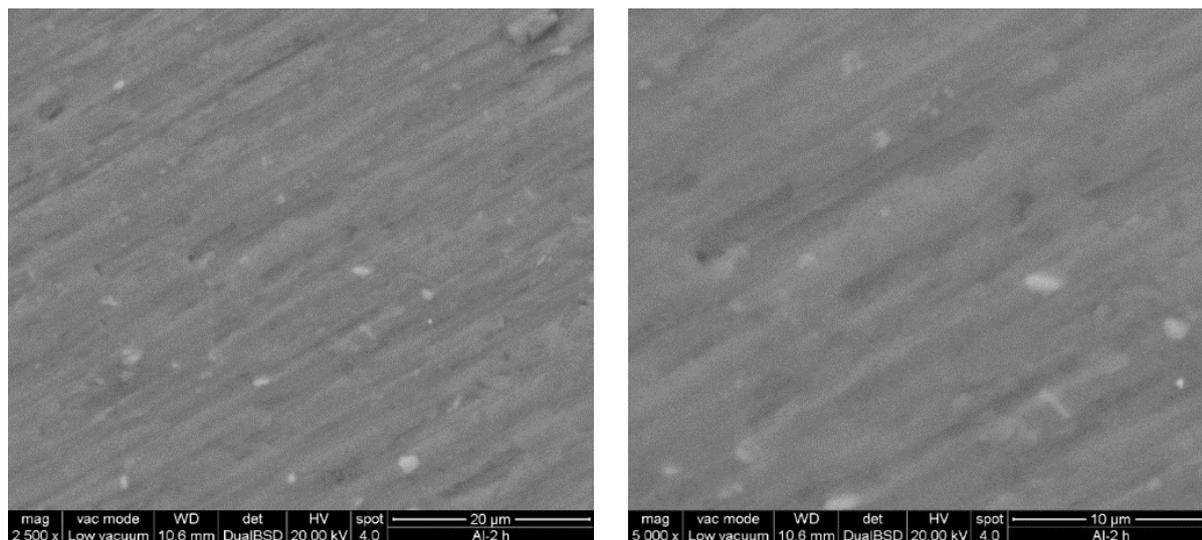


Fig. 5.10 Microstruttura della sezione del filo dopo 2 ore di trattamento a 165 °C

Dopo due ore di trattamento a regime si nota come le particelle di soluto siano molto disperse e inizino a formarsi precipitati di forma circolare; questa microstruttura rende difficile il movimento delle dislocazioni come dimostra l'aumento dell'UTS nella figura 5.2, la resistività elettrica rimane elevata ma diminuisce rispetto al valore di resistività precedente al trattamento termico. Questo perché i precipitati hanno iniziato a agglomerarsi quindi ci sono meno particelle di soluto in soluzione solida, che allo stesso tempo hanno una dimensione maggiore quindi costituiscono un maggiore ostacolo per le dislocazioni rispetto alla microstruttura precedente, come dimostra il già citato aumento del carico di rottura.

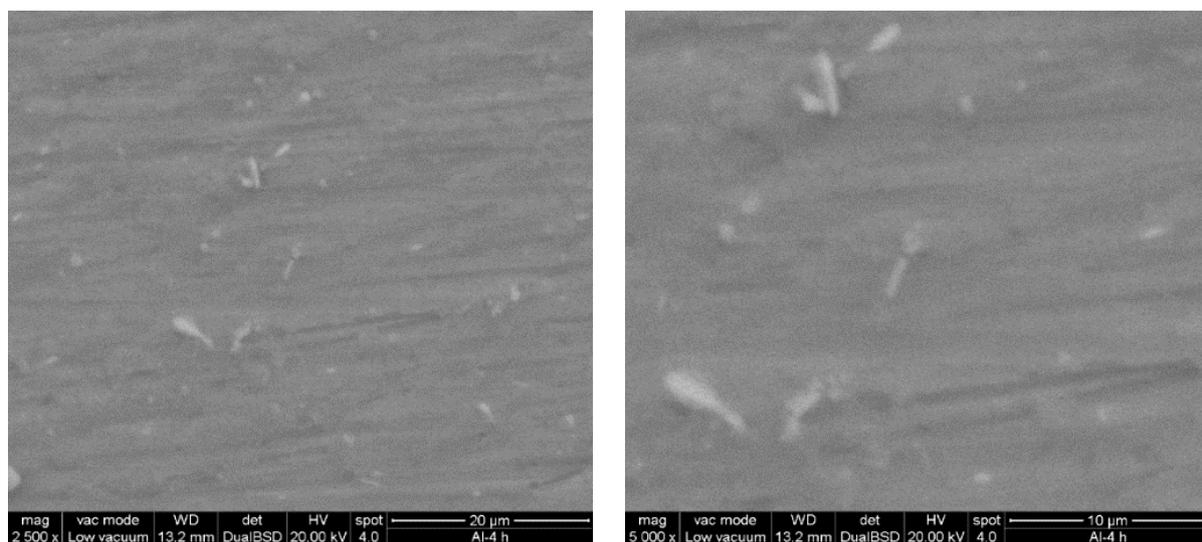


Fig. 5.11 Microstruttura della sezione del filo dopo 4 ore di trattamento a 165 °C

Dopo 4 ore di trattamento si nota come la microstruttura sia in una fase di transizione; c'è una minore concentrazione di particelle poiché stanno andando a ingrossare i precipitati.

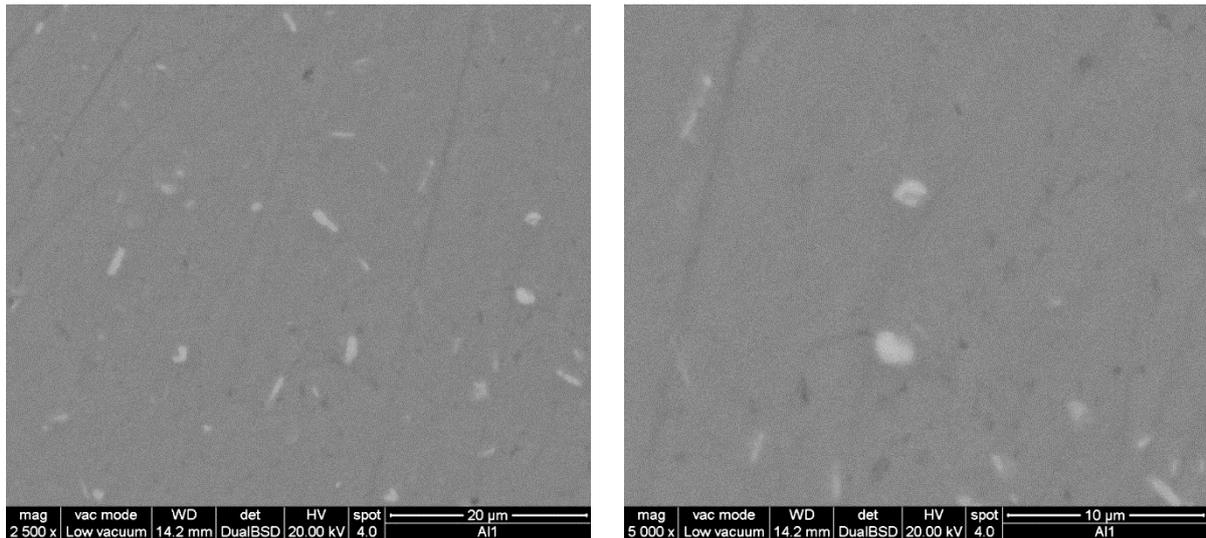


Fig. 5.12 Microstruttura della sezione del filo dopo 6 ore di trattamento a 165 °C

Dopo 6 ore si vede chiaramente come i precipitati si siano ingrossati e abbiano assunto una forma circolare; questa microstruttura consente alle dislocazioni di muoversi facilmente, ecco perché il carico di rottura ha un calo, e ostacolamento il movimento degli elettroni, questo si traduce in una diminuzione di resistività elettrica.

