

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA DEI MATERIALI

Tesi di Laurea Magistrale in

Ingegneria dei materiali

**Analisi di resistività elettrica nel fenomeno
della solidificazione di ghise lamellari**

**Analysis of electrical resistivity during grey cast iron
solidification**

Relatore: Prof. Ing. Manuele Dabalà

Tutor aziendale: Mauro De Lissandri

Laureando: ANDREA LOVATO

Matricola: 1045393

ANNO ACCADEMICO 2014 – 2015

*“It is impossible to measure anything
without disturbing it”*

Uncertainty principle, 1927

Werner Karl Heisenberg

Abstract

The thermal analysis offers an efficient method of controlling the structure and properties of materials during solidification. Nevertheless, it presents some critical points: this paper has the aim to investigate an alternative procedure to optimize the timing of the analysis, focusing on the grey cast iron and on the possible correlation between the electrical resistivity and the microstructural changes, in order to accelerate the whole process.

The electrical analysis is an innovative method and it has been necessary the support of the results of the thermal analysis, currently applied, in order to verify the output of the new procedure, looking for obtaining a correlation between the equivalent carbon and the electrical resistivity at the liquidus temperature.

This paper first describes the current method of thermal analysis with the related restrictions, especially upon the necessary timing to extract the data. Therefore, alternative methods have been proposed, such as the electrical analysis, here investigated, in order to get the same information, both simplifying and accelerating the process.

Then the work presents the detailed choice of materials and tools for the application of the electrical resistivity, in two different studies (with 2 electrodes or with 4 electrodes).

All the empirical data are shown to give the complete picture of the analysis, comparing the trends of the derivative functions of the thermal analysis and the electrical one, in order to find any similarity.

In conclusion, we can confirm the existence of a strong correlation between the chemical composition of the grey cast iron materials and the electrical resistivity at the liquidus temperature.

This knowledge can be crucial for additional investigations, in order to further improve the process, reducing the internal expenses of foundries, increasing the efficiency and the safety of the actual procedure.

Keyword: Cast iron, electrical resistivity, cooling curve, thermal analysis.

Ringraziamenti

Vorrei esprimere la mia sincera gratitudine a:

Prima di tutti, al professor Manuele Dabalà per aver creduto in me, per lo sviluppo di questo progetto, per aver suscitato il mio interesse verso il mondo della ghisa e dell'analisi termica, nonché per aver supportato il mio lavoro.

L'azienda Fassmet, in particolare Mauro e Luca, per avermi accolto, agevolato in questo progetto e messo a disposizione le attrezzature in modo da poter farmi lavorare nel miglior dei modi, ottenendo gli ottimi risultati finali. Luigi per avermi trasmesso, giorno dopo giorno, la passione per il lavoro che svolge e per avermi insegnato tante piccole cose che non si possono trovare in alcun libro.

Tutti i colleghi del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova per aver creato un ambiente di lavoro eccellente.

La mia famiglia per il loro continuo sostegno e incoraggiamento.

Tutte le persone che non ho menzionato per nome, ma con le quali sarò sempre in debito!

Sommario

1. INTRODUZIONE	1
1.1. Metodo attuale per la rilevazione della cooling curve	2
1.2. Limitazioni del metodo	4
1.3. Possibili metodi alternativi per la rilevazione	5
1.3.1. Rilevazione della permeabilità magnetica.....	6
1.3.2. Rilevazione di resistività elettrica	11
1.4. Il fenomeno della resistività elettrica.....	13
1.4.1. Modello di conduzione classico (Drude-Lorentz).....	14
1.4.2. Teoria delle bande	16
1.4.3. La massa efficace	17
1.4.4. Dipendenza dalla temperatura	18
1.4.5. Resistività di una lega multicomponente	23
1.5. Analisi della ghisa tramite resistività	24
2. METODI, STRUMENTAZIONE E SELEZIONE DEI MATERIALI	31
2.1. Strumentazione utilizzata.....	33
2.1.1. Software per l'analisi termica	33
2.1.2. Strumento di misura della resistenza e procedura preparativa	34
2.1.3. Programma Matlab per grafici, curve derivate e smooth delle curve	37
2.1.4. Programma CES EduPack.....	39
2.2. Primo metodo: rilevazione con 2 elettrodi.....	39
2.3. Secondo metodo: rilevazione con 4 elettrodi.....	41
2.4. Materiale base utilizzato per la colata.....	43
2.5. Scelta del materiale per gli elettrodi basati sul primo metodo.....	46

2.6. Scelta materiale per elettrodi con il secondo metodo	52
3. ANALISI DEI DATI	58
3.1. 1° metodo.....	58
3.2. 2° metodo.....	69
3.3. Confronto tra le curve dell'analisi elettrica	74
3.4. Confronto con le curve dell'analisi termica	77
3.5. Individuazione punti critici nell'analisi elettrica (T_{liquidus})	82
4. RISULTATI E CONCLUSIONI	87
APPENDICE 1	89
APPENDICE 2	90
Bibliografia.....	95

Capitolo 1

1. INTRODUZIONE

Alla base di qualsiasi processo di fonderia, il fenomeno della solidificazione riveste un ruolo fondamentale per la buona riuscita dei getti ed è al tempo stesso il momento che richiede la maggior attenzione. Pertanto si ritiene di primaria importanza poterne seguire l'evoluzione in modo preciso e dettagliato.

Nel panorama internazionale tale obiettivo è stato raggiunto mediante l'analisi della temperatura, durante il processo di solidificazione, di un campione di materiale fuso. Lo studio di questo fenomeno ha permesso di migliorare i processi di fusione e la qualità dei manufatti, consentendo la formazione di geometrie sempre più complesse pur mantenendo buone caratteristiche meccaniche.

Sebbene siano ben conosciute le correlazioni tra proprietà fisiche e microstruttura, i processi di solidificazione riguardanti le leghe di ghisa sono tutt'oggi oggetto di ricerche scientifiche. Da queste proviene la spinta verso nuovi approcci, basati su diversi fenomeni fisici in modo da investigare altre possibili manifestazioni, che con le attuali tecniche non verrebbero rilevate. Queste ricerche hanno lo scopo di fornire un metodo che permetta di ottenere informazioni aggiuntive sulle proprietà meccaniche o sull'analisi chimica del materiale, presumendo di poterle mettere in parallelo all'attuale metodo di analisi termica, o perfino sostituirlo nel caso fornissero informazioni più accurate.

Questo elaborato si prefigge l'obiettivo di presentare e descrivere la procedura di un metodo del tutto innovativo per l'analisi delle proprietà del materiale di colata, presupponendo che in futuro potrà essere associato all'attuale metodo di rilevazione della temperatura.

Nel primo capitolo si andrà pertanto ad illustrare il metodo di rilevazione attualmente utilizzato, con i suoi pregi e limitazioni, che hanno portato all'idea dell'investigazione in nuovi settori. Verranno in seguito presentati i possibili metodi alternativi e in particolare

INTRODUZIONE

quello oggetto di studio. Nel secondo capitolo si andranno a descrivere le procedure che hanno portato alla scelta di particolari materiali essenziali per la buona riuscita delle prove e la strumentazione utilizzata per rilevare i dati. Nel terzo capitolo si descriveranno le prove sviluppate durante il tirocinio presso l'azienda Fassmet di Mauro De Lissandri e l'analisi dei dati ottenuti. Infine, saranno esposte le conclusioni e i risultati ottenuti da questo nuovo metodo tra cui la correlazione tra il carbonio equivalente e la resistenza della ghisa alla temperatura di liquidus.

1.1. Metodo attuale per la rilevazione della cooling curve

Sia i metalli puri, sia le leghe allo stato liquido, se posti all'interno di un contenitore in contatto con l'ambiente, tenderanno a raffreddarsi cedendo calore secondo le dinamiche di conduzione, convezione e irraggiamento.

Si può comprendere come la solidificazione sia un fenomeno molto rilevante per i materiali metallici poiché risulta essere il momento in cui si formano i primi cristalli e dalle caratteristiche di questi (dimensioni, forma e orientazione) dipenderanno tutte le proprietà fisiche e tecnologiche del materiale. Infatti, dal momento che la maggior parte delle leghe sono ottenute partendo da un prodotto liquido, la loro struttura e costituzione sono direttamente legate a quanto è avvenuto durante il passaggio dalla fase liquida a quella solida.

Lo studio della solidificazione di diversi materiali metallici, tra cui le ghise, venne svolto per la prima volta da Alfred Boyle nel 1946 mediante l'utilizzo di termocoppie costituite dall'unione di un filo di Platino e uno di Platino-Rodio (denominate oggi B, R, o S in funzione della percentuale dei due elementi, e permettono rilevazioni di temperatura in intervalli tra -50°C e 1820°C con una sensibilità di $10\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$). Nel campo delle ghise questo metodo ha costituito le basi per la determinazione delle percentuali in peso di carbonio e di silicio, mediante lo sviluppo di relazioni empiriche, partendo dalle temperature di liquidus e di eutettico metastabile, e fornendo in questo modo un'analisi chimica elementare.

Tale metodo è stato ampiamente diffuso grazie allo sviluppo di termocoppie più economiche e di crogioli di varie forme, rendendoli adatti a diverse applicazioni.

Tuttavia sono state riscontrate alcune discrepanze tra i dati delle diverse fonderie, pertanto si è cercato di forzare la solidificazione verso un sistema metastabile: ciò è stato possibile grazie all'aggiunta di tellurio nella coppetta di solidificazione che impedisce la recalescenza eutettica e la fase grafitica, potendo così ricavare l'esatta percentuale di C e Si.

Di contro questo approccio non permette di ottenere informazioni sulla formazione della grafite, la cui conoscenza risulta essere fondamentale per una fonderia di ghisa, per la previsione delle proprietà meccaniche del materiale.

Attraverso l'introduzione di computer e di sistemi di conversione analogico/digitale con risoluzione a 16 bit è stato possibile elaborare e registrare in tempo reale la curva di raffreddamento, permettendo la rilevazione non più in laboratorio ma direttamente nel reparto di produzione, dove tale tecnica si è imposta come metodo di controllo in particolare nelle linee di produzione continua che richiedono un costante riscontro con i canoni di qualità. La tecnica di analisi termica si è rivelata efficace per valutare, prima della colata, una serie di parametri importanti, quali le temperature di solidificazione eutettica, la recalescenza e il sottoraffreddamento, nonché la qualità finale dei getti, ottimizzando il controllo del processo di fusione.

Il sistema è costituito da un contenitore a forma di parallelepipedo contenente un volume di 54 mm³ (*chill-cup* – *Figura 1-1*) dentro il quale la ghisa da analizzare verrà colata e andrà a solidificarsi. All'interno la coppetta possiede, a metà dell'altezza, una termocoppia di tipo K¹ rivestita da un tubo capillare di vetro quarzo, del diametro di 3 mm e lungo 40 mm, il quale evita il cortocircuito tra la ghisa e i fili. Questi ultimi escono lateralmente dal recipiente e vanno a collegarsi sul fondo dove, una volta in opera, avverrà il collegamento elettrico con il supporto resistente al calore (*contact block*) [1 sitografia]. Da esso fuoriescono i cavi che si collegano al convertitore

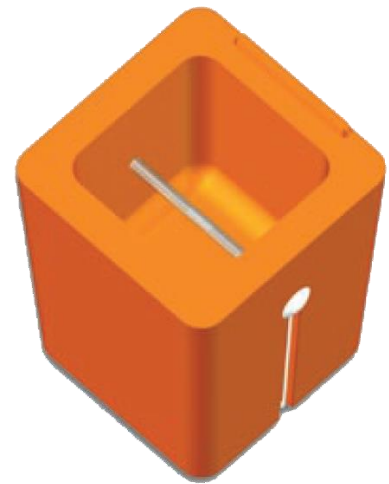


Figura 1-1: *chill-cup* in sabbia-resina

¹ Questo tipo di trasduttore è costituito dall'accoppiamento tra un filo di lega Ni-Cr e un filo di lega Ni-Al, i quali forniscono una sensibilità approssimativa di 41 $\mu V/^{\circ}C$ valida in un intervallo di temperature da $-200^{\circ}C$ a $+1350^{\circ}C$.

INTRODUZIONE

analogico-digitale (A/D) e successivamente il segnale digitale viene trasmesso al computer tramite la porta USB.

La rappresentazione dell'evoluzione termica del fuso, durante la fase di solidificazione, avviene mediante la visualizzazione, da parte del software, di diagrammi tempo – temperatura aggiornati in tempo reale.

1.2. Limitazioni del metodo

Nel paragrafo precedente si è esposto come avviene la solidificazione nella chill-cup e di come la temperatura venga rilevata. Questo metodo presenta però alcune limitazioni, esposte qui di seguito:

- La modalità stessa di rilevazione della temperatura potrebbe pregiudicare la naturale solidificazione del provino in quanto è posto un tubo di materiale, estraneo a quello della colata, lungo tutta la sezione orizzontale, inquinando quindi la solidificazione naturale.
- In questo tipo di analisi, si associa a una determinata variazione di temperatura una trasformazione di fase, senza però poter avere informazioni circa la dimensione dei grani che si sono formati.
- Nelle ghise sferoidali il parametro che identifica il numero dei noduli (nodule count) viene calcolato mediante una funzione la cui variabile è la derivata della temperatura rispetto al tempo, nel momento in cui avviene la solidificazione (T_{sol}). È necessaria perciò una media statistica per valutare i coefficienti della funzione.
- Non è possibile prevedere con esattezza la forma della grafite (lamellare, vermicolare, sferoidale) nei primi 100 secondi.
- Impossibile identificare prodotti di precipitazione non metallici come solfuri, ossidi, nitruri, ecc.
- L'analisi termica consente di calcolare solo i rischi di formazione di carburi primari.

- La conduttività termica viene correlata all'angolo che forma la derivata in prossimità della temperatura di solidus. La misura risulta assai complessa in quanto la curva potrebbe subire delle variazioni nel tratto considerato, compromettendo quindi la misura stessa. Inoltre, questo tratto di curva non dipende solo dalla conduttività termica del materiale ma risulta anche influenzata dal ritiro, dalla forma della grafite e dal contenuto di Mg residuo nel caso di ghise con grafite sferoidale. Risulta quindi impossibile isolare ogni effetto per valutare le singole influenze ed avere un risultato attendibile.
- La predizione dei difetti è basata sull'angolo della derivata, come spiegato sopra, influenzato da più variabili finora inseparabili.
- La calibrazione del software è molto laboriosa e necessita di pregressi studi statistici.
- L'analisi termica deve essere sempre fatta con gli stessi contenitori, altrimenti i risultati non potranno essere confrontabili.
- Le termocoppie di tipo K limitano la temperatura di colata a 1350°C poiché a temperature superiori potrebbe portare alla fusione dei fili che la costituiscono, invalidando così la prova. Sarebbe necessario pertanto, utilizzare termocoppie di tipo S resistenti fino a 1700°C ma incrementando notevolmente i costi.

1.3. Possibili metodi alternativi per la rilevazione

In tutte le fonderie di ghisa, il controllo di qualità del materiale da colare viene principalmente effettuato con il metodo dell'analisi termica, ma, come è stato appena descritto, pone dei limiti per ora invalicabili. Questa è stata la forza motrice per la ricerca di eventuali metodi alternativi che permettessero di fornire informazioni aggiuntive rispetto alle consuete, e che al tempo stesso potessero fornire valori più attendibili per aumentare la qualità microstrutturale, che si riflette sulle proprietà meccaniche del prodotto finale.

Di seguito sono presentati due metodi innovativi per fornire in ugual misura le caratteristiche rilevate dall'analisi termica, cercando allo stesso modo di essere il meno

INTRODUZIONE

invasivi possibile al fine di non alterare la misura, e fornire informazioni aggiuntive grazie al verificarsi di fenomeni fisici differenti.

1.3.1. Rilevazione della permeabilità magnetica

In questo sotto paragrafo si vuole illustrare un metodo che potrebbe essere alternativo all'analisi termica.

La proprietà di conduzione elettrica posseduta un metallo fuso, porta ad ipotizzare l'impiego dei campi magnetici. In particolare, oggi si sfrutta questa caratteristica per valutare la variazione di permeabilità magnetica negli acciai inossidabili austenitici dopo essere stati sottoposti al processo di trafilatura a freddo. Tale lavorazione produce una significativa deformazione che induce un incrudimento nel materiale trasformando parte dell'austenite in martensite. [2 sitografia]

La regione dello spazio in cui si manifestano le forze magnetiche prende il nome di campo magnetico. Esso è un campo vettoriale solenoidale generato dal moto di una carica elettrica o da un campo elettrico. Pertanto un conduttore percorso da corrente produrrà un campo magnetico nello spazio che lo circonda. Direzione e verso del campo magnetico vengono descritti dalle linee di forza che sono tangenti alla direzione in ogni punto e sono tanto più fitte quanto più elevata è l'intensità del campo (H).



Figura 1-2: campo magnetico attorno ad un filo percorso da corrente continua

Viene designato col nome di solenoide un sistema di spire contigue e coassiali. Il campo magnetico prodotto da un solenoide rettilineo si compone di un fascio di linee di forza che attraversano il solenoide uscendo da una estremità (per convenzione denominato *polo nord*) per aprirsi verso l'esterno e racchiudersi all'estremità opposta (*polo sud*). Un solenoide realizza al suo interno un campo magnetico uniforme e di intensità proporzionale al numero delle spire (N) e all'intensità della corrente (I); questo prodotto viene designato col nome di *forza magnetomotrice* e viene misurata in amperspire.

L'intensità del campo, invece, varia in modo inversamente proporzionale alla lunghezza del solenoide (l), dunque si definisce:

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \quad (1.1)$$

L'unità di misura del campo magnetico H è l'ampere al metro A/m.

Se ora si immagina di considerare il flusso (Φ) passante su un'unità di superficie (S), normale alle linee di induzione, è possibile definire la sua densità come *induzione magnetica* (B) e si misura in tesla T.

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (1.2)$$

L'induzione è direttamente proporzionale all'intensità del campo magnetico e si presenta con caratteristiche di grandezza vettoriale avente la stessa direzione e lo stesso verso del vettore H. La costante di proporzionalità viene detta *permeabilità magnetica assoluta* (μ) e si misura in henry al metro H/m. Essa è data dal prodotto della *permeabilità magnetica relativa* (μ_r), valore adimensionale e dipendente dal mezzo fisico in cui ha sede il campo, con la *permeabilità magnetica del vuoto* (μ_0) misurata quindi in H/m.

La presenza di un materiale immerso nel flusso (B) provoca una variazione del campo magnetico rispetto alla situazione in cui lo spazio considerato sia vuoto (B_0), introducendo una nuova grandezza adimensionale, la *suscettività magnetica* (χ_m). Di seguito viene prima definita e poi correlata alla permeabilità magnetica assoluta dalle seguenti relazioni:

$$B_m = B - B_0 = \mu_0 \chi_m H \quad ; \quad \chi_m = \mu_r - 1 \quad ; \quad \mu = \mu_0 (\chi_m + 1) \quad (1.3)$$

Nel caso in analisi, il materiale oggetto di analisi è ghisa, e possiede pertanto caratteristiche ferromagnetiche: di conseguenza la permeabilità magnetica relativa dipende dall'intensità del campo magnetico H. Il ciclo di isteresi rappresenta il diagramma di stato del materiale e la sua forma dipende fortemente dalla composizione della sostanza in esame.

INTRODUZIONE

Altra proprietà fondamentale dei materiali ferromagnetici è che per ognuno di essi esiste una *temperatura critica* (T_c), detta *temperatura di Curie*, al di sopra della quale il materiale diventa paramagnetico e la suscettività segue la legge:

$$\chi_m = \frac{C \cdot \rho}{T - T_c} \quad (1.4)$$

Dove:

ρ è la densità;

C è la costante di Curie;

T_c per il ferro è 1043 K ovvero 770°C.

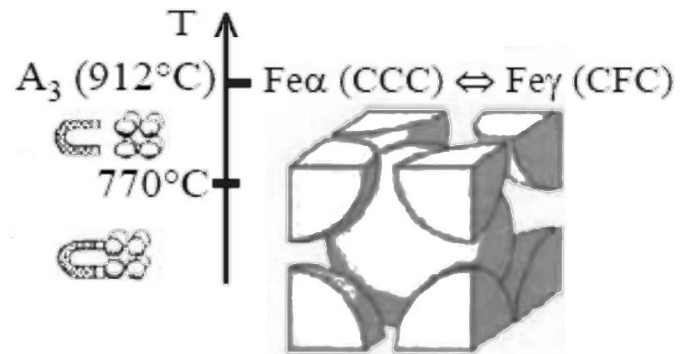


Figura: 1-3 trasformazione allotropica del ferro da ferromagnetico a paramagnetico

Si consideri un solenoide collegato ad un generatore. Quando la tensione nel circuito non è costante nel tempo, il flusso concatenato varia anch'esso e compare ai capi del solenoide una forza elettromotrice indotta. In un circuito contenente un induttore e ad esso applicata una tensione alternata sinusoidale, con frequenza f , si permetterà il passaggio di una corrente (i) che varia nel tempo con pulsazione $\omega = 2\pi f$, caratterizzata da uno sfasamento rispetto alla forza elettromotrice (\mathcal{E}_0).

$$i = \frac{\mathcal{E}_0}{\omega L} \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (1.5)$$

Dove:

ωL è la reattanza dell'induttore;

t è il tempo;

L è l'induttanza dell'induttore.

L'induttanza è misurata in henry (H); tale grandezza dipende dalla sua forma e dalle caratteristiche magnetiche del mezzo posto all'interno del solenoide.

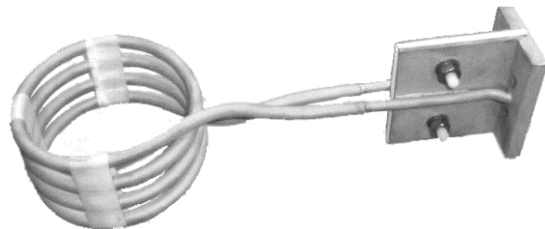


Figura 1-4: induttore per il rilevamento di campi magnetici



Figura 1-5: rilevazione della permeabilità magnetica.

Introducendo la ghisa liquida all'interno di un contenitore avvolto da un solenoide è possibile sfruttare quanto visto e rilevare la variazione di induttanza nel tempo. In altre parole, si andrà a correlare l'andamento dello sfasamento della tensione rispetto alla corrente, alla permeabilità magnetica assoluta del provino durante la solidificazione.

È un metodo che necessita di particolari strumenti e quindi potrebbe risultare alquanto complesso da attuare.

Un metodo alternativo è l'utilizzo della concatenazione dei flussi magnetici.

Ogni qualvolta il flusso del campo magnetico $\Phi(B)$, concatenato con un circuito, varia nel tempo, si ha la generazione di una forza elettromotrice indotta \mathcal{E}_i data dall'opposto della derivata del flusso rispetto al tempo:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d \Phi(B)}{dt} \quad (1.6)$$

La forza elettromotrice indotta si comporta quindi come un generatore. L'effetto è sempre tale da opporsi alla causa che l'ha generata in accordo con il principio di conservazione dell'energia.

Sulla base di quanto detto è possibile accoppiare due circuiti caratterizzati ognuno dalla propria induttanza che dipende dalla forma, dalla posizione relativa, oltre che dalla permeabilità dei mezzi. [4]

Questo secondo metodo sfrutta l'utilizzo di un nucleo di materiale ferromagnetico con lo scopo di aumentare il flusso $\Phi(B)$ per una data corrente e far sì che le linee di forza di B restino all'interno del traferro. L'avvolgimento primario, composto da N_p spire, è collegato ad un generatore che fornisce la potenza mentre l'altro è definito avvolgimento secondario, composto da N_s spire e conterrà al suo interno il provino di ghisa liquida da analizzare.

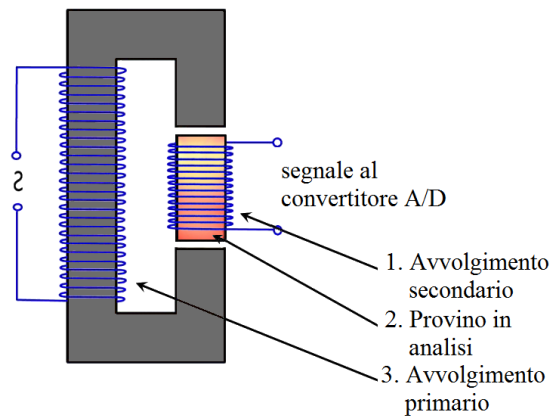


Figura 1-6: rilevazione della permeabilità magnetica sfruttando l'accoppiamento per mutua induzione

Nel primario circolerà la corrente i_p fornita dal generatore, mentre nel secondario circolerà la corrente i_s . Così descritti i due avvolgimenti risultano mutuamente accoppiati, pertanto una variazione sul primo si ripercuoterà sul secondo:

$$\frac{i_s}{i_p} = - \frac{N_p}{N_s} \quad (1.7)$$

Questo accoppiamento risulta assai più versatile per il fatto che da un lato il generatore impone una tensione alternata che provoca un flusso. Questo si concatenerà nel secondo avvolgimento grazie alla presenza della ghisa liquida che fungerà da mezzo concatenante. Poiché durante la solidificazione si andranno a formare diverse fasi, quali austenite (con permeabilità magnetica relativa prossima all'unità) e ferrite (paramagnetica a temperature superiori a 770°C), queste avranno comportamenti diversi e influenzeranno il campo magnetico nel quale sono immersi. In particolare una struttura ferritica esibisce una piccola perdita d'isteresi ed elevata permeabilità magnetica; al contrario una morfologia perlitica induce una elevata perdita d'isteresi e una limitata permeabilità magnetica. Un basso valore di carbonio equivalente aumenta la cementite libera producendo bassa permeabilità magnetica, assieme a elevate perdite di isteresi.

Elevate proprietà magnetiche si presentano sia in ghise bianche, sia nelle ghise malleabili. In questa classifica al secondo posto si posizionano le ghise sferoidali, dove la conformazione della grafite produce una esigua influenza sulla perdita di isteresi nelle ghise con matrice perlitica, ma ne diminuisce il valore in caso di matrice ferritica.

Nelle ghise grigie la grafite lamellare non influenza la perdita d'isteresi ma previene la formazione di elevati campi magnetici causati dalla demagnetizzazione. [5]

Con il metodo precedentemente descritto la misura consta solo in un rilevatore di corrente collegato al secondario che invierà i dati al convertitore A/D ed in seguito il calcolatore correlerà i valori con la variazione di permeabilità magnetica.

Questo metodo presenta però alcuni punti critici per lo studio in esame, in quanto l'utilizzo di correnti alternate inducono nel metallo fuso il fenomeno della forza di Lorentz, comportando lo sviluppo dell'agitazione magnetica. [6] Questa implica la rottura delle punte dei rami secondari delle dendriti, generando così una solidificazione con conformazione differente rispetto a quella naturale. [7]

1.3.2. Rilevazione di resistività elettrica

Dal punto di vista della conduzione elettrica possiamo suddividere i materiali in *conduttori*, nei quali la corrente fluisce con una certa facilità, e in *isolanti* ove tutte le cariche elementari di segno opposto presenti nei loro atomi son reciprocamente vincolate, in modo che le forze derivanti dai campi elettrici possano soltanto determinare un leggero scostamento conseguente alla deformazione delle orbite.

Si definisce *resistività elettrica* (ρ) una caratteristica intrinseca del materiale, ossia l'attitudine ad ostacolare il passaggio delle cariche elettriche. Nel sistema internazionale l'unità di misura è l'ohm per metro $\Omega \cdot m$. I materiali isolanti devono possedere una resistività maggiore di $10^{14} \Omega \cdot m$, a differenza dei conduttori che possiedono una resistività attorno a $10^{-8} \Omega \cdot m$.

Alcune volte potrebbe risultare più semplice ragionare in termini di *conduttività elettrica* (o *conducibilità elettrica specifica*) (σ), reciproco della resistività. La sua unità di misura è il Siemens al metro S/m.

La *resistenza elettrica* (R) invece, è una grandezza fisica scalare di un corpo che tende ad opporsi al passaggio della corrente elettrica quando è sottoposto a una tensione elettrica.

INTRODUZIONE

Nel sistema internazionale la sua unità di misura è l'ohm Ω e dalla *prima legge di Ohm* la si definisce come:

$$R = \frac{V}{I} \quad (1.8)$$

Laddove:

V indica la tensione elettrica (V);

I è la corrente elettrica (A).

Questa opposizione dipende dal materiale e in particolare se ha una geometria ben definita è possibile collegarla alla resistività elettrica.

I due parametri sono legati dalla seguente relazione nota come *seconda legge di Ohm*:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} \quad (1.9)$$

Dove:

L rappresenta la lunghezza del conduttore (m);

S è la sezione del conduttore (m²).

La *conduttanza elettrica* (G), misurata in Siemens (S) invece, è l'espressione quantitativa di un materiale a non ostacolare il moto degli elettroni attraverso di esso e per definizione è il reciproco della resistenza.

Ciò che ha portato a pensare di ricorrere all'utilizzo di tale entità fisica è stata la possibilità che tale fenomeno fosse direttamente e facilmente misurabile, anche ad elevata temperatura, con una buona accuratezza. Una peculiarità di questo metodo è che il flusso di elettroni costituente la corrente risulta sensibile alla struttura dell'oggetto che sta attraversando: tanto nel caso in cui quest'ultimo sia allo stato solido, quanto allo stato liquido. Questo è dovuto al moto degli elettroni, che durante i loro spostamenti attraverso il materiale incontrano diversi tipi di ostacoli come:

- Imperfezioni del reticolo²: la struttura cristallina del metallo è sempre associata a difetti puntuali, lineari o di superficie per una stabilità termodinamica.
- Atomi di impurità: perturbazione della nube elettronica del metallo base mediante differenti campi magnetici atti a respingere o attirare gli elettroni liberi.
- Fononi: vibrazioni degli atomi costituenti il materiale, dovute alla (inevitabile) temperatura diversa dallo zero assoluto. Essi giocano un ruolo importante nella comprensione di molte proprietà dei solidi quali il calore specifico, la conduzione termica, la conduzione elettrica e la propagazione del suono. [8]

Caratteristica altresì essenziale è la suscettibilità della resistività elettrica alla temperatura (a riguardo si scenderà in dettaglio nel prossimo paragrafo).

Queste caratteristiche hanno fatto supporre l'utilizzo di tale metodo con lo scopo di ricercare un connubio tra influenza microstrutturale e sensibilità termica.

1.4. Il fenomeno della resistività elettrica

La fisica classica è stata in grado di fornire un'espressione per la resistività, ma non è stata in grado di spiegare perché due diversi solidi cristallini composti da diverso materiale siano uno conduttore e l'altro isolante, e non permette di fornire informazioni circa la differenza tra le resistività.

A valori di temperatura e pressione ambiente molte sostanze si presentano allo stato solido, pertanto la distanza tra atomi e molecole viene a essere dello stesso ordine di grandezza della loro dimensione e allo stesso tempo le forze intermolecolari risultano avere intensità comparabile alle forze che legano gli atomi. Da questo fatto ne consegue che le proprietà della struttura vengono influenzate dalla presenza delle strutture più prossime.

² Le lavorazioni meccaniche a freddo inducono la formazione di dislocazioni sessili e di jogs con un conseguente aumento dell'incrudimento nel materiale. A tale fatto è associato un aumento di resistività. Tale controllo in opera permette quindi una valutazione veloce del grado di incrudimento su questi materiali.

1.4.1. Modello di conduzione classico (Drude-Lorentz)

Inizialmente i due fisici proposero, agli inizi del XX secolo, un modello per la conduzione elettrica descritto brevemente qui di seguito dal quale si potrà in parte apprendere il modello di conduzione nel materiale solido.

In un conduttore gli elettroni di conduzione si comportano come un “gas” di particelle. Essi sono continuamente in movimento e la direzione della loro traiettoria muta ad ogni collisione con gli ioni molto più pesanti di loro. Si muovono con velocità media dovuta all’agitazione termica (v_T) in tutte le direzioni, secondo la distribuzione di Boltzmann.

In assenza di campi elettrici esterni, data la casualità del moto, in media il numero degli elettroni che attraversano in una direzione una sezione di area unitaria in un dato tempo, è pari al numero di quelli che la attraversano nella direzione opposta. Pertanto dopo un certo numero di urti l’elettrone si troverà in una posizione che non dista di molto rispetto a quella di partenza; ne consegue che il flusso netto di carica risulterà nullo e nulla sarà la corrente elettrica (Figura 1-7 sez. A).

