POLITECNICO DI TORINO

Tesi di Laurea magistrale in Ingegneria meccanica

Sviluppo di una metodologia per la produzione di un involucro batterie per veicoli elettrici

Relatore

Prof. Franco Lombardi
Prof.ssa Manuela De Maddis

Laureando

De Mauro Andrea

C'è una forza motrice più forte
del vapore, dell'elettricità
e dell'energia atomica:
la volontà.
Cit. Albert Einstein

Sommario

Abstract 8

Introduzione 10

1 Diffusione auto elettriche 13

1.1 Storia dell'auto elettrica 13

1.2 Diffusione delle auto elettriche oggi 14

1.3 Importanza del pacco batterie 17

2 Tecniche di saldatura 21

2.1 Termini generali 21

2.2 Definizione di saldatura 22

2.3 Classificazione dei processi di saldatura 23

2.4 Tecniche di saldatura 24

2.4.1 Saldobrasatura 24

2.4.2 Saldatura a gas 24

2.4.3 Saldatura ad arco elettrico 25

2.4.4 Saldatura a resistenza 26

2.4.5 Saldatura laser LBW (Laser Beam Welding) 27

2.5 Parametri saldatura 28

2.5.1 Corrente di saldatura 29

2.5.2 Polarità della corrente 29

2.5.3 Tensione dell'arco e lunghezza dell'arco 29

2.5.4 Velocità di spostamento della torcia 30

2.5.5 Stick-out 30

2.5.6 Gas di protezione 31

2.5.7 Materiale d'apporto 33

2.6 Difetti di saldatura 34

3 Saldatura ad arco elettrico 37
3.1 Saldatura ad arco con elettrodo rivestito 38
3.2 Saldatura con elettrodo non fusibile e bagno protetto da gas (TIG) 39
3.3 Saldatura con elettrodo fusibile in gas protettivo (GMAW) 40
3.4 Saldatura al plasma 45
3.5 Saldatura ad arco sommerso (SAW) 46
3.6 Tipi di giunti 47
4 L'Alluminio e sue leghe 48
4.1 Influenza degli elementi leganti sull'alluminio: 50
4.2 Nomenclatura 52
4.3 Saldabilità dell'alluminio 57
5 Caso studio 61
5.1 L'azienda ospitante 62
5.1 Materiali utilizzati 63
5.1.1 Materiali di base 63
5.1.2 Materiale d'apporto 67
5.2 Saldatura 68
5.2.1 Attrezzatura per saldatura 69
5.2.2 Tipologie di giunti saldati 71
5.2.3 Difetti di saldatura dei giunti saldati 73
5.3 Prova di tenuta in pressione del pacco batterie 95
5.3.1 Metodi per il test di tenuta in pressione 96
5.3.2 Prova di tenuta in pressione controllo perdite 101
5.4 Considerazioni e miglioramenti futuri (conclusioni)**Errore. Il segnalibro non è definito.**
6 Conclusioni 104
7 Bibliografia 107
8 Ringraziamenti 109

Abstract

Un obiettivo chiaro della Commissione Europea è alzare ulteriormente gli obiettivi di riduzione delle emissioni inquinanti, come l'anidride carbonica. Entro il 2030 l'Unione Europea dovrebbe ridurre le proprie emissioni del 50%. Per assicurare emissioni zero entro il 2050, la Commissione intende presentare la prima "Legge per il clima", che dovrebbe rendere questi obiettivi vincolanti e sanciti dalla legislazione europea. [1]

Per raggiungere tali obbiettivi l'Europa impone sempre più restrizioni per quanto riguarda le emissioni di CO_2 e NO_x emessi dai veicoli a combustione interna e per questo incita attraverso lo stanziamento di ecoincentivi l'acquisto di auto ibride o elettriche. Il comparto delle auto elettriche, nonostante le dimensioni ridotte, sta costantemente assumendo sempre più rilevanza nel mercato dell'automotive. Guardando al parco auto, Motus-E rileva che, per soddisfare l'obiettivo dell'Unione Europea, ci devono essere 5 milioni di veicoli privati elettrificati sulle nostre strade al 2030, di cui 4,1 milioni full electric. [2]

Un aspetto cruciale nella progettazione dei veicoli elettrici è la sicurezza. Attualmente la fonte d'energia più diffusa per la mobilità elettrica sono le batterie a ioni di litio [3]. Quest'ultime se sottoposte a shock di carico esterno, possono provocare incendi o esplodere. Dunque, è necessario un involucro robusto che le contenga, capace di sostenerle e proteggerle da urti, senza incombere eccessivamente sulla massa totale del veicolo inoltre dev'essere anche capace di frenare intrusione di umidità e polvere per prevenire perdite d'isolamento e cortocircuiti interni.

Quest'ultimo quindi deve essere progettato minimizzando il peso, minimizzando la massima deformazione e massimizzando la sua ermeticità. Queste esigenze tecniche si ripercuotono sia nella scelta dei materiali, sia nella scelta del processo di giunzione dei componenti. In particolare, quest'ultimo oltre a garantire opportuna resistenza meccanica e tenuta deve essere economicamente conveniente. Il presente lavoro, frutto della mia esperienza di tirocinio in una PMI Italiana, descrive tutte le scelte intraprese fino allo sviluppo di una metodologia di produzione di un involucro batterie per un veicolo BEV.

Introduzione

Grazie al mio periodo di tirocinio/tesi presso l'Eurodies Italia srl, ho avuto l'opportunità di seguire, insieme al team dedicato, il progetto riguardante la realizzazione del pacco batterie per il primo modello BEV di una casa automobilistica italiana molto nota.

L'azienda Eurodies Italia s.r.l. è locata ad Avigliana in provincia di Torino ed è leader nella fabbricazione e assemblaggio di componenti in lamiera per prototipi e piccole serie nel campo automotive ma non solo. Il fiore all'occhiello dell'azienda è l'imbutitura delle fiancate delle automobili ma sempre aperta a nuove sfide.

L'elaborato è così strutturato. Nella prima parte introduttiva descriveremo la diffusione delle auto elettriche, come negli ultimi anni le problematiche legate all'inquinamento hanno spinto molte case automobilistiche a puntare sull'alternativa dell'elettrico, progettando veicoli di diverse tipologie con l'obiettivo di realizzare una mobilità "priva di emissioni". Svolgeremo una breve analisi di mercato, riportando i dati relativi alle vendite negli ultimi anni e alcune previsioni sul futuro dei veicoli elettrici.

Possiamo definire il cuore di un'auto elettrica le sue batterie, grossi accumulatori di energia elettrica utile appunto per fornire potenza elettrica al proprio motore. La batteria di un'auto elettrica è formata da tanti moduli che a loro volta sono formati da diverse celle le quali collegate tra loro in serie e in parallelo, raggiungono un'alta differenza di potenziale. Inoltre essendo elementi decisamente delicati hanno bisogno di un involucro robusto e solido che le protegga. Sarà proprio quest'ultimo l'oggetto del mio lavoro di tesi che descriverò nel capitolo 5.

Nei settori dell'industria in cui il peso del manufatto è un punto cruciale, l'alluminio è ampiamente utilizzato. Ha, per questo motivo, trovato largo impiego nella fabbricazione di pacchi batterie, dove la leggerezza delle strutture, unita ad adeguate proprietà meccaniche è una necessità particolarmente sentita. Nel secondo capitolo descriverò delle generalità dell'alluminio e delle sue leghe.

Nel terzo capitolo invece troviamo cenni generali sulla saldatura. La saldatura rappresenta uno strumento fondamentale per la realizzazione delle giunzioni e per la creazione di complessivi partendo da elementi semplici. Approssimativamente esistono una cinquantina di metodi per la saldatura, a ognuno dei quali potrebbe essere dedicata una singola trattazione. Diversamente da metodi quali bullonatura, rivettatura o chiodatura, questa tecnica consente la realizzazione di giunzioni permanenti. Si tratta di una lavorazione complessa i cui effetti sono difficili da controllare e talvolta anche imprevedibili. In questo contesto si intende fornire delle generalità sulla saldatura e sulle varie tipologie esistenti concentrandosi maggiormente sulle procedure di saldatura ad arco. Segue poi un approfondimento sulla saldatura ad arco elettrico essendo quest'ultima la tecnica utilizzata per l'assemblaggio del pacco batterie realizzato, in particolare si è utilizzata la saldatura ad arco elettrico di tipo GMAW con gas protettivo inerte.

Seguirà infine la descrizione delle attività in azienda, le tecniche, le prove effettuate e i controlli durante i processi.

1 Diffusione auto elettriche

1.1 Storia dell'auto elettrica

L'auto elettrica a batteria (BEV) fu una delle prime tipologie di automobile ad essere inventata, sperimentata e commercializzata nei primi anni dell'800. Pochi anni prima del 1900, prima della preponderanza del potente e inquinante motore a combustione interna, le auto elettriche detenevano molti record di velocità e distanze percorse con una carica e nel corso dei primi anni del novecento per un certo tempo vendettero di più rispetto ai veicoli termici.

Il successo delle auto elettriche non sarebbe però durata a lungo. Con gli sviluppi della seconda rivoluzione industriale che permisero soprattutto una riduzione del costo di produzione e la scoperta di nuovi giacimenti petroliferi in America che indussero una notevole riduzione del prezzo della benzina, le vetture con motore termico risultavo più economiche e quindi più accessibili alla popolazione. Inoltre si ebbero miglioramenti notevoli in prestazione e affidabilità che permisero all'auto termica di ottenere una posizione dominante nel mercato. Le auto elettriche non riuscirono più a competere con i modelli a benzina, visti i maggiori costi e limiti in velocità, autonomia e prestazioni. È l'eclisse dell'auto elettrica. [4]

L'interesse verso le auto elettriche si riaccese negli anni sessanta/settanta data la crisi petrolifera connessa al Medioriente, che diminuì la disponibilità del petrolio e ne aumentò il prezzo, ma anche per le battaglie dei movimenti ecologisti. Le principali case automobilistiche, incentivarono la ricerca e svilupparono vari prototipi di automobili con motori dotati di alimentazioni alternative e sostenibili tra cui nuovamente i veicoli elettrici. Questi entusiasmi però non furono destinati a durare. Il settore elettrico, ad esempio, non riuscì a risolvere un problema fondamentale, quello della scarsa capacità

di immagazzinamento dell'energia da parte delle batterie, e soprattutto per questo motivo il primato dei motori a combustione rimase inalterato.

Negli anni Novanta ritornò l'interesse per la mobilità sostenibile, a causa delle continue crisi petrolifere e i problemi provocati dai gas serra che allarmavano sempre di più l'opinione pubblica, ma non si registrò un'inversione di rotta. Nel nuovo millennio, la ricerca di una mobilità sostenibile pare sempre più all'ordine del giorno nell'agenda della comunità internazionale. Le principali case automobilistiche sono impegnate in attività di ricerca e sviluppo sulle auto elettriche per superare i conosciuti limiti di velocità, autonomia, tempi di ricarica e disponibilità di infrastrutture (ad es. le colonnine di ricarica), in modo tale che questo tipo di automobili riesca a competere con i mezzi tradizionali basati sui combustibili fossili. [5]

1.2 Diffusione delle auto elettriche oggi

Ci sono sempre più auto sulle strade europee, infatti a differenza degli anni passati, oggi in media in un nucleo famigliare composto da quattro persone maggiorenni ci sono almeno tre auto. Poi attraverso il stazionamento di grandi somme di denaro dalla commissione europea al fine della riduzione dell'inquinamento, ogni anno si registra un numero di vendite di auto BEV o PHEV sempre maggiore.