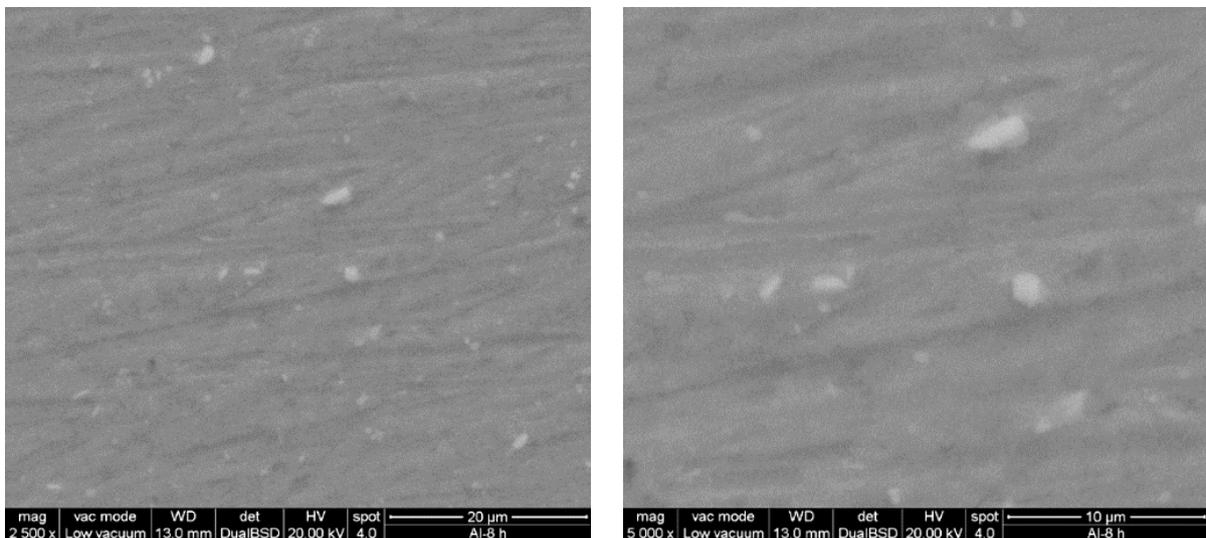


Fig. 5.13 Microstruttura della sezione del filo dopo 8 ore di trattamento a 165 °C

Con un trattamento di 8 ore a regime a 165 °C si vede un ulteriore ingrossamento dei precipitati e una minore quantità di particelle di soluto; i precipitati inoltre tendono ad assumere una forma circolare.

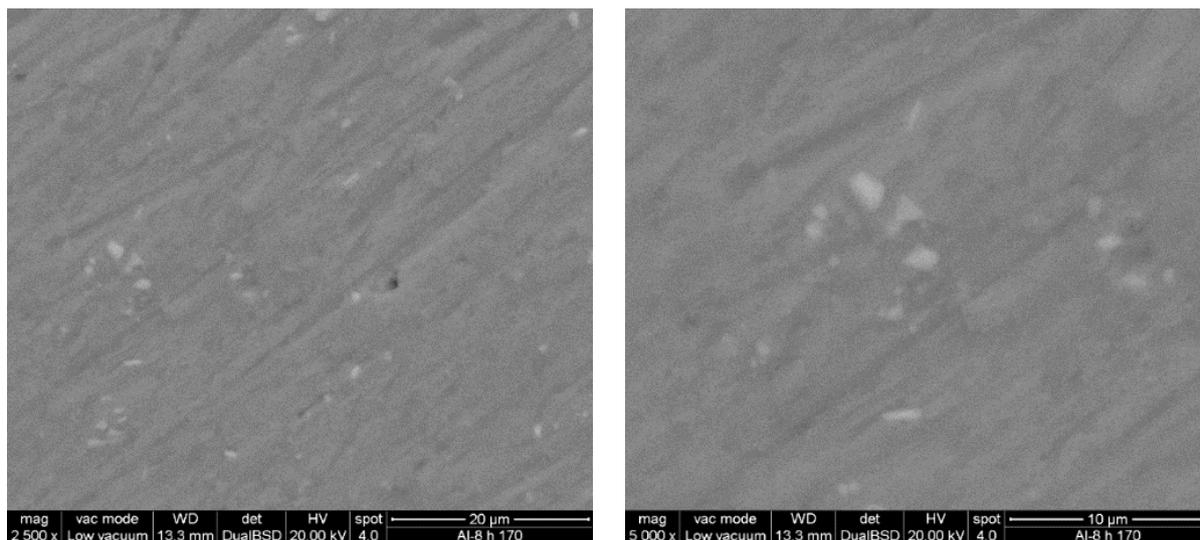


Fig. 5.14 Microstruttura della sezione del filo dopo 8 ore di trattamento a 170 °C

Dopo 8 ore a regime a 170 °C la microstruttura risulta simile a quella precedente (8 ore a 165 °C), quindi con precipitati ingrossati, anche se la loro distribuzione risulta meno omogenea. Per analizzare la composizione di matrice e precipitati si è utilizzata un'analisi EDS (Energy Dispersive X-ray Analysis), che ha dimostrato che i precipitati sono principalmente costituiti da Mg, Si e Fe, mentre nella matrice oltre all'alluminio è risultato esserci Mg in soluzione solida.

