



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Relazione per la prova finale

Saldo-brasatura ad induzione magnetica

Magnetic induction brazing

Laureando

Pasini Luca

Matricola: 1139497

Tutor Universitario

Prof. Manuele Dabalà

Anno Accademico 2021/2022

Sommario

Premessa	3
Introduzione	4
Ciclo frigorifero.....	4
Elettromagnetismo	6
Campi magnetici nella materia.....	9
Saldatura	11
Saldo-brasatura	14
Obiettivi	15
Campioni analizzati	16
Lega saldante	18
Analisi sperimentale	19
Risultati	21
Leakage test.....	21
Penetration test	22
Test di resistenza meccanica	23
Ingrossamento grana cristallina	24
Test di corrosione.....	25
Conclusioni	26
Bibliografia	27
Sitografia	28
Indice delle tabelle	28
Indice delle figure	29
Ringraziamenti	30

Premessa

Il presente lavoro di tesi si colloca all'interno di un progetto industriale di Electrolux Italia SpA, avente come obiettivo la messa a punto di un processo di saldo-brasatura ad induzione magnetica da impiegare nell'esecuzione di giunti del circuito refrigerante di frigoriferi e congelatori domestici. Particolare attenzione è stata data al comportamento dei metalli costituenti i tubi in esame quando sottoposti al campo magnetico e alla scelta della lega saldante da utilizzare nella sigillatura della saldo-brasatura.

Attualmente, i giunti del circuito refrigerante vengono eseguiti manualmente, da saldatori addestrati, che utilizzano una fiamma libera per portare a fusione i metalli delle estremità dei giunti e la lega saldante. La messa a punto di un processo di saldo-brasatura ad induzione magnetica è prerequisito fondamentale per l'automazione del processo, che consentirà di aumentare la ripetibilità delle operazioni riducendo fortemente le perdite dal circuito refrigerante, fonte significativa di rilavorazioni interne e, talvolta, di interventi in utenza da parte dell'assistenza tecnica.

L'automazione delle operazioni presuppone la definizione di un ciclo di saldo-brasatura, che è il risultato dell'ottimizzazione di molteplici variabili di processo quali, ad esempio, intensità del campo magnetico, forma dell'induttore e distanza tubo-induttore, tempo di esecuzione. Le variabili qui elencate sono state esaminate per una serie di giunti tipo Rame-Rame, Acciaio Ramato-Rame, Rame-Acciaio Ramato, Acciaio-Acciaio, Acciaio Zincato-Rame. Il comportamento dei metalli utilizzati nei test sperimentali è stato oggetto di confronto con le indicazioni dettate dalla teoria e da fonti di letteratura.

Introduzione

Ciclo frigorifero

È un ciclo termodinamico inverso che avviene in particolari macchine chiamate *macchine inverse*, in quanto in queste macchine il lavoro viene sfruttato invece di essere prodotto.

La macchina può essere schematizzata nel seguente modo:

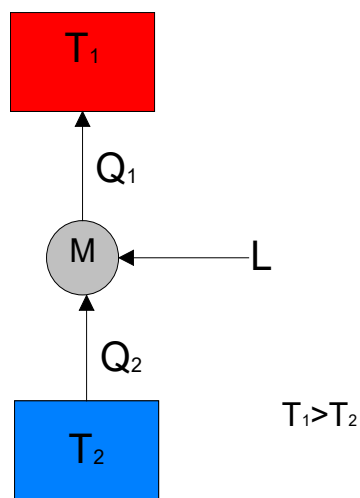


FIGURA 1: SCHEMA A BLOCCHI DI UNA MACCHINA FRIGORIFERA

Essa può essere utilizzata per mantenere freddo il serbatoio a temperatura inferiore T_2 , come ad esempio il frigorifero di casa. Si nota che la macchina mantiene la temperatura T_2 costante (in teoria) assorbendo il calore Q_2 , inoltre cede il calore Q_1 al serbatoio a temperatura T_1 , che di solito è rappresentato dall'ambiente esterno.

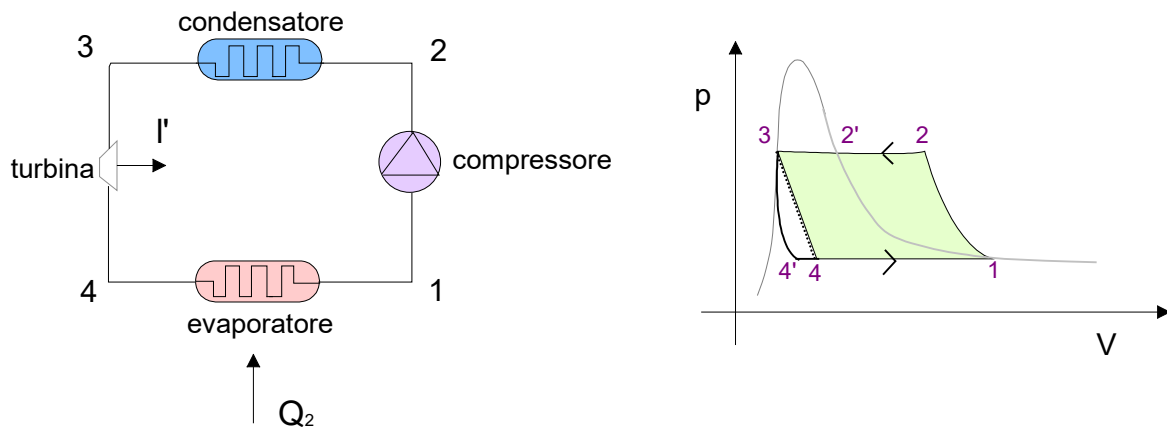


FIGURA 2: SCHEMA DI IMPIANTO FRIGORIFERO (SINISTRA), DIAGRAMMA P-V PER CICLO FRIGORIFERO (DESTRA)

1-2 Il fluido, che in **1** si trova allo stato di vapore saturo secco, passa attraverso un compressore che ne aumenta la pressione per mezzo di una trasformazione adiabatica reversibile, con conseguente aumento della temperatura, che in **2** si trova nel campo del vapore surriscaldato.

2-2', 2'-3 Il fluido percorre la serpentina del condensatore e cedendo calore Q_1 comincia a raffreddarsi ($2 \rightarrow 2'$) a pressione costante, raggiungendo, in **2'**, lo stato di vapore saturo secco.

A questo punto, sempre a pressione costante, il vapore condensa ($2' \rightarrow 3$) e a temperatura costante giunge in **3**.

3-4 Il fluido entra nella valvola di laminazione e subisce una trasformazione isoentalpica ($h_3 = h_4$) che ne diminuisce pressione, temperatura e ne aumenta il volume. La valvola rende questo processo fortemente irreversibile e da ciò deriva l'impossibilità di tracciare un percorso definito.