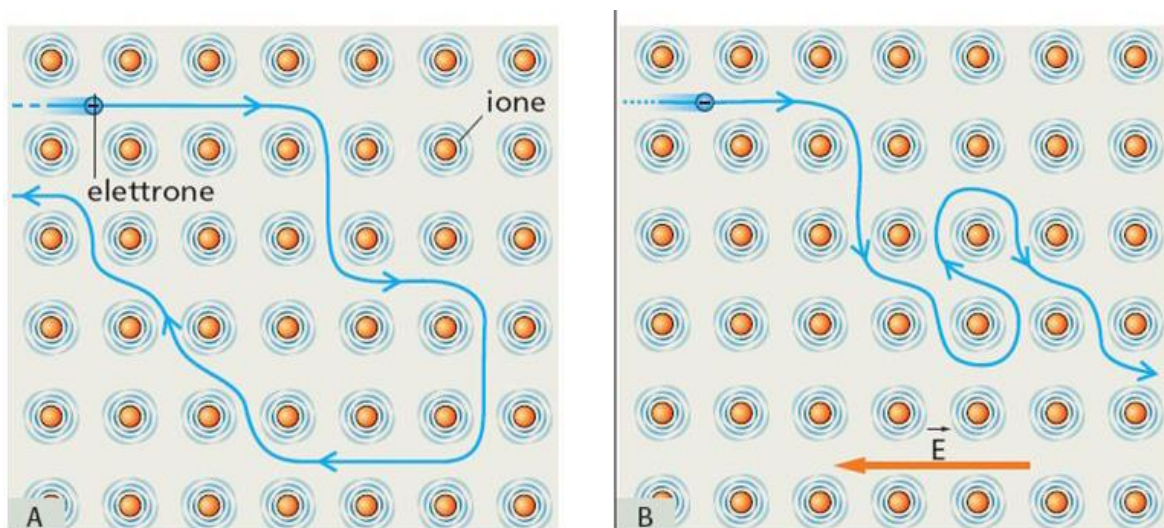


Figura 1-7: A) percorso di un elettrone di conduzione nel reticolo cristallino senza l’applicazione di campi elettrici; B) percorso dell’elettrone influenzato dall’applicazione di un campo elettrico E

L’applicazione di un campo elettrico E impone una forza e di conseguenza un’accelerazione (a) sull’elettrone. La variazione nel moto, dovuta alla collisione con gli ioni, privilegia una direzione rispetto alle altre; l’effetto risultante consiste nel fatto che gli elettroni di conduzione tendono a derivare nella direzione opposta al campo (Figura 1-7 sez. B),

acquistando una velocità media ordinata, *velocità di deriva* (v_D), nel tempo medio τ (*tempo di rilassamento*), fra un urto e il successivo.

$$v_D = a \tau = \frac{e E}{m} \tau \quad (1.10)$$

La velocità di deriva è correlata alla densità di corrente (j) definita come la corrente che attraversa l'unità di superficie:

$$v_D = \frac{j}{ne} \quad (1.11)$$

Dove n rappresenta il numero di elettroni coinvolti nell'unità di volume.

Dal confronto della (1.10) con la (1.11) e ricordando la proporzionalità tra corrente e tensione $j = \sigma \cdot E$ ne risulta:

$$\rho = \frac{m_e}{ne^2\tau} \quad (1.12)$$

Essa dipende da alcune costanti universali come la massa dell'elettrone (m_e) e dalla sua carica elementare (e), ma soprattutto dalle proprietà del metallo, ovvero il numero di elettroni (n) e dal tempo tra le collisioni τ (dell'ordine di 10^{-14} s). [9 sitografia]

Negli urti anelastici contro gli ioni del reticolo, gli elettroni cedono l'energia acquisita nell'accelerazione (questo fenomeno spiega l'effetto Joule) e riprendono a muoversi grazie all'energia termica media mutando la direzione in modo casuale.

Il modello, però, non è in grado di fornire informazioni riguardo alle ragioni per cui un materiale sia conduttore o meno. Di seguito ricorreremo alla teoria delle bande per giustificare questo fenomeno.

1.4.2. Teoria delle bande

Nei solidi cristallini la disposizione regolare degli atomi a lungo raggio permette agli elettroni di essere condivisi da tutti gli atomi del solido. Gli elettroni dei livelli energetici più esterni possono essere debolmente legati all'atomo e quindi risultano liberi all'interno del cristallo. La conduzione elettrica è legata al moto degli elettroni liberi ovvero quelli presenti nella *banda di conduzione*, dove i livelli energetici sono parzialmente riempiti. Gli elettroni non possono avere valori di energia che stiano al di fuori di queste bande e sono in grado di passare da una banda inferiore a una superiore solo nel caso in cui gli venga fornita l'energia necessaria per effettuare il salto.

Gli elettroni appartenenti ai livelli energetici più bassi sono quelli in prossimità del nucleo dell'atomo e sono poco influenzati dagli atomi vicini, pertanto la larghezza della loro banda risulta piccola. Ne consegue che spostandosi dai sottogusci interni verso quelli esterni, le bande aumentano in termini di estensione. Quelle a più bassa energia risultano completamente riempite e differenziate (isolate), di conseguenza esse non sono responsabili della conduzione elettrica; le bande con energia elevata, invece, possono anche sovrapporsi, data la loro estensione.

Se una banda completamente riempita si sovrappone a una vuota, questo andrà a caratterizzare il comportamento elettrico del materiale. In altre parole elementi con un numero dispari di elettroni di valenza non potranno riempire completamente una banda, quindi un solido così costituito non potrà essere isolante.

L'occupazione della banda da parte di queste particelle è una funzione della temperatura: allo zero assoluto (quindi in assenza di energia termica) i livelli parzialmente riempiti si trovano tutti al di sotto di un determinato valore energetico denominato *energia di Fermi* (\mathcal{E}_F) e rappresenta il più alto livello in cui sia possibile trovare un elettrone e dipende dal metallo considerato. Per temperature differenti ci saranno livelli parzialmente riempiti con energia leggermente superiore a \mathcal{E}_F producendo una banda quasi piena (banda di valenza) e una quasi vuota (banda di conduzione). Possiamo quindi attribuire alla *velocità di Fermi* (v_F) di un elettrone l'energia cinetica corrispondente a \mathcal{E}_F .

Se si integra la funzione della *distribuzione di Fermi* rispetto alla velocità si nota che esistono molti elettroni che si muovono in una direzione e altrettanti che si spostano nel verso opposto. Ne risulta che la velocità media è nulla e di conseguenza in una sezione del conduttore, in assenza di un campo elettrico applicato, circolerà una corrente nulla. [10]

Quanto descritto dalla meccanica quantistica va a precisare che il contributo effettivo alla conduzione è dovuto solo a una piccola parte degli elettroni liberi che si muovono con velocità v_F e non come descritto dal modello di Drude-Lorentz dove si consideravano tutti gli elettroni liberi con velocità v_D .

1.4.3. La massa efficace

Nel modello classico la resistività è proporzionale alla massa dell'elettrone. A livello quantomeccanico questa massa assume valori variabili a seconda delle condizioni in cui si trova l'elettrone e prende il nome di *massa efficace* (m^*). La peculiarità in questa definizione sta nel fatto che gli elettroni risentono solo delle forze esterne, mentre quelle interne vengono considerate attraverso il loro effetto sulla massa efficace. In questa ragione qualunque sia il reticolo, ha un'influenza minima sull'elettrone.

L'energia dell'elettrone, dipendente dalla sua massa e di conseguenza anche dalla massa efficace, diventa un'entità variabile. A questo fatto consegue che i livelli energetici poco densi si hanno quando m^* è piccola quindi, ricorrendo all'equazione (1.12), la resistività di un metallo è tanto minore quanto la densità dei livelli sia minore. Sulla base di questa argomentazione si può capire come materiali conduttori differenti abbiano resistività molto diverse tra loro. [11]

1.4.4. Dipendenza dalla temperatura

Come anticipato alla fine del sottoparagrafo §1.3.2 l'elettrone durante il suo percorso incontra diversi tipi di ostacoli (imperfezioni del reticolo, atomi di impurità, fononi).

A ognuno di questi possiamo attribuire un contributo alla resistività totale (ρ) del materiale che, secondo la legge di Matthiessen, è scomponibile principalmente nella somma di due diversi apporti: contributo termico ρ_T (predominante all'aumentare della temperatura) e una resistività residua ρ_R . [12 sitografia]

Quest'ultima a sua volta è data dalla somma di due contributi, ossia difetti reticolari ρ_{dif} ed impurità ρ_{imp} .

$$\rho = \rho_T + \rho_R = \rho_T + (\rho_{dif} + \rho_{imp}) \quad (1.13)$$

L'incremento della resistività residua dovuta all'impurezza (A) segue la legge di Nordheim espressa dalla funzione parabolica:

$$\rho_R(x) = Ax - Ax^2 \quad (1.14)$$

Dove x indica la concentrazione dell'impurità rispetto al materiale base, mentre A è una costante denominata *coefficiente di resistività del soluto*. Il materiale influisce in questa costante mediante la dimensione degli atomi costituenti, la struttura cristallina e l'elettronegatività.

La regola di Nordheim può essere utilizzata per leghe bimetalliche con perfetta solubilità allo stato solido.

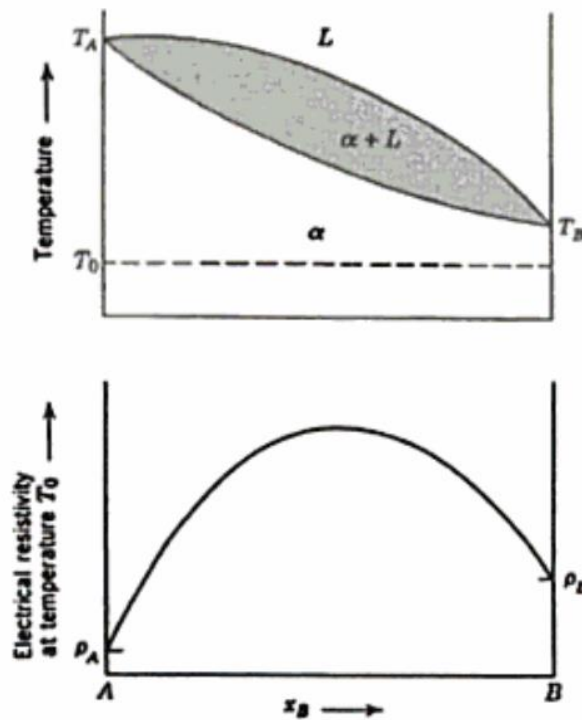


Figura 1-8: resistività vs composizione di un sistema di due elementi completamente solubili l'uno nell'altro

La resistività totale può essere descritta come:

$$\rho = \rho_A + \rho_R(x_B) = \rho_A + A x - A x^2 \quad (1.15)$$

Per quanto riguarda la resistività termica, essa si può esprimere nei seguenti termini:

$$\rho_T = \rho_0 [1 + \alpha (T - T_0)] \quad (1.16)$$

Dove ρ_0 è la resistività alla temperatura di riferimento T_0 mentre α è il *coefficiente termico della resistività* (TCR) e rappresenta la pendenza della retta. Generalmente il TCR ha una caratteristica decrescente all'aumentare della temperatura. Per il ferro puro (99.98%) a 20°C assume il valore di $6.4 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. [13]

RESISTIVITÀ		
RESISTIVITÀ E COEFFICIENTE TERMICO DI ALCUNI MATERIALI SOLIDI		
materiale	resistività a 20° C in $\Omega \cdot m$	coefficiente termico, a 20° C, in $^{\circ}C^{-1}$
<i>conduttori</i>		
alluminio	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$
argento	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$
bronzo fosforoso	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-3}$
costantina	$5 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-6}$
ferro α	$8,7 \cdot 10^{-8}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$
ferro-nichel	$8,7 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-4}$
grafite	$8 \cdot 10^{-6}$	-
manganina	$4,4 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-6}$
nichelcromo	$1 \cdot 10^{-6}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$
piombo	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$
platino	$9,8 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$
rame	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$
zinc	$5,5 \cdot 10^{-8}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$
<i>semiconduttori</i>		
germanio	$5 \cdot 10^{-1}$	$-5 \cdot 10^{-3}$
silicio	$5,8 \cdot 10^{-1}$	$-4,5 \cdot 10^{-3}$
<i>isolanti</i>		
ambra	10^{14}	-
ebanite	10^{16}	-
mica	10^{13}	-
paraffina	10^{15}	-
polistirene espanso	10^{15}	-

Tabella 1-1: valori di resistività elettrica e di coefficiente termico per alcuni materiali

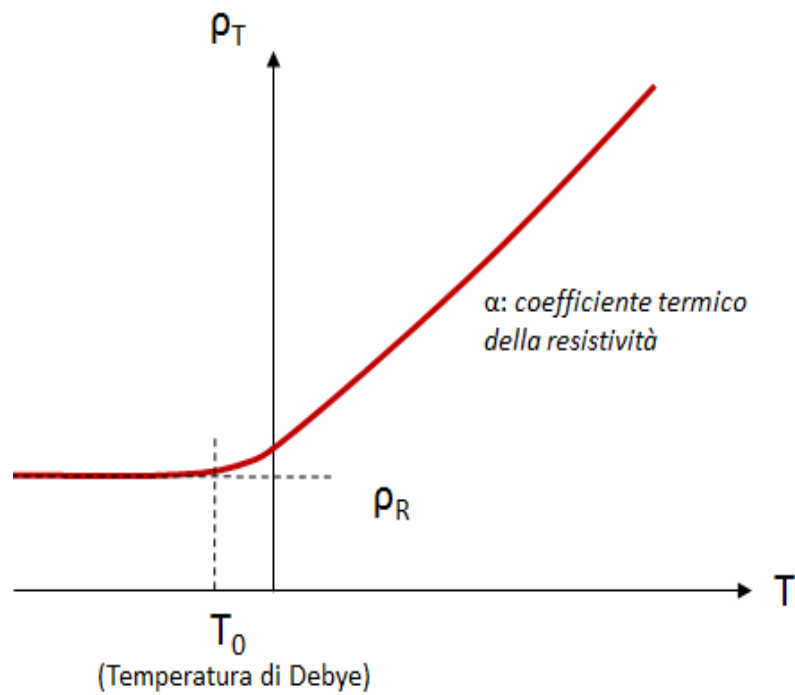


Figura 1-9: andamento della resistività in funzione della temperatura di un tipico metallo, regola di Matthiessen.

Altri materiali come la grafite presentano un andamento non lineare all'aumentare della temperatura, come dimostrato nella ricerca condotta da Norio Iwashita. [14]

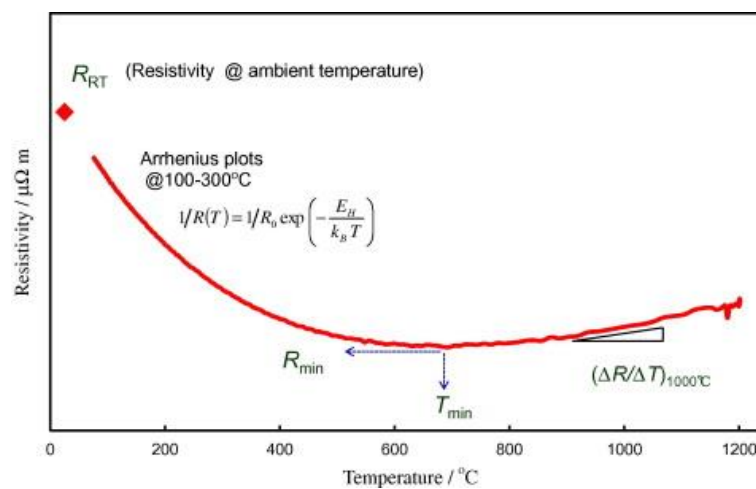


Figura 1-10: andamento della resistività della grafite in funzione della temperatura

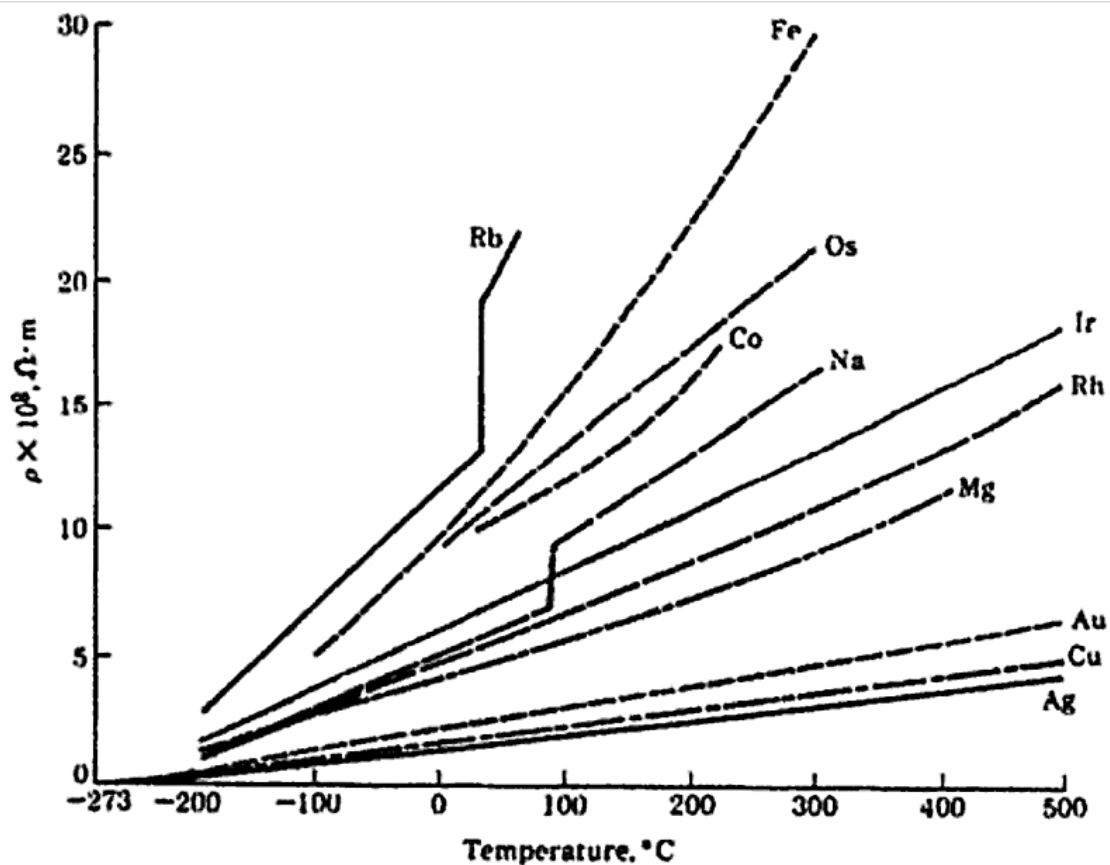


Figura 1-11: andamento resistività elettrica di diversi elementi

Il grafico sopra riportato pone a confronto le resistività di diversi elementi in una finestra limitata di temperature. Si vuole far notare come si verifichi un sensibile gap di resistività per i metalli come rubidio e sodio, alle rispettive temperature di fusione di 39,48 $^{\circ}C$ e 97,72 $^{\circ}C$.

1.4.5. Resistività di una lega multicomponente

Si consideri un tratto di lunghezza L e di sezione A di una lega costituita da due fasi α (matrice) e β (particellare), distribuite in modo random, con rispettive frazioni volumetriche V_α e V_β .

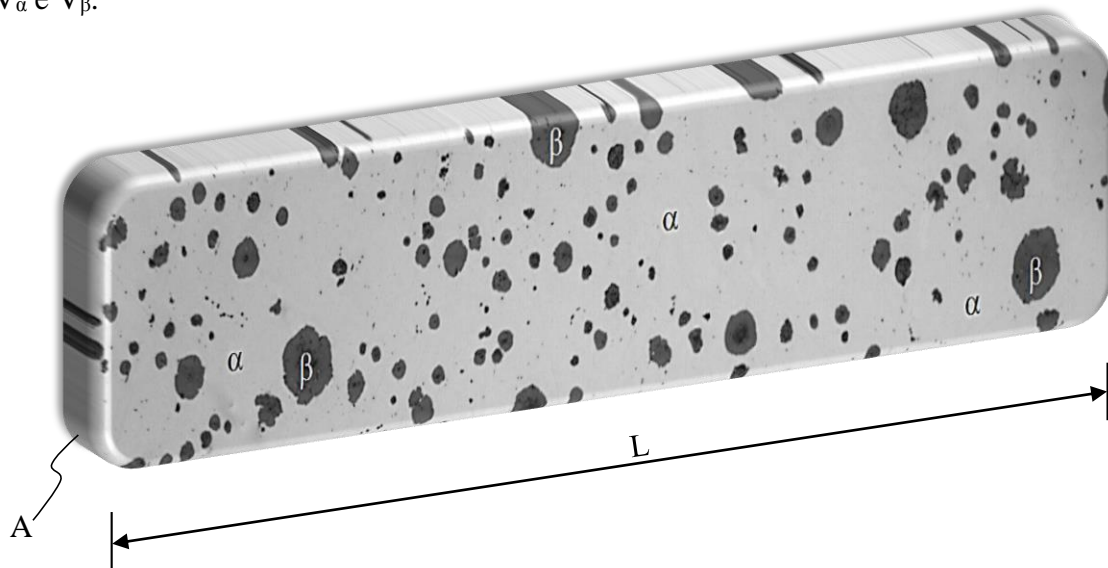


Figura 1-12: parte di una sezione di ghisa sferoidale

In accordo con la seconda legge di Ohm si può scrivere:

$$R = \frac{(\rho_\alpha V_\alpha + \rho_\beta V_\beta)}{A} \cdot L \quad (1.17)$$

Dove il termine al numeratore rappresenta la resistività di un materiale bifasico nel tratto in analisi. [15] Si può notare come essa, a temperatura costante, presenti un andamento lineare in funzione della frazione volumetrica delle due fasi come rappresentato in figura 1-11.

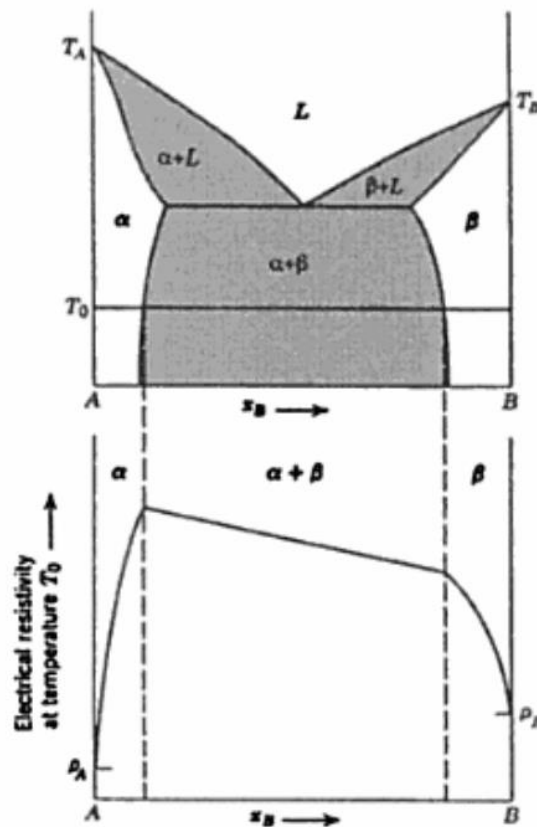


Figura 1-13: resistività vs composizione per un sistema binario con componenti completamente miscibili allo stato liquido e parzialmente miscibili in fase solida.

1.5. Analisi della ghisa tramite resistività

Come si può evincere dall'elenco seguente, la resistività della ghisa, misurata a temperatura ambiente, assume valori compresi tra 50 e 100 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ in funzione del tipo di ghisa:

- Ghisa lamellare: 65 ÷ 80 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$;
- Ghisa vermicolare: 70 ÷ 80 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$;
- Ghisa sferoidale: > 54 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$;
- Ghisa bianca: 24 ÷ 35 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$;

La difformità tra le diverse tipologie di ghisa è imputabile a:

- Tipo di grafite: nella sua forma cristallina esagonale permette la sovrapposizione di strati esagonali semi-infiniti denominati anche grafene. [16]

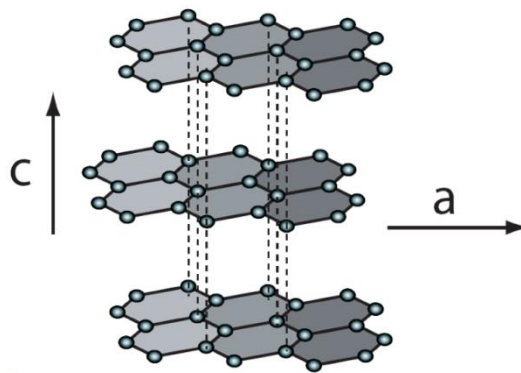


Figura 1-14: struttura della grafite e rappresentazione delle direzioni di crescita

La grafite possiede due direzioni di crescita (a- parallela e c- perpendicolare ai piani basali). In accordo con le ricerche svolte da Double and Hellawell [17] il legame è forte lungo i piani mentre risulta debole perpendicolarmente. Pertanto la “normale” crescita dal fuso è favorita lungo il piano e sfavorita lungo la direzione “c”. Poiché il piano risente del liquido che lo circonda, viene portato invece, in una rappresentazione macroscopica, alla formazione di grovigli e avvolgimenti su se stessa essendo i legami covalenti C=C più forti.

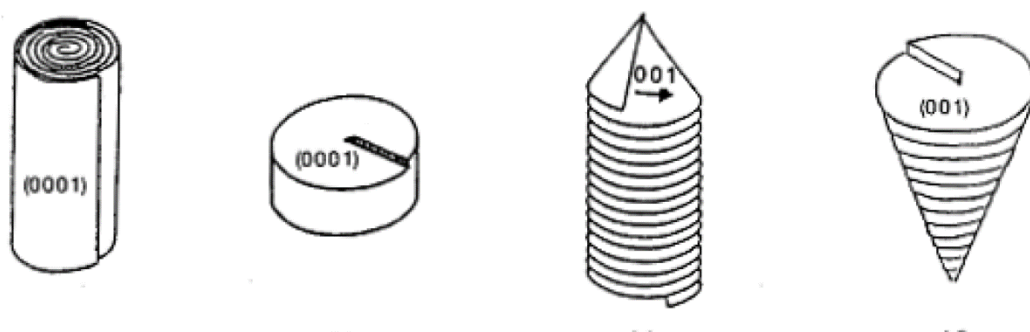


Figura 1-15: modelli di crescita della grafite basati sulle ricerche di Lux, et al. [18]; (a) crescita a film; (b) crescita mediante dislocazione a vite; (c) crescita cilindrica-conica; (d) crescita conica

INTRODUZIONE

La diversa conformazione strutturale della grafite conferisce valori differenti di resistività, ad esempio, sotto forma di lamelle grossolane derivanti dal tipo *a*, fornisce la maggior resistività, decrementandola però al diminuire delle sue dimensioni, come apprezzabile in tabella 1-2

RESISTIVITÀ GRAFITE LAMELLARE		
Dimensione sezione lamella (μm)	Dimensione grafite lamellare	Resistività elettrica ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)
76	Grossolana	1.036
53	Medio-grossa	0.946
30	Media	0.914
22	Medio-fine	0.844
15	Fine	0.774

Tabella 1-2: valori di resistività elettrica per diverse dimensioni di grafite lamellare.

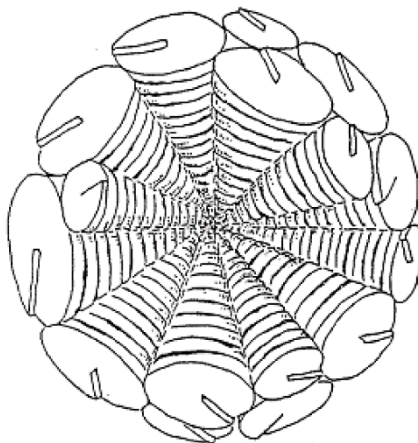


Figura 1-16: modello strutturale di un nodulo di grafite sferoidale [19]

Se invece il bagno è stato disossidato, desolfurato e defosforato il metallo risulta di migliore qualità e la grafite può crescere con una energia minima di attivazione favorendo la formazione di strutture di tipo *d*, quindi con la formazione di sferoidi. [17]

Come descritto nel §1.4.4 la resistività residua è influenzata dalla struttura reticolare, pertanto si avranno valori di conducibilità che dipendono dalla direzione in cui è posizionata la grafite. Queste ipotesi sono state confermate da R.L. Powell [20] mediante misure di resistività lungo l'asse a di $980 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ e lungo l'asse c di $4100 \mu\Omega \cdot \text{cm}$.

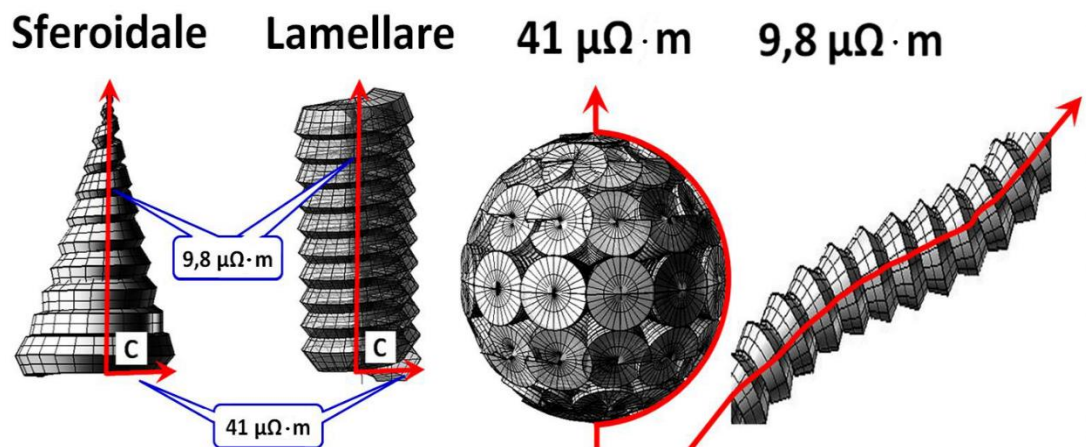


Figura 1-17: valori di resistività lungo gli assi di crescita della grafite

- La composizione chimica ha una particolare influenza: come si evince dalla Figura 1-12 la presenza di grafite e silicio incrementa questa proprietà sia per matrici perlitiche sia per quelle ferritiche. [21]

INTRODUZIONE

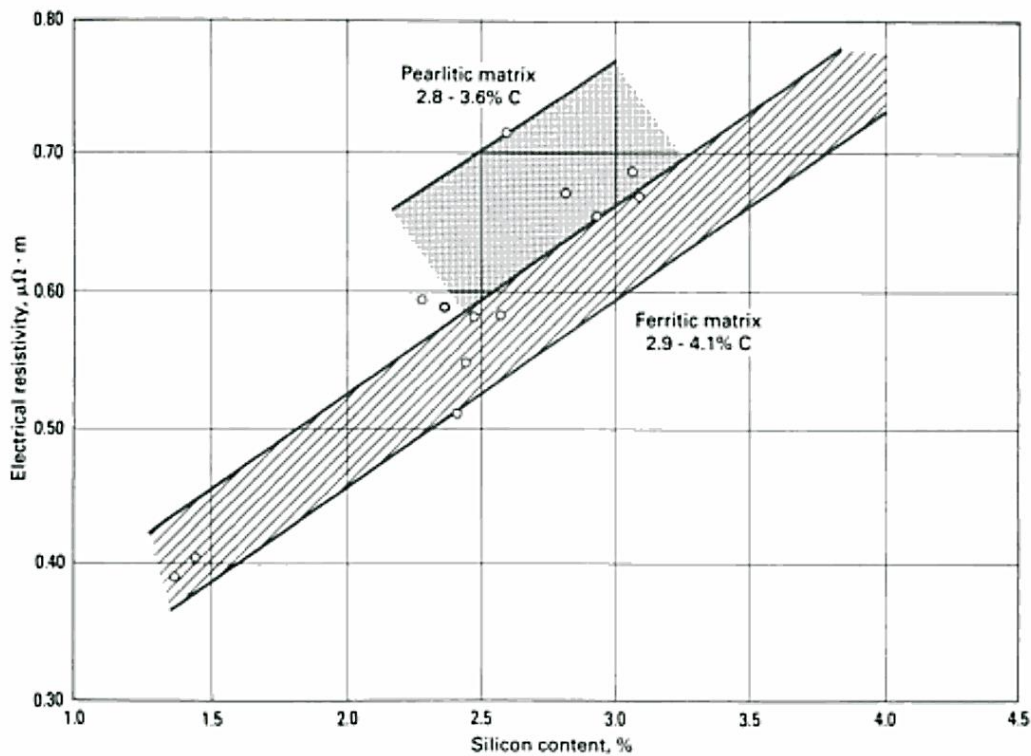


Figura 1-18: influenza sulla resistività della percentuale di silicio per matrici perlitiche e ferritiche

La diversa percentuale di carbonio presente nelle strutture ferritiche e perlitiche assieme alla differente conformazione del reticolo cristallino, portano ad avere valori dissimili di resistività per le rispettive microstrutture. Di seguito sono riportati nel dettaglio i valori medi di resistività rilevati a temperatura ambiente:

- Austenite: $1,4 \mu\Omega \cdot cm$;
 - Ferrite: $1,5 \mu\Omega \cdot cm$;
 - Perlite: $0,87 \mu\Omega \cdot cm$;
 - Cementite: $0,53 \mu\Omega \cdot cm$;
 - Liquido: $4,7 \mu\Omega \cdot cm$;
- La presenza di elementi in lega in soluzione solida nella matrice producono in genere un aumento della resistività. Tra gli elementi con maggior influenza si rilevano nickel e alluminio, i quali incrementano la resistività all'aumentare della loro percentuale

in termini di massa. Altri elementi come rame, molibdeno, vanadio, cromo inducono invece una minima influenza. [22]

Effect of nickel additions on the electrical resistivity of cast iron

Total Carbon	Composition, weight %					Electrical resistivity
	Si	Ma	S	P	Ni	$\mu\Omega\cdot\text{cm}$
3,52	1,63	0,64	0,041	0,05	-	86,4
...	0,47	79,4
...	0,86	99,1
...	1,22	103,3
...	1,45	405,8
...	1,81	103,2

Effect of nickel additions on the electrical resistivity of cast iron

Total Carbon	Composition, weight %					Electrical resistivity
	Si	Ma	S	P	Al	$\mu\Omega\cdot\text{cm}$
2,95	0,90	0,64	0,07	0,04	0,06	44,1
2,95	1,01	...	...	...	0,22	48,7
2,99	0,94	...	...	...	0,66	55,6
3,00	0,91	...	...	...	1,18	63,5
3,00	0,91	...	...	...	2,30	89,0
2,99	0,93	...	...	...	3,34	93,7

Tabella 1-3: influenza degli elementi Ni e Al sulla resistività della ghisa lamellare

L'analisi elettrica, sfruttando misure di resistenza con una sensibilità di 10 n Ω , consente di rilevare caratteristiche estrinseche del materiale, come la presenza di risucchi o impurezze all'interno del solido.