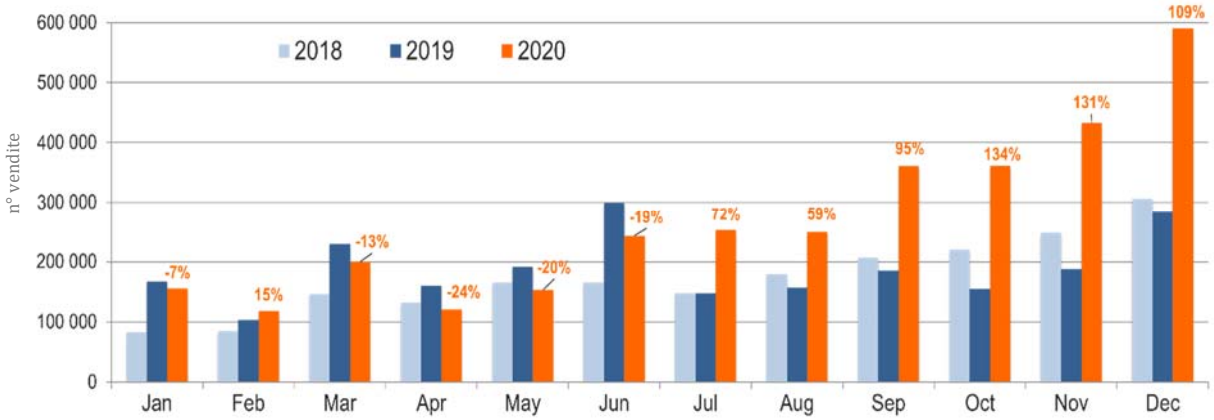


Figura 1: Vendite veicoli BEV & PHEV in Europa

Anche a livello globale il mercato delle auto elettriche negli ultimi 10 anni ha avuto una grande crescita come si può notare dal grafico in Figura 2. Alla fine, il 2020 è diventato

un anno eccezionale per i veicoli plug-in. Con vendite globali di auto BEV + PHEV di 3,24 milioni, rispetto ai 2,26 milioni dell'anno precedente. Ciò che è iniziato con una recessione economica senza precedenti durante la prima ondata di COVID-19 è diventata una storia di successo per i veicoli elettrici in Europa. Quasi 1,4 milioni di BEV e PHEV sono stati registrati in Europa nel 2020, il 137% in più rispetto al 2019, in un mercato automobilistico in calo del 20% su base annua. È stata la combinazione di nuovi modelli attraenti, incentivi da parte dei fondi per il recupero verde, il mandato di 95 g di CO_2, una disponibilità notevolmente migliorata e un'intensa promozione dei veicoli elettrici. [6]

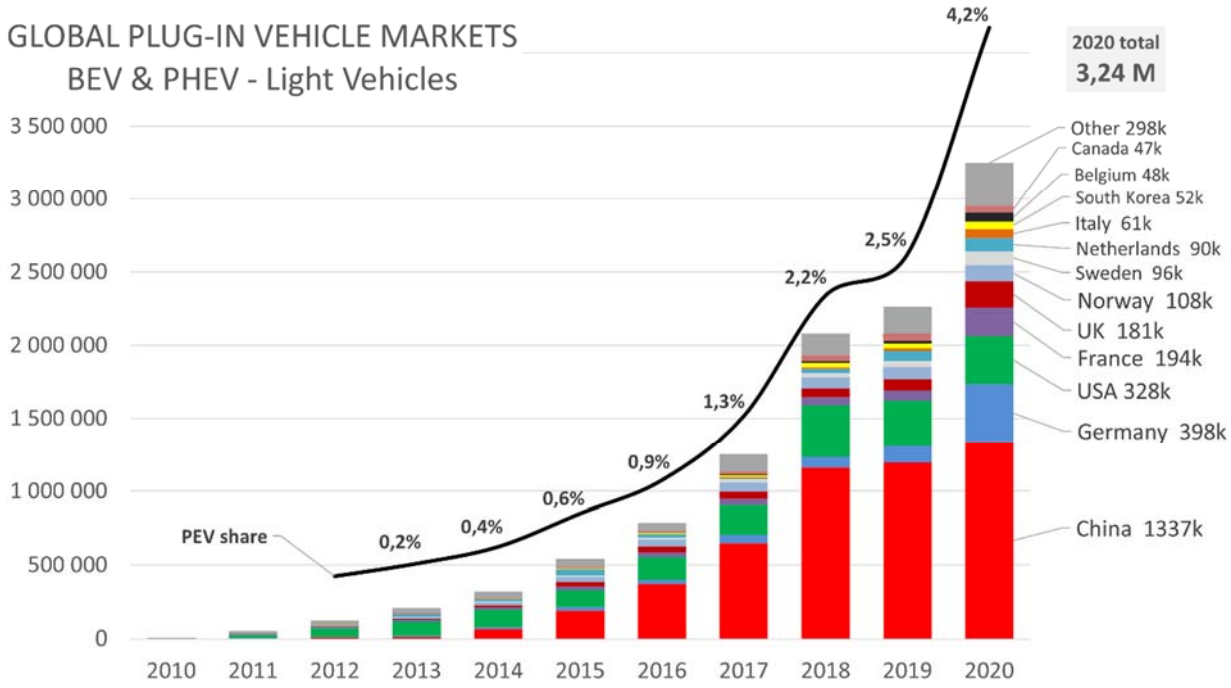


Figura 2: Totale veicoli BEV & PHEV in Europa

Rispetto ad una tradizionale automobile dotata di motore a combustione interna, i **vantaggi** principali di un'auto elettrica sono:

- La maggiore efficienza termodinamica. Un motore a benzina arriva ad un'efficienza energetica del 25-28%, un diesel arriva intorno al 40%,per alcuni motori elettrici si arriva al 90%;
- La maggiore economicità, misurata in €/km percorso, dovuta al minore o nullo consumo di carburante di origine fossile. Naturalmente ciò dipende dal prezzo del carburante fossile, molto variabile da nazione a nazione: più la benzina costa, più una vettura elettrica è conveniente;
- Il rispetto per l'ambiente dovuto all'assenza di consumo di combustibili fossili o quantomeno ad un minore consumo;
- La semplicità costruttiva, la compattezza e l'affidabilità di un motore elettrico rispetto ad un motore a combustione interna;
- La silenziosità, un vantaggio per guidatore, passeggeri e ambiente circostante;
- L'elevata coppia motrice, subito disponibile in un motore elettrico. Alcuni modelli (per esempio Tesla) sono famosi per disporre di un'accelerazione fulminante;
- Il trattamento fiscale favorevole in termini di bollo (tassa automobilistica);
- La possibilità di accedere gratuitamente a molte ZTL.

Gli **svantaggi** principali sono:

- Il costo iniziale di acquisto, normalmente maggiore rispetto ad un'auto "normale";
- L'autonomia, soprattutto in condizioni d'uso non ottimali (in salita, con frequenti accelerate e frenate, ecc.). Anche le temperature molto basse possono ridurre l'autonomia delle batterie;
- Il tempo di ricarica delle batterie. L'energia/minuto (cioè la potenza) della ricarica elettrica è tuttora enormemente inferiore ai MJ/minuto che può fornire una pompa di benzina. L'ordine di grandezza, se si considera una ricarica domestica, è 6 kW contro 5.000 kW. La conseguenza è che per un pieno di benzina si impiegano un paio di minuti, mentre per un pieno di energia elettrica di solito occorrono molte ore;

- La necessità di un complicato sistema elettronico di gestione;
- La silenziosità può costituire un potenziale pericolo per i pedoni nelle vicinanze.
- Il peso delle batterie (si parla in alcuni casi anche di 500 Kg) può diminuire le prestazioni dinamiche della vettura rispetto ad un modello "normale", soprattutto per quanto riguarda la stabilità e la frenata;
- La scarsa densità di energia delle batterie. Un Kg di benzina ha densità di energia pari a circa 47 MJ/Kg, una pur efficiente batteria agli ioni di litio circa 0,5 MJ/Kg, una batteria al piombo circa 0,1 MJ/Kg. Il risultato è che un serbatoio di benzina pesa poche decine di Kg, un pacco batterie può pesare anche molte centinaia di chilogrammi;
- Il costo di produzione delle batterie;
- Il costo di progettazione di una vettura elettrica;
- Il numero di ricarica sopportato dalle batterie. Dopo un certo numero di cicli di ricarica, molto variabile, le prestazioni delle batterie di alcuni tipi (non tutti) decadono ed occorre sostituirle;
- L'impatto ambientale dovuto allo smaltimento delle batterie esauste;
- La scarsità in natura, attuale e soprattutto futura, di litio e di altri metalli rari utilizzati nelle batterie (neodimio, boro, cobalto).

1.3 Importanza dell'involucro batterie

Nelle automobili elettriche l'involucro batterie ricopre un ruolo fondamentale e sostituisce il tradizionale serbatoio della benzina nelle auto tradizionali.

Una richiesta del mercato è quella di avere sempre più autonomia, la quale su una tradizionale auto termica si aggira in media tra gli 800 ei 1000 km, e nel caso la si voglia incrementare ciò non comporta stravolgimenti dal punto di vista della massa del veicolo.

Al contrario su una elettrica ad oggi l'autonomia in media è tra i 300 e i 500 km con una carica completa. Ma a differenza del normale serbatoio di carburante, aumentare la

capacità delle batterie comporta, con le tecnologie in uso oggi (batterie agli ioni di litio Li-ion), un notevole aumento della massa e anche dei volumi, già compromettenti. [7]

Figura 3: Esempio di un involucro batterie di un veicolo BEV

Proprio per questo non esistono pacchi batteria a catalogo ma vengono adottate delle soluzioni "ad Hoc" appunto o per meglio adattarsi al telaio dell'automobile sulla quale verrà installa, o ad esempio per avere diverse versioni con più o meno kWh a disposizione e garantire livelli di autonomia differenti.

Una delle grandi sfide tecniche della produzione di veicoli elettrici è garantire la sicurezza dei grandi involucri batteria che li alimentano spesso criticati come fonte di incendi. Le batterie per l'auto elettrica sono, forse, il componente più delicato delle nuove motorizzazioni a "zero emissioni". È importante, dunque, avere delle accortezze durante la loro produzione.

I veicoli elettrici sono sostanzialmente sicuri e il rischio che si verifichino delle criticità mentre sono normalmente in uso è molto basso e non certo superiore a quello delle automobili a motore tradizionale. Pur tuttavia negli anni si sono verificati alcuni casi in cui automobili alimentate a batterie si sono incendiate. Tale fenomeno prende il nome di "thermal runaway" e potrebbe rappresentare un rischio incendio per i veicoli elettrici.

In pratica, con riferimento gli autoveicoli che montano batterie agli ioni di litio, potrebbe crearsi uno squilibrio termico nella batteria che determina un aumento incontrollato e inarrestabile della temperatura. Una reazione a catena che porta prima alla combustione e poi a uno scoppio della batteria stessa. Ovviamente si parla di casi del tutto eccezionali.

Le condizioni anomale che determinano un "thermal runaway" possono essere riconducibili a tre fattori:

- problemi elettrici, derivanti dall'uso di materiali di fabbricazione non idonei;
- corto circuiti;
- urti meccanici.

Le cause del cortocircuito interno possono essere le seguenti:

1.Urti meccanici, i quali determinano la circostanza maggiormente pericolosa; in caso incidente non è escludibile che si verifichino condizioni estreme capaci di far incendiare la vettura. Molti produttori inoltre hanno inoltre iniziato verificare materiali che consentono di rafforzare le parti che compongono il blocco batterie così da ridurre i rischi di rotture meccaniche in caso di urti.

2.Utilizzo non appropriato o abuso, che provocano il funzionamento di celle o batterie al di fuori della finestra operativa ovvero delle specifiche di corrente, tensione e temperatura di funzionamento. In particolare:

- condizioni di sovraccarica possono portare al deposito di litio metallico all'anodo in forma di dendriti che possono provocare il corto circuito interno della cella;
- ricarica a temperature al di sotto della temperatura minima di funzionamento può portare al deposito di litio metallico all'anodo in forma di dendriti che possono provocare il corto circuito interno della cella.

3.Difetti di produzione, tra cui un assemblaggio non corretto della cella o della batteria, la presenza di impurezze, la presenza di inclusioni del tipo: particelle metalliche; frammenti dei materiali impiegati nella costruzione, intrappolati durante il processo di produzione; impurezze nei prodotti chimici utilizzati per la realizzazione delle celle; particelle dei materiali attivi disperse all'interno della cella; disomogeneità o difetti strutturali o non corretto posizionamento degli elettrodi o del separatore che restano

invisibili durante l'assemblaggio e i test di qualità e i controlli di processo oppure che si rivelano durante l'utilizzo; le impurezze di tipo metallico possono causare cortocircuito; altri tipi di impurezze possono costituire punti di innesco di reazioni di decomposizione dei materiali presenti. Per questo è molto importante garantire una certa soglia di pulizia del pacco batterie e l'impermeabilità a liquidi e particelle solide attraverso test di tenuta.

L'entità dei danni provocati dal cortocircuito dipende dalla superficie interessata dal cortocircuito, del percorso di trasmissione del cortocircuito all'interno del sistema, dalla posizione in cui essa viene. La cella può rispondere in maniera lenta oppure in maniera molto rapida. [8]

Per garantire al consumatore finale una certa soglia di sicurezza, rispettano alcuni parametri, tra cui:

- Protezione meccanica da urti esterni;
- Isolamento elettrico;
- Isolamento termico;
- Grado di protezione IP.