4-1 Il fluido, che in **4** è quasi completamente liquido, entra nell'evaporatore e a pressione costante comincia la vaporizzazione assorbendo il calore Q_2 fornito al sistema, fino a raggiungere lo stato iniziale **1** nel quale può ricominciare il ciclo.

Elettromagnetismo

Lorentz fu uno dei precursori allo studio dell'interazione tra cariche in movimento in un campo magnetico e trovò che esse risentono di una forza, detta di Lorentz, che tende a farle deviare secondo la relazione:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} = qvB\sin\theta \quad (1.0)$$

Con θ angolo compreso tra la direzione della velocità e la direzione del campo magnetico.

Questo fenomeno si manifesta anche in presenza di un conduttore, immerso in un campo, su cui circola una corrente.

Successivamente si è arrivati al punto di cercare il legame esplicito tra il campo magnetico e le correnti che lo generano. I primi esperimenti furono condotti da Laplace il quale arrivò a formulare la **prima legge elementare di Laplace**, che esprime il campo magnetico prodotto da un tratto infinitesimo $d\mathbf{s}$ di filo, percorso dalla corrente i , in un punto P distante r dall'elemento di filo:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} i \frac{d\mathbf{s} \times \mathbf{u}_r}{r^2} \quad (1.1)$$

dove μ_0 è una costante che dipende dal sistema e dal mezzo materiale in cui si sperimenta detta **permeabilità magnetica del vuoto**, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$.

Per ottenere il campo magnetico \mathbf{B} prodotto da un circuito chiuso, si va ad integrare la (1.1) ottenendo:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} i \oint \frac{d\mathbf{s} \times \mathbf{u}_r}{r^2} \quad (1.2)$$

che costituisce la **legge di Ampere-Laplace**.

A questo punto, per spiegare i fenomeni di elettromagnetismo, si definiscono le relazioni e leggi matematiche che stanno alla base di tale fenomeno fisico, dette **equazioni di Maxwell (nei materiali)**:

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (1.3)$$

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (1.4)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho \quad (1.5)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (1.6)$$

Dove **H** è detto campo magnetico e si differenzia da B attraverso la relazione:

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (1.7)$$

Ciò che è importante, in sede di questo elaborato, è cosa succede considerando un materiale metallico sottoposto all'azione di un campo magnetico. Per questo quesito ci viene in aiuto quella che viene detta **legge di Faraday-Neumann**:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\phi(\bar{B})}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS \quad (1.8)$$

Ogni qualvolta che il flusso del campo magnetico, concatenato con un circuito, varia nel tempo si ottiene una forza elettromotrice indotta data dall'opposto di tale variazione di flusso.

Se il circuito è dotato di una certa resistenza interna, come può averla un materiale metallico per sua natura si ottiene:

$$i_i = \frac{\varepsilon_i}{R} \quad (1.9)$$

Questo fenomeno di variazione del flusso del campo elettrico può essere generato da una non costanza propria del valore del campo, oppure da una variazione di geometria del circuito considerato, in entrambe le situazioni si verrà a creare una corrente indotta sul circuito. Nel caso in cui si va a immergere un conduttore metallico massiccio in un campo magnetico, la corrente che si crea nel conduttore viene detta **corrente parassita**. Il fenomeno si accentua:

- Con l'aumentare del campo magnetico
- Con l'aumentare della conducibilità elettrica del materiale

La resistività del materiale smorza il movimento delle correnti, che generano perdite di energia e per effetto Joule si ottiene un riscaldamento del pezzo.

Campi magnetici nella materia

Discutiamo le proprietà magnetiche della materia, ovvero il comportamento quando in presenza di campo magnetico prodotto da correnti elettriche.

Consideriamo, per esempio, un solenoide indefinito vuoto, il cui campo magnetico ha l'espressione $B_0 = \mu_0 ni$ e indichiamo poi con H un vettore, parallelo a B_0 , descritto come:

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}_0}{\mu_0} \quad (2.0)$$

la cui intensità, $H = ni$, dipende nel caso specifico dalle caratteristiche della sorgente (densità di spire n e corrente i).

Immaginando di riempire il solenoide con un mezzo omogeneo si arriva ad avere un campo magnetico, all'interno, $B \neq B_0$ con rapporto tra i due pari a:

$$\frac{B}{B_0} = k_m \quad (2.1)$$

con una conseguente variazione del campo magnetico, dovuta alla presenza del mezzo, di valore:

$$\mathbf{B}_m = \mathbf{B} - \mathbf{B}_0 = \mu_0 \chi_m \mathbf{H} \quad (2.2)$$

Dove χ_m è detta suscettività magnetica che ha il significato di *variazione relativa del campo magnetico*. A questo punto si può notare che il campo magnetico del solenoide considerato, diventa pari a:

$$B = \mu_0 ni + \mu_0 \chi_m ni \quad (2.3)$$

Dato che il termine $\mu_0 ni$ è il campo magnetico generato dalla corrente di conduzione che circola nelle spire del solenoide, il secondo termine deve rappresentare l'effetto del mezzo magnetizzato, il che risulta esattamente identico ad un secondo solenoide,

identico al primo, però generato da una corrente con densità lineare pari a $\chi_m ni$. Sulla superficie del pezzo, si verifica realmente una corrente anche se non di conduzione, che è il risultato di correnti di origine atomica dette **correnti amperiane**.

A questo proposito si può procedere ad una classificazione dei materiali che hanno proprietà magnetiche:

- **Diamagnetiche:** $k_m < 1 \rightarrow \chi_m < 0$, si ha quindi correnti amperiane che danno un contributo opposto a B_0 (come ad esempio, argento, rame, silicio);
- **Paramagnetiche:** $k_m > 1 \rightarrow \chi_m > 0$, correnti amperiane equiverse alle correnti di conduzione, ottenendo effetti magnetici che si sommano tra loro (alluminio, titanio).
- **Ferromagnetiche:** in questa terza categoria, χ_m e k_m dipendono dal valore del campo magnetico e anche dal modo in cui viene raggiunto quel determinato valore. La permeabilità magnetica relativa può arrivare a valori dell'ordine di $10^3 \div 10^4$, essa è positiva quindi, come nel caso delle sostanze paramagnetiche, gli effetti tra correnti amperiane e quelle di conduzione si sommano tra di loro (ferro, cobalto e nichel).

Come il grafico in figura 5 mostra, si ha che nel momento in cui si va ad applicare B_s e H_s , partendo da zero, la curva che descrive tale andamento risulta essere fortemente non lineare, dovuta appunto dai fenomeni di saturazione del materiale.