Tali micro risucchi posizionati lungo il percorso effettuato dalla corrente inducono, seppur in minima entità, un allungamento del tratto da percorrere affinché il circuito si chiuda, traducendosi in un aumento della resistività.

A differenza del comportamento nel caso di elementi disciolti allo stato solido nella lega, le impurezze sono solitamente particelle estranee o un insieme particolare di composti chimici che non rispettano le classiche regole della valenza. Nella ghisa quelli più comuni sono i carburi e con la loro presenza si nota anche in questo caso un aumento della resistività elettrica.

Capitolo 2

2. METODI, STRUMENTAZIONE E SELEZIONE DEI MATERIALI

L'idea di applicare in un futuro l'analisi elettrica presso una fonderia presuppone che la strumentazione di analisi e l'operatore si pongano a una distanza minima di sicurezza dalla zona di prelievo per la successiva analisi.

Per effettuare misure di resistività, e quindi di resistenza, a distanze significative lo scenario si presenta problematico, in quanto un misuratore di resistenza generico include nella rilevazione tutte le resistenze presenti a valle, inclusa la resistenza dei fili (R_{cavo}) tra l'ohmetro e il campione, le resistenze dei contatti, oltre che alla resistenza del provino stesso (R_{provino}).

Generalmente le resistenze dei fili risultano piccole (dell'ordine dei $\text{m}\Omega$ per metro); da sottolineare però che, nel caso in cui vengano collegati cavi molto lunghi, la loro resistenza non si può più trascurare, soprattutto se la resistenza incognita assume valori estremamente piccoli (ordine delle decine di $\mu\Omega$), come nel caso in analisi. [23 sitografia]

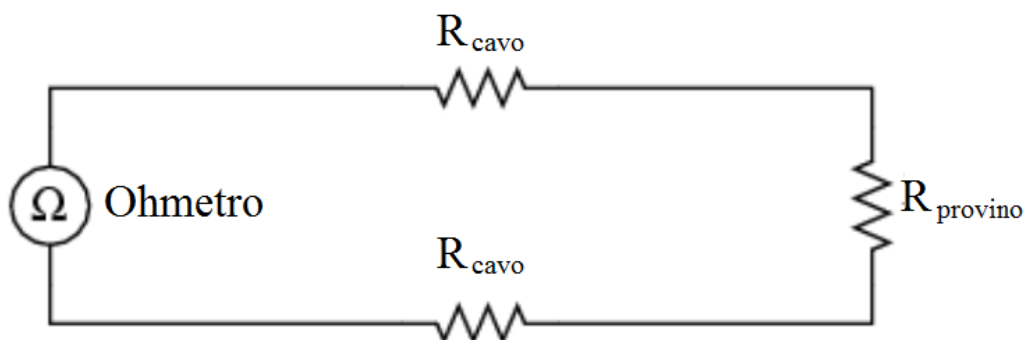


Figura 2-1: schema elettrico del circuito di misurazione

$$R_{tot} = R_{avo} + R_{provino} + R_{cavo} \quad (2.1)$$

Per evitare tale inconveniente si presenta qui di seguito il metodo di rilevazione di misure ohmiche con quattro fili, chiamata più semplicemente misura Kelvin.

In questo tipo di misure si ha il bypass del calo di tensione attraverso i conduttori mediante il rilevamento della tensione direttamente sulla resistenza incognita.

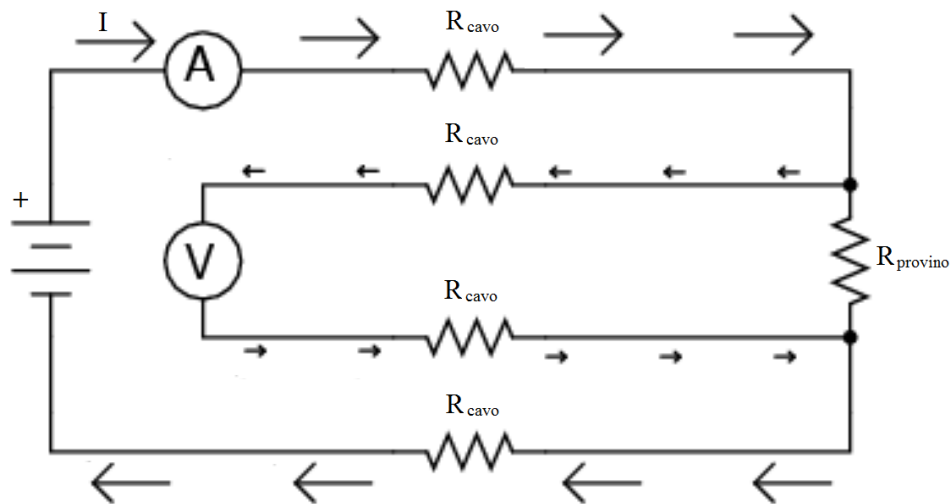


Figura 2-2: schema elettrico della rilevazione con la sonda a quattro fili

Infatti in questa configurazione il voltmetro misura la tensione a valle della resistenza dei cavi, rilevando direttamente la caduta di tensione sulla resistenza del provino. Teoricamente bisognerebbe considerare anche le resistenze dei cavi del voltmetro ma, come descritto in precedenza, trattandosi di ordini di grandezza di alcuni $m\Omega$, posti in serie alla resistenza interna dello strumento che è di circa alcune decine di $M\Omega$, esse si possono tralasciare poiché l'errore è trascurabile. La resistenza del provino viene calcolata mediante la divisione della tensione (V) per la corrente (I) imposta dal generatore di corrente costante.

Con questa configurazione si possono escludere le resistenze dovute ai cavi che portano la corrente, riuscendo a misurare con precisione il valore della resistenza del provino.

Purtroppo è presente una seconda sorgente di errore, che diventa alquanto problematica quando il valore da misurare è molto basso, circa da $100\ m\Omega$ a scendere.

La corrente I è costante e il suo valore varia in funzione del fondo scala di misura. La tensione V rilevata dal voltmetro, nel caso di misura di basse resistenze, diminuisce a sua volta.

Quando la tensione V scende al di sotto del mV, bisogna tenere presente che i materiali utilizzati nella catena di misura (cavi, giunzioni, morsetti, ecc ...) potrebbero essere costituiti da metalli diversi: la giunzione di metalli dissimili origina un fenomeno fisico denominato seebeck, realizzando una forza elettromotrice che si pone in serie alla tensione rilevata dal voltmetro.

Basti pensare che una giunzione Cu/SnPb può generare fino a 3 μ V per ogni grado di differenza rispetto al giunto freddo, mentre un collegamento Cu/CuO può alterare la misura fino a 1 mV. [24 sitografia] [25 sitografia] Inoltre non è prevedibile se questo potenziale si andrà a sommare o sottrarre al valore di V misurato. Pertanto è necessario porre attenzione a non utilizzare troppi giunti di contatto tra materiali diversi.

2.1. Strumentazione utilizzata

Di seguito si elencano nei dettagli la strumentazione utilizzata per effettuare le analisi termiche ed elettriche sui vari provini, i software utilizzati per selezione dei vari materiali ed elaborazione dati.

2.1.1. Software per l'analisi termica

L'obiettivo di tale analisi consiste nel correlare i valori ricavati durante la fusione con la microstruttura finale del manufatto, attraverso un'elaborazione mediante modelli matematici atti a prevedere il meccanismo di crescita della fase primaria e dell'eutettico.

L'entità di tali fenomeni dipende da diversi fattori tra i quali i più importanti sono le condizioni di isolamento che incidono sul raffreddamento del provino e la geometria del contenitore che influenza i moti del liquido.

METODI, STRUMENTAZIONE E SELEZIONE DEI MATERIALI

Per supportare l'analisi elettrica e poter avere inizialmente dei dati di confronto è stato deciso di utilizzare il software per l'analisi termica fornito dall'azienda Fassmet di De Lissandri Mauro che si impone come sistema di controllo, gestione e ottimizzazione del processo di solidificazione di qualunque tipo di ghisa.

Il programma è in grado di campionare in tempo reale i dati provenienti dal convertitore A/D, permettendo una visualizzazione grafica personalizzabile della curva di raffreddamento e della sua derivata prima. Inoltre l'interfaccia utente visualizza una stima quantitativa di carbonio e silicio presente e la previsione delle caratteristiche meccaniche del materiale; inoltre, avendo una grafica interattiva, permette di ottenere consigli per il miglioramento della qualità finale del materiale.

Grazie alla capacità di acquisizione su più canali è stato possibile comparare diverse colate simultaneamente, in particolare quelle soggette a normale raffreddamento con quelle invece prese in esame dall'analisi elettrica.

La possibilità di analisi mediante la comparazione delle curve ha permesso di confrontare i vari andamenti delle prove e poter mettere in primo piano gli eventuali errori nel processo di colata: si è potuto ottenere questo risultato grazie anche alla possibilità di simulazione e di zoom, consentendo riprocessare post colata la curva per identificare al meglio i punti critici.

2.1.2. Strumento di misura della resistenza e procedura preparativa

Lo strumento di tipo analogico-digitale è gestito da un microprocessore a 16 bit che sfrutta la misura di resistenza Kelvin e che permette di scendere a risoluzioni e precisioni di 1 n Ω .

Sul frontale sono presenti quattro boccole (A+, A-, V+, V-) di cui rispettivamente due per l'apporto della corrente di misura e due per la rilevazione della caduta di tensione ai capi della resistenza incognita. Il segnale d'ingresso è quindi amplificato e rapportato a quello presente su una resistenza campione interna percorsa dalla medesima corrente che circola nella resistenza incognita: il risultato, opportunamente elaborato e trattato dal microprocessore, viene rappresentato sul display LCD.

Prima di iniziare la prova, si seleziona sullo strumento la temperatura ambiente poiché lo strumento si andrà poi a calibrare grazie alla sua resistenza interna di riferimento. In seguito si è atteso circa 10 minuti affinché i componenti interni allo strumento si assestassero termicamente.

In seguito si attua la procedura di azzeramento dello strumento e si inizia con la compensazione dei cavi di corrente. Questo passaggio risulta fondamentale, in quanto è possibile che nei casi in cui sui cavi di corrente si verificano elevate cadute di tensione (a causa delle correnti di misura di $1 \div 10$ A, di sezioni insufficienti o di lunghezze eccessive), l'amplificatore di segnale non sia in grado di compensare del tutto la variazione di tensione, nonostante questo possieda un'elevata reiezione su propri ingressi. L'auto-azzeramento così ottenuto permette in questo caso di settare automaticamente alcuni parametri interni allo strumento, in modo tale da non far circolare corrente nei cavi e di compensare le cadute di tensione³.

Considerando il primo metodo di rilevazione di resistività, la procedura di azzeramento dei cavi, delle cadute ohmiche sulle resistenze di contatto e la resistenza degli elettrodi è stata svolta, solo durante questo passaggio, mediante l'utilizzo di un unico elettrodo, lungo il doppio di uno normale con entrambe le estremità filettate.

Collegando nella giusta sequenza i cavi dello strumento a tali estremità è stato possibile annullare la resistenza degli elettrodi a temperatura ambiente permettendo così una misura più precisa.

Per quanto riguarda il secondo metodo di analisi, per la procedura di azzeramento, si è provveduto alla costruzione di un dispositivo atto ad accogliere l'inserimento dei quattro elettrodi. Il materiale utilizzato per costruire il dispositivo di taratura è l'ottone (1) in quanto,

³ Per sua natura la compensazione è diversa per ogni portata ed è funzione della corrente di misura usata, ossia la compensazione che viene effettuata è valida solo per quella portata e per quella corrente di misura. Per tale motivo lo strumento salva quella particolare compensazione nella cella di memoria corrispondente a quella portata e quella corrente, così da richiamarla qualora vengano selezionate nuovamente.

La memorizzazione è comunque permanente e viene salvata in una memoria non volatile allo spegnimento. Bisogna sottolineare però che i valori salvati sono fortemente dipendenti dalle condizioni di misura come: lunghezza e sezione dei cavi di corrente, potenziali termoelettrici, temperatura ambiente ed interna allo strumento, nonché tempo trascorso dall'accensione di quest'ultimo. Potrebbe pertanto accadere che alla successiva riaccensione dello strumento non risultino più validi. Data la crucialità delle misurazioni si è preferito eseguire questa procedura ad ogni accensione.

su consiglio del costruttore del NanoOhmetro digitale, possiede una resistività non così elevata ed è approssimabile a quella delle resistenze di contatto $\approx 10 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$.

Come osservabile in figura 2-3, su un lato sono stati eseguiti due fori per l'inserimento degli elettrodi della corrente (2) e delle viti per il rispettivo fissaggio. Sulla faccia opposta si è proceduto allo stesso modo per inserire e fissare gli elettrodi della tensione (3). All'estremità opposta sono collegati due cilindri in rame (4) con la funzione di collegare i cavi provenienti dal NanoOhmetro agli elettrodi e di dissipare il calore con lo scopo di non bruciare i cavi.

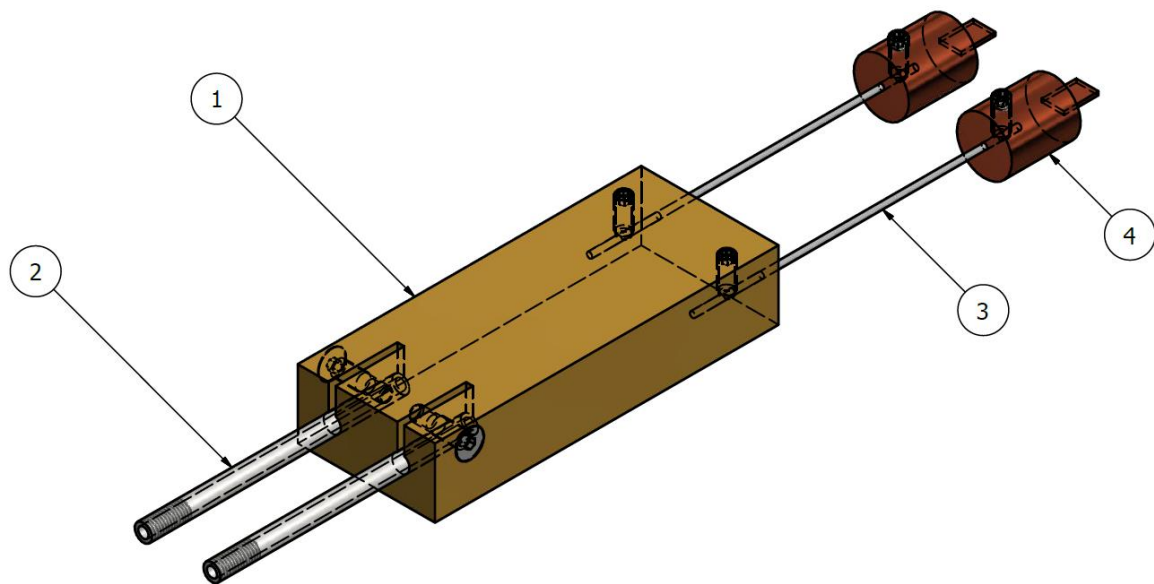


Figura 2-3: dispositivo per l'azzeramento del NanoOhmetro

Successivamente, per ottenere una buona qualità della misura si sono adottati alcuni accorgimenti:

- Pulire le superfici dei terminali della resistenza incognita e dei cavi di misura da oli, acqua, ossidi ecc.
- Scelta della sezione dei cavi della corrente di 6 mm^2 per evitare che un differente riscaldamento per effetto Joule interferisca con la misura nel tempo.
- Evitare di concatenare i cavi di misura con campi magnetici variabili che potrebbero rendere instabile la lettura. A tal fine si è sempre cercato di spegnere il forno a induzione presente in prossimità della strumentazione.

- Eseguire un auto-azzeramento all'inizio di ogni misura in quanto con portate di 320 $\mu\Omega$ per garantire una buona precisione di lettura.

2.1.3. Programma Matlab per grafici, curve derivate e smoothing delle curve

Lo strumento di analisi termica fornito dall'azienda è in grado di elaborare autonomamente la derivata della temperatura rispetto al tempo e di rappresentarla sullo stesso grafico che riporta l'andamento della temperatura.

Il NanoOhmetro si collega tramite porta USB al computer per rappresentare graficamente la funzione della resistenza nel tempo, ma non fornisce informazioni circa la derivata della resistenza rispetto al tempo. Per risolvere questo inconveniente si è utilizzato il programma Matlab per elaborare i dati, in quanto utilizza una notazione matriciale che si esprime attraverso valori numerici ordinati in righe e colonne.

Lo script è stato programmato per risalire ai valori di resistenza e di temperatura presenti su file di testo generati dai due programmi di acquisizione: poiché le due funzioni sono continue, è possibile calcolare le rispettive derivate e rappresentarle graficamente su due schermate distinte, in funzione del tempo. Il metodo che si è deciso di perseguire si basa sulla formula dei tre punti (o della differenza centrale):

$$f'(x) \approx \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h} \quad (2.2)$$

dove valori tipici per il passo h sono corrispondenti a 0.01 per far sì che la curva si approssimi con la retta tangente in quel punto.

Inoltre, lo script è stato sviluppato in modo tale che inizi a rappresentare le curve nell'istante stesso in cui viene colata la ghisa nella chill cup, ed elimina i valori precedenti a tale tempo. È stato necessario svolgere questo passaggio in quanto il programma che rivela la resistenza inizia la registrazione manualmente e necessita di alcuni secondi per assestarsi sul fondo scala selezionato, pertanto, per garantire l'acquisizione di tutti i dati utili, è stato avviato alcuni istanti prima della colata: lo script garantisce di mantenere solo i dati significativi.

Il calcolo della derivata è stato fatto anche sui valori che in seguito non sono stati visualizzati: questa procedura si è resa necessaria in quanto il calcolo diverge agli estremi e non risulta più rappresentativo (fenomeno di Runge). [26] Per tale motivo si è scelto di terminare l'acquisizione dei dati alcuni secondi dopo il termine dell'analisi termica, per poter appunto fornire una derivata non divergente agli estremi.

I valori delle derivate così ottenute sono state successivamente elaborate dallo script poiché, essendo ricavati da valori sperimentali, erano soggetti ad elevate variazioni. Si è deciso pertanto di operare con una funzione di smoothing: in statistica, essa consiste nell'applicazione di una funzione di filtro il cui scopo è evidenziare i pattern significativi, attenuando il rumore generato da artefatti ambientali, elettrici, elettronici e informatici.

Lo smoothing può essere distinto dal concetto di curve di fitting poiché:

- Le curve di fitting spesso comportano l'utilizzo di una funzione esplicita per il risultato, mentre i risultati ottenuti dalla curva di smoothing sono i valori "livellati" che prescindono dall'utilizzo successivo di una forma funzionale, se esistente.
- L'obiettivo dello smoothing è quello di fornire un'idea generale dei cambiamenti di valore relativamente lenti, prestando poca attenzione ad una stretta corrispondenza dei valori dei dati, mentre la procedura di "aggiustamento alle curve" si concentra nel raggiungere la corrispondenza più stretta possibile ai valori sperimentali.

Si è operato pertanto con l'interpolazione spline che consiste in un particolare metodo di interpolazione basata sulle funzioni spline: esse sono uno strumento dell'analisi numerica e vengono ottenute mediante una suddivisione dell'intervallo della funzione in vari sotto-intervalli, e per ciascuno di essi viene generato un polinomio di basso grado (n) che interpola i valori. Una delle condizioni al contorno è che i polinomi tra un intervallo e quello successivo osservino la continuità delle derivate fino all'ordine $n-1$. [27]

2.1.4. Programma CES EduPack

La vasta gamma di materiali a disposizione rende necessario l'utilizzo di software e database che semplifichino l'individuazione del materiale più opportuno all'analisi in oggetto. Nello specifico, si è ricorsi al programma CES EduPack fornito dall'Università degli Studi di Padova, il quale si basa su una raccolta di dati di materiali presenti in commercio con relative proprietà chimico-fisiche, meccaniche, termiche, elettriche, ambientali e valorizzazione economica.

Questo software consente di impostare i valori desiderati per determinati indici, fornendo come output un grafico nel quale sono rappresentate le classi di materiali che corrispondono a tali criteri, agevolando così la scelta del materiale più prestante per lo studio in esame. [28] Nel dettaglio, viene considerato indice una funzione di diverse proprietà atte a descrivere un comportamento in opera del materiale stesso: ad esempio, per selezionare il materiale per la realizzazione degli elettrodi, si è proceduto a comparare la resistività con il prezzo dei materiali in commercio, per poter valutare costi e benefici di eventuali materiali che avessero la minor resistività e allo stesso tempo un prezzo sostenibile per un'eventuale produzione su larga scala.

In altre parole, il programma consente di risolvere un problema di ottimizzazione vincolata dati determinati indici, intervalli di valori, processi di produzione ed eventuale geometria dei materiali.

2.2. Primo metodo: rilevazione con 2 elettrodi

Per misurare la resistività del provino è necessario conoscere la sua resistenza e le dimensioni geometriche, per poter ricorrere alla seconda legge di Ohm.

La geometria del provino che si è andati ad utilizzare è rimasta la medesima per l'analisi termica in quanto, come descritto nel paragrafo §1.2 uno dei limiti di tale analisi è la dipendenza dal contenitore utilizzato.

Pertanto, per ottenere un parametro di confronto, l'analisi elettrica è stata svolta in una chill cup. Tale coppetta, costituita da sabbia resina, è stata forata su due lati a metà dell'altezza del provino per permettere l'inserimento degli elettrodi con diametro 8 mm; attraverso di

essi andrà a scorrere la corrente appena verrà colata la ghisa che chiuderà il circuito elettrico. All'interno della coppetta, questi ultimi dovranno rimanere ad una distanza predefinita tale da permettere un corretto riempimento della coppetta, facilitando il passaggio della corrente attraverso una distanza nota di ghisa, senza dare luogo alla formazioni di risucchi qualora fossero troppo vicini.

In figura 2-4 è rappresentato lo schema elettrico di questo primo metodo in cui si evincono le resistenze di ciascun cavo sommate a quelle dei rispettivi contatti (R_1 , R_2 , R_3 , R_4), il provino (R_x), e le resistenze dei due elettrodi compresi tra i relativi nodi b-b* e c-c*.

Gli elettrodi sono stati realizzati direttamente durante l'esperienza di tirocinio utilizzando un tornio manuale, partendo da una barra trafilata di diametro 8 mm e in seguito filettati M5 ad un'estremità. Il filetto di ridotte dimensioni ha permesso di fermare in battuta dell'elettrodo i capocorda collegati ai cavi dello strumento, garantendo un buon contatto elettrico mediante fissaggio con rondella e dado.

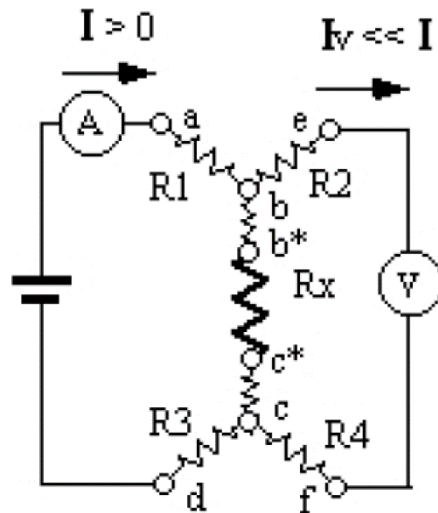


Figura 2-4: schema elettrico della rilevazione di resistenza con il primo metodo

Il caso in analisi è al limite poiché si misurano resistenze estremamente basse e ad elevata temperatura producendo una naturale ossidazione dei contatti. Con il proseguirsi delle prove l'ossido (pessimo conduttore elettrico) sui contatti può raggiungere spessori di qualche micron e di conseguenza si verificherebbe una resistenza di contatto che si andrebbe a sommare a quella del provino.

Si è scelto di adottare un particolare rimedio, che consiste nell'utilizzare una corrente elevata in modo tale che la tensione ai capi dell'ossido aumenti fino a decine di mV in modo da far avvenire la perforazione dell'ossido, per *effetto tunnel*, da parte degli elettroni



Per aumentare la precisione si è collegato verso la battuta dell'elettrodo il capocorda collegato al morsetto del voltmetro (V_+) e dietro ad esso il capocorda corrispondente al polo del generatore di corrente costante (A_+). Allo stesso modo si è proceduto con il secondo elettrodo. Con tale sequenza la resistenza di contatto tra A_+ e V_+ non rientra nella misura, cosa invece che avviene per quella tra V_+ e l'elettrodo.

2.3. Secondo metodo: rilevazione con 4 elettrodi

Ciò che ha portato allo sviluppo, durante il periodo di stage, di un secondo metodo per la rilevazione è stata la presenza della resistenza degli elettrodi nella misurazione. Anche in tale rilevazione si ricorre al metodo a quattro fili, ma per come veniva applicato nel metodo precedente si andava a considerare, nella resistenza totale, anche quella dovuta al materiale costituente gli elettrodi.

Con questa nuova configurazione si hanno invece due elettrodi che portano la corrente (HI e LO) e altri due che andranno a misurare direttamente la caduta di tensione nella ghisa (Sense HI e Sense LO).

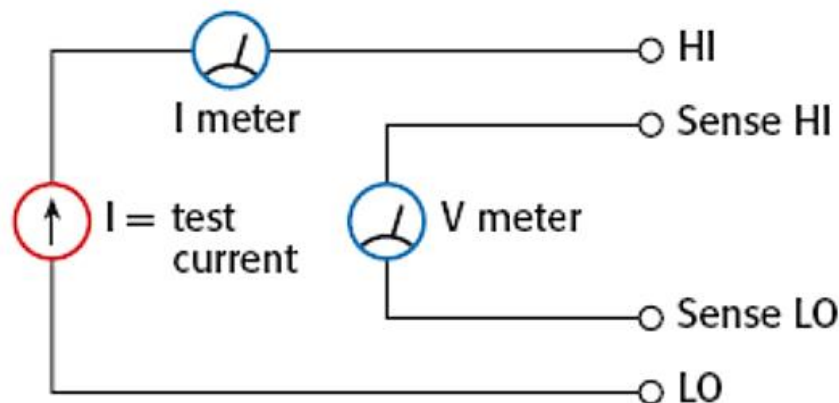


Figura 2-5: configurazione del NanoOhmetro

Per ottenere ciò non è sufficiente forare in quattro punti, uno per elettrodo, nella chill cup. Sebbene sia il liquido, sia solido in analisi siano conduttori elettrici, la corrente è influenzata prima dai moti convettivi che si generano durante la colata ed in seguito dalla solidificazione della ghisa stessa. Pertanto, non essendo questi comportamenti identici in ogni punto del provino, la posizione degli elettrodi che rivelano la tensione (V_+ e V_-) è di fondamentale importanza. Se questi venissero posizionati parallelamente o ancor peggio, perpendicolarmente a quelli che impongono la corrente, sarebbero soggetti alle correnti parassite passanti sulla superficie del provino e non sarebbero immersi in modo equipotenziale nelle “linee di flusso” della corrente. Inoltre, durante la solidificazione, la superficie del metallo a contatto con la sabbia resina solidifica prima rispetto al nucleo, che invece resta liquido. Ricordando che la resistività del solido è minore rispetto a quella del liquido, nel momento in cui si verificherà la solidificazione si manifesterà anche un elevato passaggio di corrente sulle superfici esterne, che influenzerà in modo significativo la misura di resistenza durante tutta la prova.

La soluzione a tale problema è stata l'introduzione dell'elettrodo della tensione all'interno dell'elettrodo impone il passaggio di corrente.

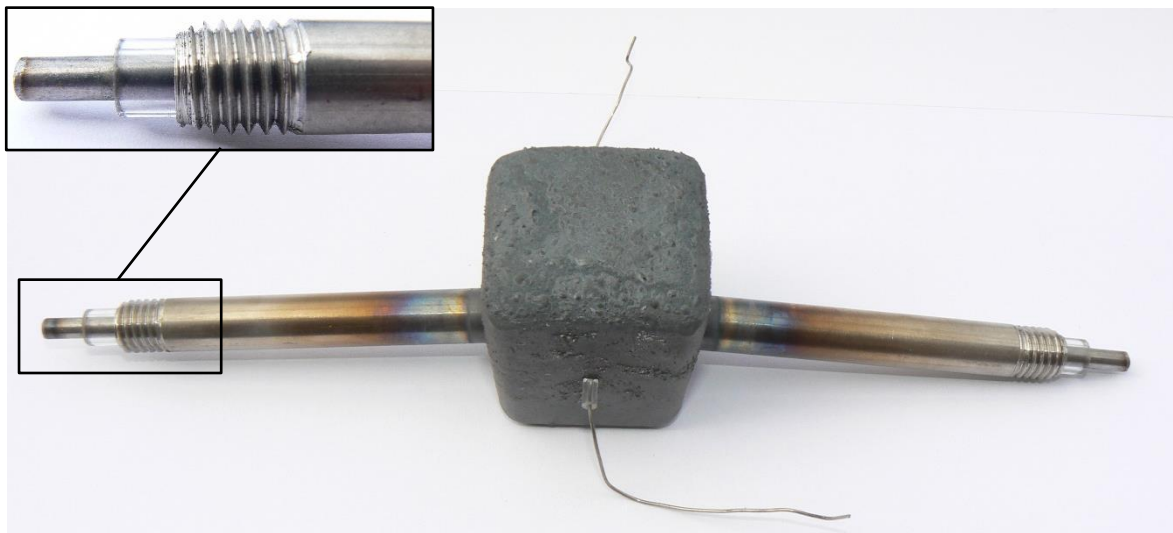


Figura 2-6: provino di ghisa con elettrodi collegati

I due elettrodi (HI con Sense HI, come LO con Sense LO) sono stati opportunamente isolati l'uno dall'altro per evitare il contatto, mediante un isolante in vetro silice: la scelta di tale materiale è dettagliata in seguito. Operando con questa sequenza, gli elettrodi V_+ e V_- saranno meno soggetti ad interferenze e la misura totale risulterà molto più precisa.

2.4. Materiale base utilizzato per la colata

L'analisi elettrica è stata pensata come supporto integrativo all'analisi termica, pertanto il materiale base utilizzato per le colate è stata la ghisa. Tra tutti i possibili tipi si è deciso di iniziare con le ghise lamellari, le quali presentano la maggior resistività elettrica. Durante la solidificazione le variazioni di resistenza saranno quindi più manifestabili rispetto a una ghisa che presenterebbe bassi valori: infatti, se si fosse inizialmente utilizzata una ghisa bianca, le piccole variazioni $d\Omega/dt$ si sarebbero sommate ad un dato di resistenza già di per sé basso, non rendendo esplicito il fenomeno fisico corrispondente.

Lo strumento è in grado di rilevare piccoli valori di resistenza che si manifestano, permettendo una visualizzazione migliore del comportamento durante la solidificazione e aprendo lo studio all'ottenimento di nuove possibili informazioni.

Si riporta nelle tabelle qui di seguito la composizione chimica delle ghise utilizzate per i test.

GHISA G-15							
Composizione chimica							
Elementi	Si	Fe	Cr	Ni	S	P	C
RISCONTRATO	2,2000	92,9800	0,1090	0,0432	0,0691	0,1300	3,6700

GHISA G-250 EN-GJL-250 :1997							
Composizione chimica							
Elementi	Si	Fe	Cr	Ni	S	P	C
RISCONTRATO	2,450	0,680	0,070	0,190	0,020	0,190	3,300

Ghisa GJL 350 EN 16482:2013			
Composizione chimica %			
C	Mn	Si	P
3,350	0,500	2,750	0,100

Tabella 2-1: composizione chimica delle ghise utilizzate

Si è scelto di operare su tre diverse campionature, differenti tra loro principalmente per il contenuto di carbonio. Per un'analisi più accurata si è valutato il carbonio equivalente (C_{eq}) di ogni ghisa utilizzando la seguente formula:

$$C_{eq} = \%C + \frac{1}{3}(\%Si + \%P) \quad (2.3)$$

Per le ghise in analisi sono stati ottenuti i seguenti valori:

•G15 $C_{eq} = 4,32$

•G25 $C_{eq} = 4,17$

•G35 $C_{eq} = 4,29$

Il carbonio, di per se, può dare luogo a due differenti strutture limiti: grafite o cementite.