Nel corso della mia esperienza in azienda ho avuto esperienza diretta su due dei quattro punti elencati precedentemente, ovvero la parte sulla resistenza meccanica e del grado di protezione IP da garantire al pacco batterie di cui parlerò nel capitolo 5.3.

2 Tecniche di saldatura

2.1 Termini generali

Di seguito un'elencazione delle principali terminologie ricorrenti:

- **Lembi:** superfici affiancate dei pezzi da unire, la cui forma determina la forma e tipologia del giunto;
- **Metallo base:** è il metallo che costituisce i pezzi da saldare;
- **Bagno di fusione:** è quella porzione di metallo che si trova allo stato liquido durante l'esecuzione della saldatura;
- **Metallo d'apporto:** è il metallo che si deposita fra i lembi da unire. Non è presente in tutti i procedimenti di saldatura;
- **Giunto saldato:** è il risultato dell'operazione di saldatura ed è caratterizzato dalla continuità metallica. Il giunto saldato può essere ottenuto attraverso una o più passate;
- **Protezione del bagno:** alcuni procedimenti di saldatura richiedono la protezione del bagno di fusione dall'ossigeno e dall'azoto per impedire ossidazioni e nitrurazioni dannose per l'integrità del giunto;
- **Fonte di calore:** potenza termica necessaria per la fusione del metallo d'apporto e/o riscaldamento dei lembi da collegare. Può essere di origine varie.

2.2 Definizione di saldatura

La saldatura è definita come un processo nel quale materiali dello stesso tipo o classe vengono uniti, causandone la giunzione attraverso la formazione di un legame chimico, sotto l'azione combinata di riscaldamento localizzato e/o applicazione di materiale d'apporto. La saldatura realizza un collegamento permanente che si differenzia da altri collegamenti permanenti, come la rivettatura o incollatura che non realizzano la continuità del materiale.

I vantaggi più significativi della saldatura rispetto agli altri metodi di assemblaggio permanenti o smontabili sono senza dubbio la possibilità di fornire una eccezionale integrità e robustezza, l'operabilità in manuale e/o in automatico attraverso robot saldatori; fissaggio ermetico con la saldatura continua; applicabile a moltissimi materiali; può essere portabile per usi indoor ed outdoor. Gli svantaggi principalmente riguardano il calore sviluppato durante il processo, il quale degrada le caratteristiche dei materiali base nell'intorno del cordone e può causare distorsioni o sollecitazioni residue. Invece l'incollaggio adesivo, disponibile in diverse tipologie e forme come liquidi, paste, soluzioni, etc, viene largamente utilizzata per applicazioni che richiedono robustezza, isolamento, smorzamento di vibrazioni e resistenza alla corrosione fra materiali anche dissimili. I principali svantaggi riguardano i tempi d'attesa che possono essere lunghi, oltre al possibile degrado a causa del calore o di altri agenti esterni. Mentre il fissaggio meccanico come la bullonatura, chiodatura e rivettatura, richiedono la realizzazione di un foro attraverso il componente da unire, indebolendone la struttura.

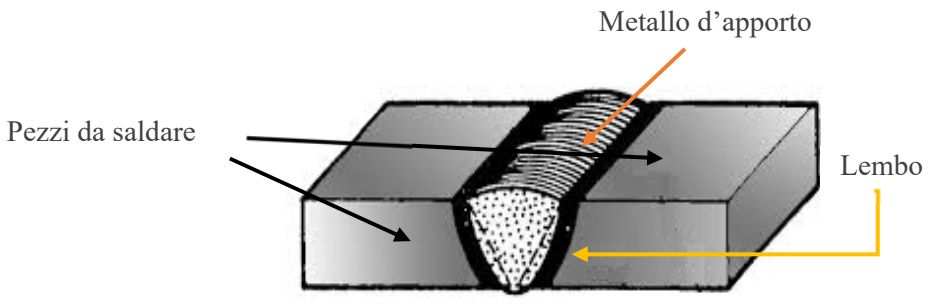


Figura 4: Esempio di giunto saldato

Esistono diverse tipologie di saldature ognuno dei quali segue alcuni procedimenti differenti come ad esempio la fornitura del calore necessario all'attuazione del processo. Da quest'ultimo spesso prende il nome il processo di saldatura.

Alcuni sistemi per la fornitura del calore necessario all'attuazione del processo di saldatura:

- Fiamma diretta ottenuta per combustione di un gas;
- Arco elettrico che si forma tra due elettrodi;
- Resistenza elettrica per effetto Joule;
- Attrito tra i lembi;
- Pressione;
- Laser ad elevata potenza.

2.3 Classificazione dei processi di saldatura

Le numerose tipologie di saldatura si possono raggruppare in:

- **saldature omogenee**: il materiale base è uguale al materiale d'apporto.
- **saldature autogene**: sono caratterizzate dal raggiungimento della temperatura di fusione del materiale base. Questo avviene per apporto termico esterno (saldature autogene per fusione) o per il contemporaneo apporto termico da una sorgente esterna insieme ad una elevata pressione applicata tra i componenti da saldare (s. a. per pressione). In questa categoria la formazione del giunto avviene grazie alla sola fusione del materiale base o con l'aggiunta del materiale d'apporto.
- **saldature eterogene**: sono caratterizzate dalla mancata fusione del materiale base. Il materiale d'apporto, necessariamente di tipo basso fondente, in questa categoria è sempre presente.
- **saldature allo stato solido**: in questo caso la saldatura è generata per mescolamento plastico del materiale base che quindi viene mantenuto ad una temperatura inferiore rispetto a quella di fusione. Non vi è materiale d'apporto.

2.4 Tecniche di saldatura

2.4.1 Saldobrasatura

La saldobrasatura è una saldatura eterogena, per questo motivo il metallo d'apporto ha un punto di fusione inferiore e quindi composizione diversa rispetto al metallo base. È necessario avere evidentemente una zona di sovrapposizione abbastanza ampia poiché la resistenza meccanica del materiale d'apporto è molto bassa.

2.4.2 Saldatura a gas

Tecnica di saldatura che sfrutta la combustione di un gas per fondere un metallo. I gas utilizzati possono essere miscele di ossigeno con idrogeno (Ossidrica) o metano, propano (Ossipropanica) oppure acetilene (Ossiacetilenica). La saldatura a gas più diffusa utilizza una miscela di ossigeno ed acetilene, che alimentano contemporaneamente una torcia, ed escono dall'ugello terminale dove tale miscela viene accesa. La temperatura massima raggiungibile è dell'ordine dei 2000 - 3000 °C e può essere quindi utilizzata anche per la saldatura degli acciai. Piccoli spessori possono essere saldati semplicemente fondendone i bordi, che devono solo essere sufficientemente accostati. Spessori superiori possono essere saldati allontanando i due lembi e riempiendo con il metallo d'apporto il giunto.

La fiamma ossiacetilenica viene realizzata mediante la combustione di acetilene C_2H_2 e ossigeno O2. Nel dardo avviene la reazione primaria: $C_2H_2 + O_2 \rightarrow 2CO + H_2$ i prodotti della combustione si combinano poi con l'ossigeno generando:

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$$

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$$

Per eseguire la saldatura i lembi devono trovarsi nella zona riducente dove si raggiungono i 3100°C e grazie all'atmosfera riducente si limita l'ossidazione del pezzo.

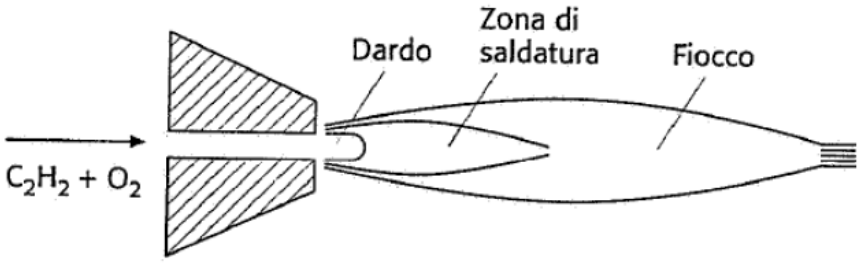


Figura 5: Reazione fiamma saldatura a gas

2.4.3 Saldatura ad arco elettrico

La saldatura ad arco elettrico è un tipo di saldatura che avviene per fusione, infatti il collegamento dei pezzi è ottenuto mediante fusione e successiva solidificazione dei lembi e del metallo d'apporto.

La fusione dei lembi e del metallo d'apporto avviene grazie al calore generato, appunto, come suggerisce il nome della tecnica, dall'arco elettrico che scocca tra elettrodo e i lembi da saldare.

Si distinguono diversi tipi di saldature ad arco elettrico:

- Saldatura con elettrodo rivestito (SMAW);
- Saldatura ad arco sommerso (SAW);
- Saldatura con elettrodo non fusibile e bagno fuso protetto da gas (TIG);
- Saldatura con elettrodo fusibile in gas protettivo (GMAW);
- Saldatura al plasma.

Seguirà una trattazione più dettagliata di questa tecnica di saldatura nel capitolo successivo.

2.4.4 Saldatura a resistenza

In questo processo si genera calore attraverso la resistenza incontrata dalla corrente elettrica che scorre tra le parti da saldare. I lembi da saldare sono parte integrante del circuito elettrico, nel quale il calore e la saldatura hanno luogo nel punto di contatto, sfruttando il principio di Joule.

Una coppia di elettrodi, spesso dotati anche di raffreddamento ad acqua, conduce la corrente nella giunzione, applicando una pressione per incrementare il contatto tra elettrodo-metallo e aiutare a racchiudere il materiale fuso nel punto di giunzione.

Per far funzionare al meglio tale processo, la resistenza incontrata dalla corrente dev'essere maggiore nella regione di contatto rispetto alla zona circostante.

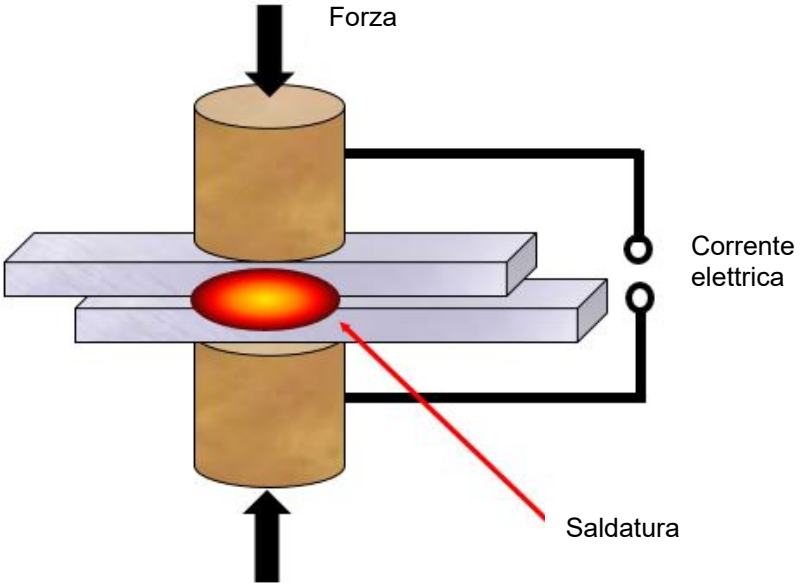


Figura 6: Saldatura a resistenza

2.4.5 Saldatura laser LBW (Laser Beam Welding)

Il laser è un insieme di intense radiazioni elettromagnetiche a frequenza ottica. L'unità saldatrice laser comprende: una sorgente eccitatrice, un sistema riflettente per dirigere le radiazioni dalla sorgente eccitatrice sul cristallo laser, un materiale capace di produrre un'azione laser, un sistema per la concentrazione del fascio emesso.

I parametri che un operatore deve valutare sono:

• Energia d'impulso: dipende dall'energia elettrica scaricata sulla sorgente eccitatrice, che può essere regolata agendo sul potenziale di appositi condensatori.

• Durata dell'impulso: può essere variata agendo sulla capacità dei condensatori.

• Lunghezza d'onda.

• Preparazione: la superficie dei pezzi da saldare deve essere ricoperta con sostanze ad alto coefficiente di assorbimento quando si trattano materiali molto riflettenti.

• Atmosfera: un'atmosfera di gas inerte può evitare l'evaporazione superficiale.