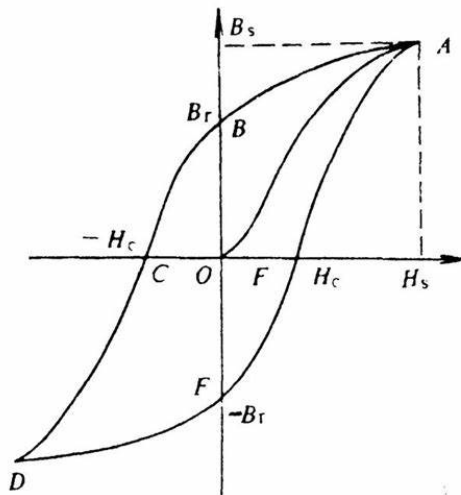


FIGURA 3: CICLO DI ISTERESI MAGNETICA

Saldatura

La saldatura è un processo che permette l'unione di due giunti mediante la loro fusione. Essa realizza un collegamento permanente, che si differenzia da altri collegamenti permanenti in quanto esiste una certa continuità di materiale. In alcuni processi di saldatura viene garantita anche una continuità quasi totale nelle caratteristiche stesse del materiale.

Ogni materiale che risulta rispettare la proprietà di **saldabilità** viene detto *saldabile*, ossia l'attitudine, appunto, di realizzare giunzioni mediante una tecnica di saldatura finalizzata ad ottenere una zona di collegamento tra elementi dello stesso materiale o tra materiali diversi (si parla rispettivamente di saldatura autogena e saldatura eterogena). A giocare un ruolo importante in questo, dal punto di vista metallografico, sono

- la composizione del materiale;
- la grana;
- il grado di purezza.

In particolare, ciò che gioca un ruolo chiave sulla determinazione della saldabilità di un materiale è il **Carbonio Equivalente (CE)**, che risulta utilizzato nei materiali ferrosi, tipicamente acciaio e ghisa. Questo perché i materiali ferrosi non sono mai puri ma hanno al loro interno una moltitudine di altri elementi alliganti che possono provocare una migliore o peggiore saldabilità del materiale base.

Entrando più nel dettaglio, elementi in lega come manganese, cromo, silicio, molibdeno tendono a diminuire la saldabilità dell'acciaio. Specialmente, negli standard di ingegneria strutturale, raramente si utilizza il CE ma piuttosto si va a limitare la percentuale massima di determinati elementi in lega. Per completezza, risulta utile in questa sede di elaborato, citare la formula per il calcolo del Carbonio Equivalente:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Cu + \%Ni}{15} \quad (3.1)$$

Percentuale di Carbonio Equivalente (CE)	Saldabilità
Minore di 0,4	Metallo Saldabile
Compreso tra 0,4 e 0,6	Saldabile ma necessita di un preriscaldamento
Maggiore di 0,6	Difficilmente saldabile, necessita di un pre e post riscaldamento

Nella pratica tecnica, per poter saldare due parti metalliche è necessario preparare i due lembi mediante la cianfrinatura, figura 6, si deve portare i materiali base alla temperatura di fusione oppure ad una temperatura di poco inferiore a quella di fusione con l'applicazione di una pressione tra i lembi. In alternativa, senza arrivare a fusione, si può utilizzare il cosiddetto **metallo d'apporto**, ossia un terzo componente, che si va a porre nella zona di giunzione portando questo a fusione, il processo viene detto, in questo caso, brasatura.

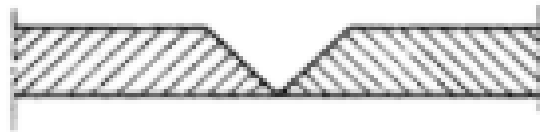


FIGURA 4: CIANFRINO CLASSICO A V PER SALDATURA TESTA-TESTA

Il risultato finale della saldatura viene mostrato schematizzato nella figura seguente, dove vengono anche evidenziate le varie zone che si vengono a creare.

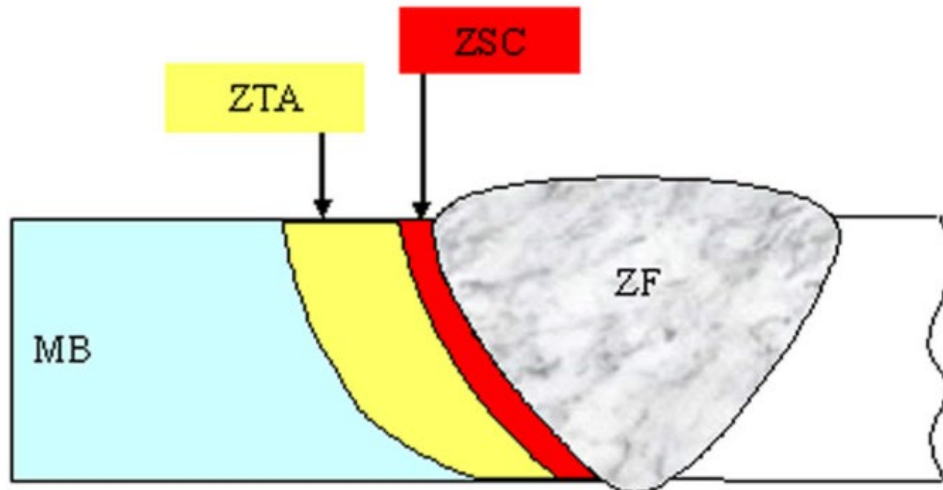


FIGURA 5: SCHEMATIZZAZIONE DI UNA SALDATURA

ZTA: zona termicamente alterata, che ha subito un eccessivo riscaldamento, creando così un eccessivo accrescimento della grana cristallina, con possibile infragilimento dell'acciaio;

ZSC: zona sotto cordone, facente parte sempre della ZTA, questa zona comporta un ulteriore infragilimento dell'acciaio rispetto a ZTA in quanto si raggiungono temperature ancor più elevate;

ZF: zona fusa, nella quale si viene a creare un mescolamento tra il metallo base (MB) e la lega saldante.

Esistono diversi sistemi di saldatura:

- A fiamma, prodotta per combustione di un gas con aria o ossigeno;
- Ad arco elettrico che si viene a creare tra due elettrodi;
- Frizione, in cui i lembi si riscaldano per effetto dell'attrito;
- A resistenza elettrica in cui si sfrutta l'effetto Joule.