In generale la grafite può presentarsi in sei diverse forme strutturali: lamelle sottili, lamelle grossolane, noduli con accentuate ramificazioni, flocculi frastagliati, flocculi compatti, sferoidale. I fattori che influenzano il modo di presentarsi del carbonio nella ghisa e quindi le caratteristiche meccaniche sono:

Composizione chimica;

- Velocità di raffreddamento;
- Eventuale trattamento termico;
- Eventuale trattamento nel bagno prima della fusione.

La grafite lamellare si classifica a sua volta in cinque sottotipi designati dalla normativa ASTM A274 dalle lettere progressive da “A” fino a “E”:

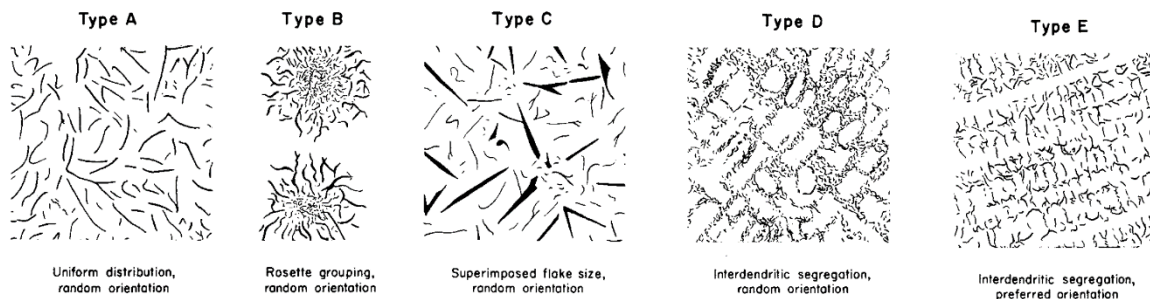


Figura 2-7: rappresentazione delle forme in cui si manifesta la grafite nelle ghise lamellari

Vengono riportate di seguito alcune micrografie della ghisa utilizzata eseguite presso il laboratorio di metallografia dell'Università degli Studi di Padova. È stato impostato lo stesso ingrandimento di 100x, utilizzato nella normativa sopra citata, per avere un mezzo di confronto.

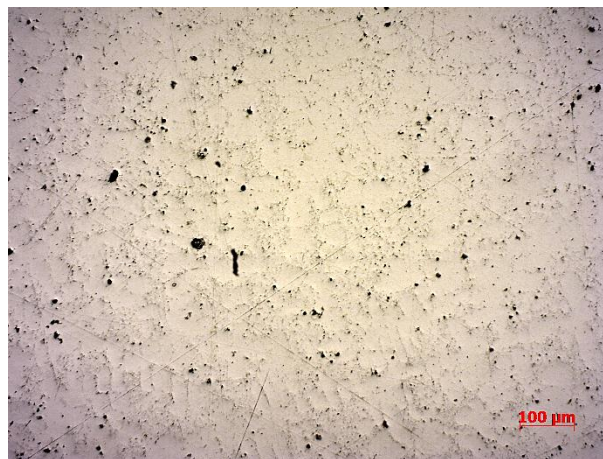


Figura 2-8: microstrutture delle ghise utilizzate nella colata. Rispettivamente dall'alto verso il basso: G15, G25, G35

Da un rapido confronto delle tre ghise si evince come esse presentino la stessa forma della grafite e rientrino nella tipologia “D” poiché gli elettrodi provocano un rapido raffreddamento e di conseguenza un’importante crescita dendritica.

2.5. Scelta del materiale per gli elettrodi basati sul primo metodo

La valutazione dei materiali è stata effettuata in due step successivi:

1° step: selezione grafica con indici di prestazione, per una prima cernita veloce ma approssimativa con il livello 2 di CES.

2° step: Selezione analitica con funzione di prestazione per una reale ottimizzazione.

Nella prima fase, i due elettrodi sono collegati ad un connettore ciascuno che ne rileva la tensione e posteriormente è presente un ulteriore connettore che permette il passaggio della corrente.

Come già anticipato, con questo metodo le resistenze degli elettrodi a temperatura ambiente vengono eliminate durante la fase iniziale di taratura dello strumento, ma all’aumentare della temperatura si verifica un aumento della loro resistenza elettrica.

Si è resa quindi necessaria l’individuazione di un materiale presente, come stato di fornitura, in forma cilindrica affinché non si verificasse la formazione di un campo elettrico più intenso in prossimità delle zone in cui la superficie del conduttore presenta un raggio di curvatura minore, fenomeno noto come *potere disperdente delle punte*; si esige inoltre una bassa resistività elettrica, escludendo quindi alcune classi di materiali come: ceramici, polimeri, materiali naturali e vetri. Nella classe dei materiali metallici si può notare come il titanio e le sue leghe presentino un’elevata resistività, pertanto verranno esclusi anch’essi dalla selezione, compatibilmente con i seguenti ulteriori indici:

Temperatura di fusione (T_f): gli elettrodi inseriti preventivamente nella coppetta devono poter resistere alla temperatura alla quale viene colata la ghisa (1350°C) e non devono dissolversi nel bagno per l'intera durata della prova (circa 10 minuti). Come vincolo a riguardo si è optato per una temperatura minima di 1400°C che ha permesso di escludere i materiali con temperatura di fusione inferiore a tale valore.

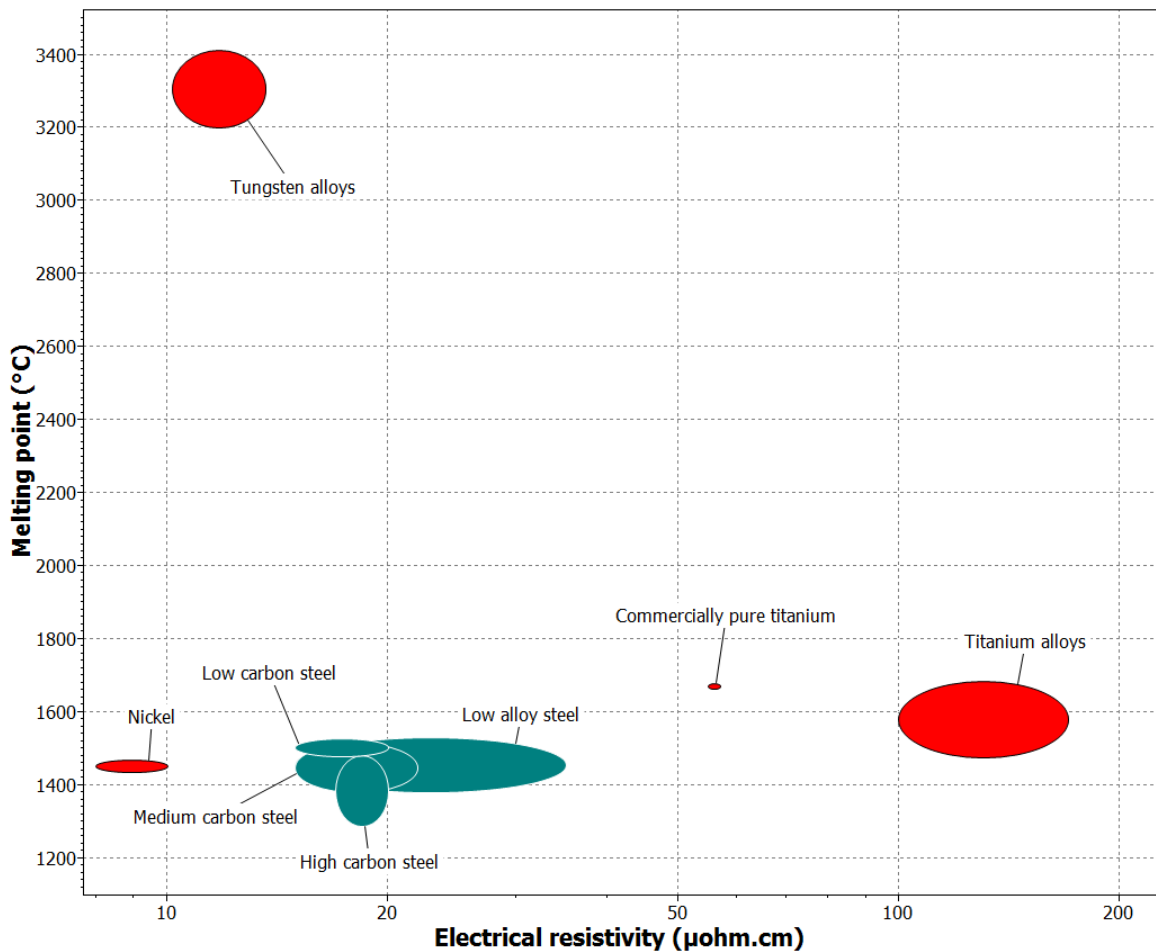


Grafico 2-1: temperatura di fusione vs resistività elettrica. Materiali considerati per la selezione

Prezzo (P): la rilevazione dell'analisi elettrica vuole svincolarsi dall'utilizzo di un prodotto come la chill cup pertanto è necessario essere competitivi su un eventuale costo di produzione. A tal fine si è cercato di scegliere un materiale facilmente reperibile sul mercato e a buon prezzo rispetto la propria massa. Si è deciso di porre come limite di costo 15 €/kg per avere una ampia gamma di materiali tra cui scegliere. Da questa ultima selezione vanno perciò escluse le leghe di tungsteno e nickel.

Diffusività termica (a): è definita come il rapporto fra conducibilità termica e il prodotto di densità e calore specifico del corpo.

$$a = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho} \quad (2.4)$$

Essendo un indice di diffusione la sua unità di misura secondo il Sistema Internazionale è m^2/s .

La diffusività termica è una caratteristica intrinseca del corpo in quanto dipende esclusivamente da parametri relativi al materiale di cui è composto e descrive il comportamento di un flusso termico in presenza di condizioni non stazionarie. [29]

Infatti affinché il provino non cali drasticamente la propria temperatura, per effetto dell'asportazione di calore da parte degli elettrodi, rendendo invano il confronto con l'analisi termica svolta in parallelo, è necessario che questa proprietà sia la minore possibile.

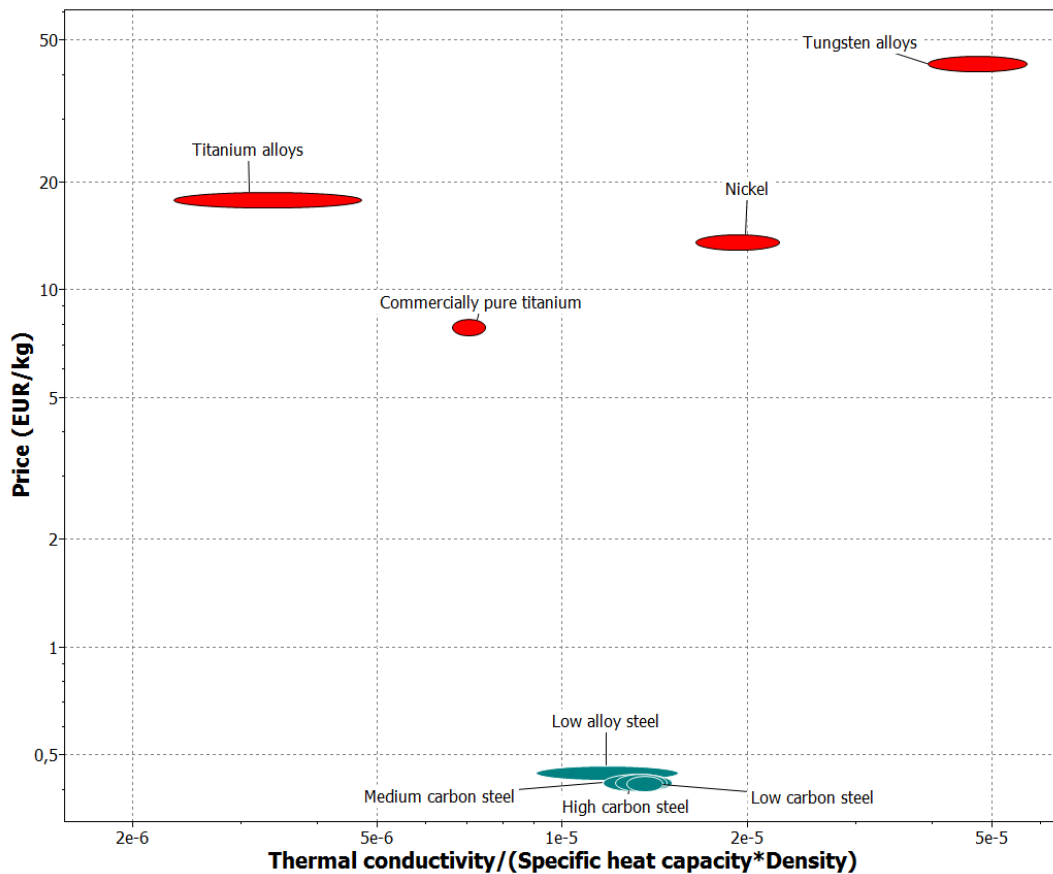


Grafico 2-2: costo vs diffusività termica. Materiali considerati per la selezione

Per utilizzare la selezione analitica si è ricorsi al livello 3 del software ricorrendo ad un più vasto database di prodotti.

Con i medesimi vincoli risultano ora disponibili 416 diversi materiali, includendo anche limitate classi specifiche che prima non venivano considerate. Per poter restringere il campo di scelta, sono stati ristretti i vincoli precedentemente definiti fino ad ottenere un elenco circoscritto a 8 materiali:

- 34CrMo4,
- AISI 1020
- AISI 1117
- S235JR,
- AISI 1022
- YS 140
- AISI 1015
- AISI 1025

Vengono in questo modo eliminate le leghe di cromo, la grafite pirolitica e il carbonio cristallizzato per la loro maggiore diffusività termica; gli acciai con medio-alto tenore di carbonio per la loro minor temperatura di fusione; gli acciai basso legati per la loro maggiore resistività elettrica.

Si riporta nella tabella 2-2 i valori degli indici e in tabella 2-3 gli stessi valori, normalizzati rispetto al più piccolo per le proprietà decrescenti mentre rispetto al più grande per la proprietà crescente (T_f), poiché si vuole impostare una funzione di prestazione per poi andare a scegliere il materiale con Z maggiore:

INDICI				
Materiale	ρ ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	a (m^2/s)	T_f ($^\circ\text{C}$)	P ($\text{€}/\text{kg}$)
34CrMo4	21,91	0,0000136	1408	0,45
S235JR	16,97	0,0000137	1501	0,42
Fe5CrMoV	37,42	0,0000082	1446	0,94
AISI 1040	17,44	0,0000137	1468	0,42
AISI 1117	17,32	0,0000138	1506	0,42
YS140	20,86	0,0000133	1486	0,38
YS300	23,47	0,0000123	1462	0,3

Tabella 2-2: proprietà dei materiali presi in considerazione

INDICI NORMALIZZATI

Materiale	$(\rho)_{norm}$	$(a)_{norm}$	$(T_f)_{norm}$	$(P)_{norm}$
34CrMo4	0,77	0,60	0,93	0,67
S235JR	1,00	0,60	0,99	0,71
Fe5CrMoV	0,45	1,00	0,96	0,32
AISI 1040	0,97	0,60	0,97	0,71
AISI 1117	0,98	0,59	1,00	0,71
YS140	0,81	0,62	0,98	0,78
YS300	0,72	0,67	0,97	1,00

Tabella 2-3: valori normalizzati delle proprietà

La funzione di prestazione è definita come segue:

$$Z_{pres} = \alpha_{\rho} \cdot (\rho)_{norm} + \alpha_T \cdot (T_f)_{norm} + \alpha_a \cdot (a)_{norm} + \alpha_P \cdot (P)_{norm} \quad (2.5)$$

Sulla base dell'esperienza svolta a tirocinio e per la descrizione riportata precedentemente, si è deciso di attribuire il seguente ordine d'importanza alle proprietà prese in esame.

Proprietà	Importanza
Resistività elettrica	10/10
Temperatura di fusione	8/10
Diffusività termica	7/10
Prezzo	6/10

Tabella 2-4: proprietà considerate nel primo metodo e relativa importanza

Per attribuire agli indici normalizzati i fattori peso (α_i) di tale funzione si è utilizzato il metodo Enhanced Digital Logic.

Nelle colonne vengono riportate le proprietà mentre in riga troviamo il risultato della differenza tra la proprietà nell'intestazione di colonna con le altre proprietà, in ordine

appunto decrescente di importanza, e sommando un'unità. Ad esempio, nella prima cella per la resistività elettrica, si riporta il valore $3 = 10 (\rho) - 8 (Tf) + 1$

	Resistività elettrica	Temperatura di fusione	Diffusività termica	Prezzo	
	3	1			
	4		1		
	5			1	
		2	1		
		3		1	
			2	1	
					Somma Totale
Tot parziale	12	6	4	3	25
α_i	0,48	0,24	0,16	0,12	

Tabella 2-5: metodo enhance digital mode

Moltiplicando i coefficienti così ottenuti per i valori normalizzati delle proprietà di ogni materiale, è possibile attribuirgli un indice. Poiché i valori sono stati normalizzati rispetto il valore di proprietà più piccola, ora è possibile ordinarli in ordine crescente di funzione Z.

Materiale	Z
S235JR	0,869
Fe5CrMoV	0,859
AISI 1117	0,853
YS140	0,792
YS300	0,783
34CrMo4	0,746
AISI 1040	0,650

Tabella 2-6: materiali ordinati in base al valore della loro funzione di prestazione

La scelta del materiale da utilizzare per gli elettrodi con il primo metodo, è caduta pertanto sul materiale S235JR, il quale unisce caratteristiche di bassa resistività elettrica e diffusività termica a elevata temperatura di fusione, il tutto ad un prezzo competitivo.

2.6. Scelta materiale per elettrodi con il secondo metodo

Con il secondo metodo in analisi gli obiettivi di misurare la resistività in modo preciso restano ma, cambiando la tecnica bisogna assolvere esigenze differenti.

Poiché con questo metodo le resistenze dei contatti vengono eliminate assieme alle resistenze dei cavi e degli elettrodi stessi, le priorità sono ricadute nel trovare un materiale idoneo per: a) l'elettrodo della tensione, b) fungere da isolante elettrico e infine uno adeguato c) per l'elettrodo della corrente.

a) Iniziamo analizzando l'elettrodo della tensione: inizialmente si erano tralasciati i costi per la selezione di questo tipo di elettrodo portando alla scelta delle leghe di nickel, dato il loro elevato punto di fusione (1445°C). Sono state svolte alcune prove al fine di valutare se un filo di diametro 1,6 mm di INCONEL 80 e INCONEL 625 potessero resistere, ottenendo però scarsi risultati a causa della dissoluzione dell'elettrodo, come si evince dalle seguenti micrografie.

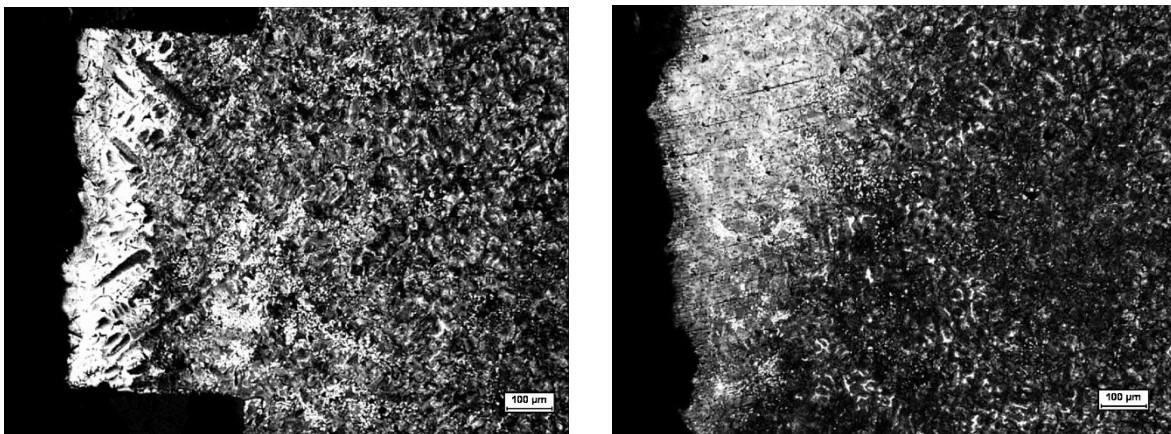


Figure 2-9: micrografia elettrodo della tensione in lega di nickel

Per poter raggiungere lo scopo sarebbe pertanto necessario ricorrere a diametri maggiori con un incremento eccessivo dei costi. Si è così incluso nei parametri di scelta anche il prezzo. Riassumendo quindi gli indici scelti, troviamo: temperatura di fusione maggiore di 1400°C poiché si vuole diminuire il più possibile la dimensione dell'elettrodo; diffusività termica bassa affinché non si verifichi eccessiva asportazione del calore rischiando di bruciare i cavi

dello strumento; prezzo minore di 20 €/kg; resistività elettrica non più così importante; infine stato di fornitura in forma cilindrica.

In base a queste restrizioni si ottengono 647 materiali.

Diminuendo il costo a 10€/kg e portando la una temperatura minima di fusione a 1450°C si riescono a scartare la maggior parte i quelli proposti fino ad ottenerne 63. Tra questi, molti sono costituiti dallo stesso materiale ma con diverso stato di fornitura, come ad esempio eventuali trattamenti termici.

Si ottiene pertanto un elenco di 20 materiali differenti. In appendice 2 si riporta il medesimo procedimento effettuato per il primo metodo di analisi della resistività elettrica.

Proprietà	Importanza
Temperatura di fusione	10/10
Diffusività termica	9/10
Prezzo	7/10
Resistività elettrica	6/10

Tabella 2-7: proprietà considerate per il secondo metodo per l'elettrodo della tensione e relativa importanza

Anche in questa applicazione l'acciaio con basso tenore di carbonio risulta essere in prima posizione.

METODI, STRUMENTAZIONE E SELEZIONE DEI MATERIALI

Per determinare la dimensione di quest'elettrodo si è proceduto alla preparazione di 4 cilindri con diametri rispettivamente di 2,5 mm, 3 mm, 3,5 mm e 4 mm. Essi sono stati inseriti in un contenitore e in seguito è stata colata della ghisa. L'utilizzo di una termocoppia ha permesso di confermare una temperatura di colata superiore a 1400°C.

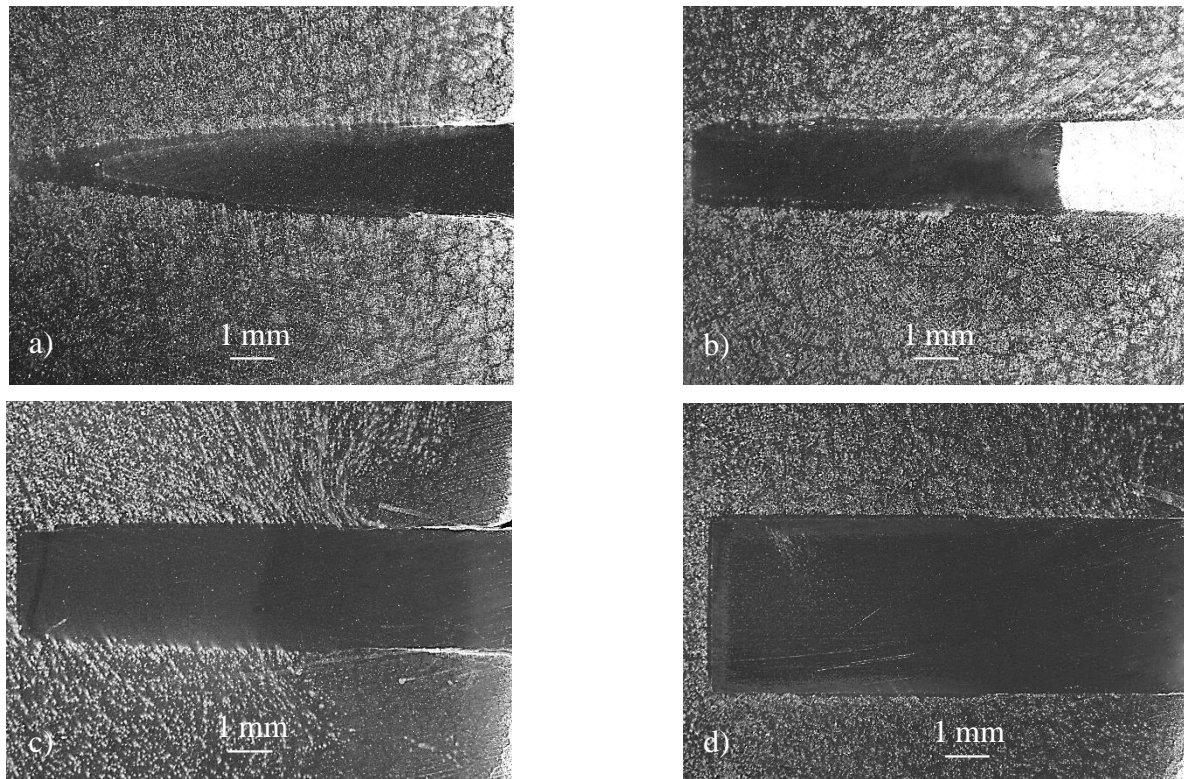


Figura 2-8: macrografia degli elettrodi utilizzati per valutare l'eventuale variazione geometrica

Dall'immagine si evince come l'unico elettrodo a non subire modificazioni alla propria geometria sia quello da 4 mm. Pertanto è stata ritenuta la scelta migliore.

b) l'isolante riveste un ruolo importante in quanto non deve permettere il contatto tra i due elettrodi. È necessario pertanto una temperatura di transizione vetrosa superiore a 1200°C e una buona resistenza allo shock termico in quanto l'eventuale fratturazione dell'isolante porterebbe alla sua disgregazione e all'inquinamento del provino. Nonché ad un'alterazione della misura dovuto all'infiltrazione della ghisa, ponendo in collegamento i due elettrodi V e A in zone non previste.

Costruiamo quindi l'indice (I) da massimizzare:

$$\sigma_f > E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad \rightarrow \quad \Delta T < \frac{\sigma_f}{E \cdot \alpha} \quad \rightarrow \quad I = \frac{\sigma_f}{E \cdot \alpha} \quad (2.6)$$

In un grafico σ_f vs $E \cdot \alpha$ la retta di selezione è data dall'equazione:

$$\log(\sigma_f) = \log(E \cdot \alpha) + \log(I) \quad (2.7)$$

Considerando il fascio di rette tratteggiate con pendenza 1, l'indice viene massimizzato spostandosi verso l'alto.

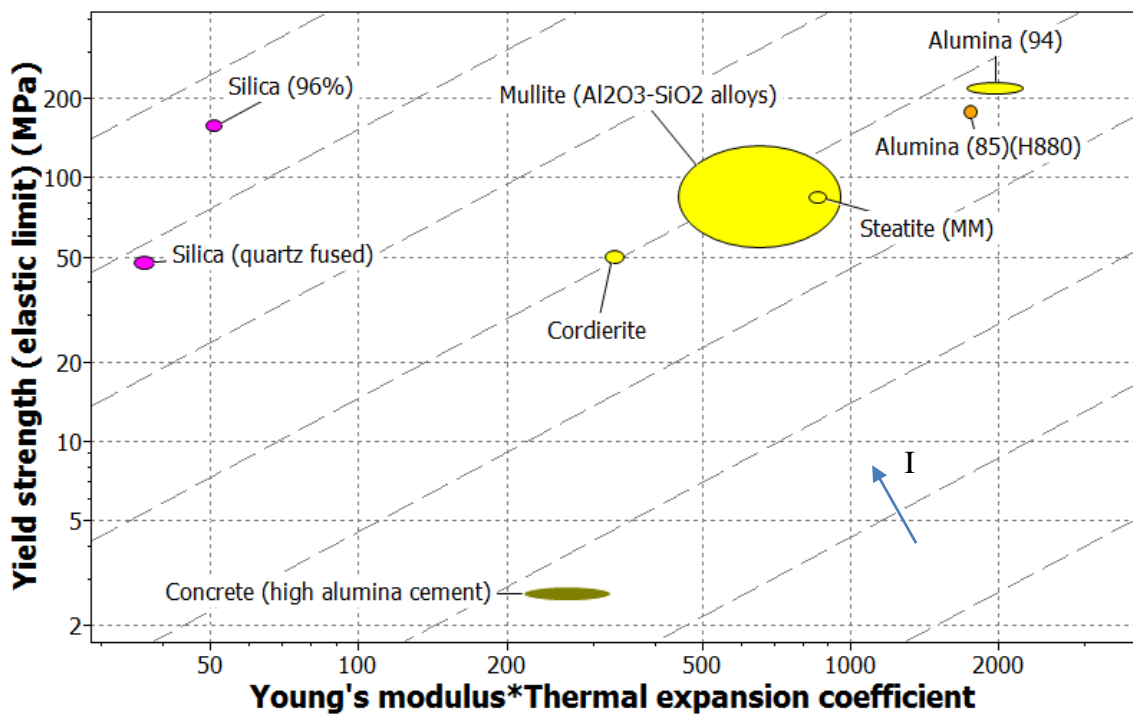


Grafico 2-3: valutazione della resistenza allo shock termico mediante l'indice I

Inoltre, il prodotto serve fornito con una geometria tubolare e tenendo comunque in considerazione l'aspetto economico si costruisce il grafico seguente.

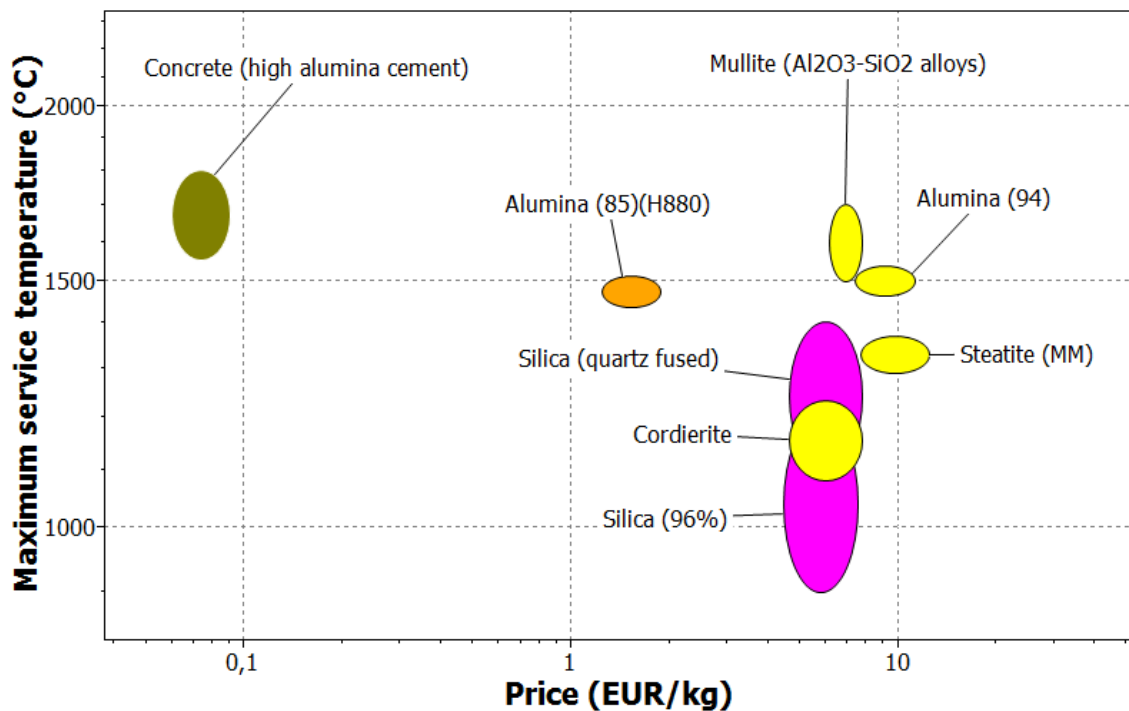


Grafico 2-4: massima temperatura di servizio vs costo.

Si evince come il vetro di silice possieda un'ottima resistenza allo shock termico e una temperatura di transizione vetrosa sufficientemente alta per l'applicazione in esame.

È inoltre da scartare il cemento con alto contenuto di allumina, sebbene possieda ottime caratteristiche di resistenza all'elevata temperatura e un prezzo molto competitivo. Come si può evincere dal grafico 2-3, esso presenta una bassa resistenza allo shock termico; inoltre si scarta la scelta dell'allumina in quanto essa possiede ottime caratteristiche di isolante elettrico a temperatura ambiente ma, a all'aumentare di quest'ultima, la sua resistività cala drasticamente [30] rischiando di vanificare la prova.

c) L'ultimo materiale da selezionare è il tubo esterno che trasporta la corrente. Presenta questa forma in quanto all'interno è alloggiato l'isolante e dentro questo, l'elettrodo della tensione.