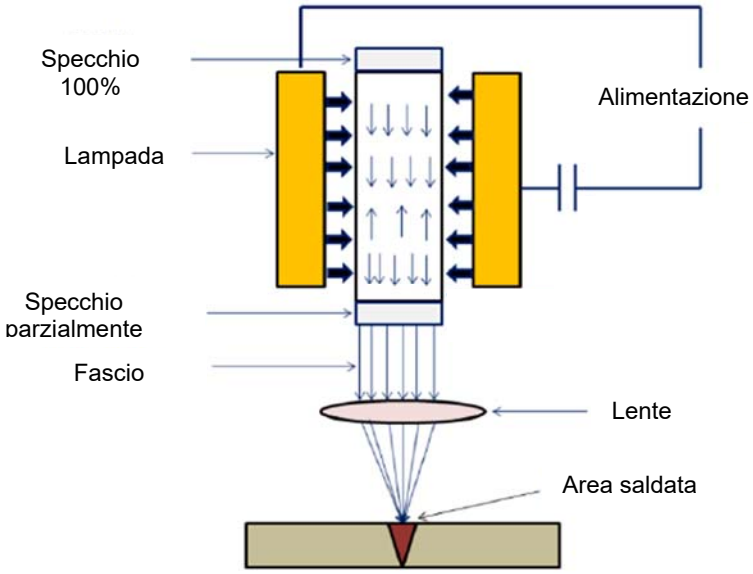


Figura 7: Saldatura laser

2.5 Parametri saldatura

Per ottenere un certo tipo di giunto che soddisfi determinati requisiti, che sia ad esempio di una certa dimensione o che il cordone abbia una certa penetrazione oppure il suo grado di porosità, bisogna intervenire sui parametri di saldatura. Considerando le tecniche ad arco elettrico, tali variabili influiscono sulla microstruttura della saldatura, sui cicli termici, sulla penetrazione e sulla qualità del giunto, alcuni di questi sono:

- Corrente di saldatura;
- Polarità della corrente;
- Tensione dell'arco e lunghezza dell'arco;
- Velocità di spostamento della torcia;
- Stick-out;
- Posizione torcia;
- Gas di protezione;
- Materiale d'apporto.

È importante conoscere e controllare gli effetti dei parametri di saldatura al fine di ottenere un giunto di buona qualità. I parametri di saldatura non sono indipendenti tra loro, il cambiamento di uno di essi richiede il cambiamento di uno o più degli altri. Generalmente possiamo dire che la forma del cordone è funzione della corrente di saldatura, della velocità di spostamento della torcia, della tensione d'arco del gas di protezione e della posizione della torcia.

Per riuscire a selezionare, per ogni tipo di applicazione, la combinazione ottimale di questi parametri è necessaria oltre ad un'ottima conoscenza anche molta esperienza. Infatti le proprietà meccaniche e metallurgiche del metallo di saldatura e della zona termicamente alterata dipendono principalmente dal tipo di metallo base, dalla composizione del metallo d'apporto e dalla velocità di raffreddamento, strettamente legata alla forma del giunto ed alla dimensione del cordone.

2.5.1 Corrente di saldatura

Se tutte le altre variabili restano costanti, la corrente di saldatura è una funzione non lineare della velocità di avanzamento del filo.

Un aumento della corrente di saldatura, e di conseguenza un aumento della velocità di avanzamento dell'elettrodo, determinerà oltre ad un aumento del materiale depositato, anche un aumento della profondità e della larghezza di penetrazione quindi un aumento della sezione del cordone di saldatura.

2.5.2 Polarità della corrente

Con il termine polarità si definisce la connessione elettrica della torcia di saldatura con i terminali del generatore (polo positivo o polo negativo). Se la torcia è collegata al polo positivo, siamo in "corrente continua elettrodo positivo" (DCEP). Quando la torcia è collegata al polo negativo, la polarità è detta "corrente continua elettrodo negativo" (DCEN).

La metodologia più usata è la DCEP, anche detta polarità inversa; questa condizione determina un arco stabile, spruzzi relativamente bassi, buone caratteristiche del cordone di saldatura e grandi profondità di penetrazioni.

2.5.3 Tensione dell'arco e lunghezza dell'arco

Questi due parametri sono variabili critiche nel processo di saldatura ed è necessario controllarle accuratamente.

- Un arco corto comporta dei cortocircuiti che generano spallinatura;
- Un arco troppo lungo diventa instabile influenzando il cordone.

La lunghezza dell'arco è una variabile indipendente mentre la tensione d'arco dipende sia dalla lunghezza dell'arco sia da altre variabili come: la composizione chimica e la dimensione dell'elettrodo, il gas di protezione, la tecnica di saldatura. La tensione d'arco è approssimativamente pari al valore medio della lunghezza d'arco; essa include la caduta di tensione che si verifica nello stick-out.

È più facile misurare la tensione d'arco e quindi più controllabile ed è per questa ragione che nelle specifiche tecniche relative ai procedimenti di saldatura si fa riferimento alla tensione d'arco.

- Una tensione d'arco eccessiva determina: porosità, spallinatura e intaglio marginale;
- Una riduzione della tensione d'arco determina: un cordone di saldatura più stretto con una cresta del cordone più alta ed una maggiore penetrazione.

2.5.4 Velocità di spostamento della torcia

Al diminuire della velocità di spostamento della torcia aumenta la quantità di metallo d'apporto depositata per unità di lunghezza e a velocità molto bassa l'arco di saldatura incide sul bagno di fusione, invece che sul metallo base, diminuendo la penetrazione ottenuta e producendo un cordone di saldatura più largo.

All'aumentare della velocità di spostamento della torcia, l'energia termica trasmessa dall'arco di saldatura in un primo momento aumenta, dato che l'arco elettrico incide direttamente sul metallo base, con un ulteriore aumento della velocità di spostamento, inizia a diminuire.

2.5.5 Stick-out

Lo stick-out (o sporgenza libera) è la distanza tra l'estremità dell'elettrodo e l'estremità del guida-filo. Quando il filo è all'interno del guida-filo, la densità di corrente che lo attraversa è bassa, ma quando il filo esce, la densità di corrente aumenta notevolmente portando ad un riscaldamento per effetto Joule.

Inoltre lo stick-out ha influenza anche sulla geometria del cordone e sulla fluidità del bagno di fusione: una sua diminuzione determina un allargamento del cordone ed un aumento della fluidità del bagno.

2.5.6 Gas di protezione

Il gas di protezione selezionato ha un effetto importante sulla saldatura prodotta.

Alcuni metalli devono essere saldati con un gas inerte come l'argon o l'elio o miscele di entrambi questi ultimi. Altri metalli si lavorano meglio con gas reattivi come il carbonio o con miscele di gas inerti e gas reattivi come argon e ossigeno o argon e anidride carbonica.

L'Argon al 100% viene utilizzato su metalli non ferrosi come alluminio, rame, magnesio, nichel e loro leghe, ma il 100% di argon non viene normalmente utilizzato per la realizzazione di saldature su metalli ferrosi.

L'Argon essendo più denso dell'aria, spinge via l'aria più leggera quindi protegge efficacemente le saldature. Inoltre è un gas facilmente ionizzabile che porta ad avere archi lunghi in basse tensioni, questo lo rende meno sensibile ai cambiamenti nella lunghezza d'arco. Il gas di protezione con l'argon o miscele di argon e altri gas vengono utilizzati nel processo di trasferimento spray. Aggiungendo gas reattivi (ossidanti), come ossigeno o anidride carbonica, nell'argon essi tendono a stabilizzare l'arco, facilitano il trasferimento del materiale nel bagno di fusione e minimizzano gli spruzzi. Di conseguenza, la penetrazione viene migliorata. Aggiungendo elio o azoto aumenta il calore dell'arco, generando una penetrazione più profonda. Una piccola variazione della percentuale dei gas reattivi genera un effetto sulla saldatura. La maggior parte delle volte le miscele contengono dall'1% al 5% di ossigeno. L'anidride carbonica può essere aggiunta all'argon nell'intervallo dal 20% al 30%.

L'argon al 100% genera problemi con l'acciaio poiché si genera un ossido di ferro sulla superficie, il quale può generare un'emissione di elettroni che attrae l'arco. Tuttavia, questi ossidi non sono distribuiti uniformemente: ciò comporta un movimento dell'arco molto irregolare e, a sua volta, irregolari depositi di saldatura. Questo problema è stato risolto aggiungendo piccole quantità di ossigeno all'argon, la reazione prodotta genera un film uniforme di ossido di ferro e fornisce un sito più stabile per l'arco.

La quantità di ossigeno necessaria per stabilizzare gli archi in acciaio varia con la lega. Generalmente, il 2% è sufficiente per gli acciai al carbonio e acciai a bassa lega. L'anidride carbonica può sostituire l'ossigeno, con un valore tra il 2% e l'8% per acciai a bassa lega.

Il 100% di biossido di carbonio viene ampiamente utilizzato come gas di protezione per la saldatura ad arco, negli acciai. Permette maggiore velocità di saldatura, migliore penetrazione, buone proprietà meccaniche e costa meno dei gas inerti. Lo svantaggio nell'uso dell'anidride carbonica è un arco meno stabile e un notevole aumento degli schizzi di saldatura.

Gases/Blend	Gas Reaction	Application	Remarks
Argon (Ar)	Inert	Nonferrous metals	Provides spray transfer
Helium (He)	Inert	Aluminum and magnesium	Very hot arc for welds on thick sections, usually used in gas blends to increase the arc temperature and penetration
Ar + 1% O_2	Oxidizing	Stainless steel	Oxygen provides arc stability
Ar + 2% O_2	Oxidizing	Stainless steel	Oxygen provides arc stability
Ar + 5% O_2	Oxidizing	Mild and low alloy steel	Provides spray transfer
Ar + 5% CO_2	Oxidizing	Low alloy steel	Pulse spray and short-circuit transfer in out-of-position welds
Ar + 10% CO_2	Oxidizing	Low alloy steel	Same as above with a wider, more fluid weld pool
Ar + 25% CO_2	Oxidizing	Mild, low alloy steels and stainless steel	Smooth weld surface, reduces penetration with short-circuiting transfer
Gas/Blend	Gas Reaction	Application	Remarks
CO_2	Oxidizing	Mild, low alloy steels and stainless steel	Least expensive gas, deep penetration with short-circuiting or globular transfer
Nitrogen	Almost inert	Copper and copper alloys	Has high heat input with globular transfer
Ar + 25% He	Inert	Al, Mg, copper, nickel, and their alloys	Higher heat input than Ar, for thicker metal
Ar + 50% He	Inert	Al, Mg, copper, nickel, and their alloys	Higher heat in arc use on heavier thickness with spray transfer
Ar + 75% He	Inert	Copper, nickel, and their alloys	Highest heat input
Ar + CO_2 + O_2	Oxidizing	Low alloy steel and some stainless steels	All metal transfer for automatic and robotic applications
Ar + CO_2 + N	Almost inert	Stainless steel	All metal transfer, excellent for thin gauge material
He + Ar + CO_2	Almost inert	Stainless steel and some low alloy steels	Excellent toughness; excellent arc stability, wetting characteristics, and bead contour; little spatter with short-circuiting transfer

Figura 8:Ttabella riepilogativa dei gas di protezione in base alle applicazioni

2.5.7 Materiale d'apporto

Generalmente la composizione del metallo d'apporto é simile a quella del metallo base, ma comunque c'è la possibilità che la composizione del metallo d'apporto possa essere alterata per compensare le perdite che avvengono nella saldatura o per provvedere una disossidazione ed una degasazione del bagno di fusione. In alcuni casi questo richiede piccolissime modifiche rispetto alla composizione del metallo base. Resta però la possibilità, in applicazioni particolari, la possibilità di avere un materiale d'apporto con una diversa composizione chimica rispetto a quella del metallo base per ottenere caratteristiche di saldatura soddisfacenti.

Le modifiche fatte sulla composizione dell'elettrodo, aggiungendo deossidanti o altri elementi degasanti, sono fatte per minimizzare la porosità della saldatura o per assicurare buone proprietà meccaniche della giunzione.

L'aggiunta di disossidanti è essenziale per la produzione di una saldatura con buone caratteristiche. I disossidanti più comuni usati negli elettrodi di acciaio sono il manganese, il silicio e l'alluminio; per gli elettrodi in lega di nickel sono usati il titanio ed il silicio; per gli elettrodi in lega di rame sono usati il titanio, il silicio e il fosforo.

Gli elettrodi usati sono abbastanza più piccoli di diametro rispetto a quelli usati per la saldatura ad arco sommerso o per la saldatura in filo animato. I diametri più comuni che troviamo in commercio sono: 0.8 - 1.0 - 1.2 -1.6 - 2.4 mm.

2.6 Difetti di saldatura

I difetti di saldatura sono definiti come imperfezioni formate nel cordone di saldatura, possono essere associati alla forma del cordone o alle dimensioni. I difetti possono verificarsi all'esterno o all'interno del metallo di saldatura e a volte possono essere accettati se i difetti sono sotto i limiti consentiti, ma altri difetti come le cricche non vengono mai accettati.