Saldo-brasatura

La brasatura è un processo di unione di materiali metallici, realizzato mediante fusione del solo metallo d'apporto, il cui punto di fusione è più basso di quello del metallo base. Si suddivide in *brasatura debole* (temperatura di fusione del materiale d'apporto sotto i 450°C), *brasatura forte* (temperatura di fusione del materiale d'apporto sopra i 450°C) e *saldobrasatura*. Nelle prime due metodologie si va ad assicurare un legame metallurgico tra i materiali in virtù della bagnabilità e della capillarità che intercorre tra i due pezzi e la lega, nel caso della saldobrasatura si va ad assicurare il giunto attraverso il solo fenomeno della bagnabilità in quanto, raggiungendo temperature molto più elevate della brasatura forte, la capillarità inizia a venire un po' a meno. Alla lega d'apporto viene implementato un disossidante, con lo scopo di decapare il giunto da eventuali impurità ed evitare il fenomeno della corrosione come, ad esempio, il caso di brasatura di pezzi in acciaio inossidabile, in quanto lo strato di cromo, a contatto con l'aria e l'alta temperatura possa rovinarsi, rendendo la superficie facilmente corrodibile.

Viene impiegata nel momento in cui si hanno giunti la cui saldatura è impossibile, quando di diversa natura e quando è necessario contenere il riscaldamento del pezzo nella zona di interesse.

Nella figura seguente viene riportato un esempio di saldobrasatura, evidenziandone il metallo d'apporto.

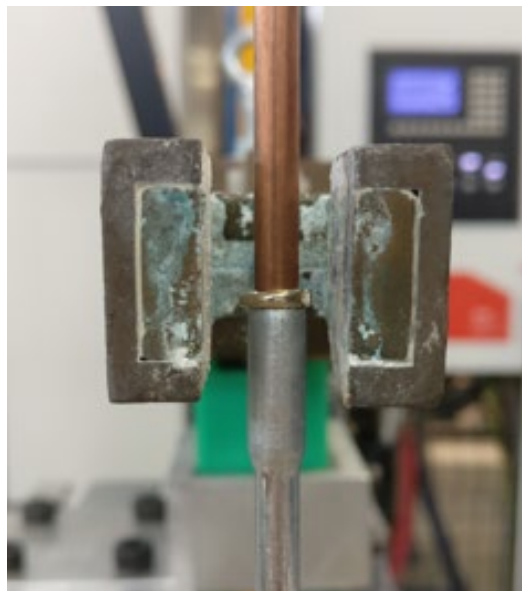


FIGURA 6: PARTICOLARE DI GIUNZIONE

Obiettivi

Lo studio e la sperimentazione aziendale, volta alla comprensione della pratica tecnica e alla messa a punto del processo con successiva implementazione in impianto, vuole portare la produzione industriale ad un livello superiore, togliendo:

- Componente umana che porta ad errore;
- Problematiche relative alla riduzione degli spazi del vano compressore, in quanto la fiamma potrebbe danneggiare le componentistiche plastiche ed elettriche intorno;
- Fiamma, in quanto la crisi Covid-19 ha portato ad un aumento della richiesta di ossigeno togliendolo per altri scopi;

offrendo così svariati vantaggi quali:

- Saldatura migliore;
- Immediata operatività;
- Elevata riproducibilità;
- Usura ridotta delle apparecchiature;
- Maggior sicurezza.

Campioni analizzati

Lo studio si è focalizzato sulla fattibilità del processo in quanto i giunti da saldare sono molteplici con geometrie, materiali diversi e problematiche di ingombri. Sono stati localizzati cinque giunti in funzione della posizione spaziale posseduta nel vano compressore e della loro funzione nell'impianto. Le famiglie di campioni sono riassunte nella seguente tabella:

Campione	Materiale F-M	Angolazione	Numero campioni	Dimensioni F-M (mm)
A	Cu - Cu	30°	10	6,2 - 5,95
B	Acciaio Ramato - Cu	30°	9	6,00 - 5,95
C	Cu - Acciaio Ramato	45°	10	4,9 - 4,76
D	Acciaio - Acciaio (Ramati)	45°	9	5,1 - 4,76
E	Acciaio Zincato - Acciaio Ramato	90°	9	4,95 - 4,76
			18	

TABELLA 1: CAMPIONI ANALIZZATI

La prova consiste nell'utilizzo del macchinario ad induzione magnetica in modalità manuale, posto nella linea di produzione dove verrà successivamente implementato, procedendo con la saldatura dei giunti sopra citati, con l'obiettivo di raggiungere circa un punto fisso in termini di "ricetta del forno" per ogni famiglia di campioni tenendo conto di qualità e tempo ciclo. Ciò che è caratteristico nella sperimentazione è la precisione millimetrica nel posizionamento del campione rispetto al centro dell'induttore, per far sì che la prova sia il più possibile vicina alla realtà produttiva. Soprattutto dal punto di vista della riproducibilità delle prove, in quanto un posizionamento leggermente differente dal campione precedente può portare ad un risultato in termini di qualità ed esecuzione totalmente differenti.

Dalla teoria si può andare a delineare quelli che sono i comportamenti dei materiali quando assoggettati al campo magnetico generato dall'induttore: ci si aspetta un comportamento poco controllabile, per i tubi in acciaio, in quanto questo materiale essendo ferromagnetico, tenderà a reagire in modo quasi violento per via della sua affinità magnetica data dalla sua permeabilità, confrontando, invece con il rame (diamagnetico), questo risulterà essere più lento a raggiungere temperature consone alla

saldatura, con conseguente comportamento più controllabile. La zincatura e la ramatura, dei campioni in acciaio, non producono nessun effetto perché lo strato depositato è molto sottile (qualche micron).

Tutti i tubi seguono linee guida dettate da normative EN (tabella 2), in quanto a composizione chimica; per ciò che riguarda la geometria sono tubi circolari aventi qualche millimetro di spessore.

		Normativa	Copertura
Campione A	Femmina	EN 12735 - 2 - Cu DHP	/
	Maschio		
Campione B	Femmina	EN 10130 - DC04	Cu
	Maschio	EN 12735 - 2 - Cu DHP	/
Campione C	Femmina	EN 12735 - 2 - Cu DHP	/
	Maschio	EN 10139 - DC04 + LC MB RL	Cu
Campione D	Femmina	EN 10130 - DC04	Cu
	Maschio	EN 10139 - DC04 + LC MB RL	Cu
Campione E	Femmina	EN 10139 - DC04 + LC MB RL	Zn
	Maschio	EN 10139 - DC04 + LC MB RL	Cu

TABELLA 2: NORMATIVE EN PER TUBI UTILIZZATI

In generale si tratta di campioni di Acciaio o di Rame, nel caso dell'acciaio abbiamo quello zincato e quello ramato. In entrambe le placcature si utilizzano acciai poveri di Carbonio ($\cong 0.08\%$) quindi si tratta di acciai ipoeutetoidici legati al Manganese ($\cong 0.4\%$) derivante da produzioni di laminazioni a freddo.