Le caratteristiche richieste sono: una bassa diffusività termica per non asportare il calore, invalidando quindi la prova; temperatura di fusione sufficientemente alta (maggiore di

1370°C) tale da non inquinare il bagno di colata; resistività elettrica non necessariamente bassa; prezzo basso (inferiore 10€/kg).

Proprietà	Importanza
Diffusività termica	10/10
Temperatura di fusione	8/10
Prezzo	7/10
Resistività elettrica	5/10

Tabella 2-9: proprietà considerate per il secondo metodo per l'elettrodo della tensione e relativa importanza

Da questa prima selezione restano 78 materiali. Tra questi sono presenti più volte lo stesso materiale ma con diversi trattamenti termici. Togliendo quest'ultimi dalla selezione restano solo 22 materiali differenti dove la classe più ampia è quella degli acciai inossidabili.

Ne risulta che il materiale ottimale per quest'applicazione è l'AISI 304.

Capitolo 3

3. ANALISI DEI DATI

3.1. 1° metodo

Prima di procedere alla misura della resistenza della ghisa è stato necessario svolgere dei test preliminari con il fine di capire se gli elettrodi resistessero effettivamente alla colata della ghisa e la temperatura in prossimità dei capicorda fosse troppo elevata tale da alterare i cavi.

Sono stati preparati tre tipi differenti di elettrodi in materiale S235JR: uno lungo 40 mm, uno lungo 40 mm con un'incisione a V, a metà della lunghezza uscente dalla chill cup, per bloccare l'eventuale flusso di calore verso i cavi e infine uno lungo 65 mm.

Dalla figura 3.1 è possibile notare la presenza di alcuni fori creati per l'alloggiamento delle termocoppie per la rilevazione della temperatura nell'elettrodo. Sono stati eseguiti a metà lunghezza e in corrispondenza dell'ancoraggio dei cavi. Di seguito si riporta l'andamento della temperatura della ghisa durante la prova e dei rispettivi elettrodi.

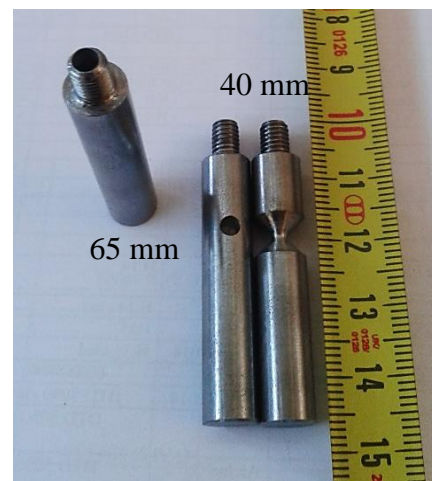


Figura 3-1: tipi elettrodi utilizzati per l'eventuale applicazione nel primo metodo

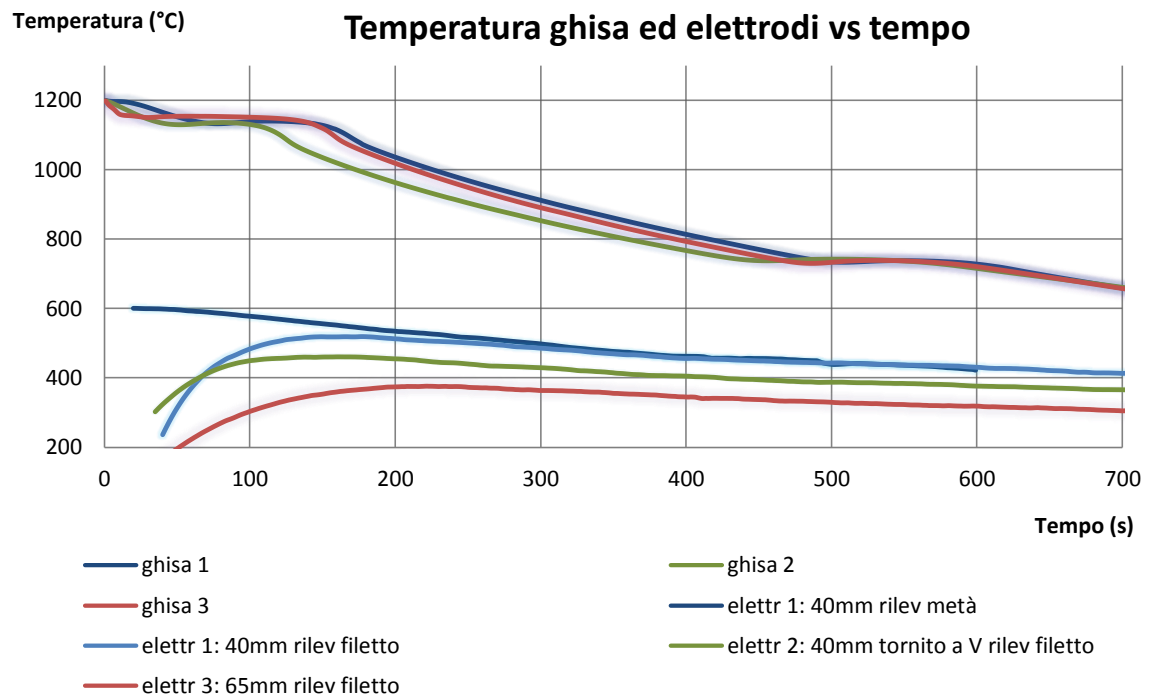


Grafico 3-1: andamento temperatura vs tempo per la ghisa (curve superiori) e per gli elettrodi (curve inferiori)

Nel grafico sono rappresentati gli andamenti delle temperature della ghisa in alto, e degli elettrodi in basso. Si sono utilizzati colori uguali per gli elettrodi e per le rispettive ghise in modo da agevolare la lettura.

Si può notare come sia elevata la temperatura con l'elettrodo da 40 mm.

Con la presenza di un intaglio, il flusso termico subisce un rallentamento, ma in corrispondenza della strizione si verifica un elevato valore di resistività elettrica dovuto alla ridotta sezione, pertanto si è esclusa questa tipologia di elettrodo.

Per le prove successive si è deciso di utilizzare quelli con lunghezza 65 mm.

Per massimizzare il contributo della ghisa sulla misura totale di resistenza, sono stati inseriti gli elettrodi 5 mm nella coppetta di colata, in modo tale da garantire un buon contatto elettrico e allo stesso tempo avere una lunghezza sufficiente di materiale da poter rilevare. Ne consegue che essi si trovano a una distanza di 25 mm tra loro.

Si è deciso di iniziare le prove con la ghisa G15.

ANALISI DEI DATI

Viene riportato qui di seguito il grafico rappresentante l'andamento della temperatura in funzione del tempo, del provino di ghisa contenente gli elettrodi.

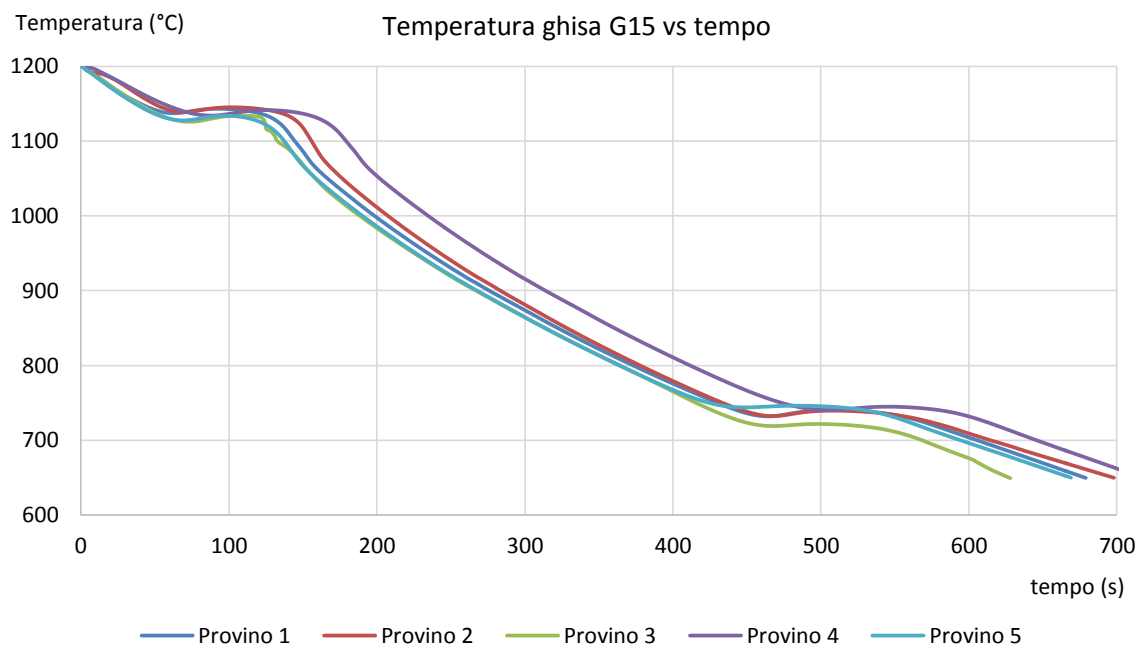


Grafico 3-2: andamento solidificazione provini in ghisa G15

Da un confronto dell'andamento della resistenza durante la solidificazione (grafici 3-3 A), con la derivata della temperatura del campione, si evince come sembrerebbe esserci una somiglianza tra il punto di massimo della resistenza elettrica, corrispondente al valore nullo della rispettiva derivata, al termine della solidificazione, ovvero alla temperatura di solidus della ghisa.

L'andamento crescente rilevabile nella derivata della resistenza elettrica a circa 470 secondi, manifesta la trasformazione di fase eutettoidica. Infatti, al diminuire della temperatura sia l'austenite primaria sia quella eutettica sovrassature di carbonio, formano così la cementite secondaria. L'austenite eutettoidica si trasforma in perlite lamellare costituita da ferrite e da cementite. Tale trasformazione allo stato solido comporta un arrangiamento della struttura con conseguente mobilità dei reticoli cristallini andando ad aumentare la resistività elettrica e producendo un conseguente aumento della resistenza.

Sono state sviluppate diverse micrografie della sezione degli elettrodi e della ghisa.

Attraverso queste si è potuto evincere una comune diffusione, di 300 μm , del carbonio dalla ghisa ($C \approx 3,3\%$) verso l'acciaio dell'elettrodo, nel quale allo stato di fornitura è stata garantita una percentuale di C corrispondente a 0,15%.



Figura 3-2: microstruttura elettrodo con il primo metodo

Come è possibile apprezzare dalla foto soprastante dove è stata riportata la punta dell'elettrodo, non è avvenuta una variazione della geometria imputabile alla sua fusione pertanto si è deciso di procedere con elettrodi di tali dimensioni e materiale.

ANALISI DEI DATI

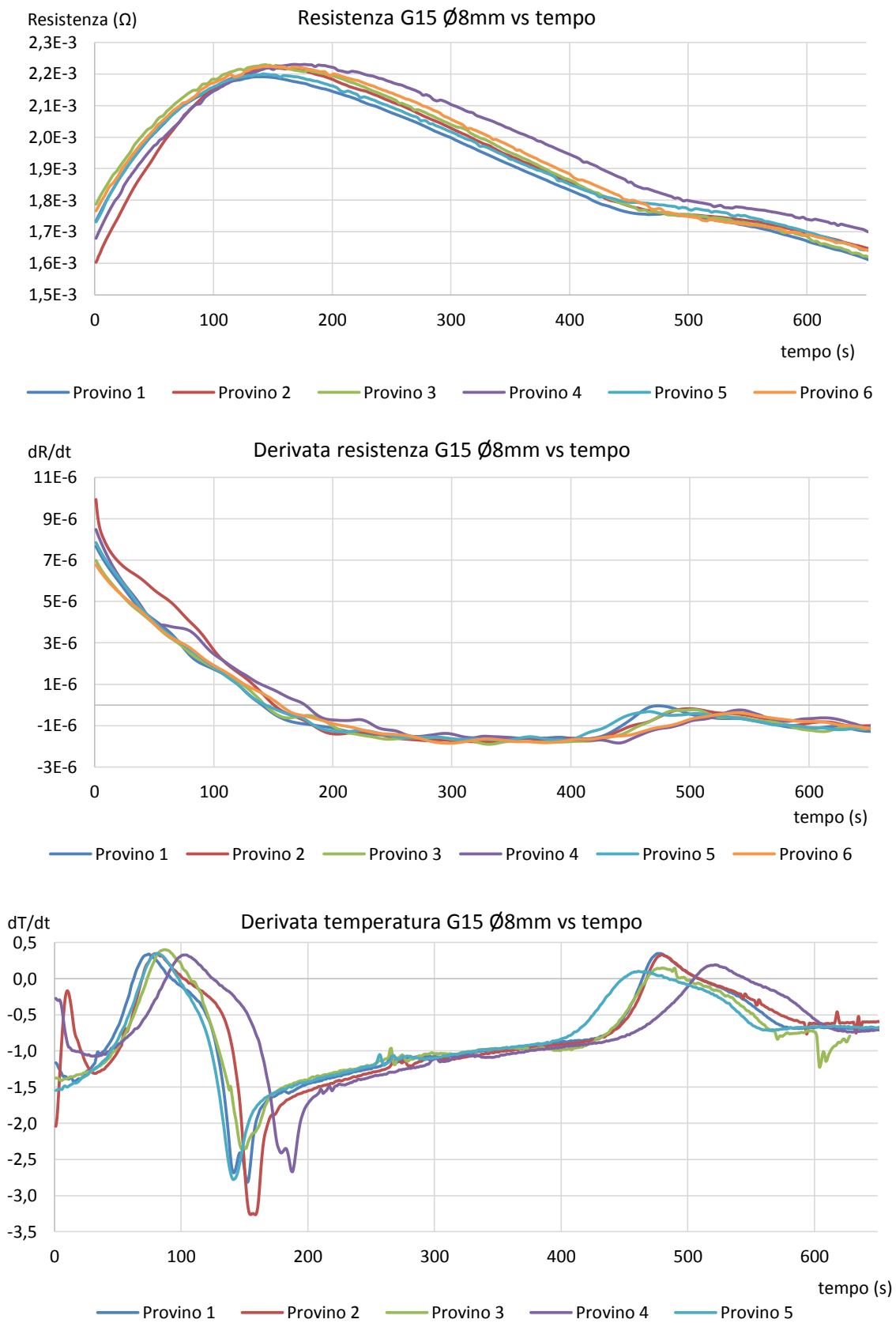


Grafico 3-3: andamenti in funzione del tempo riferita alla ghisa G15 con il primo metodo

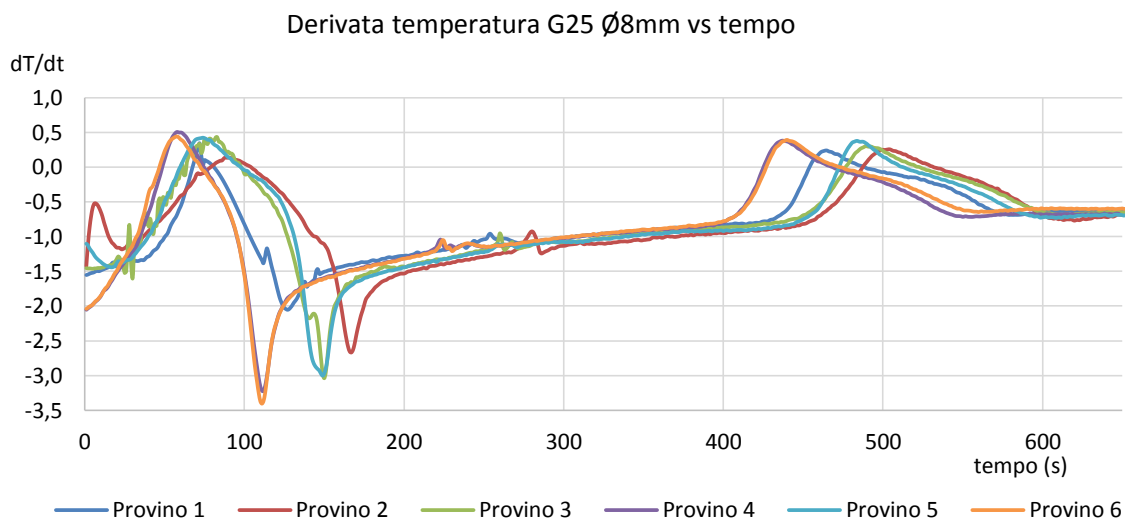
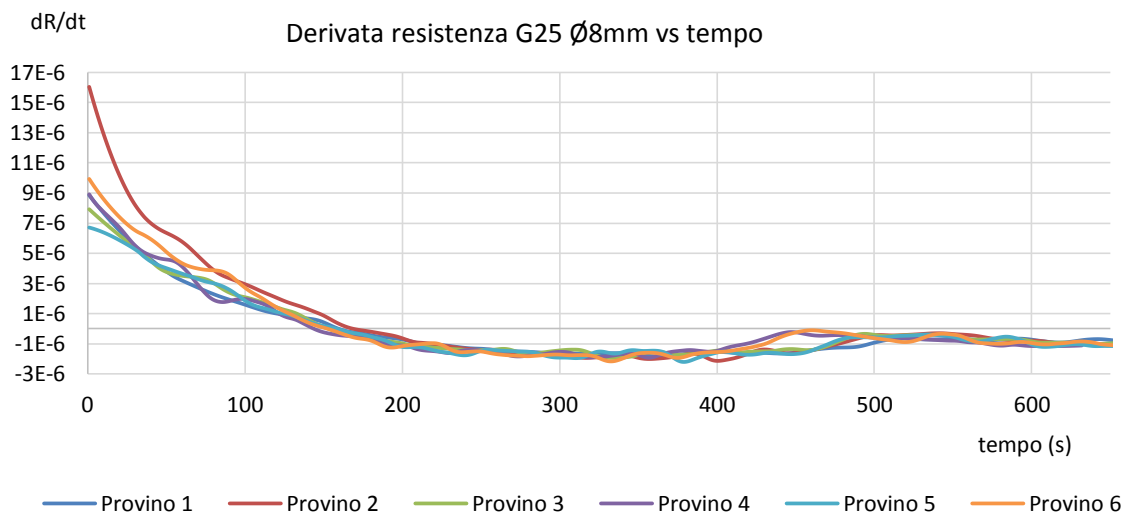
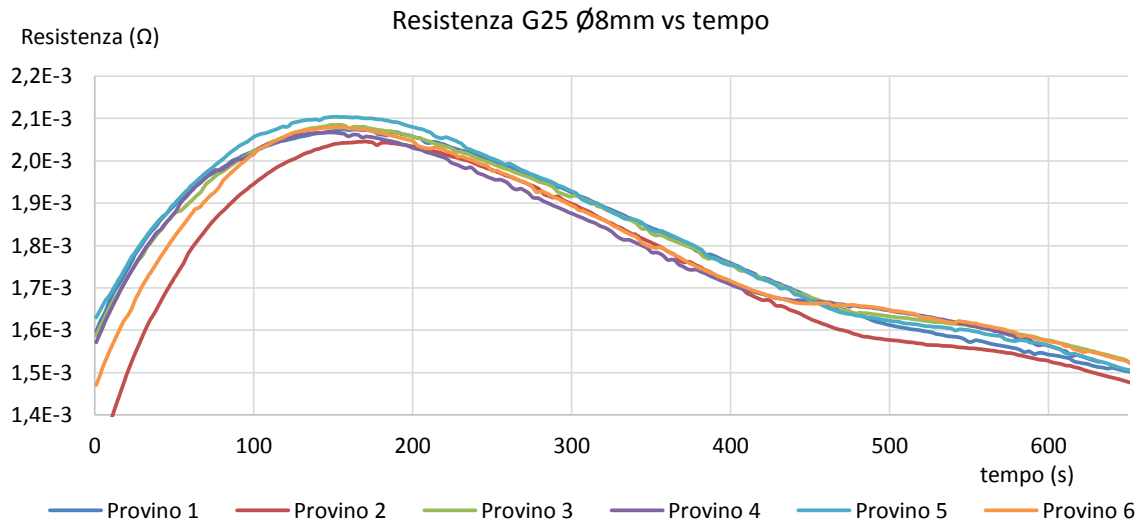


Grafico 3-4: andamenti in funzione del tempo riferita alla ghisa G25 con il primo metodo

ANALISI DEI DATI

Con questo metodo è evidente come si manifesti un valore estremamente elevato di resistenza durante tutta la prova. Questo fatto è imputabile al metodo di misurazione in quanto si va a sommare la resistenza intrinseca degli elettrodi.

Per limitare quest'ultima entità si è ricorsi perciò ad un aumento del diametro a 16 mm.

Operando in questo modo la loro resistenza, a parità di lunghezza, diminuisce di un quarto.

Sono stati costruiti tre diversi elettrodi per valutare il comportamento della temperatura con diverse lunghezze, rispettivamente 65 mm, 40 mm e 16 mm (in questo ultimo caso si è valutata la conservazione del volume rispetto ai primi elettrodi con diametro 8 mm e lunghezza 65 mm) e in assenza di essi.

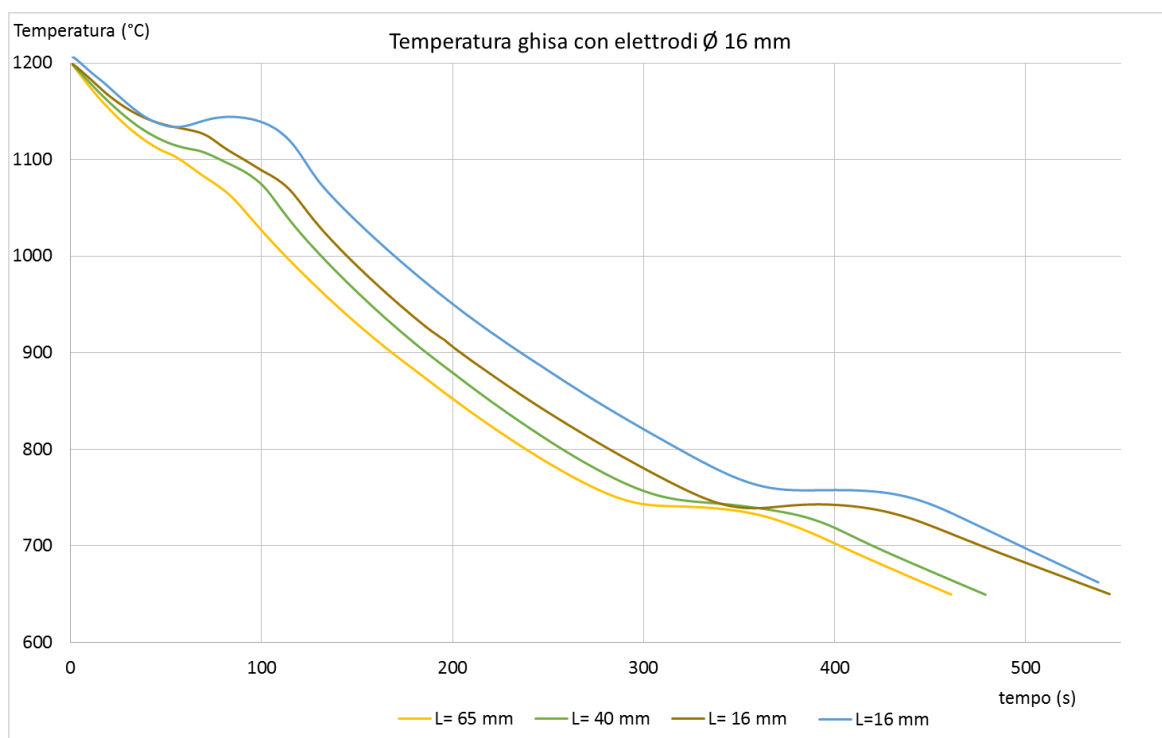


Grafico 3-5: andamento della temperatura in funzione del tempo nella ghisa contenente gli elettrodi con diametro 16 mm e di diverse lunghezze

Dal grafico si evince come gli elettrodi aventi una lunghezza di 65 mm provochino un elevato raffreddamento del provino verificando in modo limitato la trasformazione eutettica presente invece, in modo rilevante a circa 70 secondi, nel provino con elettrodi di lunghezza 16 mm. Pertanto è stato deciso di utilizzare gli elettrodi con lunghezza 16 mm e con diametro 16 mm.

Durante le prove precedenti si è notato un surriscaldamento rilevante degli elettrodi che potrebbe portare al danneggiamento dei cavi. Per assolvere tale problema sono stati costruiti quattro piccoli dissipatori in rame: ognuno collegato ad una estremità a un cavo dello strumento mentre, l'estremità opposta è stata unita al rispettivo potenziale (V_+ con A_+ e V_- con A_-) formando una coppia da alloggiare sui rispettivi due elettrodi. Si può apprezzare dall'immagine seguente i due cavi schermati corrispondenti alla rilevazione della tensione e poco più sotto il cavo blu e nero che portano la corrente.



Figura 3-3: Foto delle chill cup durante la solidificazione. Confronto tra ghisa senza elettrodi e con elettrodi

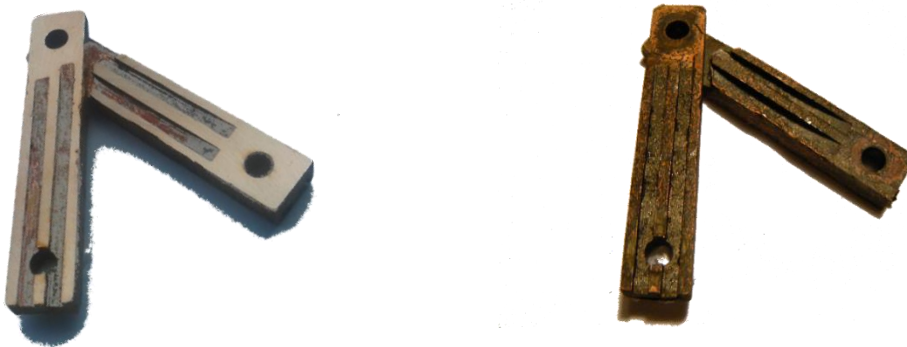


Figura 3-4: dissipatori in rame utilizzati nel 1° metodo per evitare il surriscaldamento dei cavi. Prima e dopo la serie di test

I test sono ricominciati utilizzando prima la ghisa G15 poi la G 25 e infine la G35. Vengono riportati qui di seguito i grafici della resistenza, della rispettiva derivata e della derivata della temperatura del provino con gli elettrodi inseriti da utilizzare come parametro di confronto. Lo scopo di utilizzare tre ghise diverse è stato per valutare il ripetersi di eventuali picchi caratteristici o nella manifestazione di nuove informazioni nei primi 100 secondi.

ANALISI DEI DATI

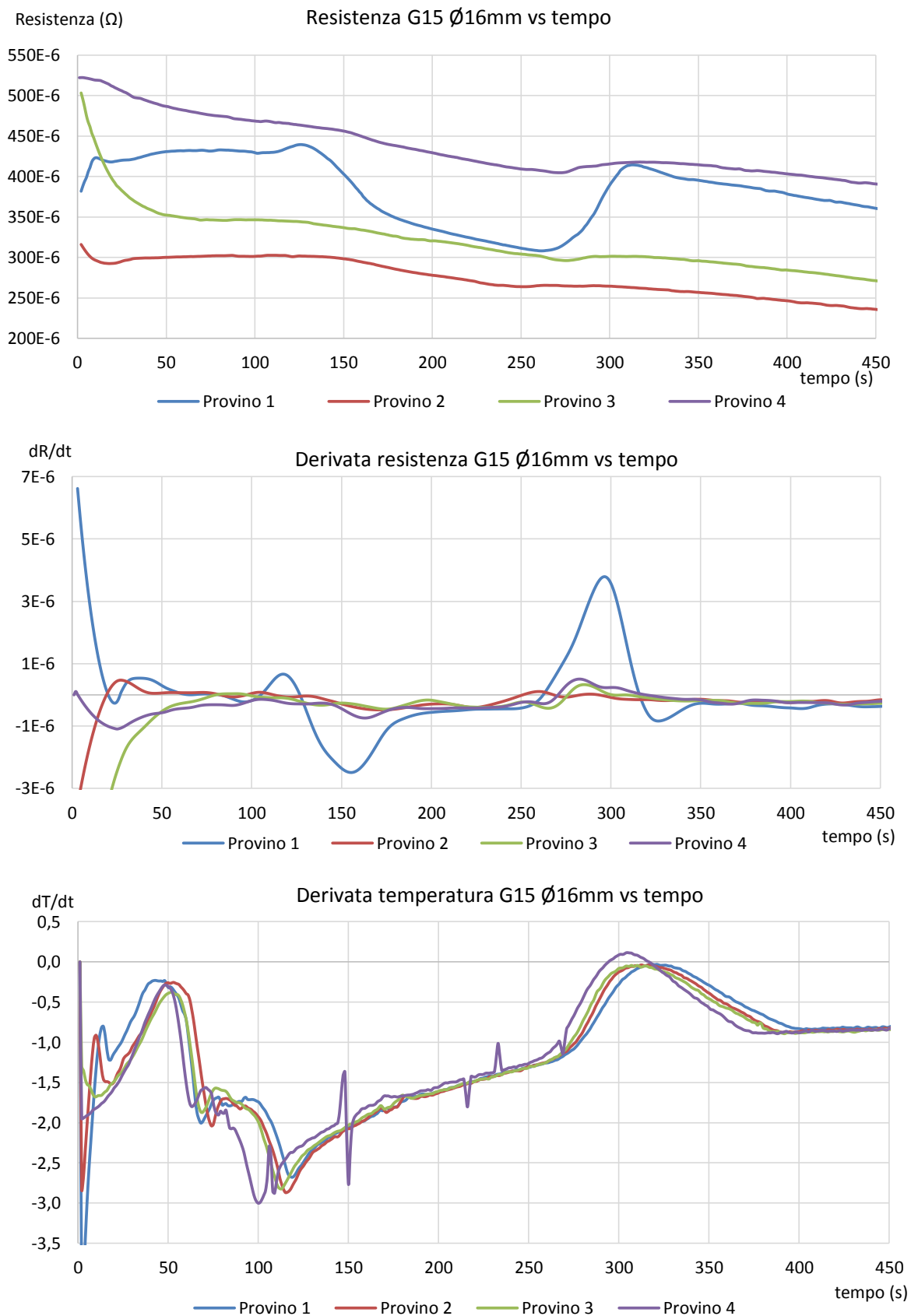


Grafico 3-6: andamenti in funzione del tempo riferita alla ghisa G15 con il primo metodo