Le imperfezioni vengono classificate in:

- cricche;
- Incisioni marginali (Undercut);
- crateri;
- porosità;
- Fusione incompleta;
- Penetrazione incompleta;
- Penetrazione eccessiva;
- Scanalatura riempita in modo incompleto
- Eccesso di metallo di saldatura;
- spruzzi.

Al primo gruppo appartengono le cricche, cioè le imperfezioni che possono formarsi per effetti termici o a causa delle tensioni in gioco. le cricche sono il difetto più grave e temibile di un giunto saldato. Infatti una cricca, anche se di piccole dimensioni, rappresenta un alto fattore di concentrazione delle tensioni (effetto di intaglio) alle sue estremità. Si possono suddividere tra cricche a caldo e a freddo. Le cricche a caldo, chiamate così perché si formano ad alta temperatura (tra i 900°C e i 1400°C), sono relative a problemi di natura metallurgica. Le cricche a freddo, invece, sono legate all'indurimento per tempra del metallo, sotto l'azione dei cicli termici di saldatura, e alla presenza di idrogeno. Si verificano negli ultimi stadi del raffreddamento (300°C-200°C) e si trovano di solito ai bordi del cordone.

Le incisioni marginali sono una solcatura a margine del cordone, avviene quando il metallo di base si fonde formando una scanalatura. Questo tipo di difetto si presenta spesso nei cordoni eseguiti manualmente sia in giunti di testa sia in cordoni d'angolo,

più frequentemente in posizione diversa da quella piana. Le incisioni marginali sono essenzialmente causate da una tensione dell'arco molto elevata, una posizione dell'elettrodo non corretta o una eccessiva velocità di alimentazione del filo.

I crateri si verificano quando non viene eseguito un corretto riempimento prima dell'interruzione dell'arco, il che provoca un raffreddamento più rapido dei bordi esterni rispetto al centro. Questo porta ad uno stress che forma una crepa. Questo fenomeno può essere ridotto al minimo non interrompendo bruscamente l'arco alla fine di una saldatura ma far decadere gradualmente la corrente permettendo al cratere di riempirsi e raffreddare più lentamente.

Le porosità o anche inclusioni gassose sono cavità provocate da gas intrappolati nel bagno che si è solidificato troppo rapidamente. Tipicamente di forma tondeggiante e assumono la denominazione di pori. Le inclusioni gassose possono essere provocate dalla presenza, sui lembi da unire, di ossido, vernice o sporcizia in genere. Anche l'uso di elevate velocità di deposito di materiale d'apporto e un non corretto maneggio della torcia o della pinza sono causa di inclusioni gassose. Contrariamente a quanto ritenuto dalla maggior parte degli operatori di saldatura, questi difetti non sono molto pericolosi per la resistenza del giunto; in particolare una porosità diffusa nella saldatura MIG di leghe leggere è praticamente inevitabile e accettabile, mentre tali difetti diventano inaccettabili solo quando sono di grandi dimensioni o numerosi (nidi di porosità o di soffiature).

La fusione incompleta è la mancanza di coalescenza tra il metallo base e il metallo d'apporto fuso. La causa principale è da ricercarsi nella non corretta preparazione dei lembi. Talvolta nella mancanza di opportuna puntatura o di cavallotti distanziatori che evitino che i lembi si chiudano, a mano a mano che la saldatura procede, per effetto del ritiro trasversale o della scarsa abilità del saldatore.

La mancanza di penetrazione si riscontra quando la fusione dei lembi presenta delle discontinuità più o meno intermittenti. Può manifestarsi in corrispondenza della successiva ripresa, in seguito ad un'interruzione del processo, oppure distribuita su tutto il cordone se non sono stati scelti degli opportuni parametri di processo. Questo difetto implica uno sviluppo incompleto del cordone lungo la direzione trasversale alla saldatura.

L’eccesso di sovrametallo può essere dovuto alla non corretta scelta della preparazione del giunto. L’eccesso di sovrametallo non garantisce una maggiore resistenza ma, al contrario, genera ai margini del sovrametallo una concentrazione di tensioni (effetto di intaglio) che sotto certe condizioni di servizio come fatica, urti o bassa temperatura, può ridurre la capacità di resistenza del giunto. Altre cause per questo difetto sono l’uso di elettrodi con dimensioni troppo elevate oppure dovuto a correnti elevate.

Le principali cause che generano spruzzi sono un’elevata corrente di saldatura, una polarità errata e una protezione inadeguata del gas.

3 Saldatura ad arco elettrico

D'ora innanzi analizzeremo nel dettaglio la saldatura ad arco elettrico essendo la tipologia di saldatura utilizzata della commessa dell'azienda ospitante.

La saldatura ad arco elettrico è uno dei più antichi e diffusi metodi di saldatura e si definisce così per l'arco elettrico che si genera fra l'elettrodo e il metallo da saldare.

Si distinguono diversi tipi di saldature ad arco elettrico:

- Saldatura con elettrodo rivestito (SMAW);
- Saldatura ad arco sommerso (SAW);
- Saldatura con elettrodo non fusibile e bagno fuso protetto da gas (TIG);
- Saldatura con elettrodo fusibile in gas protettivo (GMAW);
- Saldatura al plasma.

Le caratteristiche comuni sono relative a:

- Calore: fornito dall'arco voltaico che scocca tra un elettrodo e i lembi dei pezzi da saldare oppure tra due elettrodi;
- Metallo d'apporto: costituito dell'elettrodo stesso oppure da una bacchetta o filo metallico a parte;
- Protezione del bagno di fusione: è realizzata da una sostanza che, fondendo, si dispone in modo da impedire il contatto tra l'aria ed il bagno di fusione, oppure, da un gas opportunamente inviato sui lembi da saldare che non reagisce con il bagno di fusione e lo isola dal contatto con l'aria.

I processi che utilizzano l'arco elettrico possono essere adoperati con diverse modalità di corrente (corrente continua o alternata) e polarità di elettrodo, provocando distinte caratteristiche di saldatura.

3.1 Saldatura ad arco con elettrodo rivestito

Il procedimento SMAW (Shielded-Metal Arc Welding) è anche conosciuto come stick welding. Come suggerisce il nome stesso questo metodo utilizza come materiale d'apporto un elettrodo rivestito di lunghezza finita. L'arco elettrico si forma tra l'estremità dell'elettrodo consumabile e la superficie del metallo da saldare. Il calore generato fa fondere anche l'estremità dell'elettrodo fornendo il metallo d'apporto alla giunzione.

Si chiama elettrodo rivestito perché la parte esterna dello stesso svolge diverse funzioni:

1. Fornisce la protezione per schermare il bagno di fusione dal contatto con l'aria;
2. Fornisce deossidanti e agenti riducenti nel bagno di fusione come metallo fuso, per deossidare e pulire la saldatura. Una volta solidificata, la scoria protegge esternamente il metallo, anch'esso solidificato, ma ancora caldo e reattivo all'interno dei giunti da saldare;
3. Provvede alla stabilizzazione dell'arco attraverso componenti facilmente ionizzanti (e.g., carbonato di litio) per aiutare l'inizio dell'arco elettrico e per mantenerlo costante e stabile nel tempo aiutando la conduzione di corrente;
4. Infine fornisce elementi leganti per raffinare, aiutare e controllare la composizione e microstruttura della saldatura, aumentando anche il tasso di deposizione di materiale d'apporto fornito dal cuore della bacchetta-elettrodo.

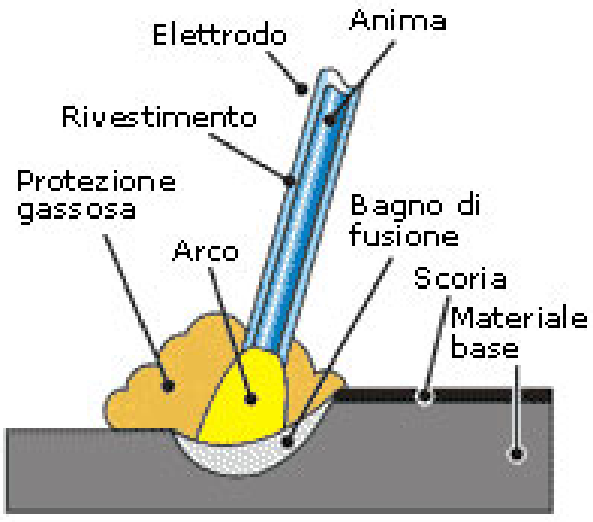


Figura 9: Saldatura ad arco elettrico con elettrodo rivestito

3.2 Saldatura con elettrodo non fusibile e bagno protetto da gas (TIG)

La saldatura TIG, Tungsten Inert Gas, anche conosciuta come saldatura GTAW, Gas Tungsten Arc Welding, è una tecnica di saldatura che prevede l'utilizzo di un elettrodo infusibile di tungsteno, da cui deriva il nome, e per la protezione del bagno richiede l'utilizzazione di un gas inerte, solitamente Argon o Elio. Inoltre in base allo spessore da saldare può esserci o meno il metallo di apporto. La potenza richiesta dal processo è tra gli 8 e i 20 kW.

È uno dei metodi più diffusi in quanto garantisce un'altissima qualità dei giunti, ma richiede l'impiego di professionisti altamente specializzati, l'elettrodo in tungsteno necessita di mantenere un'adeguata distanza dal bagno di saldatura, pena la contaminazione di quest'ultimo.

I pregi di questo metodo di lavoro sono, indubbiamente, la grande tenuta dei giunti di saldatura e la resa estetica, oltre ad un'ottima penetrazione. D'altro canto non è esente da difetti: si tratta di una lavorazione lenta e a rischio di porosità, oltre ad avere una grande difficoltà di lavorazione che richiede l'impiego di personale altamente qualificato.

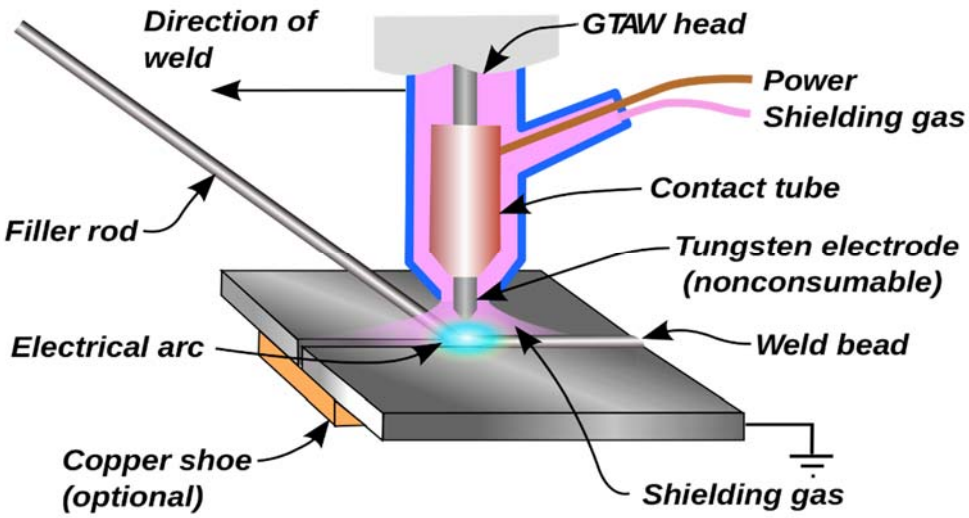


Figura 10: Apparecchiatura per saldatura TIG

3.3 Saldatura con elettrodo fusibile in gas protettivo (GMAW)

La saldatura ad elettrodo fusibile in gas protettivo prevede la doppia funzione di elettrodo e materiale d'apporto ad un filo alimentato in continuo nella zona di saldatura attraverso utilizzazione di una torcia. Dalla torcia fuoriesce anche il gas che dà origine all'atmosfera protettiva, fondamentale per ottenere un ottimo risultato.

Questo procedimento è molto versatile soprattutto per la possibilità di poter variare il gas usato per creare l'atmosfera protettiva. Per questo motivo possiamo identificare due versioni della saldatura GMAW:

- Metal inert gas (MIG): il gas che si utilizza è elio o argon o una miscela dei due, i quali non presentano attività chimiche. l'Argon garantisce un'ottima stabilità dell'arco, con conseguente regolarità nel trasferimento del materiale d'apporto, il che permette quindi una facile gestione di tutto il processo; l'Elio invece comporta un maggior apporto termico, rendendo il suo uso adatto a processi in cui sono necessarie notevoli velocità esecutive. Ovviamente una miscela dei due permetterà di ottenere delle caratteristiche "di compromesso";
- Metal active gas (MAG): Il procedimento viene detto di tipo MAG quando oltre a Elio e Argon viene utilizzata anche una percentuale di gas attivo, la cui composizione influenza chimicamente il bagno di saldatura. Nella maggior parte dei casi tali gas sono miscele di anidride carbonica, la quale permette di ottenere un bagno maggiormente caldo e penetrante, anche se a scapito della qualità del giunto; in alcuni casi specifici sono usate anche miscele di ossigeno, idrogeno o azoto.