Lo strato di zincatura applicato alla femmina del campione E, viene ottenuto tramite immersione a caldo di Zinco fuso. Il totale degli altri elementi nel bagno caldo (identificati nella EN 1179) nella fusione di zinco non deve eccedere l'1,5% in massa. La normativa che regola tale processo dell'acciaio è la EN 1461.

Per i campioni di acciaio ramato o zincato, invece, rispettano la normativa EN 10139.

Leghe brasante

Si tratta di anellini in lega, con sezione circolare, aventi diametro 4.85 mm e 6.1 mm. Sono stati utilizzati anellini al 38% di Argento (Ag), precisamente secondo la normativa EN 17672 la lega viene chiamata Ag138. Questa particolare composizione viene utilizzata per giunzioni di leghe ferrose, nichel, rame e altre loro leghe, adatta per brasatura in ambienti con atmosfera controllata.

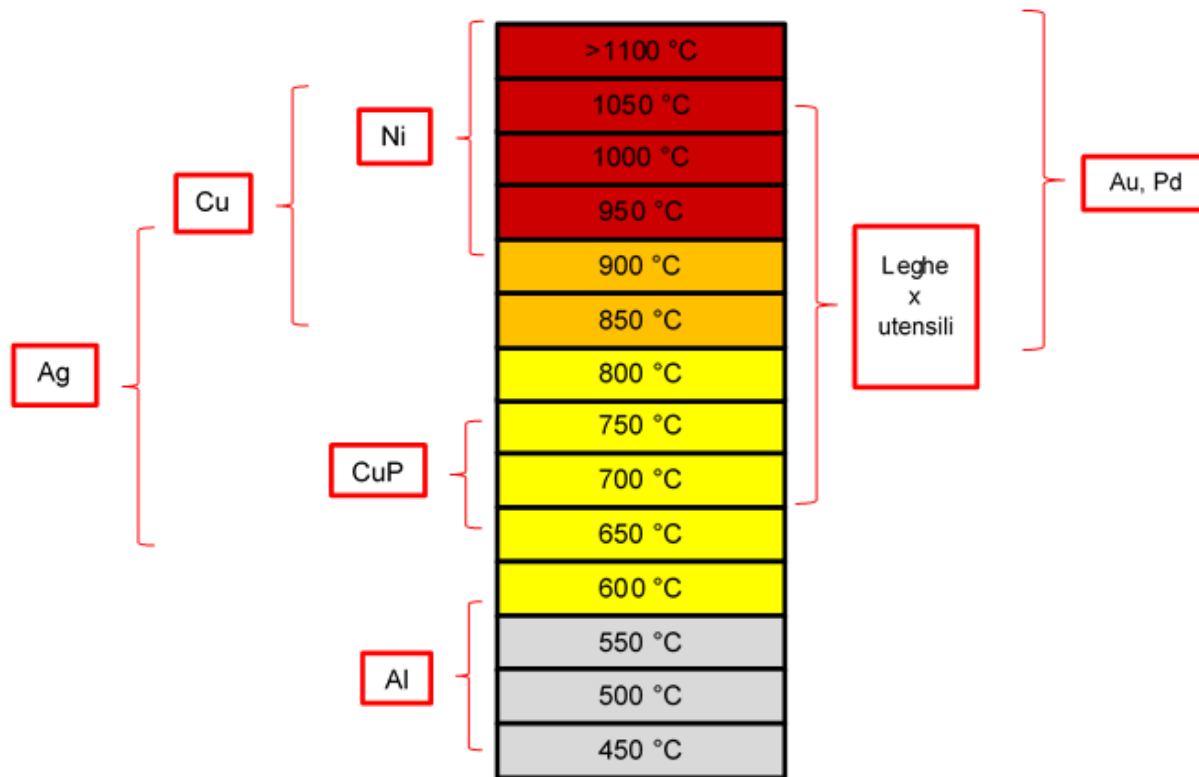


FIGURA 7: FAMIGLIE DI LEGHE BRASANTI IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA

La scelta della lega brasante è stata fatta anche in funzione dei materiali dei giunti, in quanto non si vuole portare a fusione o comunque a temperatura prossime a fusione i tubi. Considerando che la fusione delle leghe brasanti all'Argento avviene in un ampio spettro di temperature si trova che potrebbero risultare quelle più consone agli scopi. Nonché garantendo comunque un'ottima saldatura.

Analisi sperimentale

In tabella 3, che viene ripresentata sotto, sono riassunti i giunti e il numero di prove eseguite per ogni famiglia.

Campione	Materiale F-M	Angolazione	Numero campioni	Dimensioni F-M (mm)
A	Cu - Cu	30°	10	6,2 - 5,95
B	Acciaio Ramato - Cu	30°	9	6,00 - 5,95
C	Cu - Acciaio Ramato	45°	10	4,9 - 4,76
D	Acciaio - Acciaio (Ramati)	45°	9	5,1 - 4,76
E	Acciaio Zincato - Acciaio Ramato	90°	9 ————— 18	4,95 - 4,76

TABELLA 3: CAMPIONI ANALIZZATI

In totale sono state eseguite 65 prove, con focus sulla messa a punto della ricetta del macchinario tenendo a mente che la saldatura deve apparire pulita e ben riuscita. Si sono riscontrate delle difficoltà nei giunti misti ossia Acciaio-Rame, per via della diversa natura dei materiali e quindi per la diversa reazione che manifestano all'applicazione del campo magnetico. A questo proposito si è trovata la corretta posizione del centro del giunto rispetto al centro dell'induttore (posizione trovata sempre ad occhio, senza l'ausilio di sistemi ottici di lettura automatica). Essendo l'acciaio ferromagnetico si è preferito portarlo più esterno perché nell'intervallo temporale che il tubo di rame arriva a temperatura quello di acciaio è in grado di toccare temperature di bruciatura, ossia temperature dannose per il pezzo nel suo complesso. Particolari problematiche riscontrate durante le analisi sono state:

- l'elevata reattività dei tubi in acciaio, dovuta alla loro particolare affinità con i campi magnetici, data dal ciclo di isteresi magnetica; più nello specifico se non saldamente ancorate al supporto, andavano a toccare l'induttore;
- l'induttore, avendo dei concentratori di flusso in determinate zone, produce un riscaldamento localizzato nel pezzo;
- Rilevazione di effetti di bordo dell'induttore, in alcuni test se l'anellino di lega saldante si fosse trovato *border - line* con il campo magnetico, si sarebbe venuto

a creare un effetto di espulsione dell'anellino dato dalle forze che agiscono sul pezzo.