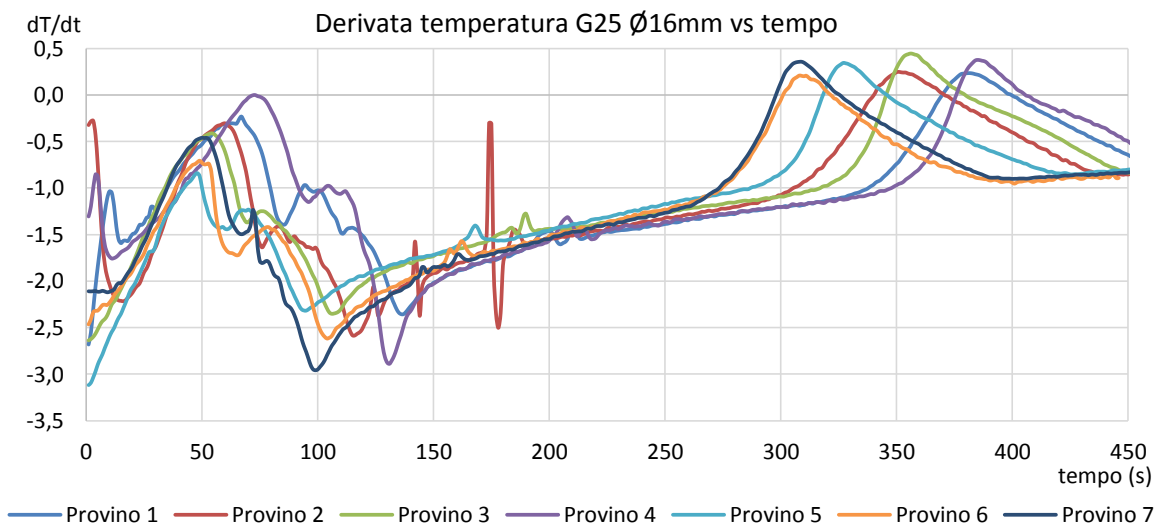
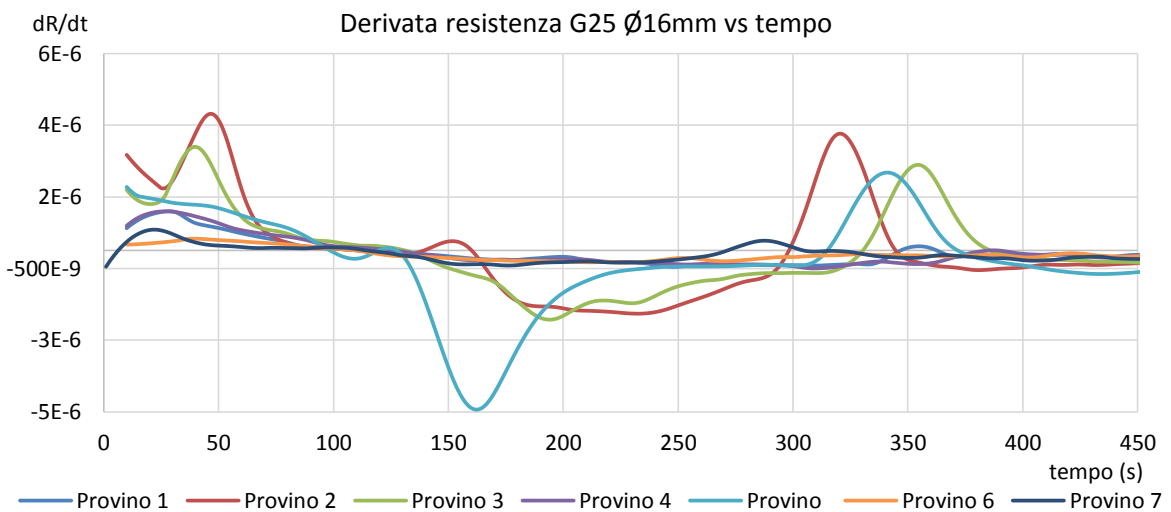
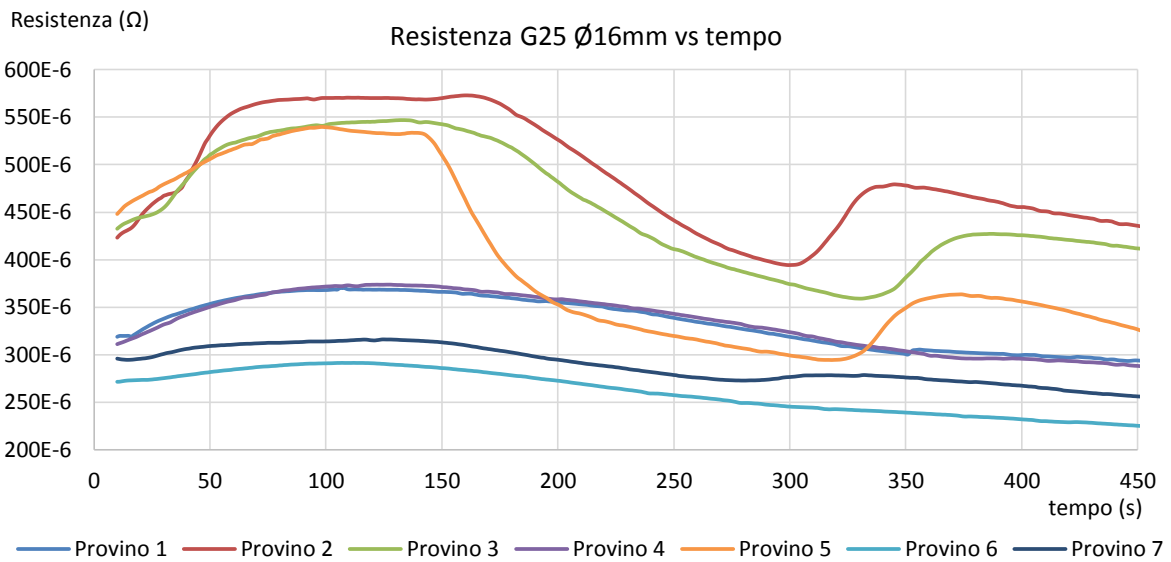


Grafico 3-7: andamenti in funzione del tempo riferita alla ghisa G25 con il primo metodo

ANALISI DEI DATI

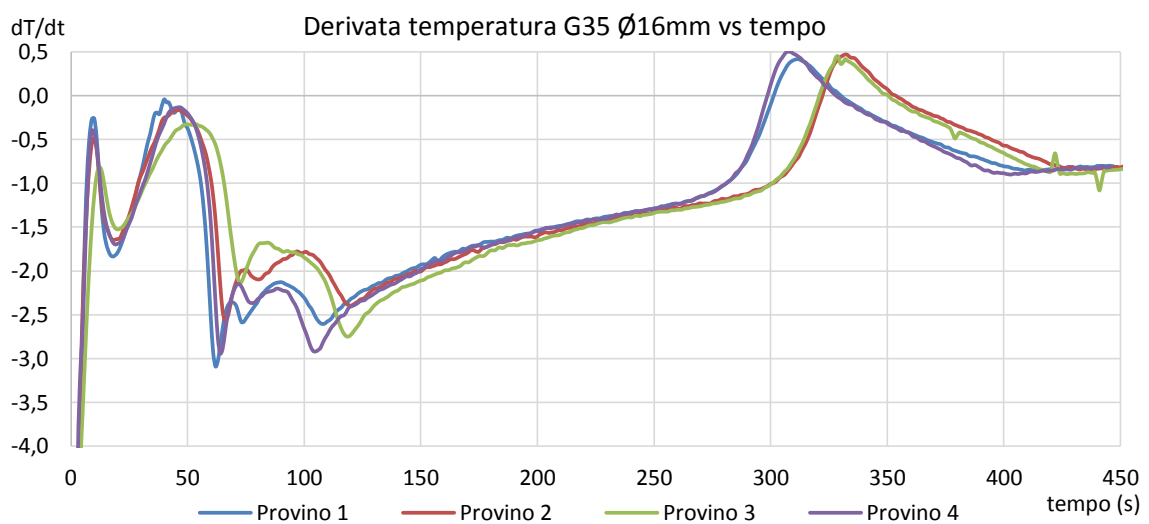
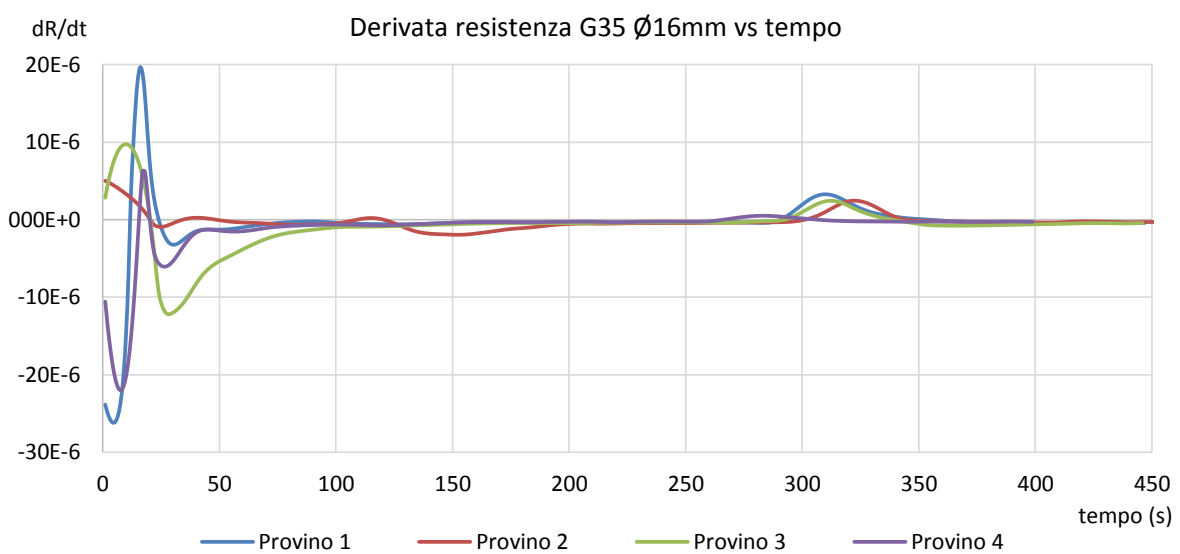
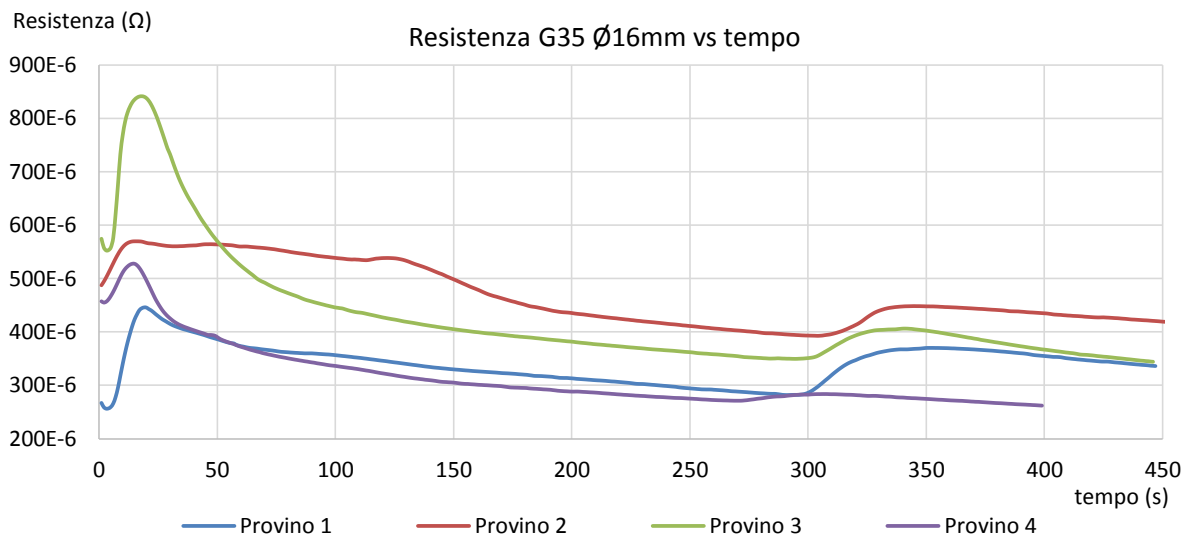


Grafico 3-8: andamenti in funzione del tempo riferita alla ghisa G35 con il primo metodo

3.2. 2° metodo

Con questo secondo metodo si è cercato di rilevare la resistenza della ghisa senza l'influenza di altri fattori esterni. Infatti, sono stati scelti i materiali con lo scopo di non interferire nell'asportazione del calore per avvicinarsi il più possibile ai risultati dell'analisi termica, utilizzata per ora come punto di riferimento.



Figura 3-5: svolgimento della rilevazione attraverso il secondo metodo proposto

Dopo le prime prove si è svolto, anche in questo caso, un'analisi metallografica sugli elettrodi per valutarne lo stato.

Dalle immagini seguenti si può notare come la geometria degli elettrodi resti per lo più inalterata al termine dello svolgimento della prova, questo ha fatto presupporre una corretta selezione dei materiali e dei loro dimensionamenti.

Si è voluto eseguire delle prove di durezza nella zona di contatto tra la ghisa e gli elettrodi. Come parametro di confronto si è stabilita anche la durezza dei materiali base ottenendo per l'acciaio AISI 304 un valore medio di 179 HV, mentre per l'acciaio S235JR, una durezza media corrispondente a 261 HV.

L'utilizzo di un profilo di durezza ha permesso inoltre di confermare la formazione di strutture intermetalliche quali carburi di cromo nel caso dell'elettrodo più grande che

ANALISI DEI DATI

trasporta la corrente, in acciaio inox AISI 304, mentre carburi di ferro in prossimità dell'elettrodo più piccolo che rileva la tensione, in acciaio S235JR.

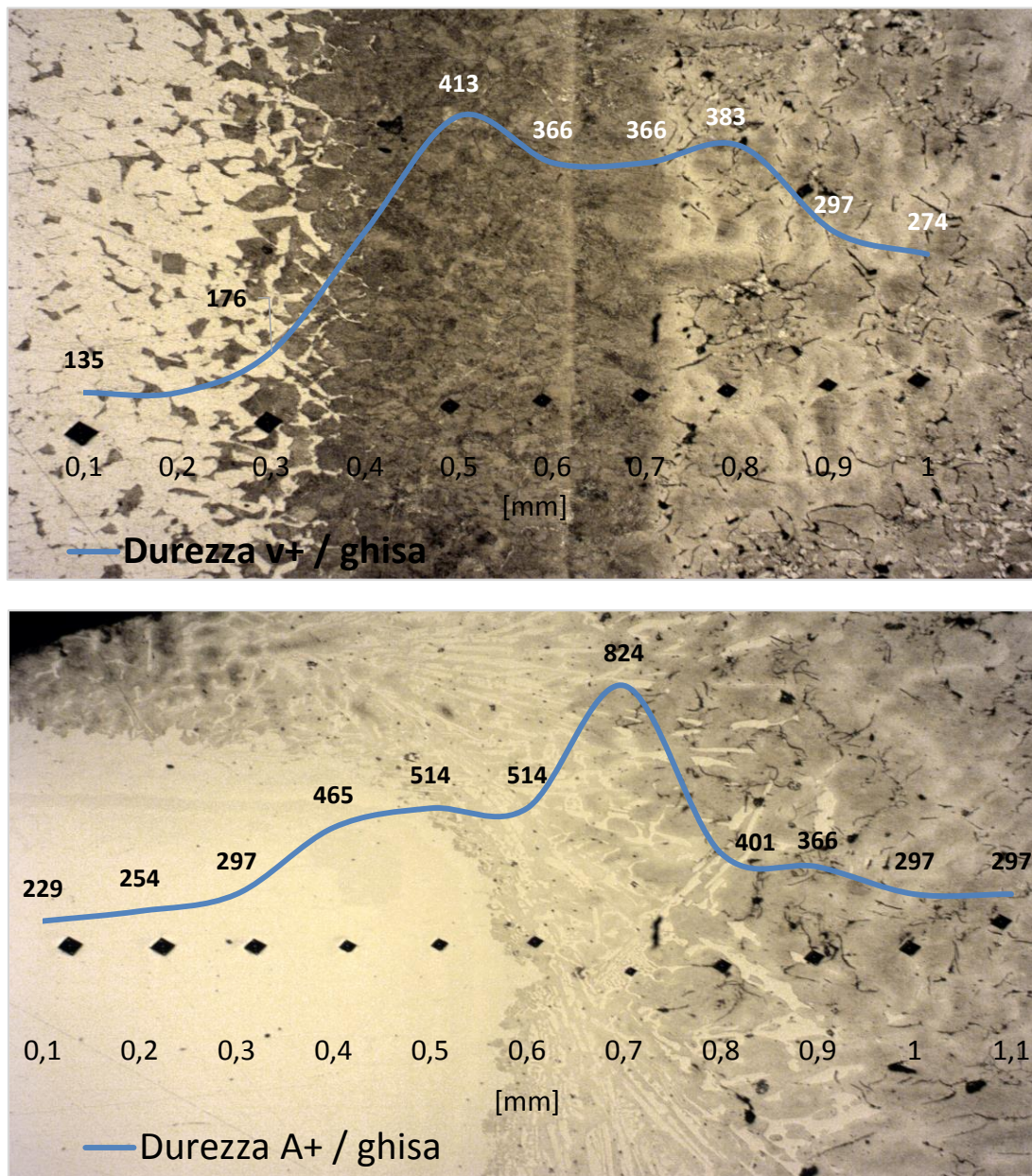


Figura 3-6: profili di durezza in prossimità dell'elettrodo che rileva la tensione e di quello che impone la corrente

La presenza di tali carburi potrebbe essere un mezzo di disturbo in quanto queste particelle, non essendo conduttrici, obbligano un percorso alternativo al passaggio della corrente. Si ipotizza che tale fatto possa spiegare l'andamento frastagliato della corrente dopo la solidificazione (corrispondente a circa 160 secondi).

Si riportano nelle pagine seguenti gli andamenti delle curve rilevate e calcolate.

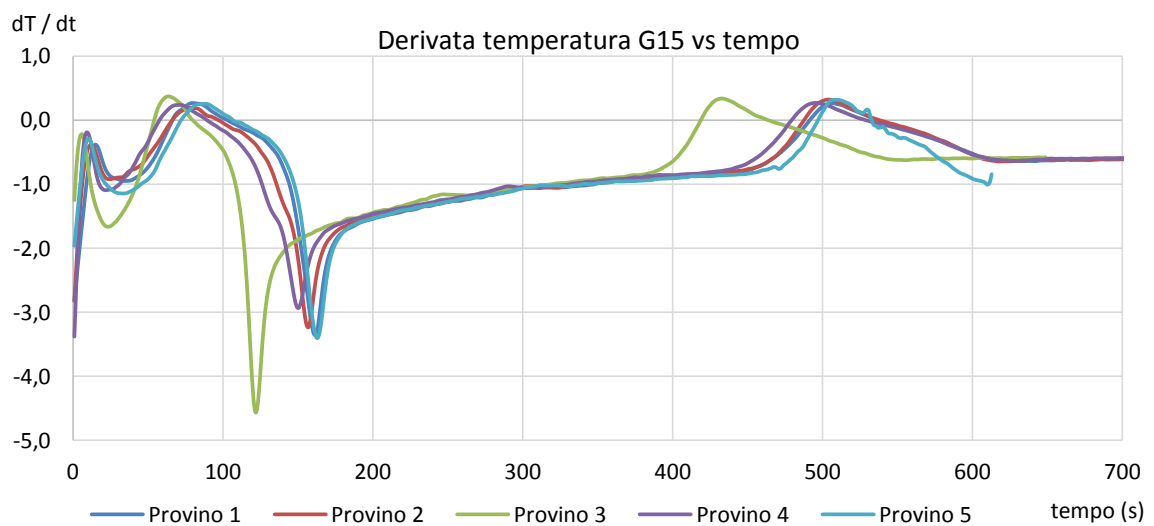
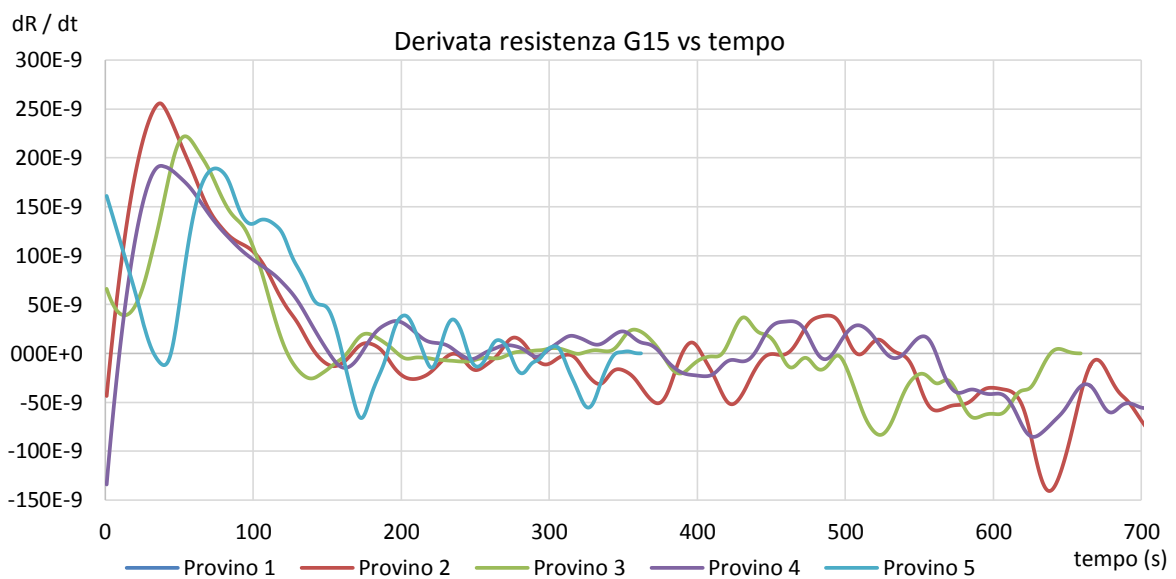
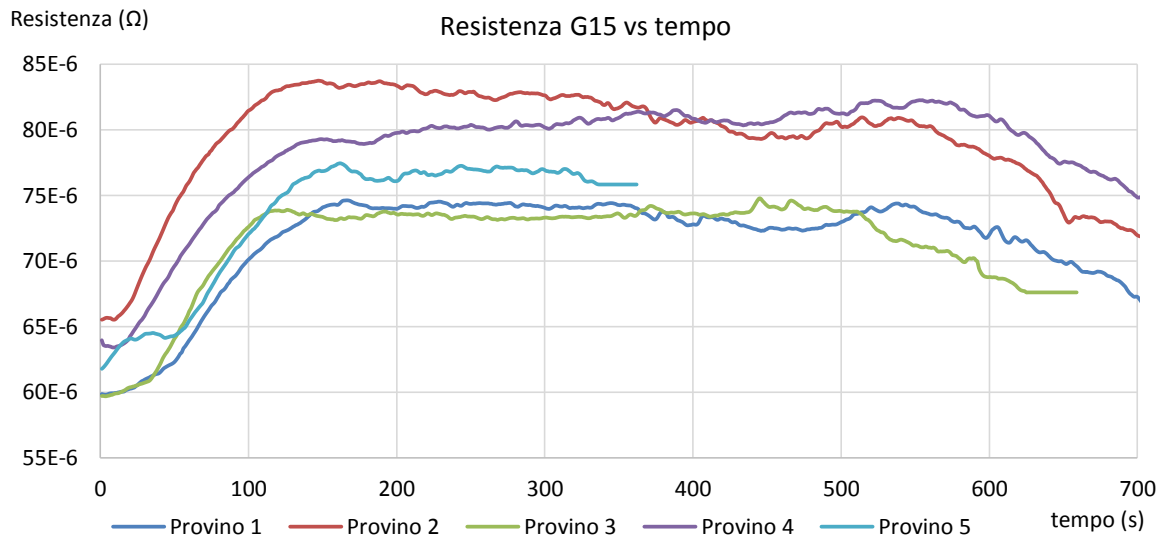


Grafico 3-9: andamenti in funzione del tempo riferita alla ghisa G15 con il secondo metodo

ANALISI DEI DATI

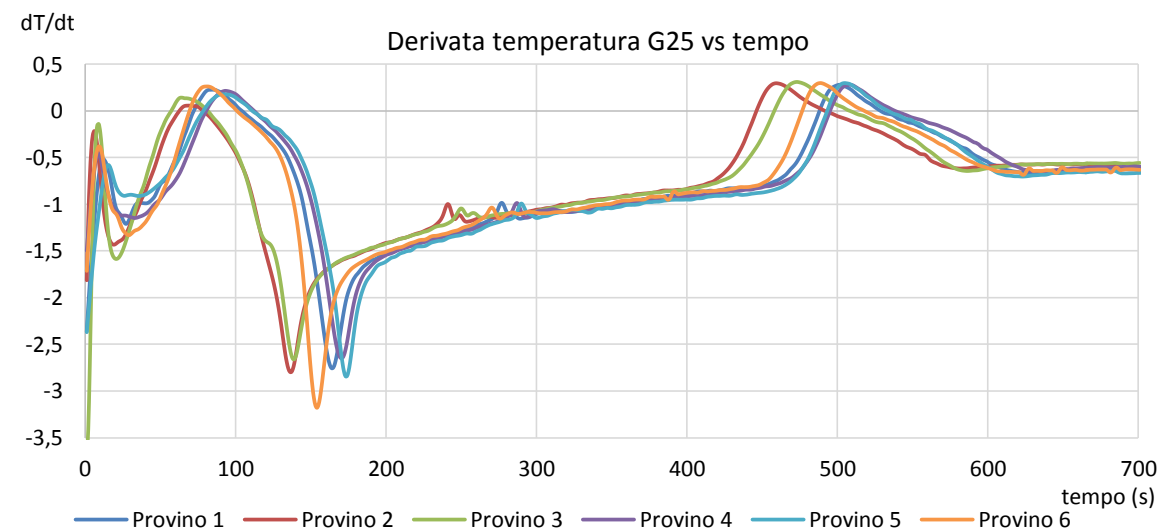
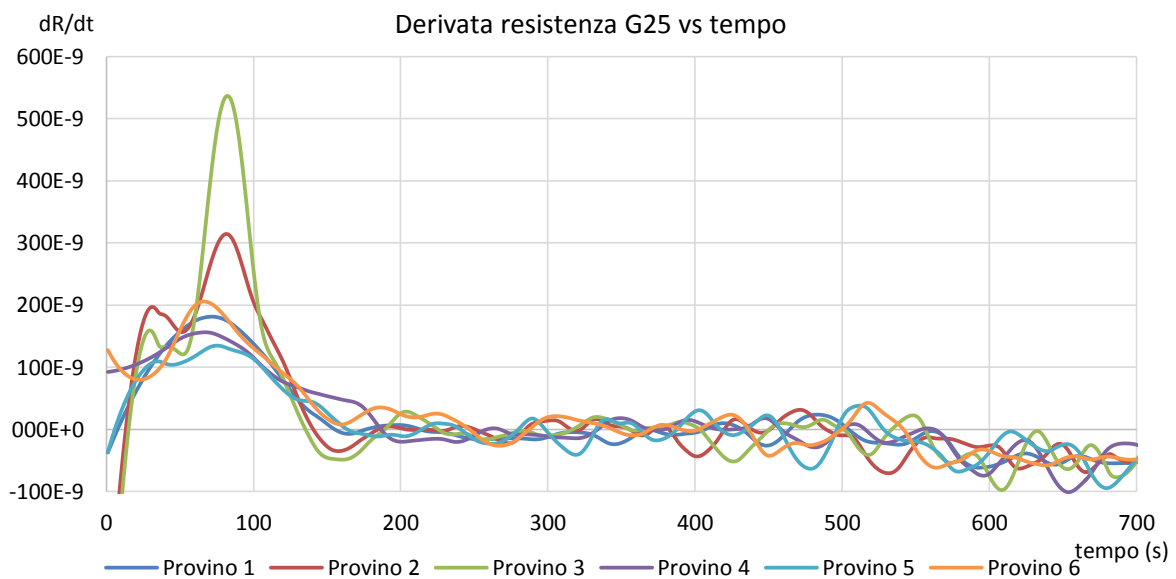
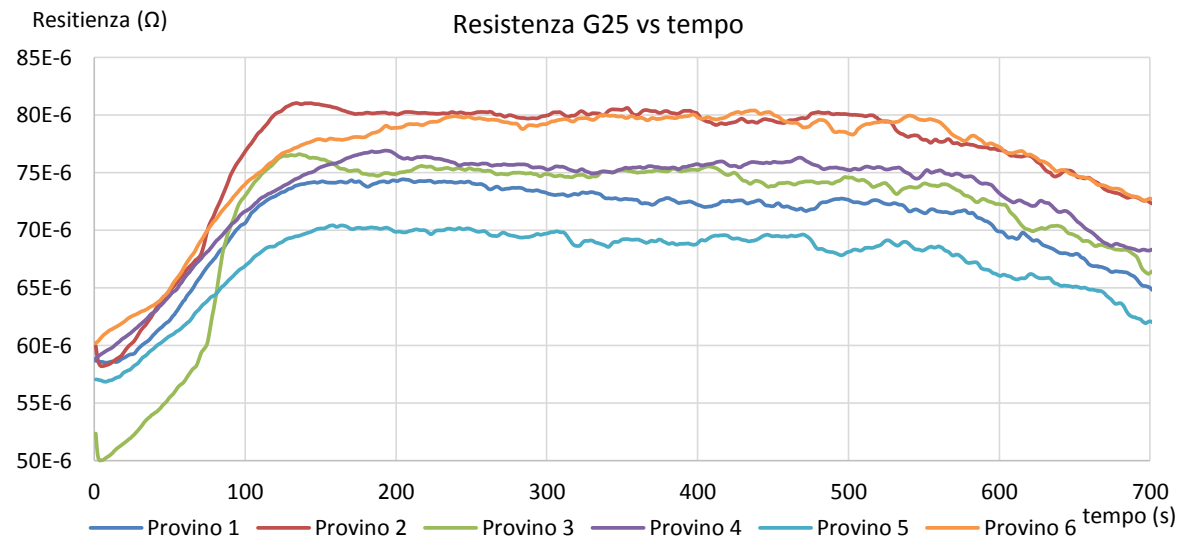


Grafico 3-10: andamenti in funzione del tempo riferita alla ghisa G25 con il secondo metodo

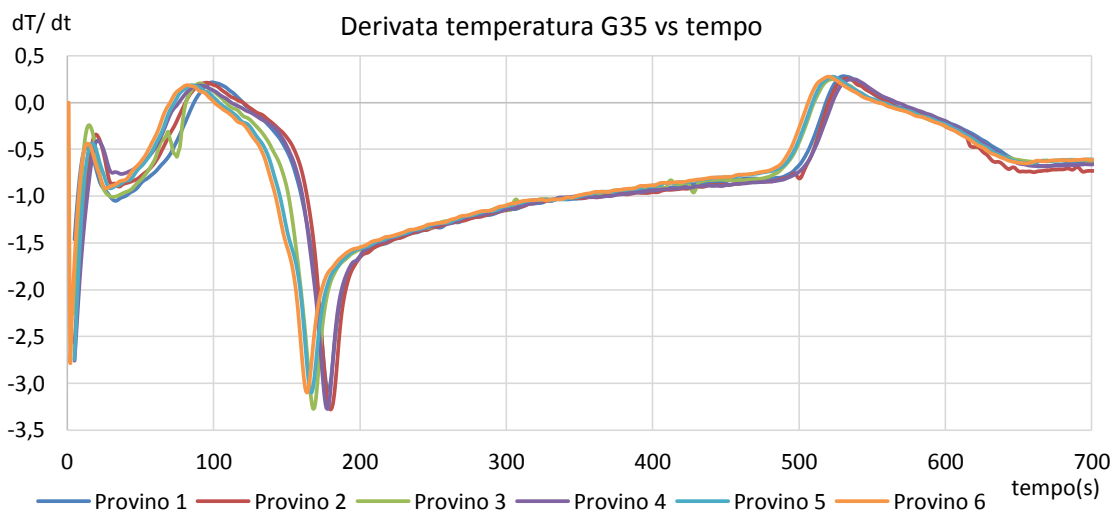
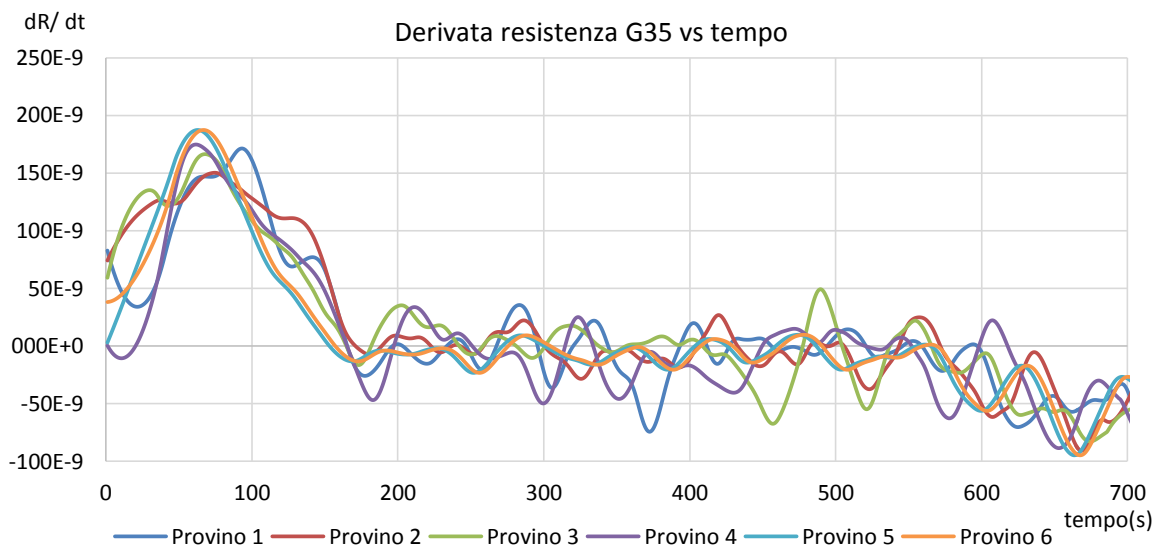
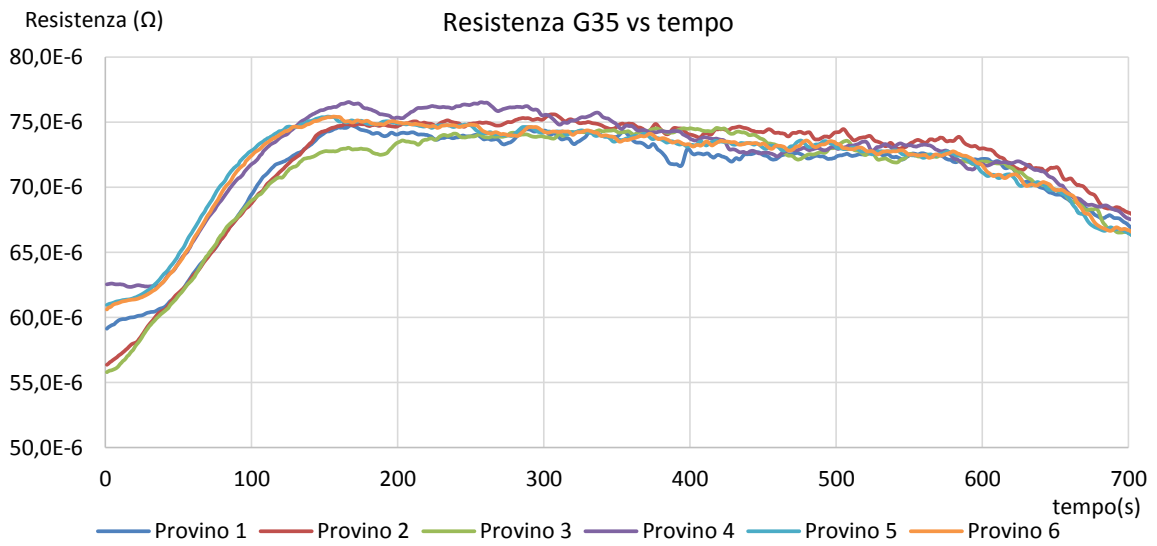


Grafico 3-11: andamenti in funzione del tempo riferita alla ghisa G35 con il secondo metodo

3.3. Confronto tra le curve dell'analisi elettrica

Considerando il primo metodo con gli elettrodi da 8 mm si può apprezzare il medesimo andamento della resistenza sia nella ghisa G15, sia nella G25. Nei paragrafi precedenti, si è supposto che questo andamento sia caratteristico del materiale costituente l'elettrodo. Per dimostrare tale fatto è stata svolta una prova con un unico elettrodo continuo lungo il doppio di uno normale ovvero 130 mm con le estremità filettate per il fissaggio con dado dei cavi provenienti dal NanoOhmetro.