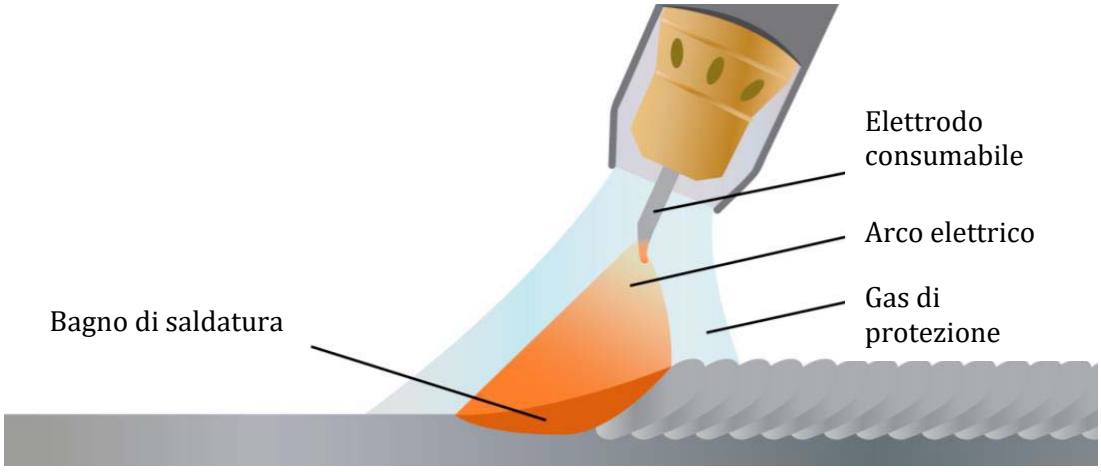


Figura 11: Saldatura ad arco con elettrodo fusibile GMAW

L'apparato di saldatura MIG e/o MAG prevede oltre al generatore di corrente e alla bombola del gas di protezione, un sistema di alimentazione per il filo/elettrodo con possibilità di variare la velocità di avanzamento. Il filo esce dall'ugello della pistola completamente circondato dal gas protettivo; in tal modo l'arco elettrico e la zona dove avviene la fusione sono completamente isolati dall'atmosfera (vedi Figura 16).

La saldatura può essere fatta manualmente: in questo caso il saldatore ha il controllo dell'inizio e della fine della saldatura tramite un pulsante sulla pistola. Può anche essere completamente automatica: in questo caso la pistola è fissa su un supporto e con dispositivi automatici viene realizzato il movimento relativo tra pistola e pezzi da saldare.

Il trasferimento del metallo d'apporto al metallo base può avvenire in vari modi, in funzione della tensione dell'arco e della corrente che lo attraversa.

- Modalità "short arc": si verifica con tensioni d'arco basse (< 20 volt) e basse correnti. Il trasferimento avviene con formazione di grosse gocce che si allungano verso il metallo base, creano un corto circuito e spengono momentaneamente l'arco; il fenomeno si ripete da 20 a 200 volte al secondo. La solidificazione del cordone di saldatura è rapida e quindi questa modalità è adatta per la saldatura in qualunque posizione e per gli spessori sottili. Ha come svantaggio la bassa deposizione oraria, quindi tempi più lunghi.

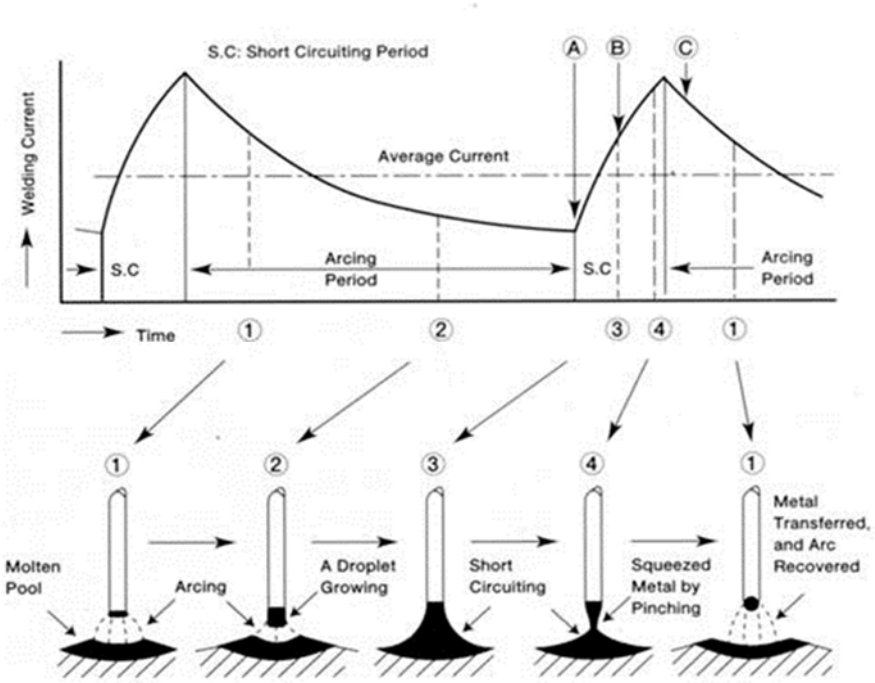


Figura 12: Short arc

- Modalità "spray arc": si verifica con tensioni d'arco superiori a 25 volt ed elevate correnti. Il trasferimento avviene sotto forma di un elevato numero di gocce di piccole dimensioni che attraversano l'arco senza spegnerlo. La fluidità del bagno di fusione è elevata, la solidificazione del cordone di saldatura lenta; per tali motivi è adatta solo per la saldatura in piano e per gli spessori grossi. Ha come vantaggio l'elevata deposizione oraria, quindi tempi di esecuzione bassi. Con questo metodo di trasferimento risulta difficile saldare spessori sottili perché si rischia di "sfondare" il giunto. In questi casi si utilizza una tecnica "Pulsata" che permette la saldatura in queste condizioni.

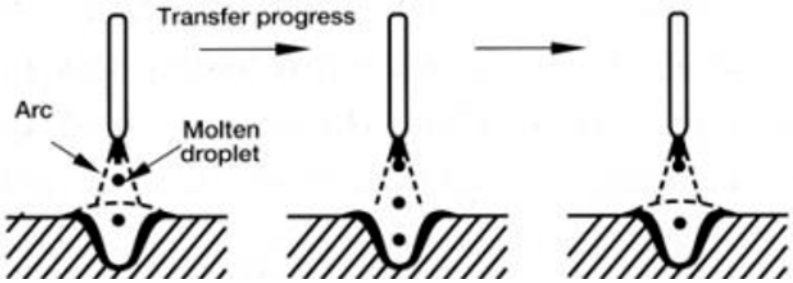


Figura 13: Spray arc

- Globular transfer: si ottiene quando il metallo è trasferito tramite gocce di grosse dimensioni e con frequenza di trasferimento più bassa rispetto alla modalità spray. Questa modalità si ottiene quando il livello di alimentazione dell'arco è insufficiente

a sviluppare adeguate forze elettromagnetiche capaci di spingere le gocce verso il metallo base, che grazie al loro significativo peso riescono ad esser deposte nel bagno di fusione per spinta gravitazionale. Tale modalità avviene quando la corrente è relativamente bassa, indipendentemente dal tipo di gas di protezione. L'arco dovrà essere abbastanza lungo da assicurare il distacco della goccia prima che essa entri in contatto con il bagno di fusione. Questo limita molto l'uso del tipo di trasferimento globulare nelle applicazioni industriali. [9]

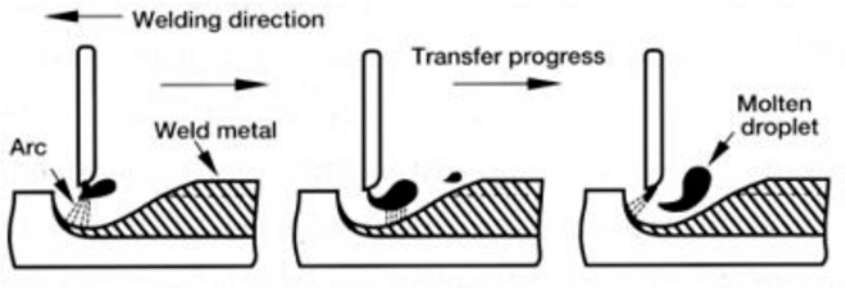


Figura 14: Globular transfer

– Pulsed arc: La corrente prodotta dal trasferimento di metallo ad arco pulsato è una corrente a doppio impulso. L'alta corrente nella modalità spray produce una buona penetrazione e fusione, mentre la bassa corrente permette un raffreddamento e un ritiro controllato. Questo metodo può essere utilizzato per eseguire saldature su un'ampia varietà di metalli. La maggior parte dei metalli può essere saldata in spessori che vanno dalla lamiera sottile alla lamiera spessa. L'alta penetrazione e le grandi caratteristiche di fusione del processo ad arco pulsato lo rendono ottimale per lavorare sull'alluminio. Il processo permette di produrre saldature a sezione spessa senza preriscaldamento sull'alluminio. [10]

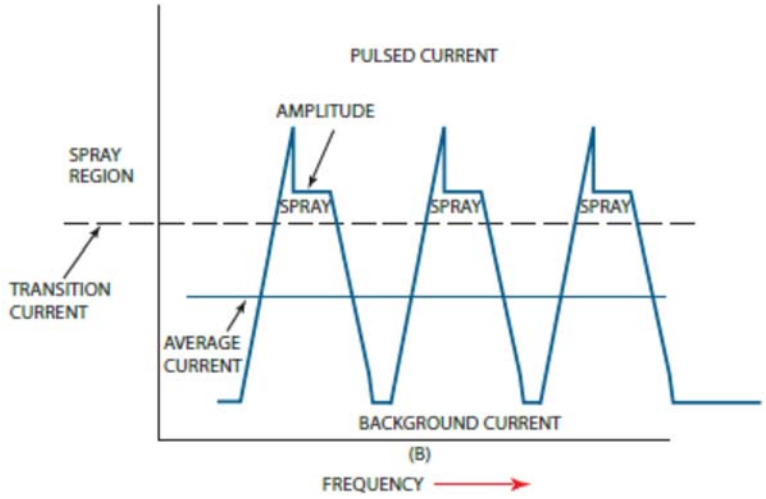


Figura 15: Pulsed arc

La saldatura MIG permette di saldare in modo semiautomatico o automatico tutte le leghe d'importanza commerciale: acciai, acciai inossidabili, leghe leggere, come leghe di alluminio o leghe del rame. La saldatura MAG si utilizza per la saldatura di acciai dolci (basso tenore di carbonio) per l'economicità del gas che utilizza.

Rispetto alla saldatura con elettrodo rivestito:

- ha una maggiore penetrazione;
- una maggiore velocità d'esecuzione per la presenza di un elettrodo continuo e per l'assenza di scoria;
- richiede una minore professionalità dell'operatore, date le caratteristiche di controllo automatico dei parametri che regolano il processo.

Per contro le macchine sono costose, meno portatili e più complesse. Non è impiegabile nelle saldature in zone difficili da raggiungere a causa delle dimensioni della torcia. La rapidità di raffreddamento del cordone dovuto all'assenza di scorie e alla corrente del gas può creare problemi nella saldatura di acciai a medio tenore di carbonio.