Ciò che si evince, da tabella 1, è che la famiglia E di giunti presenta un numero di test considerevole rispetto alle altre nonostante entrambi i tubi siano in acciaio. Ciò è dovuto dallo strato di zincatura presente nella femmina, in quanto, all'applicazione del campo magnetico, il tubo iniziava a produrre fiamme e qualche scintilla di colore verde.

In prima analisi, si è cercato di mettere mano alla ricetta variando i parametri di corrente e di tempo tentando così di raggiungere la temperatura di fusione della lega brasante in un tempo più lungo questo perché, probabilmente, la produzione di fiamme, poteva causare una qualità scadente della saldatura senza aver trovato una particolare soluzione.

Aumentando i tempi di saldatura si è riusciti parzialmente a togliere i picchi di temperatura localizzata in particolari punti, dati dai concentratori di flusso dell'induttore, portando un aumento eccessivo dei tempi di saldatura, rischiando di oltrepassare il tempo ciclo complessivo del processo.

Il secondo passo è stato provare a capire se il campione avesse qualche particolare caratteristica superficiale che non era stata considerata. Scoprendo che al tubo viene applicato uno strato di olio superficiale come ulteriore protettivo. Quindi sono stati fatti ulteriori 18 test di cui 9 con i tubi puliti dall'olio protettivo e i restanti 9 con i campioni senza olio e senza Zincatura. Questa ultima analisi ha portato ad un'ulteriore definizione dei parametri impostati dalla macchina ad induzione però non ha portato ad una soluzione ai problemi della fiamma durante la saldatura (cosa che nelle altre analisi non si è manifestata). Di seguito vengono riportate due immagini esplicative

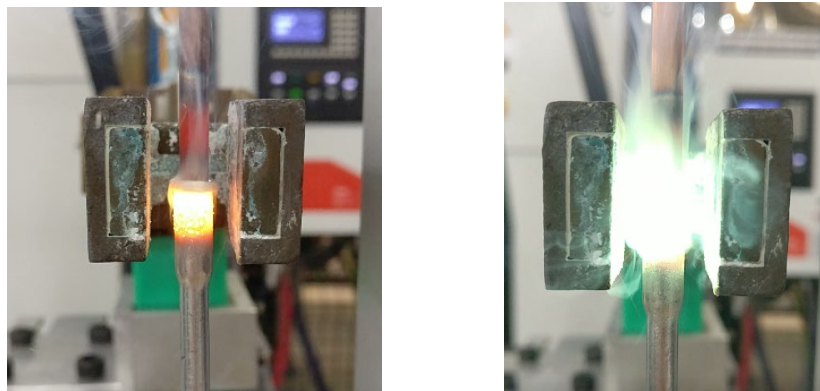


FIGURA 8: CONCENTRAZIONE DEL RISCALDAMENTO (SINISTRA), PRODUZIONE DELLA FIAMMA DURANTE BRASATURA (DESTRA)

A seguito di tutte le 65 prove, sono stati selezionati 19 campioni che, dopo un'analisi visiva e multimediale, sembravano avere una miglior saldatura. Questi campioni hanno

subito delle analisi di verifica quali: test di tenuta (Leakage test), test di penetrazione della lega saldante nel gap tra maschio e femmina, analisi metallografica, test di corrosione

Risultati

I 19 campioni, presi in considerazione, sono stati isolati dal resto in funzione di una preventiva analisi visiva che ha portato all'identificazione delle migliori saldature, tenendo chiaramente conto dei parametri impostati a macchina.

I successivi test sono stati eseguiti in via del tutto qualitativa per poter comprendere se la saldatura è stata eseguita in modo consono agli standard di qualità.

Leakage test

La prima verifica effettuata è stata quella di perdita del campione ossia l'effettiva tenuta del refrigerante che ci scorrerà all'interno. Le linee guida aziendali prevedono un test di tenuta con particolari gas e specifici macchinari, con sensibilità parecchio basse, per la rilevazione di eventuali perdite. Non è stata seguita una procedura ben precisa, in quanto non si era a disposizione delle attrezzature giuste per procedere; infatti, si ha deciso di verificare i campioni ponendoli in una vasca di acqua facendo passare al loro interno aria in pressione. Il risultato di tale analisi ha condotto al trovare positivi alla perdita solo un paio di campioni sui 19. Essendo questo test non compatibile con gli standard, se il pezzo perde in queste condizioni perderà anche con i test atti ad arrivare allo standard.

Penetration test

Questi 19 campioni, provenienti a leakage test, hanno subito un'analisi per quanto riguarda la quantità di lega saldante penetrata nel gap tra i due tubi.

Il test consiste in una analisi visiva, tramite microscopio, della penetrazione di lega saldante. Il campione viene sezionato, nel punto che può essere di più interesse, lappato e incapsulato in una resina.

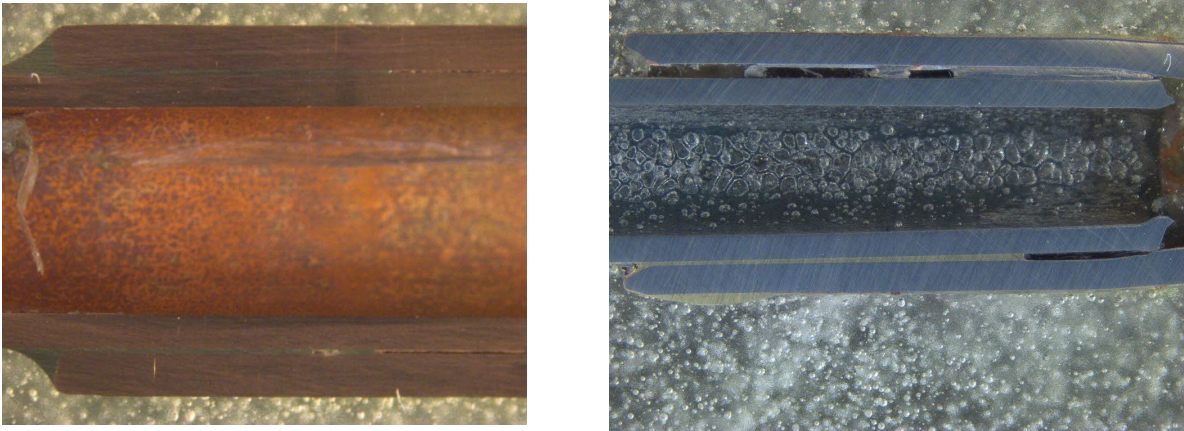


FIGURA 9: ESEMPIO DI PENETRAZIONE CORRETTA (SINISTRA) E DI PENETRAZIONE SCORRETTA (DESTRA)

Sopra vengo riportati due esempi di su due campioni diversi. Figura 11 è un esempio di corretta penetrazione quindi buoni parametri della ricetta, mentre Figura 12 è un chiaro esempio di penetrazione non avvenuta correttamente in quanto, insistono diverse discontinuità della lega saldante nell'intercapedine tra i due tubi.