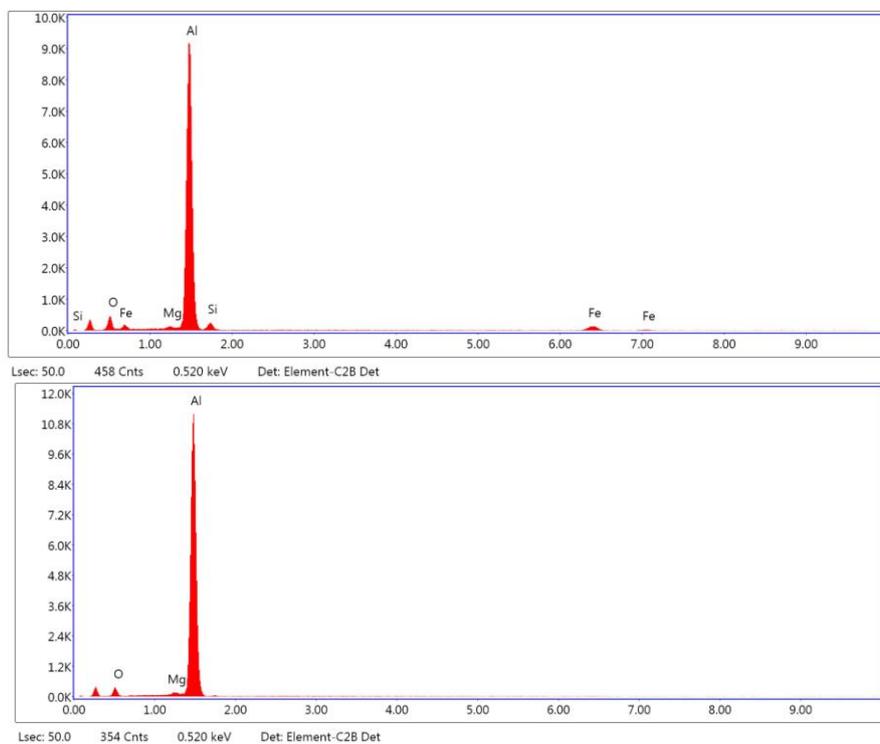


Fig. 5.15 Analisi EDS. In alto: composizione della matrice; in basso: composizione dei precipitati

Si nota quindi che tutto il Fe della lega rimane va a formare precipitati con Si e Mg e una certa quantità di Mg invece, rimane in soluzione solida. Questo ha quindi un effetto sulla conducibilità elettrica; essendo gli atomi di soluto centri di scattering per gli elettroni, infatti, causano una diminuzione della conducibilità. Un possibile sviluppo per migliorare le caratteristiche della lega potrebbe quindi essere una diminuzione del contenuto di ferro che permetterebbe la formazione dei precipitati Mg_2Si ; questo permetterebbe di ottenere, insieme a un maggiore effetto indurente, un miglioramento della conducibilità elettrica.

5.2 Doppio trattamento termico

A questo punto è stato deciso di testare fili ottenuti con una sequenza alternativa di trattamenti. Questa consiste nei seguenti passaggi:

1. La matassa si presenta nello stato solubilizzato e temprato
2. La matassa viene trattata in forno a diverse temperature
3. La matassa (vergella $\varnothing = 9,5$ mm) viene trafilata in filo ($\varnothing = 3,6$ mm)
4. Il filo viene trattato a diverse temperature

I risultati ottenuti per i fili dopo doppio trattamento sono i seguenti, viene riportato un confronto con i risultati precedenti.

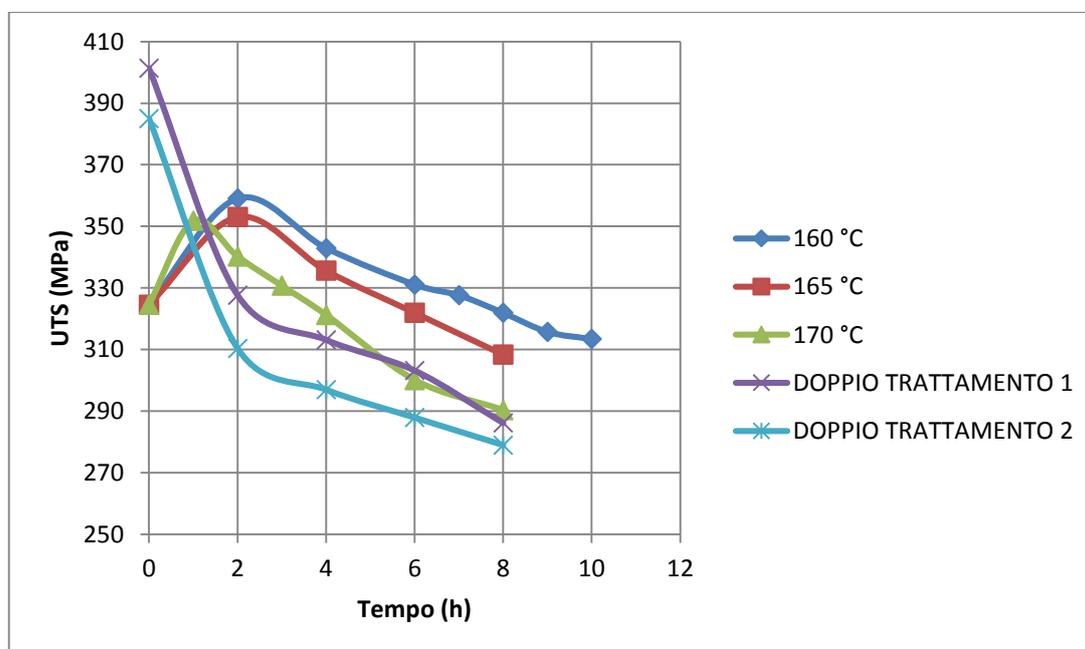


Fig. 5.16 Confronto tra gli andamenti degli UTS in funzione del tempo ottenuti con il singolo trattamento termico a 160 °C, 165 °C e 170 °C e con il doppio trattamento

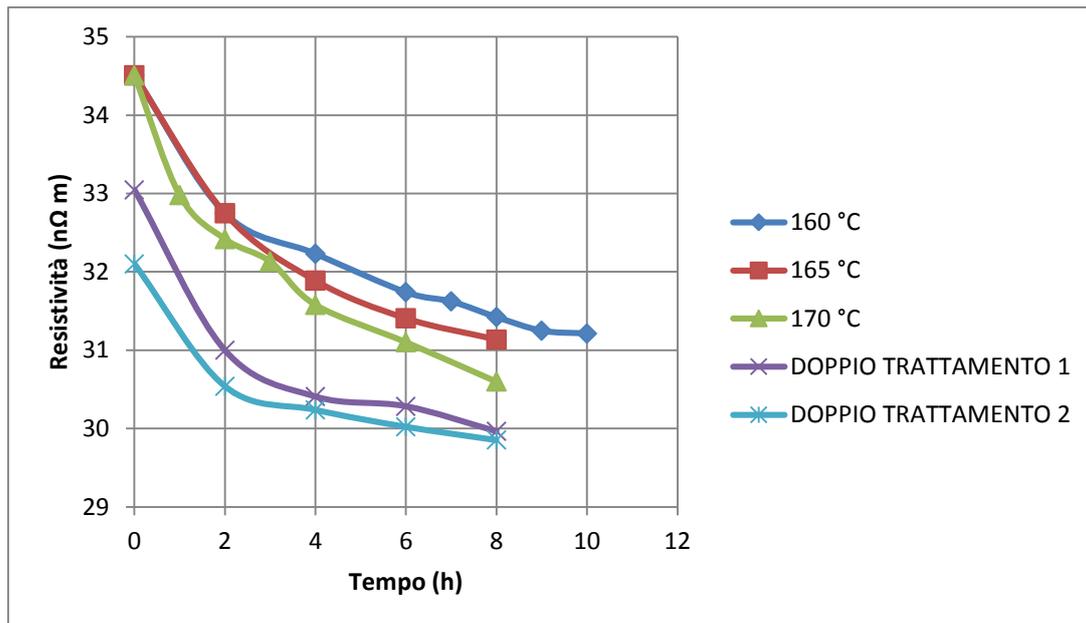


Fig. 5.17 Confronto tra gli andamenti dei carichi di rottura in funzione del tempo ottenuti con il singolo trattamento termico a 160 °C, 165 °C e 170 °C e con il doppio trattamento

Si vede una netta diminuzione di resistività rispetto alle proprietà ottenibili con il trattamento convenzionale. Prendendo ad esempio un carico di rottura di 320 MPa si riesce ad ottenere una resistività di 30,5 nΩ m mentre con il trattamento convenzionale allo stesso carico corrisponde una resistività elettrica 31,5 nΩ m.