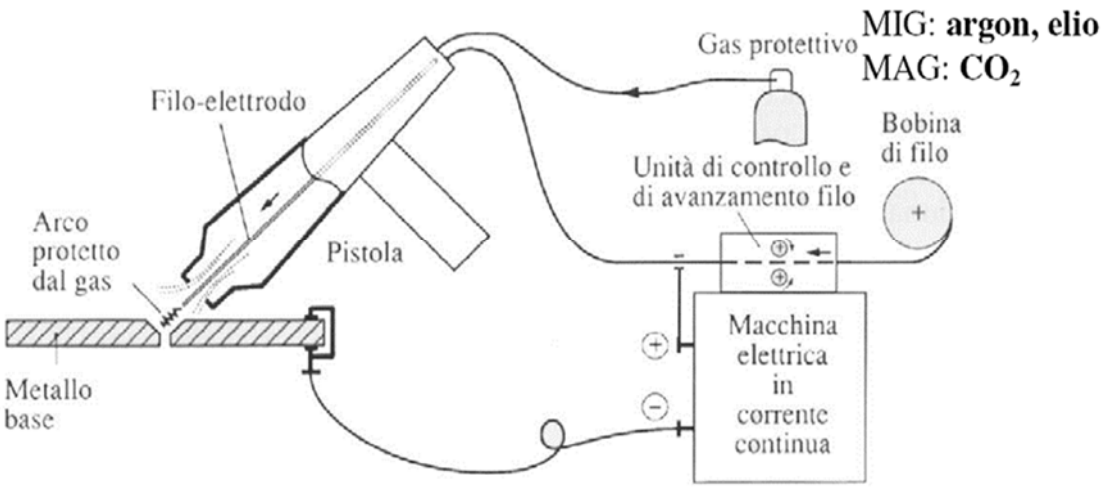


Figura 16: Schema saldatura MIG/MAG

3.4 Saldatura al plasma

La saldatura al plasma è un processo molto simile al GTAW (Gas-Tungsten Arc Welding) in quanto entrambi utilizzano un elettrodo di tungsteno infusibile per produrre l'arco voltaico. La differenza è che nella saldatura al plasma è presente l'azione convergente dei gas inerti che provoco il restringimento dell'arco. Innescando l'arco elettrico su questa colonna di gas si causa la sua parziale ionizzazione e, costringendo l'arco all'interno dell'orifizio, si ha un forte aumento della parte ionizzata trasformando il gas in plasma. Il risultato finale è una temperatura dell'arco più elevata (fino a 6.000 – 10.000 °C) a fronte di una sorgente di calore più piccola.

Esistono due diverse metodologie di saldatura al plasma:

1. Modalità in conduzione
2. Modalità Keyhole

I vantaggi di questa tecnica sono una maggior concentrazione dell'energia, una maggior penetrazione, un arco più stabile e un'alta produttività. Al contrario, però, è un processo che richiede un equipaggiamento molto costoso.

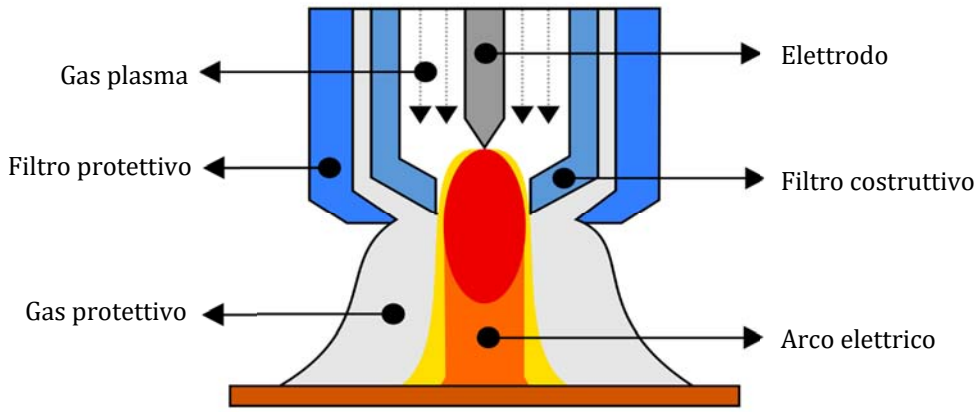


Figura 17: Saldatura al plasma

3.5 Saldatura ad arco sommerso (SAW)

L'arco elettrico che scocca tra materiale base e l'elettrodo, che in questo caso è un filo fusibile alimentato con continuità, viene totalmente coperto da un flusso granulare di silicati, ossidi e ferroleghe, depositato per gravità nella zona di saldatura il quale svolge la funzione di protezione del bagno di fusione.

Questa tipologia di saldatura ha numerosi vantaggi: previene la formazione di spruzzi e scintille, permette di utilizzare correnti elevate, da 300A a 2000A, la saldatura può penetrare profondamente nel pezzo in quanto il deposito svolge anche il ruolo di isolante termico. Inoltre cosa molto importante per la sicurezza, l'emissione di fumi e raggi UV dannosi per l'operatore è molto limitata. Mentre lo svantaggio principale di tale metodo è che il flusso granulare implica quasi esclusivamente di lavorare in piano e l'impossibilità di determinare con estrema precisione la posizione del cordone essendo totalmente coperto.

Questo metodo si presta bene ad essere automatizzato e ad avere altissimi livelli di produttività fino a 10 volte maggiori di quelli della saldatura ad elettrodo.

Figura 18: Apparecchiatura per saldatura ad arco sommerso

3.6 Tipi di giunti

Le tipologie di giunto sono determinati dalle richieste geometriche, dalle restrizioni della struttura e dal tipo di carico che esso dovrà supportare. In Figura 19 si distinguono sei tipologie di giunti, a seconda del posizionamento dei due pezzi da saldare:

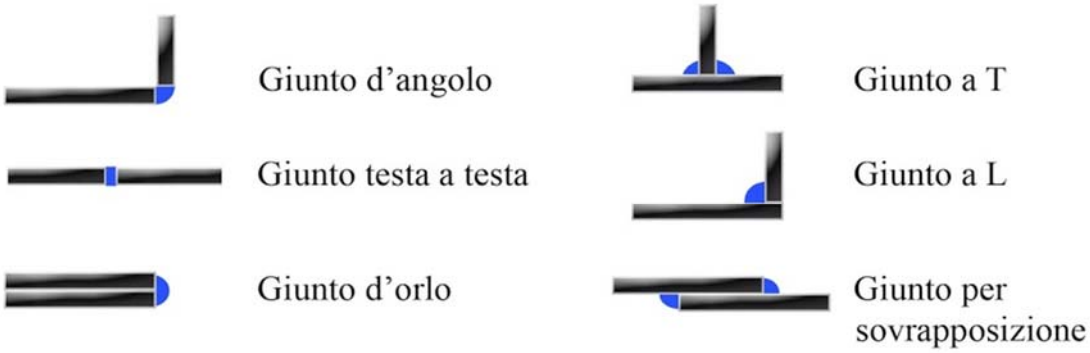


Figura 19: Tipologie di giunti

Affinché la saldatura interessi totalmente lo spessore dei pezzi, è di buona norma richiedere una preparazione dei lembi, smusso o cianfrino, entro il quale depositare uno o più cordoni in passate successive.

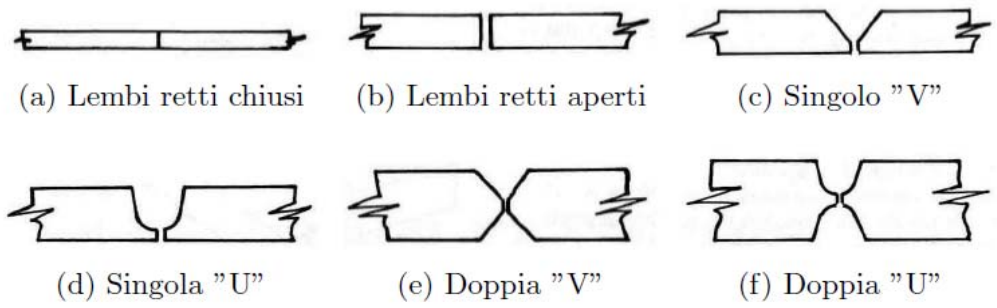


Figura 20: Alcune forme dei lembi dei giunti da saldare

Indefinitiva, la configurazione, il numero e la posizione della giunzione da saldare determina la facilità della lavorazione, costi e integrità strutturale compresa la robustezza strutturale contro la distorsione indotta sul componente dalla saldatura.

4 L’Alluminio e sue leghe

L'alluminio è un metallo particolarmente leggero, di costo modesto, duttile e malleabile, con elevata conducibilità termica ed elettrica e con buone caratteristiche di resistenza alla corrosione. Per questo motivo è utilizzato nell'industria meccanica, aeronautica, e automobilistica, per la fabbricazione di parti di aerei, di vagoni ferroviari e di veicoli a motore. Inoltre presenta notevole resistenza alla corrosione per effetto dell'acqua salata e trova quindi impiego anche nell'industria navale, per la produzione di scafi per le barche e altri mezzi acquatici. L'elevata conducibilità termica rende l'alluminio un materiale adatto alla fabbricazione di utensili da cucina, e ne permette l'impiego nei motori a combustione interna. Caratterizzato da buona conducibilità elettrica, esso viene spesso utilizzato in sostituzione del rame nella trasmissione di elevati voltaggi a lunghe distanze.

Importante è anche l'uso di alluminio sotto forma di leghe che presentano migliori caratteristiche meccaniche rispetto al metallo puro.

Le caratteristiche delle leghe di alluminio rendono tale materiale adatto alla fabbricazione di pacchi batterie, che come già detto necessitano di scambio termico per dissipare il calore dei moduli batteria al fine di garantire una vita più longeva alle stesse; la resistenza alla corrosione anche molto importante al fine di evitare l’insorgere di impurezze che potrebbero causare dei cortocircuiti interni; la leggerezza utile al fine di ridurre la massa complessiva dell’automobile già gravata dal peso sostanzioso dei vari moduli.

L'alluminio è il più abbondante costituente metallico delle rocce terrestri; si ritrova generalmente come silicato, sia solo sia mescolato con altri metalli come il sodio, il potassio, il ferro, il calcio e il magnesio, ma mai allo stato libero. Il processo di estrazione dai silicati è tuttavia complesso ed estremamente costoso, pertanto la bauxite, un ossido di alluminio (Al_2O_3), rappresenta la più importante fonte commerciale del metallo e dei suoi composti.

Le proprietà dell'alluminio puro sono:

- carico unitario di rottura (R): 60 ÷ 100 MPa;
- durezza: 15 ÷ 25 HB;
- modulo elastico (E): all'incirca 70.000 MPa;
- allungamento percentuale a rottura (A%): superiore al 40%;
- Punto di fusione: 660 °C;
- Leggerezza, densità: $\rho = 2700\ kg/m^3$;
- Ottima fusibilità;
- Malleabilità e duttilità a caldo e a freddo;
- Ottima truciolabilità;
- Buona resistenza alla corrosione;
- Scarsa resistenza meccanica.

La resistenza meccanica dell'alluminio puro può essere notevolmente migliorata per incrudimento (tramite deformazione plastica a freddo), attraverso cui è possibile aumentare il carico unitario di rottura di una volta e mezzo. [11]

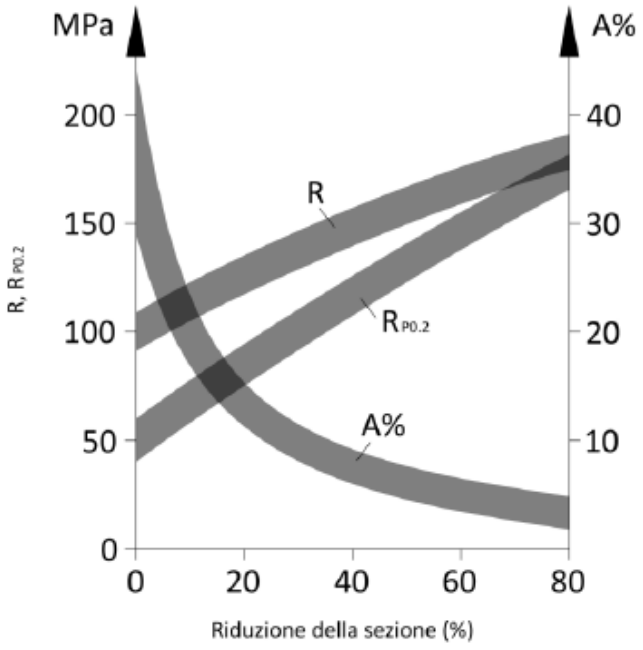


Figura 21: Andamento di R e di A% in seguito all'incrudimento per deformaizione plastica a freddo

4.1 Influenza degli elementi leganti sull'alluminio:

A causa delle sue mediocri proprietà meccaniche, gli impieghi industriali dell'alluminio puro sono ridotti a pochi casi particolari che si riferiscono alla realizzazione di conduttori elettrici, fogli per la conservazione di alimenti, alla fabbricazione di impianti chimici, scambiatori di calore, conduttori e condensatori elettrici, corpi riflettenti ed applicazioni architettoniche e decorative.

Le scarse proprietà meccaniche dell'alluminio puro ne hanno da sempre impedito un ampio utilizzo in ambito industriale, dove invece trovano largo impiego le sue leghe. Le leghe dell'alluminio, chiamate leghe leggere, sono suddivise in leghe da fonderia e leghe da lavorazione plastica.