Questo test ha portato alla luce una problematica non indifferente ossia la ripetibilità della saldatura. In particolare, a parità di ricetta e campioni da saldare si sono riscontrate delle disuniformità in termini di penetrazione della lega saldante nel giunto. Si pensa che questo sia dovuto ad una differenza nel settaggio manuale del pezzo (differenze geometriche spaziali), portando ad una differenza di riscaldamento del giunto essendo più o meno vicino all'induttore, implicando, quindi, una maggiore o minore fluidità della lega brasante e di conseguenza una differenza di penetrazione nel giunto. Anche se, dal leakage, non si riscontravano perdite, i campioni con un valore di penetrazione sotto il livello minimo di standard vengono scartati in quanto potrebbero incorrere ad una perdita a seguito di cicli di utilizzo.

Nell'immagine seguente, viene fatto un ingrandimento della zona di saldatura, in particolare si evidenzia, come descritto sopra, la lunghezza di penetrazione della lega saldante e come questa abbia portato alla creazione di alcune discontinuità determinate da una bolla nera.

Nella Parte sottostante dell'immagine abbiamo il tubo femmina, sopra il tubo maschio e nella colorazione oro si nota la lega saldante

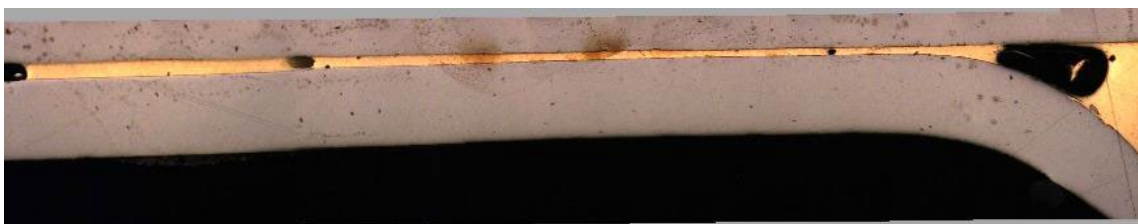


FIGURA 10: INGRANDIMENTO DEI DIFETTI NELL'INTERCAPEDINE TRA I DUE TUBI

Test di resistenza meccanica

I campioni sono stati successivamente testati dal lato meccanico, ossia resistenza a sollecitazioni. Viene adottato questa tipologia di test per simulare la manipolazione del giunto durante le operazioni di assemblaggio del circuito e per le fasi di trasporto.

Vengono prese in considerazione delle sollecitazioni semplici quali: flessione centrale con giunto in appoggio – appoggio (a) e flessione centrale con giunto incastrato da un lato (b), di seguito vengono schematizzate le prove per una totale comprensione:

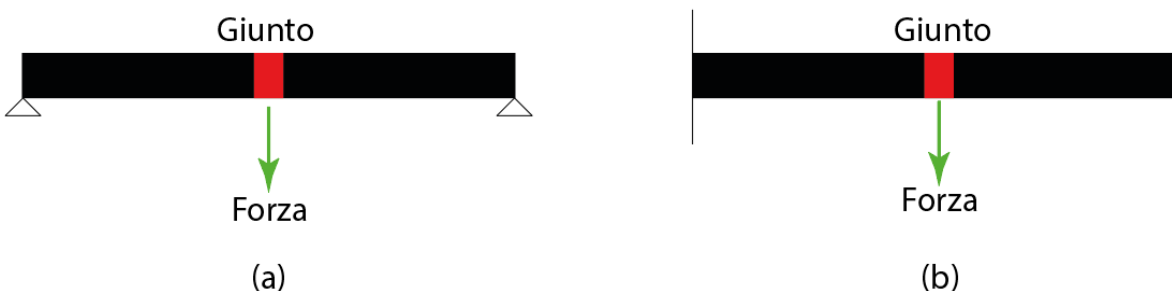


FIGURA 11: SCHEMATIZZAZIONE TEST A FLESSIONE: (A) APPOGGIO-APPOGGIO; (B) INCASTRO

Con le forze in gioco, circa 100N per giunto, non si sono create rotture.

Ingrossamento grana cristallina

La dimensione del grano di rame deve essere valutata sulla sezione trasversale dei campioni per identificare la crescita del grano sovrapposta dalla procedura di brasatura ad induzione.

Per quanto riguarda la dimensione del grano, i campioni dovrebbero presentare una crescita del grano piccola/trascurabile a causa del processo di brasatura nel tubo di rame. In ogni caso, se il test viene eseguito su piccoli campioni, le condizioni dei banchi per la brasatura sono peggiori del caso reale in termini di dissipazione del calore ed efficienza termica del raffreddamento del giunto.



FIGURA 12: DIMENSIONE GRANA CRISTALLINA PRE-SALDATURA (SINISTRA), DIMENSIONE GRANA CRISTALLINA POST-SALDATURA (DESTRA)

Nelle immagini soprastanti si evince come la crescita media dei grani non è così considerevole da definirsi pericolosa, in termini metallurgistici, per via della tenuta del giunto stesso.

Test di corrosione

La corrosione potrebbe essere particolarmente aggressiva sui giunti in quanto siamo in presenza di diversi materiali con diversi potenziali elettrici e quindi portare a corrosione per vaiolatura. I giunti brasati possono essere comunque deboli anche per la presenza di diverse sostanze inquinanti, date dalla natura del processo di saldatura e dalla stessa lega saldante.

Si tiene comunque in considerazione che la saldatura ad induzione porta comunque ad un giunto di brasatura e che quindi verranno adottati criteri di accettazioni equivalenti alla brasatura a mano.

Il test viene effettuato su una vasca coperta da una calotta sferica, al cui interno sono presenti dei supporti dove verranno poggiati i giunti. Successivamente, in accordo alla EN ISO 9227:2017, viene fatta insufflare una nebbia salina all'interno della macchina per un tempo dato da standard aziendali. In definitiva, non sono state evidenziate criticità dei campioni nei riguardi della corrosione del giunto stesso.

Conclusioni

L'elaborato ha portato alla conoscenza e comprensione sperimentale del comportamento dei materiali metallici quando sottoposti ad un campo magnetico variabile nel tempo.

Per i giunti formati da entrambi i tubi in rame, non sono sorti particolari problemi per quanto riguarda la gestione del sistema induttivo, in quanto il materiale ha presentato un comportamento poco reattivo e con una rampa di riscaldamento gestibile. Essendo, il rame, un materiale diamagnetico, è corretto che non presenti comportamenti particolari, quali riscaldamenti eccessivi o forze generate dell'interazione con il campo magnetico applicato.