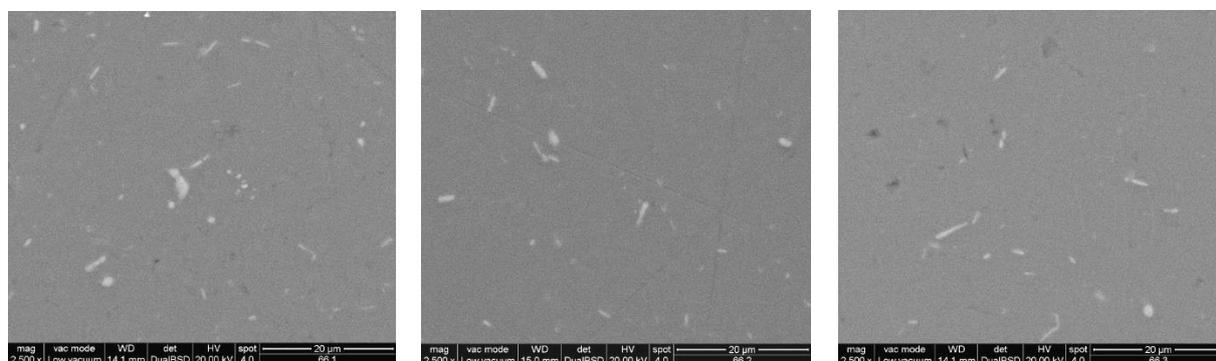
Si vede come nel caso del doppio trattamento non si abbia un incremento iniziale di UTS ma una continua diminuzione. Questo perché i precipitati si sono formati già durante il primo trattamento sulla vergella e quindi con il secondo trattamento avviene soltanto un ingrossamento di questi ultimi. Di conseguenza si hanno sempre meno particelle di soluto in soluzione e quindi sempre meno impedimenti per il movimento delle dislocazioni.

Confrontando in valori ottenuti con i valori riportati nella norma CEI EN 50183 (figura 5.13) si vede come questo consenta elevati margini, anche se risulta necessaria un'ulteriore ottimizzazione per la produzione della categoria AL4.

Tipo	Conducibilità nominale	Diametro nominale (mm)		Resistenza minima alla trazione (N/mm ²)		Allungamento massimo dopo la rottura su 250 mm	Resistività massima (nΩ m)	
		% IACS	da	fino a e incluso	dei singoli fili		media di un lotto	%
AL 2	52,5	1,50	3,50	325	-	3,0	32,84	-
		3,50	5,00	315	-			
AL 3	53,0	1,50	5,00	295	-	3,5	32,53	-
		3,50	5,00	315	330			
AL 4	52,9	1,50	3,50	325	342	3,0	32,9	32,6
		3,50	5,00	315	330			
AL 5	55,25	1,50	5,00	295	-	3,5	32,2	31,2
AL 6	55,6	1,50	3,50	314	-	3,5	31,5	31,0
		3,50	5,00	304	-			
AL 7	57,5	1,50	2,50	300	-	3,0	30,5	30,0
		2,50	3,00	290	-			
		3,00	3,50	275	-			
		3,50	4,00	265	-			
		4,00	5,00	255	-			

Tab. 5.3 Categorie di filo in lega di alluminio dalla norma CEI EN 50183

Si riportano di seguito le immagini SEM e gli spettri XRD dei campioni. Le foto seguenti mostrano l'evoluzione della microstruttura della vergella per diversi tempi di trattamento.



a.

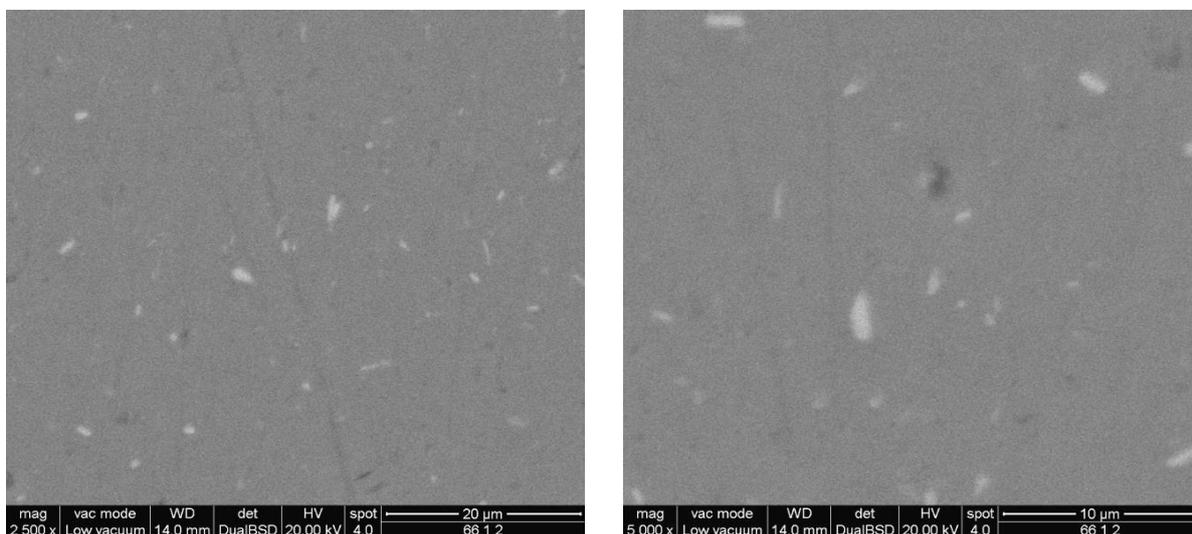
b.

c.

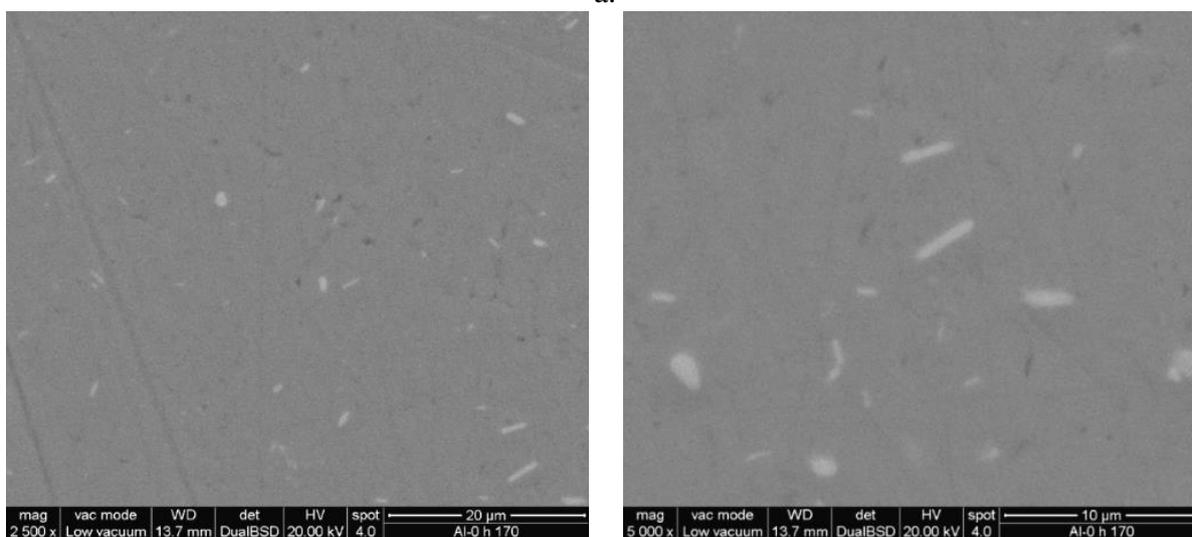
Fig. 5.18 Microstruttura della vergella per vari tempi di trattamento; a: microstruttura che compete di trattamento minore, b: tempo di trattamento intermedio, c: tempo di trattamento maggiore