Sono stati costruiti due elettrodi di questo tipo, uno in acciaio S235JR e uno in acciaio inox AISI 304 (in quanto non presenta trasformazioni di fase durante il riscaldamento), con il fine di valutarne la resistenza elettrica durante una variazione di temperatura. Ogni elettrodo è stato inserito trasversalmente in una coppetta, è stato collegato lo strumento di analisi elettrica e si è utilizzata la ghisa come mezzo riscaldante.

Nel grafico seguente sono riportati gli andamenti dei due elettrodi.

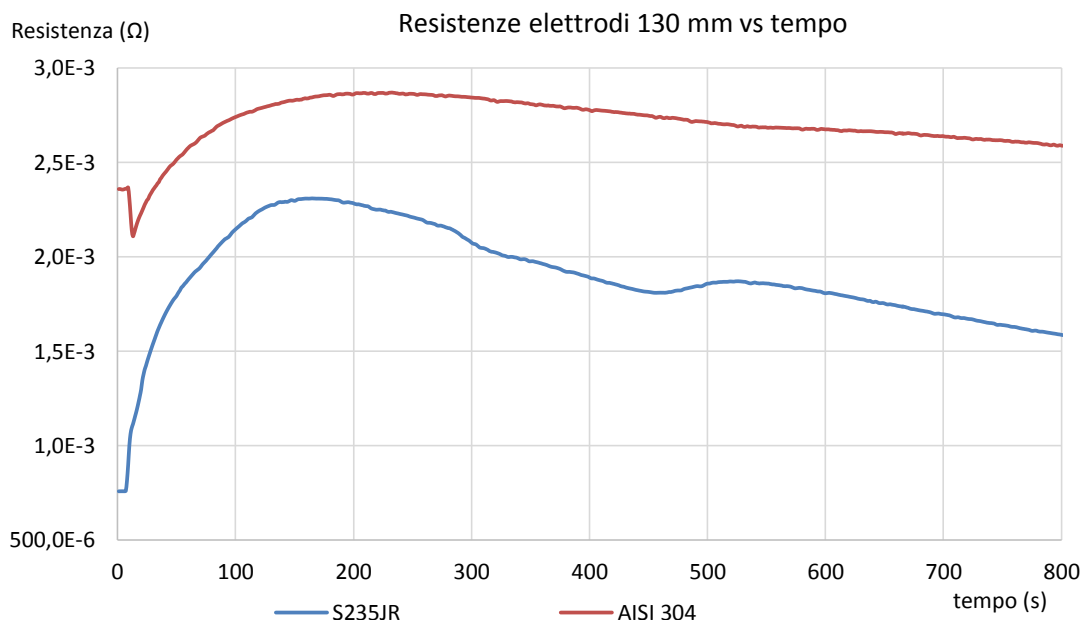


Grafico 3-11: andamenti della resistenza dell'elettrodo lungo in funzione del tempo

Si evince che l'elettrodo suscettibile di una trasformazione di fase si ripercuote nella rilevazione. L'andamento di quest'ultimo è molto prossimo a quello degli elettrodi da 16 mm: infatti si suppone che, data la loro ristretta lunghezza, essi abbiano raggiunto

temperature oltre i 727 °C tali da indurre la separazione dei cristalli di ferrite e di austenite all'interno del materiale.

Inoltre si vuole far notare come il materiale AISI 304, costituito principalmente da una fase austenitica, presenti una maggiore resistenza e quindi a parità di geometrie, una maggiore resistività. Questo importante fatto ci aiuterà qui di seguito a capire la variazione dell'andamento di resistenza negli elettrodi con diametro 16 mm.

Dalla figura 3-2 rappresentante la sezione dell'elettrodo con diametro 8 mm in contatto con la G 15, è possibile constatare come la microstruttura della ghisa non manifesti la presenza di dendriti, e quindi di austenite primaria, come invece accade nel caso degli elettrodi da 16 mm (figura 3-7).

Considerando quindi l'elettrodo con diametro 16 mm è possibile stimare per alcuni provini un andamento generale simile alle prove eseguite con gli elettrodi con diametro 8 mm, mentre per altri si verifica una modesta variazione di resistenza (G15 provino: 3; G25 provini: 2-3-5; G35 provino: 4). Per valutare a cosa fosse imputabile questa manifestazione, sono stati sezionati i provini e si è svolto uno studio metallografico.

Vengono riportate qui di seguito alcune immagini caratteristiche delle diverse ghise. Quelle presenti a sinistra sono i provini nei quali si è verificata un'alterazione della resistenza durante la prova e sono accumulate da una forte crescita dendritica. Le immagini a destra corrispondono invece alle stesse ghise presenti a sinistra, ma l'andamento della loro resistenza in funzione del tempo non presenta alcuna alterazione.

Si constata infine, in prossimità della temperatura eutettoïdica un'ulteriore variazione di resistenza imputabile, come descritto in precedenza, alla modificazione microstrutturale che si verifica sia nell'elettrodo, sia nella ghisa.

ANALISI DEI DATI

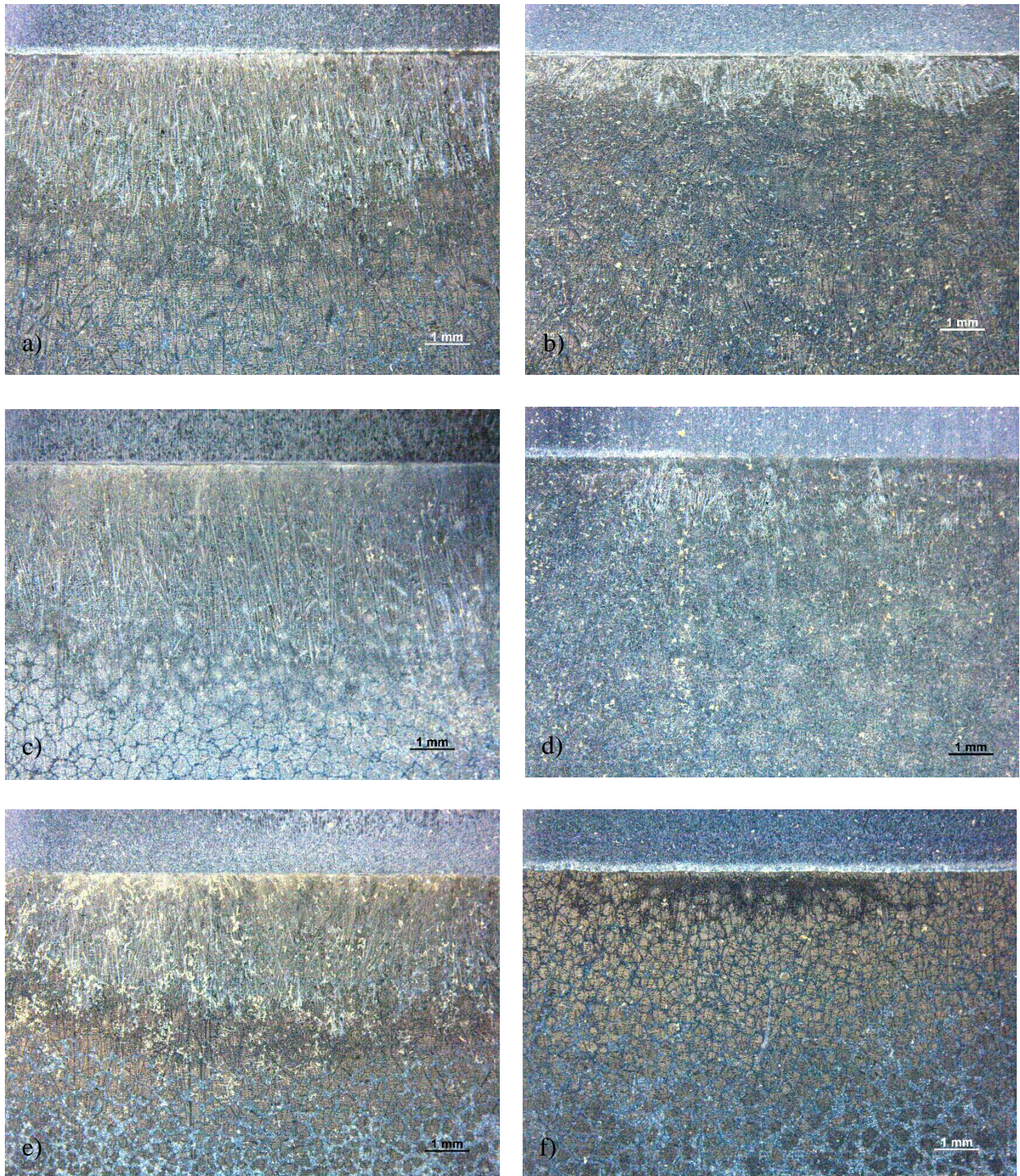


Figura 3-7: macrografie della zona dinanzi agli elettrodi con diametro 16 mm. A sinistra prove invalidate, mentre a destra prove considerate valide. a) b) ghisa G15; c) d) ghisa G25; e) f) ghisa G35

Per quanto riguarda le curve di resistenza ottenute con il secondo metodo, si evince che esse presentano lo stesso andamento, ma il valore medio assunto dalla resistenza nei tre tipi di ghisa considerati non ne permette una discriminazione.

Si ritiene perciò che con le analisi svolte finora non sia possibile avere una valutazione della composizione, se si considerano gli istanti dopo la solidificazione. Inoltre non avviene alcuna manifestazione della trasformazione eutettoidica.

Si ipotizza quindi che le manifestazioni microstrutturali si verifichino nell'intero volume del materiale in tempi diversi, visto che la temperatura non è distribuita in modo omogeneo, portando ad una rilevazione media della resistenza, e rendendo pertanto indistinguibili i singoli effetti.

3.4. Confronto con le curve dell'analisi termica

Si riportano nelle pagine seguenti gli andamenti delle derivate della resistenza, comparate con quelle dell'analisi termica di alcuni provini per le diverse ghise.

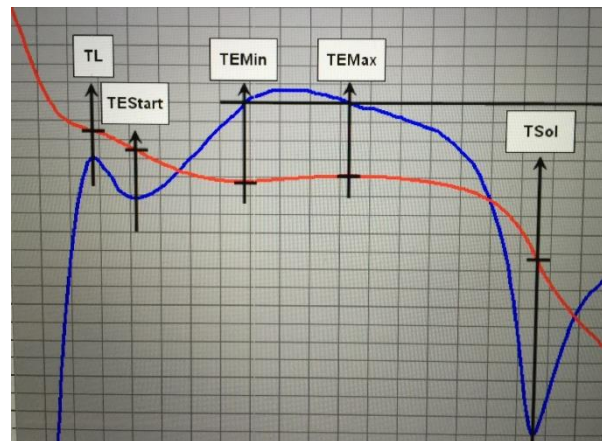


Figura 3-8: analisi termica e relativi punti caratteristici

L'attuale metodo in vigore permette di individuare, tra le varie caratteristiche, la temperatura di liquidus (TL), eutettico (TEstart) e solidus (TSol), mediante lo studio della derivata.

Attraverso l'analisi elettrica si è cercata una correlazione con i punti indicati, andando ad individuare eventuali variazioni in corrispondenza di tali marker.

Dai grafici seguenti si può evincere la presenza di un marcato punto di minimo nella derivata della resistenza in stretta corrispondenza di un medesimo nella derivata della temperatura.

ANALISI DEI DATI

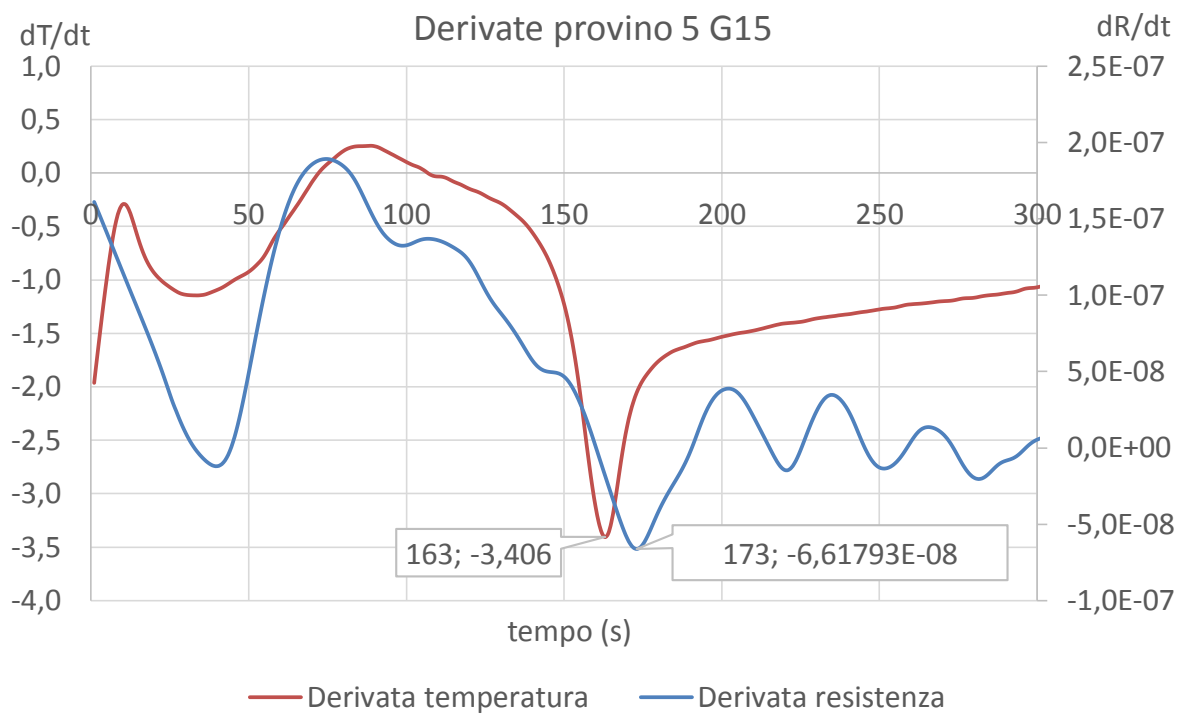
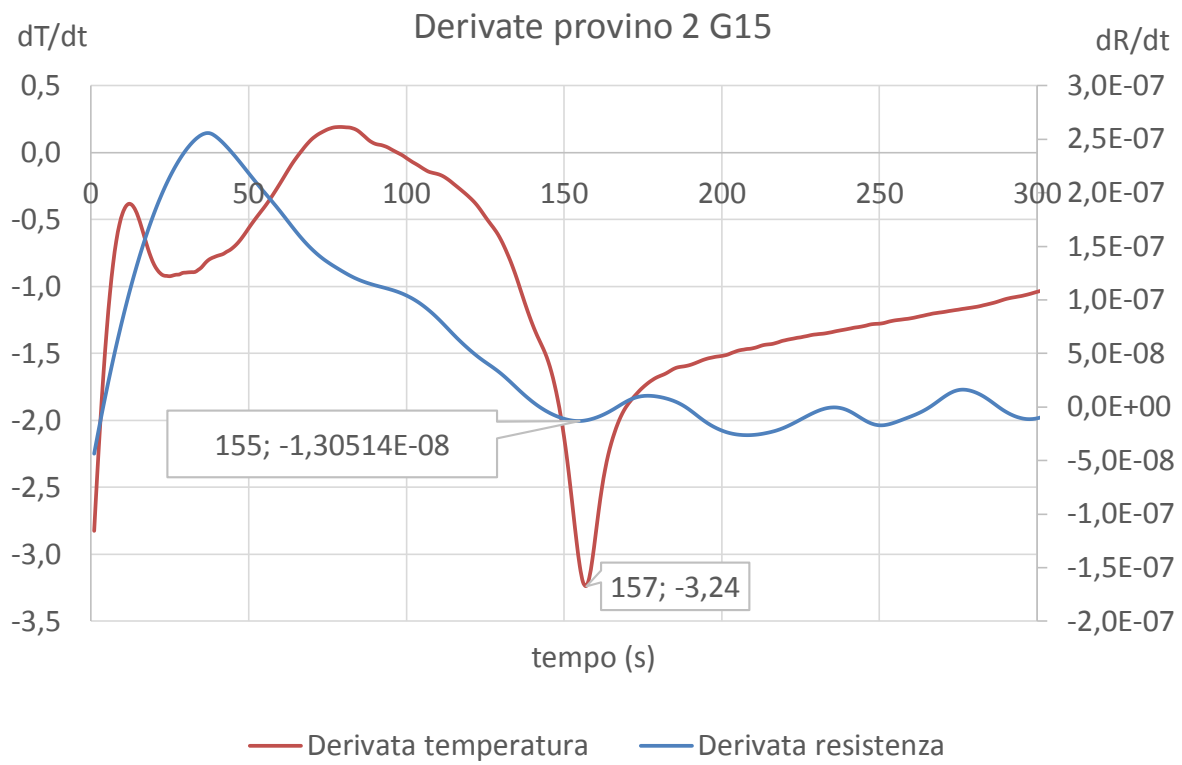


Grafico 3-12: andamento delle derivate nell'analisi termica ed elettrica per alcuni provini della ghisa G15

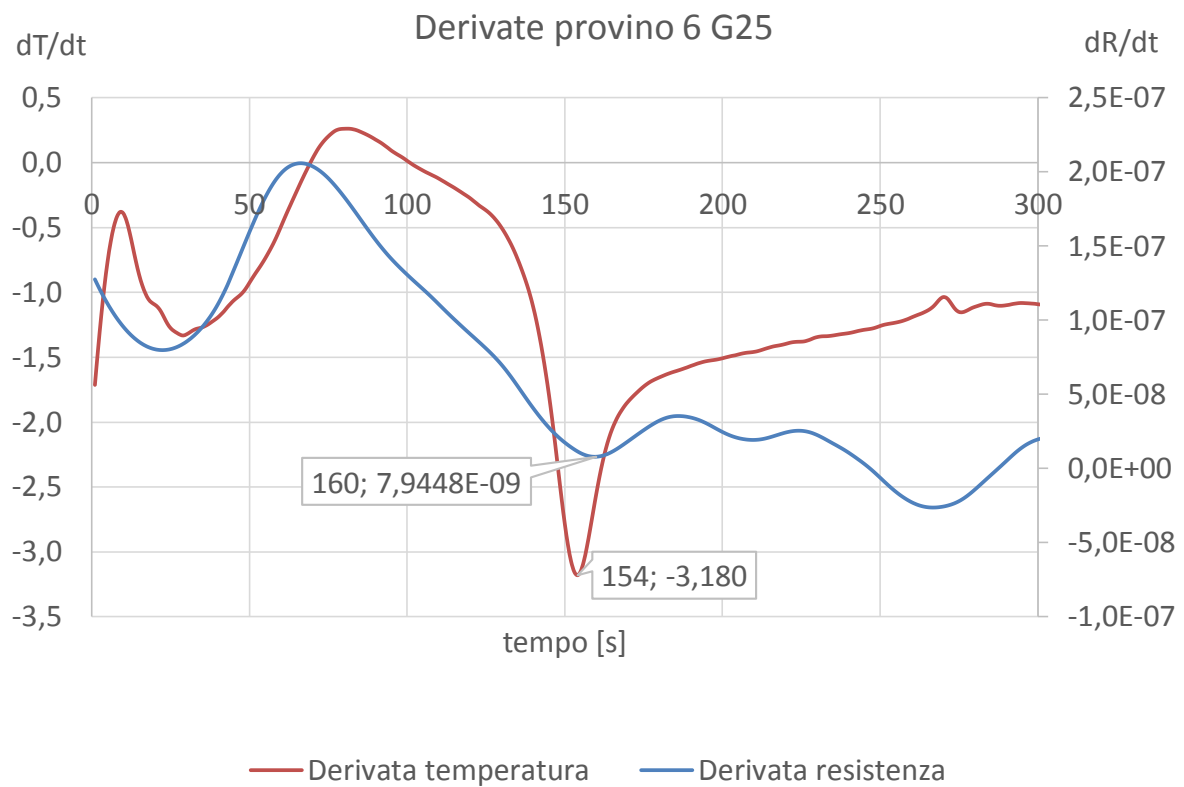
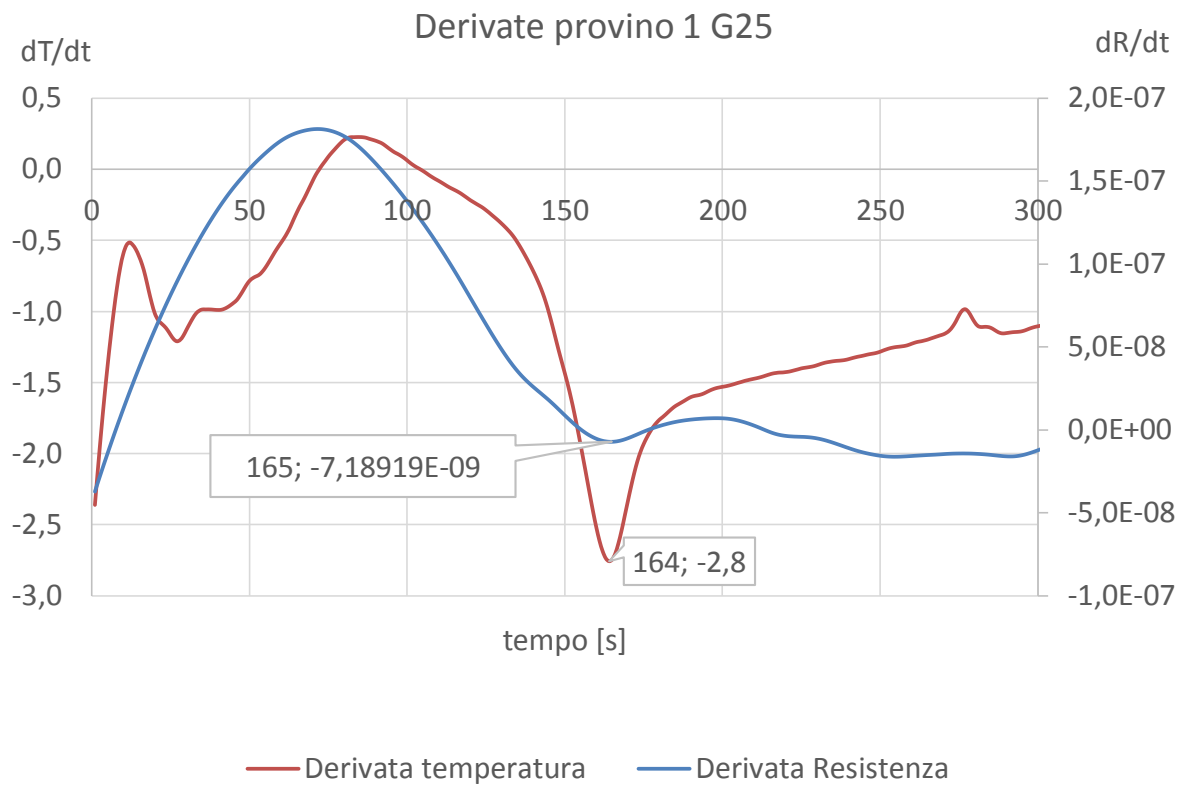


Grafico 3-13: andamento delle derivate nell'analisi termica ed elettrica per alcuni provini della ghisa G25

ANALISI DEI DATI

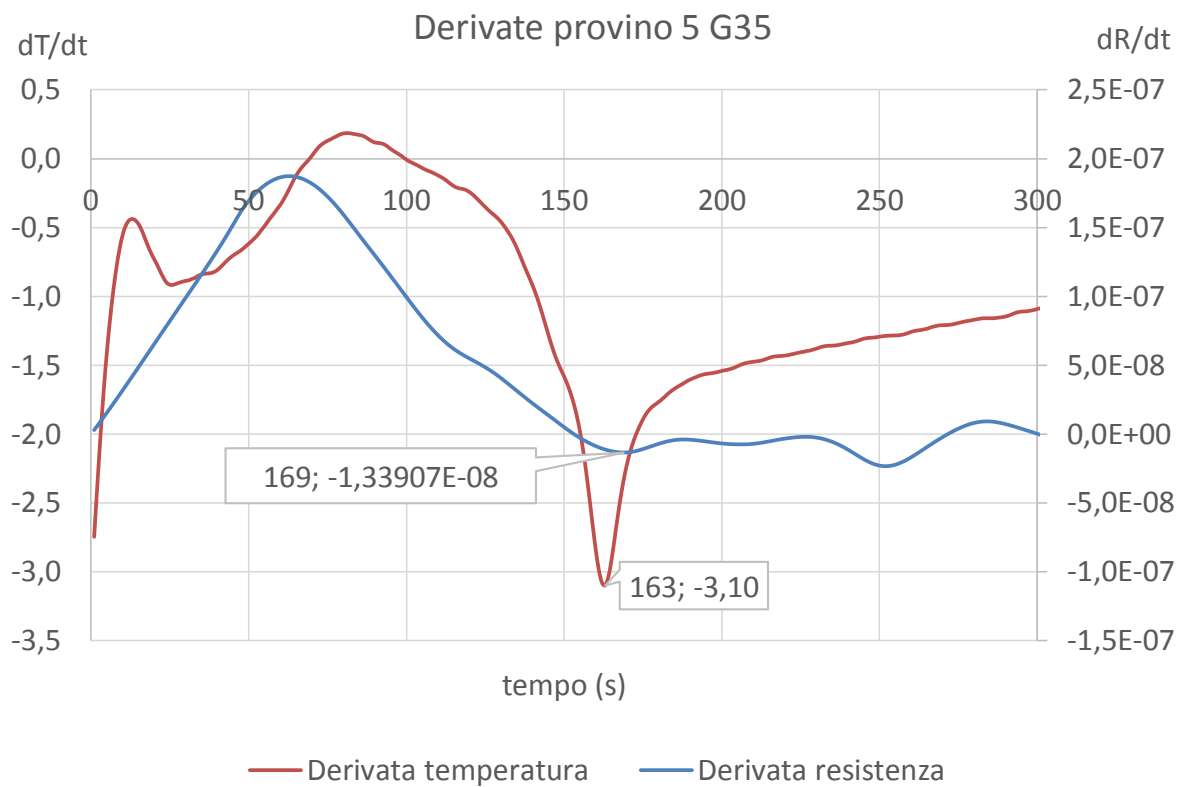
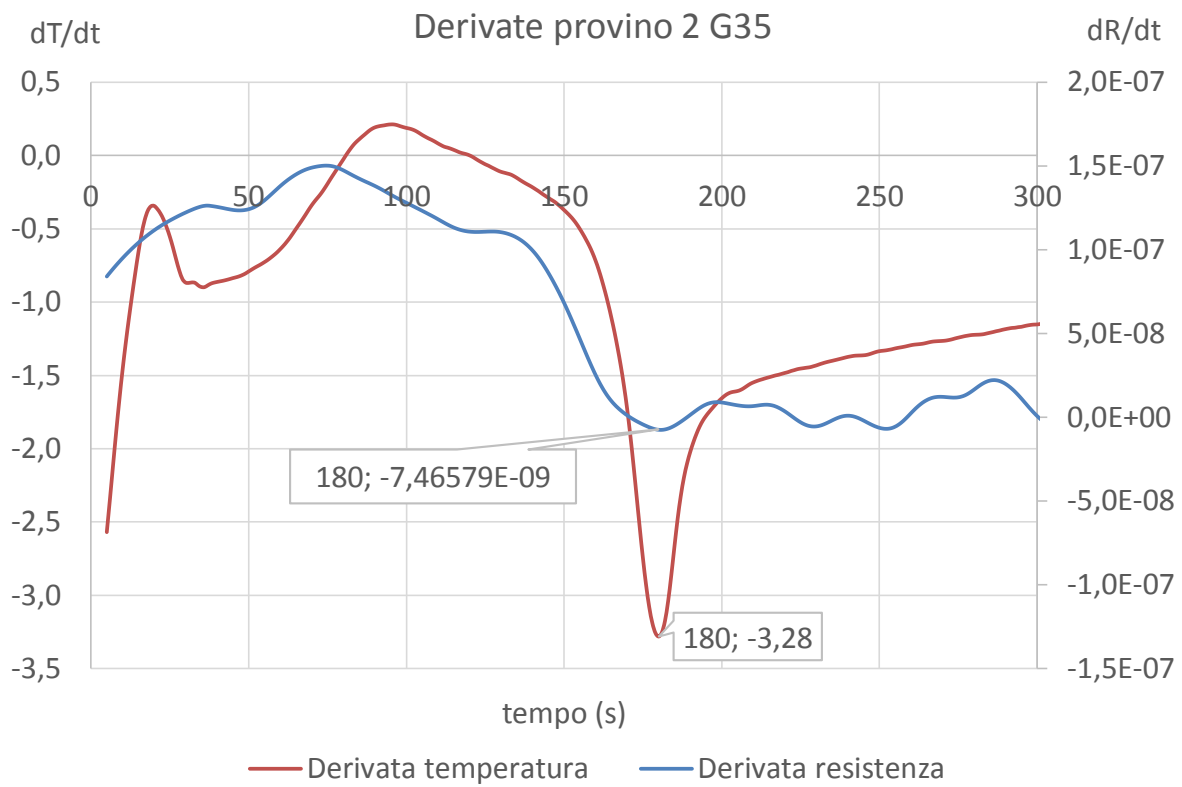


Grafico 3-13: andamento delle derivate nell'analisi termica ed elettrica per alcuni provini della ghisa G35

Si è cercato di capire se esista una correlazione tra i punti di minimo evidenziati nelle due curve, pertanto per ogni provino si è calcolato il corrispondente tempo ed è stato riportato nella seguente tabella. Nella prima colonna sono presenti le tre tipologie di ghisa con il rispettivo numero di provini; nella seconda e nella terza colonna i tempi, mentre nella quarta colonna lo scostamento temporale tra le due manifestazioni.

Serie	TIPO DI ANALISI		Δt (s)
	Termica	Elettrica	
	t_{sol} (s)	t_{sol} (s)	
G 15_1	162	178	16
G 15_2	157	155	-2
G 15_3	122	139	17
G 15_4	150	162	12
G 15_5	163	173	10
G 15_6	-	-	-
G 25_1	164	165	1
G 25_2	137	158	21
G 25_3	139	160	21
G 25_4	170	201	31
G 25_5	173	184	11
G 25_6	154	160	6
G 35_1	178	177	-1
G 35_2	180	180	0
G 35_3	164	174	10
G 35_4	174	184	10
G 35_5	163	169	6
G 35_6	164	174	10

Tabella 3-1: comparazione dei tempi ai quali si verifica un medesimo andamento associabile alla temperatura di solidus

Si può notare come la manifestazione non sia la medesima in entrambe le prove e non risulti neppure costante all'interno della stessa fornitura di ghisa. Pertanto non si ritiene affidabile la valutazione di tale parametro.

3.5. Individuazione punti critici nell'analisi elettrica ($T_{liquidus}$)

Si è evinto come non sia possibile individuare una temperatura di solidus univoca con questo metodo di analisi elettrica, pertanto si è spostata l'attenzione sulla parte iniziale del grafico della resistenza. Appena la ghisa entra in contatto con gli elettrodi e si verifica il passaggio della corrente (I_L), si manifesta per pochi secondi un picco positivo nel valore di resistenza. Questo fatto è stato riscontrato per tutte le prove svolte con il secondo metodo, come riscontrabile nel grafico seguente.