Per i campioni formati da entrambi i tubi in acciaio, si sono presentate delle reazioni secondo la teoria classica dell'elettromagnetismo. L'acciaio è un materiale metallico che segue il ciclo di isteresi magnetica quando messo in interazione con una sorgente di campo magnetico. Nel momento dell'applicazione del campo magnetico, il giunto presenta dei movimenti, delle volte violenti che porta il campione a toccare l'induttore, probabilmente per un suo scorretto posizionamento tra i due piani di induzione. Inoltre, si nota che, raggiungendo il picco di potenza impostato sul macchinario, il materiale, per via della sua natura isterica, continua, per un breve tempo ad aumentare la sua temperatura (visivamente evidente).

Nel caso di campioni misti, si notano differenze soprattutto per quanto concerne il trasferimento del calore nel pezzo, in quanto, l'acciaio raggiunge temperature atte alla brasatura in un tempo considerevolmente inferiore rispetto al rame.

Curiosa risulta la reazione del tubo in acciaio zincato, come evidenziato precedentemente, arrivato ad una determinata temperatura, produce scintille per poi tramutare in fiamme verdi. Questo deriva dalla natura isterica dell'acciaio che raggiungendo temperature elevate in brevissimo tempo fa sì che lo strato di zincatura venga "bruciato" dal pezzo stesso.

In definitiva la pratica tecnica ha riscontrato positività nelle teorie formulate dall'elettromagnetismo di Maxwell.

Bibliografia

- Paolo Mazzoldi ,Massimo Nigro, Cesare Voci, Edises 2008, “Elementi di fisica. Vol. 2: Elettromagnetismo e onde”;
- P. Ferro, F. Bonollo, Libreria progetto, Università di Padova corso di Laurea in Ingegneria Meccanica, “Dispense di materiali metallici con esercizi prima edizione”;
- Pierfrancesco Brunello, Edises, “Lezioni di fisica tecnica”;
- G. Chitarin, F. Gnesotto, M. Guarnieri, A. Maschio, A. Stella, Società Editrice Esculapio, “Elettrotecnica. Principi (Vol. 1)”;

Sitografia

- <https://www.aqm.it/it/saldatura/cenni-sulla-saldabilita-dei-materiali-metallici>
- <http://it.worldironsteel.com/news/how-to-calculate-the-carbon-equivalent-43475289.html>
- https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_brazing_alloys
- <https://www.italbras.it/normativa-uni-en-iso-17672-brasatura-forte-metalli-dapporto/>

Indice delle tabelle

Tabella 1: Campioni analizzati	16
Tabella 2: Normative EN per tubi utilizzati	17
Tabella 3: Campioni analizzati	19

Indice delle figure

Figura 1: Schema a blocchi di una macchina frigorifera	4
Figura 2: Schema di impianto frigorifero (sinistra), diagramma P-V per ciclo frigorifero (destra)	5
Figura 3: Ciclo di isteresi magnetica	10
Figura 4: Cianfrino classico a V per saldatura testa-testa	12
Figura 5: Schematizzazione di una saldatura	13
Figura 6: Particolare di giunzione	14
Figura 7: Famiglie di leghe brasanti in funzione della temperatura	18
Figura 8: Concentrazione del riscaldamento (sinistra), Produzione della fiamma durante brasatura (destra)	20
Figura 9: Esempio di penetrazione corretta (sinistra) e di penetrazione scorretta (destra)	22
Figura 10: Ingrandimento dei difetti nell'intercapedine tra i due tubi	23
Figura 11: Schematizzazione test a flessione: (a) appoggio-appoggio; (b) incastro	23
Figura 12: Dimensione grana cristallina pre-saldatura (sinistra), dimensione grana cristallina post-saldatura (destra)	24

Ringraziamenti

Dedico questo ultimo spazio di elaborato per rendere pubbliche le persone che mi sono state accanto in questi anni accademici.

Prima di tutto, un sentito grazie al mio relatore, il professor Emanuele Dabalà, che si è reso fin da subito disponibile a sostenere questa personale idea di progetto, senza alcun indugio e grazie per i consigli e la disponibilità necessari per il raggiungimento della fine dell'elaborato.

Al Dottor Corrado Cecchini, tutor aziendale, che ha accolto con felicità la mia idea di progetto concedendomi di vedere come funziona la realtà e dandomi, così, l'opportunità di lavorare con persone qualificate trasmettendomi professionalità ed esperienza.

Grazie a mamma e papà, perché mi hanno dato la possibilità di studiare quando loro per primi non l'hanno avuta, questo mio traguardo è soprattutto vostro. Grazie anche per tutti i momenti di saggezza condivisi insieme, dai momenti di felicità ai momenti più duri, mi avete insegnato a non mollare perché *"là fuori ti mangiano vivo"*, senza di voi non sarei la persona che sono oggi.

A mia sorella, che è sempre stata mio punto di riferimento, se non avesse intrapreso una carriera accademica lei, forse, non l'avrei intrapresa neppure io.

A mia nipote, che seppur piccolina, le auguro il meglio da questa vita, che un giorno tu possa leggere queste parole e comprendere la felicità che hai portato allo zio.

Ai compagni di università: Marco, Luca, anche se le nostre strade si sono separate così rapidamente mi sembra che ci si conosca da così tanto tempo. Ora, che uno di noi ha chiuso la sua carriera accademica e in occasione anche dei successivi traguardi, che la vita abbia in serbo il meglio per voi, lavorativa e privata. Senza di voi, non sarebbe stato lo stesso, avete dato colore a questo viaggio. Ormai siete amici non più colleghi.

Ai miei amici, la mia seconda famiglia, con cui ho condiviso tutto. Grazie Andrea, Anna, Alessandro, Ivan, Daniele, Giulio, Marco, Davide. Anche voi mi avete dato la forza per continuare con grinta quando il gioco si stava facendo durissimo. Grazie anche ad Annino, Ele e Tave per i momenti di studio intensivo, ai limiti di legge, ai limiti della pazzia.

Al migliore amico che possa avere, grazie Giacomo, per tutto. Per qualsiasi cosa tu abbia fatto pensando a me in questi anni e non solo in ambito accademico, dal sostegno nei momenti più difficili alla felicità condivisa insieme. Sei e sempre sarai ancora di salvezza perché ho garanzia che sempre ci sarai. Ti voglio bene.

Ringrazio la mia metà, Elisa, anche se arrivata alla conclusione del mio obiettivo mi ha dato la determinazione e la serenità giusta per concludere. Non me ne sono mai reso conto fino ad ora ma il finale così ha reso tutto più gustoso, ti amo.

Al mio attuale datore di lavoro, che si è reso disponibile nel concedermi giorni di studio per raggiungere questo obiettivo.