Il primo tempo di trattamento mostra una microstruttura disomogenea con alcuni precipitati ingrossati e altri molto piccoli. Per il secondo e terzo tempo di trattamento invece si notano molti meno precipitati piccoli che vanno ad ingrossare quelli più grossi.

Vengono ora riportate le microstrutture del filo.



a.



b.

Fig. 5.19 Microstruttura della sezione del filo dopo trafilatura. a: caso di doppio trattamento termico; b: caso di trattamento termico convenzionale.

Rispetto alla vergella si vede che dopo trafilatura i precipitati risultano più dispersi, questo potrebbe essere dovuto allo slip delle dislocazioni che passando tra i precipitati li dividono in più parti. Rispetto alla microstruttura ottenuta con trattamento termico convenzionale i precipitati mantengono una forma più tondeggianti anche se la microstruttura nei due casi non risulta molto diversa.

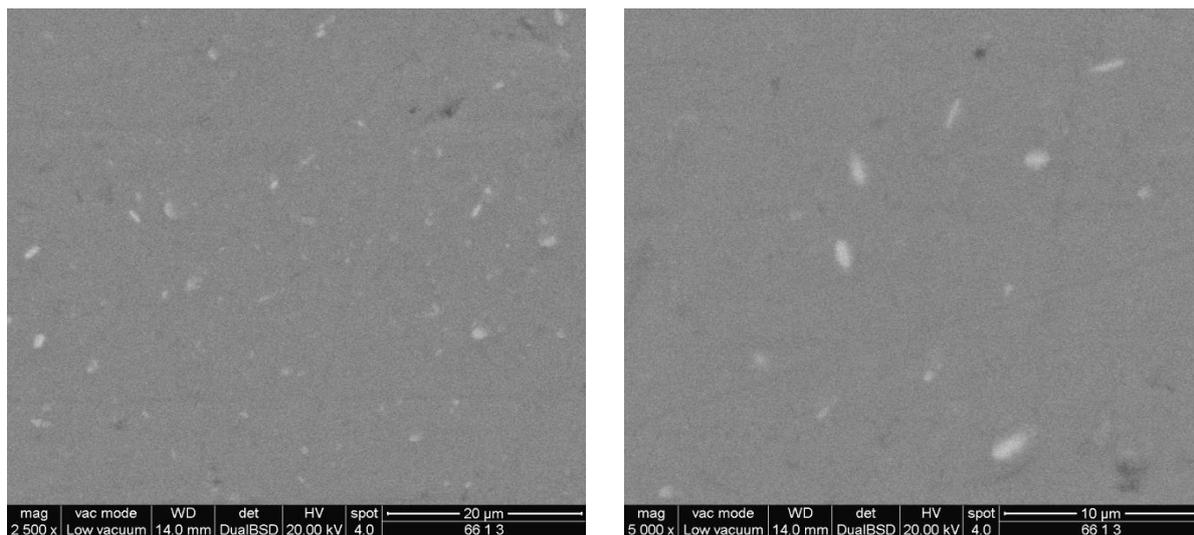


Fig. 5.20 Microstruttura della sezione del filo dopo 2 ore di trattamento

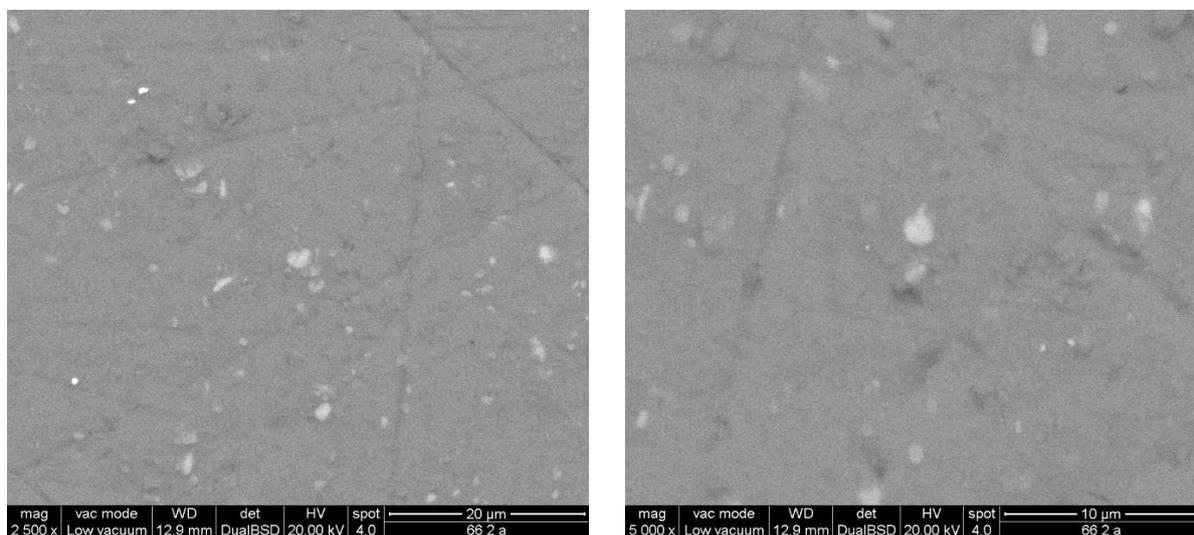


Fig. 5.21 Microstruttura della sezione del filo dopo 4 ore di trattamento