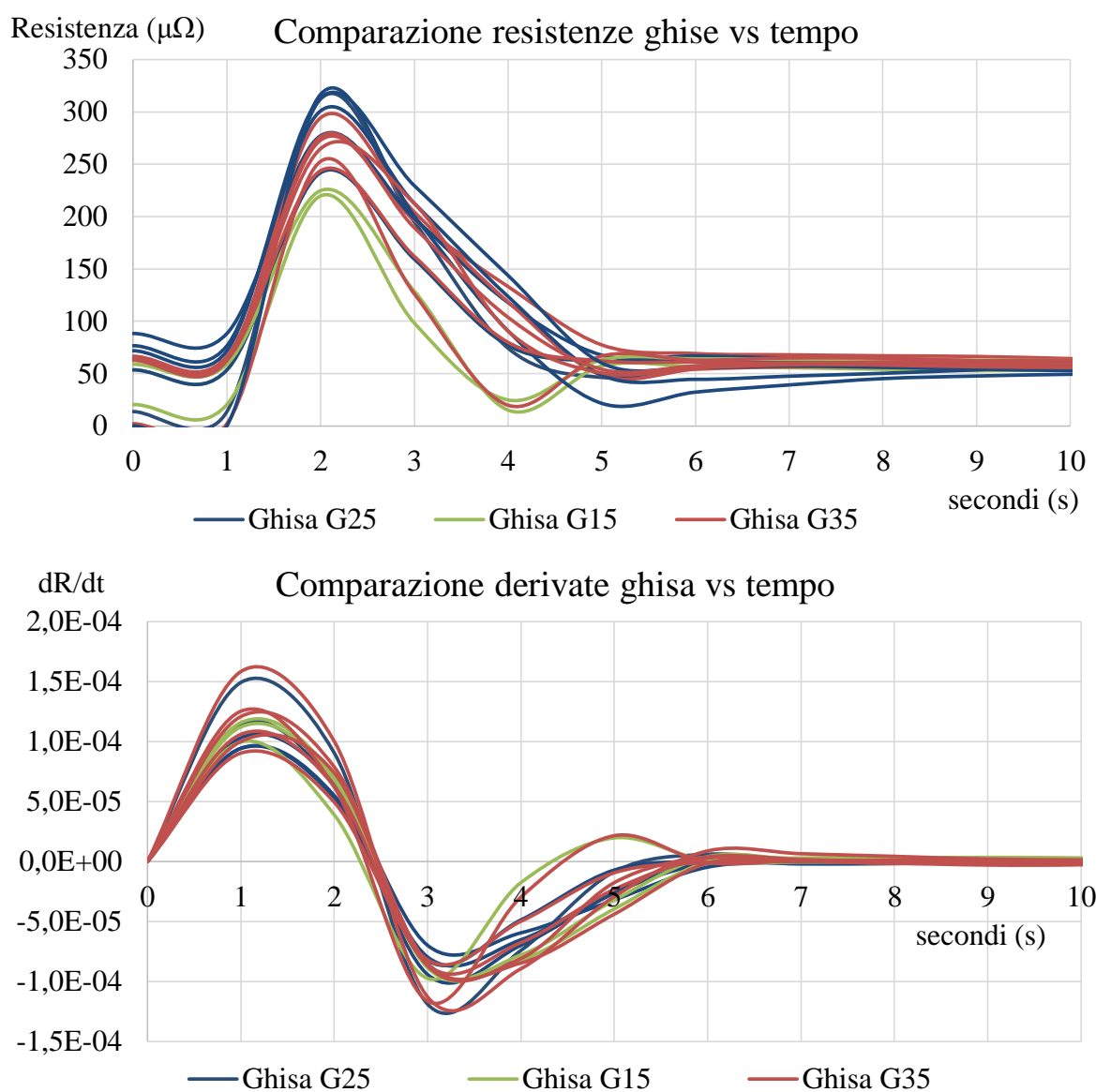


Grafico 3-14: andamento delle resistenze e delle derivate nei primi istanti della rilevazione mediante il secondo metodo

L' aumento iniziale è giustificabile in quanto lo strumento rileva l'elevata resistenza elettrica del liquido (R_L) fino al raggiungimento di un punto di massimo: la ghisa in contatto con la superficie fredda della coppetta e degli elettrodi cede calore velocemente, con un conseguente calo della resistenza. Grazie all'andamento della derivata è stato possibile identificare, a 6 secondi, un punto di minimo nella resistenza, ipotizzando che sia dovuto alla formazione dei primi cristalli solidi, costituendo un sottile film solido superficiale. Esso possiede una minor resistenza (R_S) rispetto al liquido, andando a introdurre una seconda resistenza in parallelo rispetto a quella del liquido, pertanto la corrente (I_S) percorrerà un cammino esterno preferenziale e uno meno facilitato rettilineo (I_L), con un conseguente calo della resistenza equivalente rilevata dallo strumento.

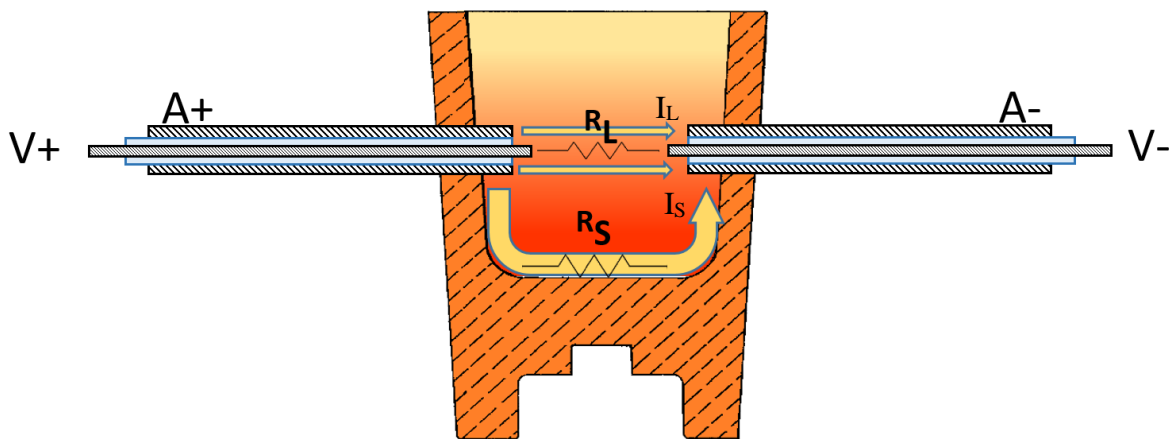


Figura 3-9: schema del percorso della corrente elettrica durante la solidificazione della ghisa nella chill cup

Lo strumento campiona il segnale ogni secondo, pertanto, per ogni tipo di ghisa, tramite un'interpolazione, è stato possibile determinare il valore di resistenza elettrica corrispondente al punto di minimo e associarla al carbonio equivalente⁴ del corrispettivo tipo di ghisa.

Per alcune serie si è verificato un errore nella registrazione dei primi secondi, a causa di un elevato tempo di autoscala del fondo scala dello strumento. Pertanto tali prove non sono state riportate in questo paragrafo né sono prese in considerazione per i calcoli.

⁴ Vedi pag. 51 e pag.52

ANALISI DEI DATI

Serie	Tliq (s) dR/dt =0	Resistenza ($\mu\Omega$) dR/dt =0	Media	
			Tliq (s)	Resistenza ($\mu\Omega$)
G 15 1	6,82	52,3		
G 15 2	-	-		
G 15 3	7,02	44,5	6,92	48,4
G 15 4	-	-		
G 15 5	-	-		
G 15 6	5,33	30,1		
G 25 1	6,29	47		
G 25 2	6,96	62,7		
G 25 3	6,96	55,5	6,95	60
G 25 4	7,3	68,3		
G 25 5	7,22	66,5		
G 25 6	5,53	31,2		
G 35 1	5,45	33,3		
G 35 2	6,7	26,8		
G 35 3	7,98	60	7,21	50,6
G 35 4	7,84	57,2		
G 35 5	6,72	52,9		
G 35 6	6,82	56,1		

Tabella 3-2: comparazione dei tempi ai quali si verifica un medesimo andamento associabile alla temperatura di solidus

Per ogni serie è stato rimosso un dato poiché valutato come outlier rispetto al valore del tempo in cui per gli altri punti la derivata assumeva il valore 0, rispettivamente G15 provino 6, G25 provino 6, G35 provino 1.

Con i dati rimasti è stata svolta la media dei tempi e delle rispettive resistenze, riportate nelle ultime colonne della tabella 3-2.

Rappresentando i dati ottenuti è stato possibile determinare una stretta correlazione tra la resistenza e il carbonio equivalente.

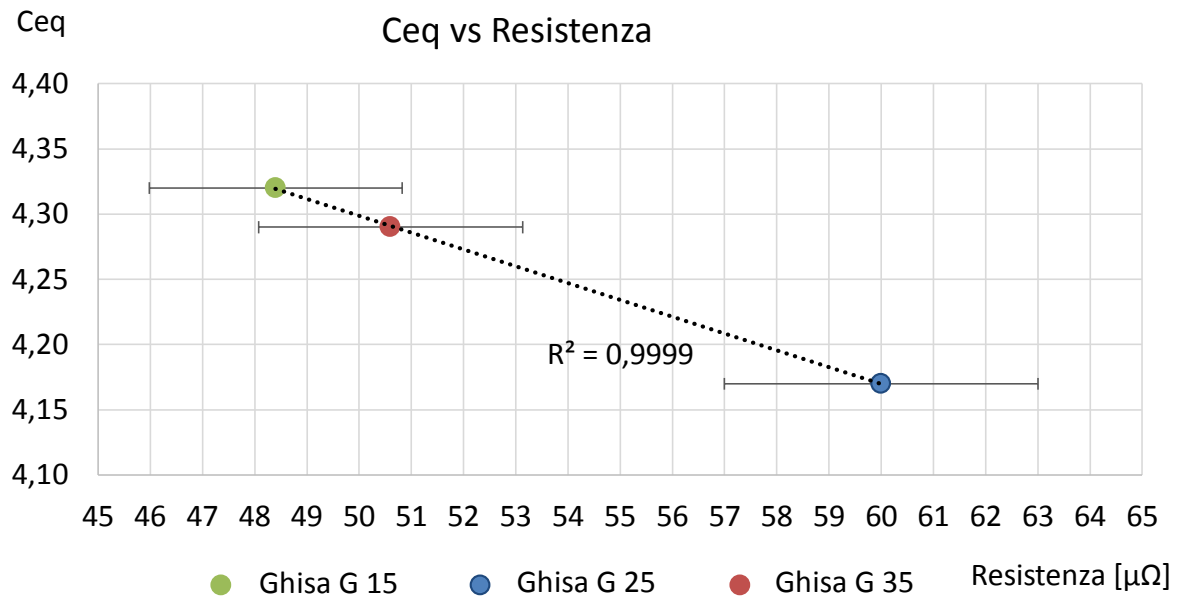


Grafico 3-15: correlazione tra temperatura di liquidus e resistenza elettrica

Tracciando una linea di tendenza tra i valori medi è possibile notare una stretta correlazione lineare tra i valori di resistenza e il carbonio equivalente della ghisa colata.

Si riporta qui di seguito la relazione riscontrata:

$$C_{eq} = -12882 * R_{(tliq)} + 4,9427 \quad (3.1)$$

Dove:

C_{eq} corrisponde al carbonio equivalente;

R_{tliq} è la resistenza rilevata alla temperatura di liquidus ovvero quando la derivata assume valore zero.

Questo studio apre la possibilità a molte ricerche future in quanto potrebbe essere applicato facilmente in fonderia, come ad esempio nella misurazione della resistenza direttamente all'interno della siviera, mediante un dispositivo ad inserimento e ad estrazione che permette la solidificazione e la commutazione dei valori. In soli 6 secondi sarebbe pertanto possibile ottenere il valore del C_{eq} della ghisa, rispetto gli attuali 5 minuti, ossia il tempo necessario a

ANALISI DEI DATI

fermare il forno ed effettuare il prelievo. Con l'eventuale applicazione di tale metodo ne gioverebbe anche la sicurezza, in quanto non sarebbe più necessario avvicinarsi manualmente e pericolosamente al canale di colata, per il prelievo della ghisa e la successiva analisi. In tale modo l'operatore non si esporrebbe in prima persona ad eventuali gravi incidenti.

Capitolo 4

4. RISULTATI E CONCLUSIONI

Obiettivo di questo elaborato è stato ideare e sviluppare un metodo alternativo all'attuale analisi termica per la determinazione delle proprietà del materiale di colata. Tale scopo è stato ottenuto mediante uno studio approfondito del fenomeno della resistenza, che ha portato alla modellizzazione dell'analisi elettrica, ottenendo con essa alcuni risultati rilevanti. Questo metodo si basa principalmente sulla misura Kelvin, che consente di rilevare valori molto bassi di resistenze, come nel caso preso in esame.

Con il primo metodo ideato, costituito dall'utilizzo di soli due elettrodi con diametro 8 mm e lunghezza 65 mm, non è stato possibile ottenere una misura precisa della resistenza elettrica, in quanto la resistenza intrinseca degli elettrodi ha influito in modo preponderante sulla misurazione della colata.

L'utilizzo di quelli con diametro 16 mm e lunghezza 16 mm, ha portato all'identificazione di una variazione microstrutturale della ghisa nella curva di resistenza, imputabile all'elevato raffreddamento provocato dagli elettrodi, invalidando così le prove.

Si è pertanto passati ad un secondo metodo, coinvolgendo 2 coppie di elettrodi concentrici, separati da un tubo isolante di vetro di silice. In questo modo è stato possibile ovviare alla rilevazione della resistenza degli elettrodi, ottenendo quindi una misurazione più accurata. Dalle curve così ricavate, si riscontra un andamento comparabile con quello della stessa campionatura ma il valore medio assunto dalla resistenza nei tre tipi di ghisa considerati non permette una discriminazione tra le tre forniture di ghisa analizzate.

Si è indagato in seguito se vi fosse una correlazione in corrispondenza della temperatura di eutettico, rilevabile in modo evidente dalla derivata dell'analisi termica: comparando il punto di minimo globale di tale derivata con il minimo locale della derivata dell'analisi

RISULTATI E CONCLUSIONI

elettrica, si è messo in evidenza una corrispondenza degli andamenti in tale punto. Proseguendo poi con un'analisi dettagliata a valori e scostamenti tra tali punti delle derivate, si è però appurato che non fossero perfettamente correlate, invalidando l'ipotesi avanzata.

Inoltre non è stato possibile rilevare la trasformazione eutettoidica in quanto le manifestazioni microstrutturali si verificano nell'intero volume del materiale in tempi diversi, visto che la temperatura non è distribuita in modo omogeneo, portando ad una rilevazione media della resistenza, e rendendo pertanto indistinguibili i singoli effetti.

Andando ad analizzare la parte iniziale della curva della resistenza elettrica si è riscontrato un repentino aumento della resistenza, imputabile a quella del liquido. In seguito, andando in dettaglio nello studio della derivata, è stato possibile individuare con precisione un determinato punto di minimo al quale è stato calcolato il valore della resistenza assunta alla temperatura di liquidus, strettamente correlata alla composizione chimica della ghisa. Correlando tali valori di resistenza a quelli del carbonio equivalente, è stato possibile tracciare una relazione lineare tra le due variabili. La variazione risulta inversamente proporzionale, e il modello così definito ben approssima i dati empirici raccolti dai vari provini di differenti ghise lamellari. In termini di tempo, con l'analisi elettrica si potrebbe ottenere il dato in 6 secondi circa inserendo il dispositivo direttamente nella siviera, senza procedere al prelievo, ottenendo un considerevole vantaggio se comparato agli attuali 5 minuti necessari all'analisi termica per ottenere lo stesso dato. Ne consegue quindi che un'eventuale applicazione dell'analisi elettrica per la determinazione delle proprietà intrinseche della ghisa porterebbe un vantaggio economico e in termini di tempo, anche pensando ad un'espansione su larga scala, nonché un vantaggio in sicurezza, poiché non sarebbe più necessario che l'operatore si esponga pericolosamente alla colata per il prelievo del metallo fuso.

APPENDICE 1

Da un punto di vista analitico il flusso termico è funzione del volume e della superficie di scambio del provino; per questo motivo è collegato alla velocità di raffreddamento, rappresentabile come la derivata della temperatura del metallo, rispetto al tempo. Durante questa prima fase la massa di liquido cede calore in modo approssimativamente lineare fino al raggiungimento della temperatura di solidificazione (temperatura di equilibrio). Realisticamente, è necessaria una condizione di instabilità per innescare il processo rispetto alle condizioni di equilibrio termodinamico (*driving force*), si parla perciò di grado di sottoraffreddamento, considerando la differenza tra la temperatura di equilibrio e quella a cui inizia effettivamente la solidificazione del liquido.

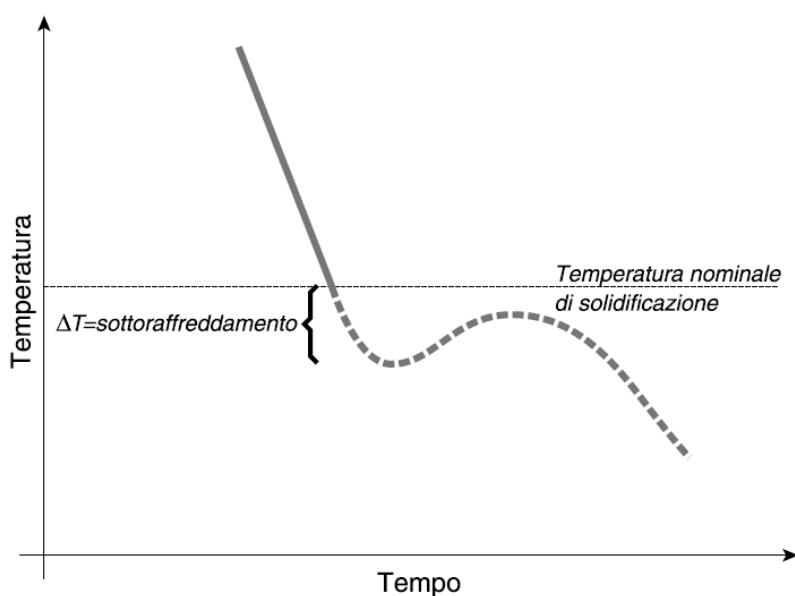


Figura A-1: curva temperatura – tempo di raffreddamento di una lega con formazione di nuclei eterogenei

La transizione dalla fase liquida a quella solida è accompagnata dal rilascio del calore latente di solidificazione: la struttura passa da quella disordinata del liquido a quella ordinata, ovvero quella dei reticoli cristallini propri della lega. L'eccesso di energia, dovuto all'asestamento, viene rilasciato sotto forma di calore comportando un aumento della temperatura del provino. Lo stesso fenomeno si verifica anche in corrispondenza di 728 °C, in cui si manifesta la trasformazione allo stato solido denominata eutettoidica.

APPENDICE 2

Si riporta qui di seguito il procedimento per la selezione del materiale costituente l'elettrodo della tensione nel secondo metodo.

Nella tabella sottostante sono riportati i materiali risultanti da una prima selezione e le loro proprietà

INDICI				
Materiale	P (€/kg)	T _f (°C)	ρ (μohm/cm)	a (m ² /s)
Carbon steel, AISI S235JR	0,42	1509	15	1,37E-05
Carbon steel, AISI 1015	0,42	1509	30	1,37E-05
Carbon steel, AISI 1025	0,42	1503	18	1,39E-05
Carbon steel, AISI 1117	0,42	1506	18	1,38E-05
Carbon steel, AISI 1118	0,43	1506	18	1,37E-05
Drawing quality, YS140 (cold rolled)	0,38	1506,5	22	1,34E-05
Intermediate alloy, Fe-5Cr-Mo-V	0,94	1457	25	8,23E-06
Low alloy steel, AISI 9310	0,89	1510,5	17	1,38E-05
Stainless steel, ferritic, AISI 405, low nickel	1,28	1505	55	6,84E-06
Stainless steel, ferritic, AISI 409	1,34	1505	55	7,12E-06
Stainless steel, ferritic, AISI 442	0,92	1477,5	55	7,02E-06
Stainless steel, martensitic, AISI 410	0,80	1505	60	6,81E-06
Stainless steel, martensitic, AISI 410S	0,76	1505	60	7,49E-06
Stainless steel, martensitic, AISI 418	1,40	1477,5	65	6,77E-06
Stainless steel, martensitic, AISI 420F	0,82	1477	55	7,01E-06
Stainless steel, martensitic, AISI 431	0,66	1477,5	72	6,77E-06
Stainless steel, martensitic, ASTM CA-15	0,89	1510	77	7,00E-06
Stainless steel, martensitic, ASTM CA-6NM	1,14	1510	77	6,92E-06
Stainless steel, martensitic, ASTM CB-7Cu	1,37	1510	77	4,77E-06

Tabella A-1: proprietà dei materiali presi in considerazione.

Si riportano nella seguente tabella i valori delle proprietà normalizzate rispetto al valore più piccolo per le proprietà decrescenti mentre rispetto al valore maggiore per la proprietà crescente (T_f)

INDICI NORMALIZZATI

Materiale	(P) _{norm}	(T) _{norm}	(ρ) _{norm}	(a) _{norm}
Carbon steel, AISI S235JR	0,910	0,999	1,000	0,349
Carbon steel, AISI 1015	0,910	0,999	0,483	0,349
Carbon steel, AISI 1025	0,910	0,995	0,829	0,344
Carbon steel, AISI 1117	0,894	0,997	0,829	0,345
Carbon steel, AISI 1118	0,886	0,997	0,829	0,349
Drawing quality, YS140 (cold rolled)	1,000	0,997	0,659	0,357
Intermediate alloy, Fe-5Cr-Mo-V	0,401	0,965	0,580	0,580
Low alloy steel, AISI 9310	0,423	1,000	0,853	0,346
Stainless steel, ferritic, AISI 405, low nickel	0,296	0,996	0,264	0,697
Stainless steel, ferritic, AISI 409	0,282	0,996	0,264	0,671
Stainless steel, ferritic, AISI 442	0,410	0,978	0,264	0,680
Stainless steel, martensitic, AISI 410	0,472	0,996	0,242	0,701
Stainless steel, martensitic, AISI 410S	0,495	0,996	0,242	0,637
Stainless steel, martensitic, AISI 418	0,269	0,978	0,223	0,705
Stainless steel, martensitic, AISI 420F	0,463	0,978	0,264	0,680
Stainless steel, martensitic, AISI 431	0,575	0,978	0,201	0,705
Stainless steel, martensitic, ASTM CA-15	0,426	1,000	0,188	0,681
Stainless steel, martensitic, ASTM CA-6NM	0,333	1,000	0,188	0,689
Stainless steel, martensitic, ASTM CB-7Cu	0,276	1,000	0,188	1,000

Tabella A-2: proprietà normalizzate dei materiali presi in considerazione per l'elettrodo della tensione

Ricordando l'importanza attribuita a queste proprietà (tabella 2-7) si possono calcolare i pesi (α) da introdurre nella funzione di prestazione.

$$Z_{pres} = \alpha_p \cdot (\rho)_{norm} + \alpha_T \cdot (T_f)_{norm} + \alpha_a \cdot (a)_{norm} + \alpha_P \cdot (P)_{norm}$$

	temperatura di fusione	diffusività termica	prezzo	resistività elettrica	
	2	1			
	4		1		
	6			1	
		3	1		
		5		1	
			3	1	
Tot parziale	12,00	9,00	5,00	3,00	Somma Totale 29,00
α_i	0,41	0,31	0,17	0,10	

Materiale	Z
Carbon steel, S235JR	0,895
Drawing quality, YS140 (cold rolled)	0,874
Carbon steel, AISI 1025	0,864
Carbon steel, AISI 1117	0,858
Carbon steel, AISI 1118	0,855
Carbon steel, AISI 1015	0,806
Low alloy steel, AISI 9310	0,668
Stainless steel, martensitic, AISI 431	0,649
Intermediate alloy, Fe-5Cr-Mo-V	0,625
Stainless steel, martensitic, AISI 410S	0,622
Stainless steel, martensitic, AISI 410	0,619
Stainless steel, martensitic, AISI 420F	0,611
Stainless steel, martensitic, ASTM CA-15	0,590
Stainless steel, ferritic, AISI 442	0,589
Stainless steel, martensitic, ASTM CB-7Cu	0,560
Stainless steel, martensitic, ASTM CA-6NM	0,552
Stainless steel, ferritic, AISI 405, low nickel	0,549
Stainless steel, ferritic, AISI 409	0,541
Stainless steel, martensitic, AISI 418	0,526

Tabella A-3: materiali per l'elettrodo della tensione ordinati per il valore della loro funzione di prestazione

Considerando ora l'elettrodo che trasporta la corrente vengono presi in considerazione i seguenti materiali

INDICI

Materiali	P (€/kg)	T _f (°C)	P (μohm/cm)	a (m ² /s)
Iron-base-superalloy, Cr-Ni alloy, A-286	5,084	1385	92	3,49E-06
Nickel-iron alloy, INVAR, cold worked	9,019	1430	80	3,22E-06
Stainless steel, austenitic, 316Ti	3,699	1412,5	76	3,64E-06
Stainless steel, austenitic, AISI 304	2,493	1425	71	3,83E-06
Stainless steel, austenitic, AISI 304L	3,103	1425	71	3,73E-06
Stainless steel, austenitic, AISI 308	2,778	1410	71	3,73E-06
Stainless steel, austenitic, AISI 308L	3,328	1410	71	3,85E-06
Stainless steel, austenitic, AISI 309	3,365	1425	78	4,03E-06
Stainless steel, austenitic, AISI 310	4,534	1425	81	3,34E-06
Stainless steel, austenitic, AISI 316	3,680	1387,5	75	3,70E-06
Stainless steel, austenitic, AISI 316L	4,159	1387,5	75	3,70E-06
Stainless steel, austenitic, AISI 317	4,197	1387,5	78	3,70E-06
Stainless steel, austenitic, AISI 317L	4,889	1387,5	80	3,51E-06
Stainless steel, austenitic, AISI 321	2,673	1412,5	71	3,83E-06
Stainless steel, austenitic, AISI 330	7,030	1412,5	102	3,40E-06
Stainless steel, austenitic, ASTM CE-30	2,673	1454	85	3,59E-06
Stainless steel, austenitic, ASTM CH-10	4,391	1430	84	3,63E-06
Stainless steel, austenitic, ASTM CH-20	4,391	1430	84	3,63E-06
Stainless steel, austenitic, ASTM CK-20	5,634	1425	90	3,87E-06
Stainless steel, austenitic, BS315S16	3,029	1425	80	3,97E-06
Stainless steel, duplex, UNS S32760	7,109	1425	83	3,66E-06

Tabella A-4: proprietà dei materiali presi in considerazione per l'elettrodo della corrente.

Tenendo conto del nuovo ordine di importanza tra le proprietà considerate e operando sempre con il metodo Enhance Digital Logic si va a costruire la seguente tabella:

	diffusività termica	temperatura di fusione	prezzo	resistività elettrica	
	3	1			
	4		1		
	6			1	
		2	1		
		4		1	
			3	1	
Tot parziale	13,00	7,00	5,00	3,00	Somma Totale
α	0,46	0,25	0,18	0,11	

Materiale	Z
Stainless steel, austenitic, AISI 304	0,978
Stainless steel, austenitic, AISI 321	0,944
Stainless steel, austenitic, AISI 308	0,930
Stainless steel, austenitic, ASTM CE-30, as cast	0,928
Stainless steel, austenitic, AISI 304L	0,889
Stainless steel, austenitic, BS315S16	0,873
Stainless steel, austenitic, AISI 308L	0,858
Stainless steel, austenitic, AISI 309	0,837
Stainless steel, austenitic, 316Ti	0,817
Stainless steel, austenitic, AISI 316	0,815
Stainless steel, austenitic, AISI 316L	0,779
Stainless steel, austenitic, AISI 317	0,771
Stainless steel, austenitic, AISI 310	0,760
Stainless steel, austenitic, ASTM CH-10, cast	0,755
Stainless steel, austenitic, ASTM CH-20, cast	0,755
Stainless steel, austenitic, AISI 317L	0,732
Iron-base-superalloy, Cr-Ni alloy, A-286, solution treated & aged	0,703
Stainless steel, austenitic, ASTM CK-20, cast	0,680
Stainless steel, duplex, UNS S32760	0,656
Nickel-iron alloy, INVAR, cold worked, hard	0,640
Stainless steel, austenitic, AISI 330	0,633

Tabella A-5: materiali per l'elettrodo della corrente ordinati per il valore della loro funzione di prestazione.

Bibliografia

- [3] L. Olivieri e E. Ravelli, *Elettrotecnica per Elettrotecnica e Telecomunicazioni*, CEDAM, Padova, 1995, p. 15-19, 91-123.
- [4] Paolo Mazzoldi, Massimo Nigro e Cesare Voci, *Elementi di fisica. Elettromagnetismo*, 2nd Ed, EDISES, 2005, p. 169-202.
- [5] Joseph R. Davis, *ASM Specialty Handbook: Cast Irons*, ASM International, 1996, p. 434.
- [6] A.A. Tzavaras and H.D. Brody, *Electromagnetic Stirring in Continuous Casting-Achievements, Problems and Goals*, Journal of Metals, March 1984, p. 31-37.
- [7] E. Takeuchi *et al.*, *Applied MHD in the Process of Continuous Casting, Magnetohydrodynamics in Process Metallurgy*, ed. J. Szekely *et al.* (Warrendale), PA: TMS, (1992), p. 189-202.
- [8] Wei Gao (Ph. D.), Nigel M. Sammes, *An Introduction to Electronic and Ionic Materials*, World Scientific, 1998, p. 22.
- [10] Andrea Castro, *Proprietà fisiche della materia*, Libreriauniversitaria.it, Padova, 1995, p.111-141.
- [11] Robert Eisberg, *Quantum physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*, 2nd Edition, 1985, p. 460-464.
- [13] Wei Gao (Ph. D.), Nigel M. Sammes, *An Introduction to Electronic and Ionic Materials*, World Scientific 1998, p.19-20.
- [14] Norio Iwashita, Hiroshi Imagawa, Wataru Nishiumi, *Variation of temperature dependence of electrical resistivity with crystal structure of artificial graphite products*, Journal Carbon, 61 2013, p. 602-608.
- [15] Wei Gao (Ph. D.), Nigel M. Sammes, *An Introduction to Electronic and Ionic Materials*, World Scientific 1998, p.23-25.
- [16] M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, K. Surihara, I.L. Spain and H.A. Goldberg, *Graphite Fibers and Filaments*, Springer, Berlin, 1988.

- [17] D.D. Double and A. Hellawell, *The Nucleation and Growth of Graphite - The Modification of Cast Iron*. Acta metall. Mater, 1995. 43 (6): p. 2435-2442.
- [18] B. Maio, D.O. North-Wood, W. Bian, K. Fang, and M. Heng-Fan, *Structure and Growth of Platelets in Graphite Spherulites in Cast Iron*, Journal of Materials Science, 1994. 29: p. 255-257.
- [19] B. Maio, D.O. North-Wood, W. Bian, K. Fang, and M. Heng-Fan, *Structure and Growth of Platelets in Graphite Spherulites in Cast Iron*. Journal of Materials Science, 1994. 29: p. 257-261.
- [20] Powell, R.L. & Childs, G.E., *American Institute of Physics Handbook*, 1972, p. 4-142 to 4-160.
- [21] C.F. Walton, Gray Society, *Ductile Iron Castings Handbook, Gray and Ductile Founders*, Ed. 1971.
- [22] Joseph R. Davis, *ASM Specialty Handbook: Cast Irons*, ASM International, 1996, p. 455.
- [26] Michela Redivo Zaglia, *Calcolo numerico. Metodi e algoritmi*, Libreria Progetto, Padova, 2011.
- [27] A. Azzalini, B. Scarpa, *Analisi dei dati e data mining*, Springer, Milano, 2004.
- [28] Michael F. Ashby, *Materials selection in mechanical design*, 4th edition, Elsevier, 2011.
- [29] Robert Byron, Warren E. Stewart; Edwin N. Lightfoot, *Transport Phenomena*, 2nd ed., New York, Wiley, 2005.
- [30] Pertti Auerkari, *Mechanical and physical Properties of engineering alumina ceramics*, Technical Research Center of Finland, ESPOO, 1996.

Sitografia

- [1] http://heraeus-electro-nite.com/media/webmedia_local/media/downloads/iron_1/thermalanalysis/thermalanalysisofcastironmay2007.pdf (ultimo accesso 05/11/2014)
- [2] http://www.lucefin.com/wp-content/files_mf/permeabilitamagnetica69.pdf (ultimo accesso 05/11/2014)
- [9] http://www.ba.infn.it/~chiarad/capitoli/16_solidi.pdf (ultimo accesso 12/12/2014)
- [12] unielettronica.altervista.org/materiale/materiali/Trasporto.pdf (ultimo accesso 15/12/2014)
- [23] <http://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-8/kelvin-resistance-measurement/> (ultimo accesso 20/03/2015)
- [24] <http://www.grix.it/viewer.php?page=7707> (ultimo accesso 20/03/2015)
- [25] <http://www.keithley.it/re/cel> (ultimo accesso 20/03/2015)