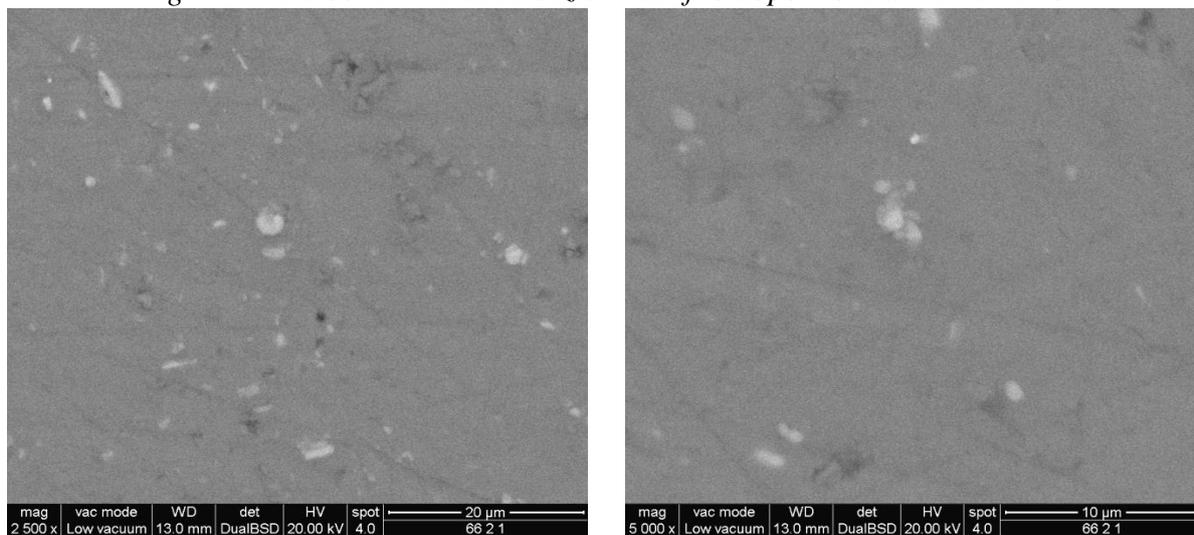


Fig. 5.22 Microstruttura della sezione del filo dopo 6 ore di trattamento

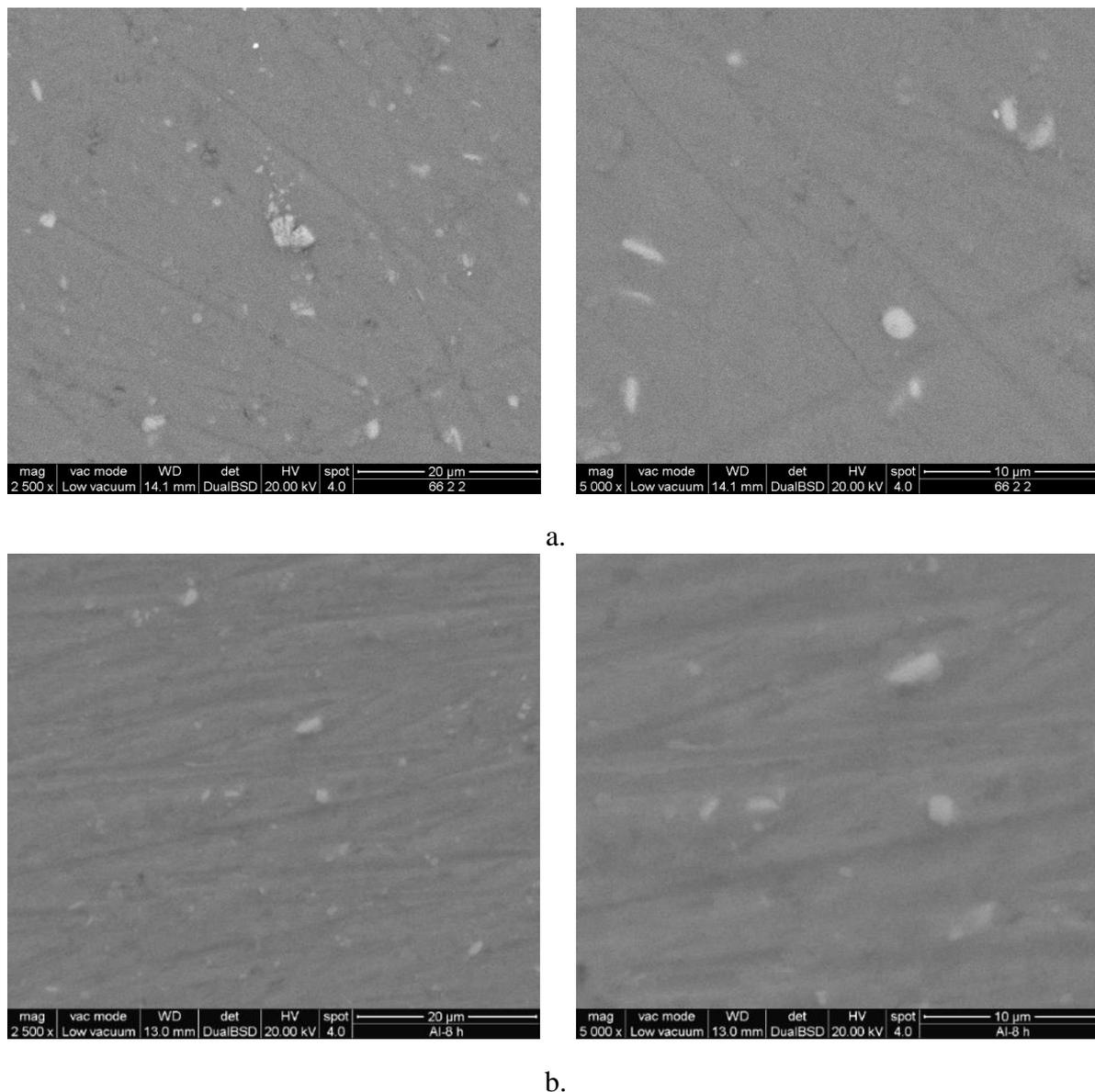


Fig. 5.23 a: microstruttura della sezione del filo dopo 9 ore di trattamento ottenuto con doppio trattamento; b: microstruttura della sezione del filo dopo 8 ore di trattamento con trattamento convenzionale.

Dopo due ore di trattamento si vedono dei precipitati più tondeggianti e la loro densità sembra diminuire. Dopo 4, 6 e 8 ore di trattamento si nota un ingrossamento via via maggiore dei precipitati e quindi una minore densità all'interno della matrice di alluminio. Rispetto al trattamento convenzionale con il doppio trattamento si ottiene un ingrossamento maggiore dei precipitati.

Il grafico riportato di seguito confronta il reticolo non deformato (riportato nella parte inferiore, con indicati i picchi caratteristici) con il reticolo ottenuto dopo trafilatura. Nella parte superiore il grafico in arancione mostra il filo dopo trafilatura nel caso di doppio trattamento termico e quello verde nel caso di unico trattamento.

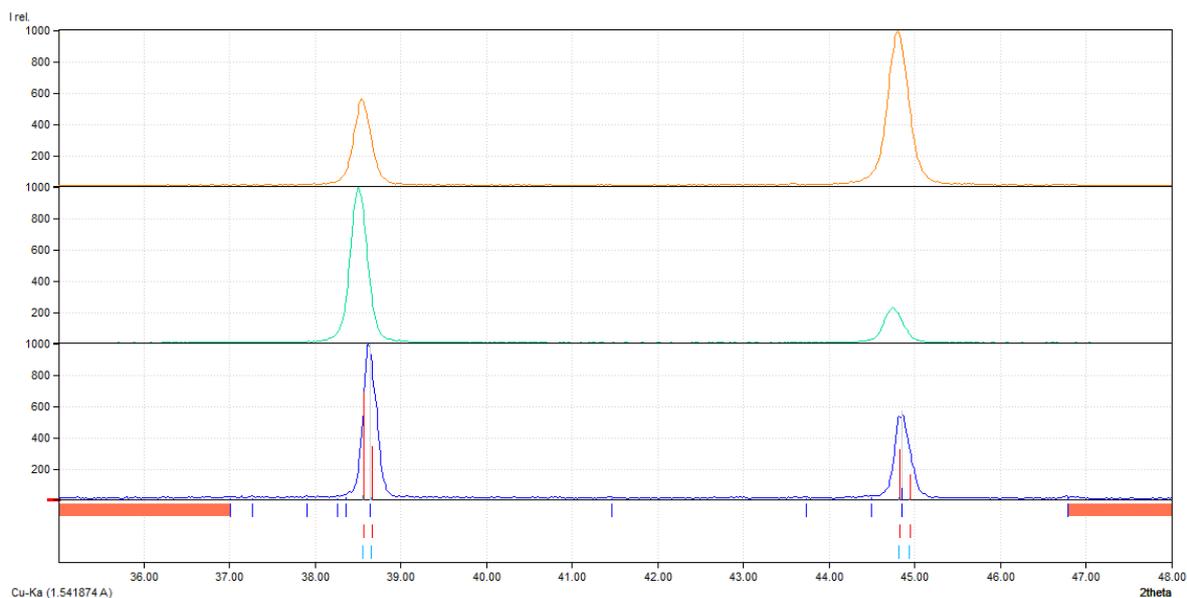


Fig. 5.24 Confronto tra spettri XRD ottenuti da vergella e filo dopo trafilatura nel caso di trattamento convenzionale e doppio trattamento

Si vede come i picchi del grafico verde siano più spostati rispetto al reticolo non deformato, i picchi del grafico arancione risultano infatti avere posizioni molto vicine a quelli del materiale prima della trafilatura.

Questo a indicare una maggiore deformazione del reticolo che spiega la minore resistività elettrica, il carico alto è infatti dato non tanto dalle dislocazioni quanto dai precipitati.

Di seguito si riportano le dimensioni dei grani ottenuti applicando la formula di Scherrer.

Tab. 5.4 Dati ricavati dagli spettri XRD

	θ (°)	FWHM (°)	Dimensioni (nm)	Dimensioni medie (nm)
Vergella	38,62	0,18	56,5	56,30
	44,86	0,2	56,1	
Filo dopo trafilatura (trattamento convenzionale)	38,5	0,22	46,2	44,60
	44,74	0,26	43,0	
Filo dopo trafilatura (doppio trattamento)	38,54	0,22	46,20	43,11
	44,80	0,28	40,01	

Le dimensioni reali sono:

Tab. 5.5 Dimensioni reali dei grani

	Dimensioni assolute (μm)
Vergella	77,14
Filo dopo trafilatura (trattamento convenzionale)	61,12
Filo dopo trafilatura (doppio trattamento)	59,06

Con il doppio trattamento si vede come le dimensioni dei grani siano confrontabili con quelle ottenute con il trattamento convenzionale.

Gli spettri XRD per vari tempi di trattamento del filo sono i seguenti:

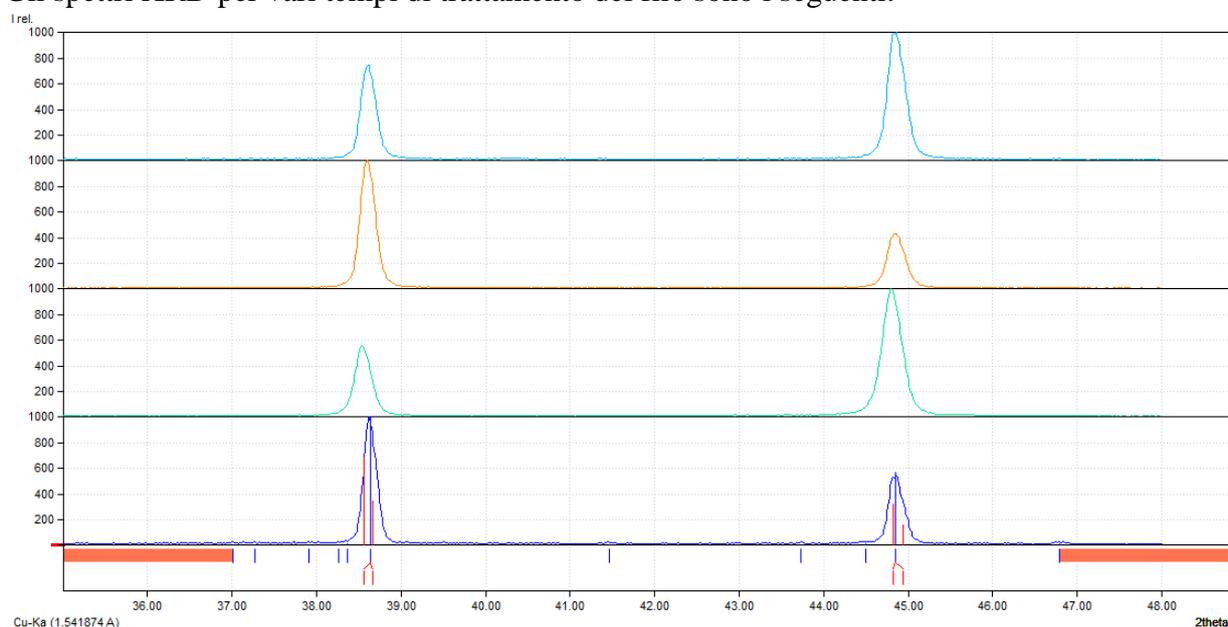


Figura 5.25 Spettri XRD. Dal basso: vergella base, filo dopo trafilatura, filo dopo due ore di trattamento a regime, filo dopo 9 ore di trattamento a regime

Come visto con il trattamento convenzionale, all'aumentare del tempo di trattamento termico i picchi si avvicinano ai picchi caratteristici dell'alluminio; in particolare alla fine del trattamento la posizione coincide con la posizione dei picchi della vergella base.

I dati ricavati dagli spettri XRD dopo vari tempi di trattamento sono riportati in tabella:

Tab. 5.6 Dati ottenuti dagli spettri XRD

	θ (°)	FWHM (°)	Dimensioni (nm)	Dimensioni medie (nm)
Vergella	38,62	0,18	56,5	56,30
	44,86	0,2	56,1	
Filo dopo trafilatura	38,54	0,22	46,20	43,11
	44,80	0,28	40,01	
Filo dopo 2 h di trattamento	38,6	0,22	46,24	46,48
	44,84	0,24	46,71	
Filo dopo 9 h di trattamento	38,62	0,2	50,88	48,80
	44,86	0,24	46,73	

Dimensioni reali dei grani:

Tab. 5.7 Dimensioni reali dei grani

	Dimensioni assolute (μm)
Vergella	77,14
Filo dopo trafilatura	59,06
Filo dopo 2 ore di trattamento	63,67
Filo dopo 9 ore di trattamento	66,86

Tab. 5.8 Confronto tra la dimensione dei grani alla fine del trattamento termico con trattamento convenzionale e doppio trattamento

	Dimensioni assolute (μm)
Filo dopo 8 ore di trattamento (trattamento convenzionale)	66,84
Filo dopo 9 ore di trattamento (doppio trattamento)	66,86

Le dimensioni dei grani risultano quindi essere le stesse. Il doppio trattamento termico non influisce sulle dimensioni dei grani.

5.3 Conclusioni sui risultati sperimentali

Il doppio trattamento permette di ottenere una conducibilità elettrica nettamente maggiore rispetto al trattamento convenzionale. Con le immagini SEM si è visto come i precipitati risultino leggermente più grandi e di forma circolare; con il doppio trattamento infatti in totale viene data più energia al materiale e questo si traduce nell'avere meno atomi di soluto in soluzione. Questo, come spiegato in precedenza, permette l'ottenimento di una migliore conducibilità elettrica.

L'importante aumento di conducibilità elettrica ottenuto, permette un incremento della potenza elettrica trasportata; tutto questo con un conduttore della stessa sezione quindi non comporta problemi di messa in opera né altri svantaggi.

Conclusioni

I conduttori elettrici aerei sono un campo di applicazione dell'ingegneria dei materiali molto attuale e lo studio del quale porta a importanti benefici per quanto riguarda la diminuzione delle perdite di energia elettrica. Il lavoro qui riportato ha principalmente due obiettivi: il primo è quello di presentare in modo critico i vantaggi e gli svantaggi dei conduttori attualmente utilizzati; il secondo è, prendendo le mosse dalla parte di confronto, ottenere proprietà migliori per quanto riguarda le leghe di alluminio della serie 6000, rispetto alle proprietà che vengono attualmente ottenute con il trattamento tecnico cosiddetto "tradizionale".

Le tecniche utilizzate per riportare un confronto completo tra i materiali sono quelle presentate da M. F. Ashby nel suo libro "Materials Selection in Mechanical Design" e in particolare i grafici di compromesso e le funzioni di penalizzazione. Queste tecniche hanno permesso di concentrare il confronto prima sulle due proprietà più importanti, quali conducibilità elettrica e carico di rottura, e avere così una visione chiara dei materiali con le caratteristiche migliori e, in un secondo momento, un confronto più completo considerando le altre proprietà importanti per la specifica applicazione quali densità, modulo elastico, coefficiente di espansione termica e costo. Lo studio dei grafici di compromesso ha permesso di visualizzare i vantaggi che porta una combinazione di più materiali per costituire il conduttore: un'anima centrale portante che consente di avere le volute caratteristiche meccaniche, e un mantello esterno in grado di dare sufficiente conducibilità elettrica. Una delle cose che si è sottolineata maggiormente è l'importanza di considerare proprietà specifiche; materiali che risultavano migliori, primo fra tutti il rame, considerando la conducibilità elettrica e le proprietà meccaniche, sono superati di gran lunga dai conduttori che impiegano alluminio e leghe di alluminio. Le proprietà di conducibilità elettrica e di carico di rottura dei conduttori studiati per il confronto sono state ricavate dalle norme che ne regolano la produzione e l'utilizzo; questo permette di avere una visione veritiera delle proprietà dei vari conduttori dato che i materiali utilizzati subiscono lavorazioni meccaniche e trattamenti termici in grado di modificare profondamente le proprietà dei materiali di partenza. Il confronto ha rivelato un buon piazzamento delle leghe di alluminio che non risultano però il materiale più vantaggioso. Considerando però la teoria sull'invecchiamento delle leghe di alluminio e la pratica industriale utilizzata, è stato possibile ideare una nuova procedura che consenta il miglioramento della conducibilità elettrica delle leghe di alluminio (in particolare della lega 6101). I risultati della procedura innovativa sono riportati nell'ultimo capitolo della tesi: si vede come considerando un carico di rottura di 320 MPa si riesca ad ottenere una resistività di 30,5 nΩ m mentre con il trattamento convenzionale allo stesso carico corrisponde una resistività elettrica 31,5 nΩ m. Il miglioramento quindi risulta netto e

un'ulteriore ottimizzazione consentirà di produrre tutte le categorie di lega di alluminio riportate nella norma CEI-EN 50183 con ampi margini; inoltre questa lega "superconduttiva" ottenuta permette una diminuzione delle perdite di energia elettrica, fatto di notevole importanza. È stata svolta inoltre una breve caratterizzazione allo scopo di confrontare i campioni ottenuti con trattamento convenzionale e quelli ottenuti con trattamento innovativo

Bibliografia e sitografia

Bibliografia

- ⁽¹⁾ Aluminium Company of America, ALCOA Aluminium Handbook), ALCOA Pittsburgh, Pa 1967
- ⁽²⁾ Sedat Karabay, Influence of AlB_2 compound on elimination of incoherent precipitation in artificial aging of wires drawn from redraw rod estrude from billets cast of alloy AA-6101 by vertical direct chill casting. *Materials and Design* 29 (2008) 1364-1375
- ⁽³⁾ X. Xu, Z. Yang, Y. Ye, G. Wang, X. He, Effects of various Mg/Si ratios on microstructure and performance property of Al-Mg-Si alloy cables, *Materials Characterization* 119 (2016) 114-119
- ⁽⁴⁾ Q. Zhao, Z. Qian, X. Cui, Y. Wu, X. Liu, Influence of Fe, Si and homogeneization on electrical conductivity and mechanical properties of dilute Al-Mg-Si alloy, *Journal of Alloys and Compounds* 666 (2016) 50-57
- ⁽⁵⁾ M. Murashkin, A. Medvedev, V. Kazykhanov, A. Krokhin, G. Raab, N. Enikeev, R. Z. Valiev, Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultrafine-grained Al 6101 alloy processed via ECAP-Conform, *Metals* 2015
- ⁽⁶⁾ C.H. Liu, J. Chen, Y. X. Lai, D. H. Zhu, Y. Gu, J. H. Chen, Enhancing electrical conductivity and strength in Al alloys by modification of conventional thermo-mechanical process, *Materials and Design* 87 (2015) 1-5
- ⁽⁷⁾ B. Smyrak, Influence of temperature and time of ageing on 6201 grade AlMgSi wire and rod, 18.-20.5.2011, *Metal* 2011

Sitografia delle immagini

Fig. 1.1 http://luce-gas.it/images/Filiera%20elettrica%20-%20aspetti%20tecnologici_2.jpg

Fig. 1.2 www.terna.it, “Analisi sintetica dei dati elettrici più rappresentativi dell’anno 2015”.

Fig. 1.3, 1.6, 2.6 <http://www.deangeliprodotti.com>

Fig. 1.4 LINEE ELETTRICHE Appunti a cura dell’Ing. Emanuela Pazzola, Facoltà d’Ingegneria dell’Università degli Studi di Cagliari

Fig. 1.7 M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, third edition, ELSEVIER, 2005

Fig. 4.6 a. <http://www.metalli.ab4trade.com/wp-content/uploads/2013/08/alluminio-secondario1.jpg>

Fig. 4.6 b. <http://www.trimet.eu/en/produkte/lieferformen/draht>

Fig. 4.7 a. <http://www.rotta.it/processi>

Fig. 4.7 b. <http://www.mgdies.com/>

Fig. 4.8 http://altecsrl.com/cordatrice_a_detorsione_planetaria_12x600.phtml