I principali elementi di alligazione utilizzati nelle leghe commerciali sono il rame, il magnesio, il silicio, il manganese, lo zinco, e il ferro. Gli effetti di tali elementi sulle proprietà dell'alluminio sono:

Rame: Aumenta in proporzione alla quantità la resistenza meccanica e la durezza. Migliora la lavorabilità alle macchine utensili. Diminuisce la resistenza alla corrosione.

Magnesio: Aumenta la resistenza meccanica e la durezza. Migliora la lavorabilità alle macchine utensili, la duttilità e la resistenza alla corrosione. Aumenta il ritiro dei getti.

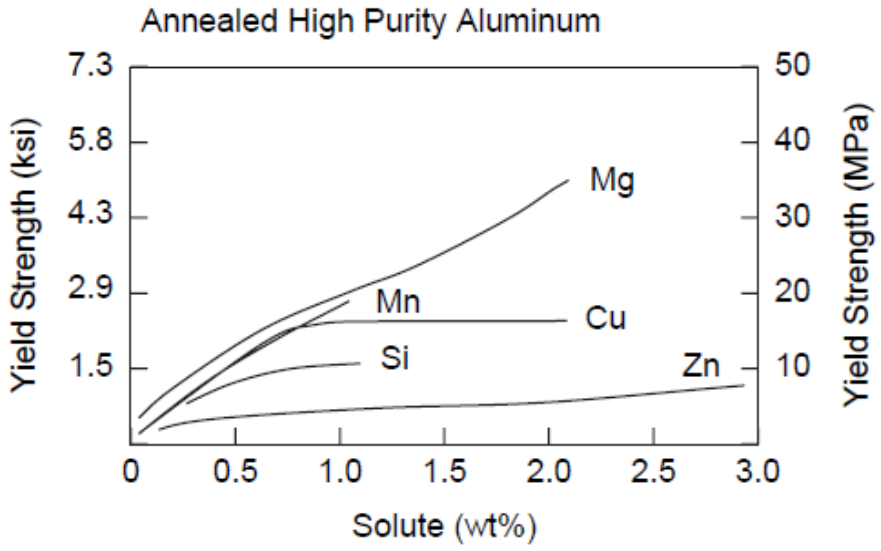


Figura 22: Effetto degli elementi leganti sulle caratteristiche meccaniche delle leghe di Al

Silicio: Aumenta la resistenza meccanica. Forte diminuzione della lavorabilità alle macchine utensili. Diminuisce di poco la resistenza alla corrosione.

Manganese: Aumenta la resistenza meccanica e la resilienza. Migliora la duttilità e la resistenza alla corrosione.

Zinco: Aumenta la resistenza meccanica e la deformabilità. Forte diminuzione della resistenza alla corrosione. Aumenta la fragilità a caldo. Rende la lega autotemprante.

Ferro: Aumenta le proprietà meccaniche anche a caldo. Riduce la fragilità a caldo. Favorisce il distacco dallo stampo dei prezzi pressofusi.

L'aggiunta degli elementi di lega permette di migliorare in modo considerevole la resistenza a trazione, che può superare quella degli acciai dolci, rendendo le leghe di alluminio adatte anche per impieghi strutturali.

Inoltre, l'aggiunta di elementi leganti può peggiorare la saldabilità e la resistenza a corrosione, come mostrato in Figura 24. [12]

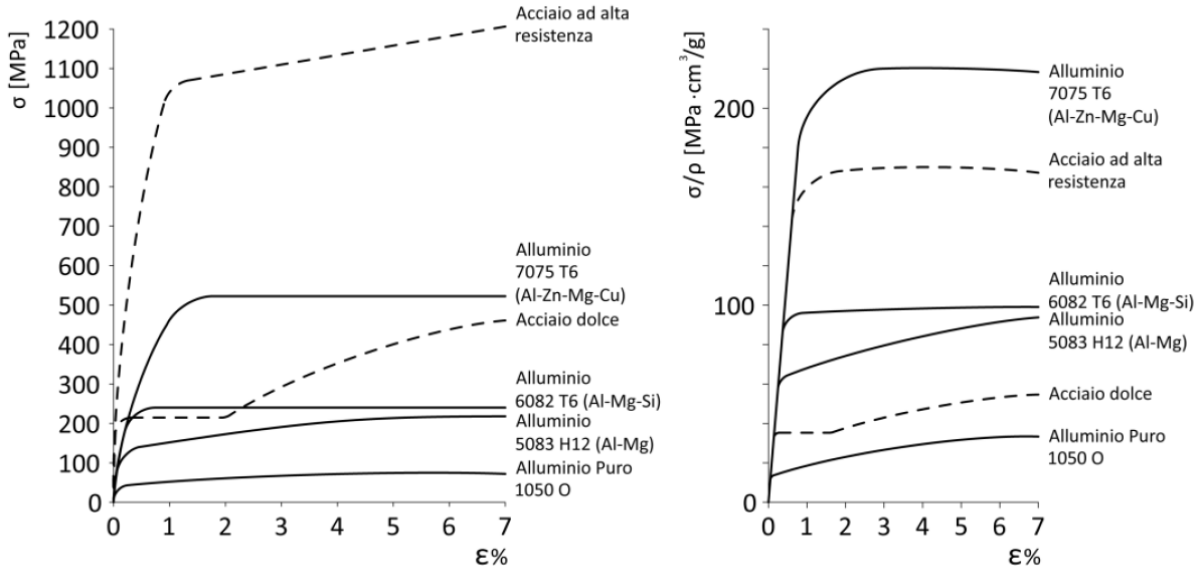


Figura 23: Confronto caratteristiche meccaniche tra leghe d'alluminio e acciai

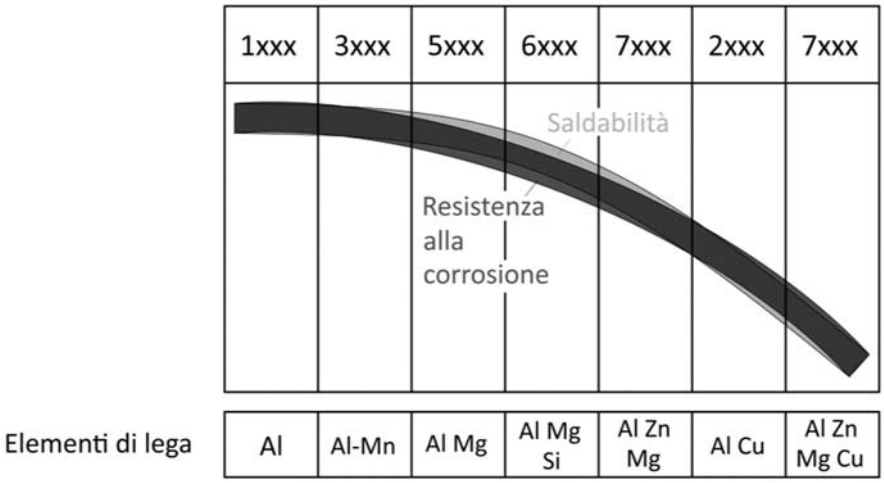


Figura 24: Andamento della resistenza alla corrosione e della saldabilità in funzione degli elementi presenti nella lega di Al

4.2 Nomenclatura

Le leghe dell'alluminio, chiamate leghe leggere, sono suddivise in leghe da fonderia e leghe da lavorazione plastica.

È possibile distinguere diverse classi di appartenenza in base agli elementi principali costituenti la lega di alluminio:

Serie di appartenenza per leghe di alluminio da fonderia

Serie	Contenuto di alluminio o elemento di lega principale
1xx.0	99.00% minimo
2xx.0	Rame
3xx.0	Silicio, rame, magnesio
4xx.0	Silicio
5xx.0	Magnesio
6xx.0	Silicio e magnesio
7xx.0	Zinco
8xx.0	Titanio
9xx.0	Altri elementi

Denominazione per le leghe da fonderia (UNI EN 178-2)

- il prefisso EN;
- la lettera A che indica alluminio;
- la lettera C che indica per getti;
- il simbolo chimico dell'alluminio Al;
- i simboli degli elementi in lega seguiti, ognuno, da numeri che esprimono il tenore, in percentuale in massa, riportati in ordine decrescente;

Esempio: EN AC-Al Si 13.

Serie di appartenenza per leghe di alluminio per deformazione plastica

Serie	Contenuto di alluminio o elemento di lega principale
1xxx	99.00% minimo
2xxx	Rame
3xxx	Manganese
4xxx	Silicio
5xxx	Magnesio
6xxx	Magnesio e silicio
7xxx	Zinco
8xxx	Altri elementi
9xxx	Non usata

Denominazione per le leghe da lavorazione plastica (UNI EN 573-2)

- il prefisso EN;
- la lettera A che indica alluminio;
- la lettera W che indica prodotti semilavorati;
- il simbolo chimico dell'alluminio Al;
- i simboli degli elementi in lega seguiti, ognuno, da numeri che esprimono il tenore, in percentuale in massa, riportati in ordine decrescente;

Esempio: EN AW- Al Mg 5.

[13]

Stati metallurgici di base dell'alluminio

Alla fine della denominazione separato da un trattino possiamo trovare delle lettere che indicano lo stato metallurgico di base con il quale il venditore ci fornisce l'alluminio.

F – grezzo di fabbricazione: si applica ai semilavorati derivati da processi di trasformazione plastica nei quali non viene esercitato nessun controllo delle condizioni termiche o dell'incrudimento.

O – ricotto: si applica ai semilavorati che vengono ricotti per ottenere lo stato di minima resistenza meccanica.

- O1: ricotto ad alta temperatura e raffreddato lentamente: viene in genere applicati a prodotti che devono essere lavorati meccanicamente prima del trattamento di solubilizzazione;
- O2: Sottoposto a trattamento termomeccanico. Usato su semilavorati che verranno sottoposti a formatura superplastica prima del trattamento di solubilizzazione;
- O3: Omogeneizzato.

H – incrudito: si applica ai semilavorati sottoposti a lavorazione plastica a freddo dopo ricottura.

- H1X: soltanto incrudito;
- H2X: incrudito e parzialmente ricotto. Si applica ai semilavorati che sono incruditi più dell'entità finale desiderata e di cui poi viene ridotta la resistenza meccanica al livello voluto mediante ricottura parziale;
- H3X: incrudito e stabilizzato. Si applica ai semilavorati che sono incruditi e le cui caratteristiche meccaniche vengono stabilizzate mediante trattamento termico a bassa temperatura. La stabilizzazione migliora la duttilità;
- H4X: incrudito e laccato o verniciato. Si applica ai semilavorati che sono incruditi e che possono essere ricotti parzialmente durante l'operazione di laccatura e/o verniciatura.

W – solubilizzato: descrive uno stato metallurgico instabile. Si applica esclusivamente alle leghe che invecchiano naturalmente a temperatura ambiente dopo trattamento

termico di solubilizzazione. Assume un significato definito solo se viene indicata la durata di invecchiamento naturale. Es.: W 0,5 h.

T – trattato termicamente

Per trattamento termico o T.T. si intende una successione di operazioni mediante le quali un metallo od una lega metallica sono soggetti ad uno o più cicli termici (riscaldamento, permanenza a temperatura, raffreddamento), al di sotto del punto o dell'intervallo di fusione e in ambiente di natura determinata, nell'intento di impartire loro determinate proprietà. Il riscaldo che precede le operazioni di deformazione plastica (fucinatura, laminazione ecc.) non è un trattamento termico.

Il trattamento termico comprende tre operazioni essenziali che lo caratterizzano:

- Riscaldo.
- Permanenza in temperatura.
- Raffreddamento.

Ognuna di queste operazioni è dipendente da due variabili fondamentali, tempo e temperatura. È nell'ambito delle variabili di questi due parametri e del loro rapporto (velocità di variazione di temperatura) che è possibile indurre nelle leghe tutte le possibili trasformazioni strutturali. Infatti riscaldi e raffreddamenti molto lenti, lunghe permanenze tenderanno a creare strutture di equilibrio, stabili a temperatura ambiente e senza tensioni interne, per cui si parlerà di ricotture, mentre variazioni veloci di temperatura, soprattutto nel raffreddamento creeranno strutture instabili, facilmente decomponibili con forti tensioni interne sia a livello reticolare che macroscopico, per cui si parlerà di tempra.

Da questo punto di vista, nel campo delle leghe di alluminio i trattamenti termici possono essere classificati in tre grandi categorie:

1. **Trattamenti di ricottura**

I trattamenti di ricottura tendono a portare la lega in condizioni di equilibrio chimico e strutturale secondo i diagrammi di stato relativi. In base alle condizioni di partenza del materiale e dei risultati che si vogliono ottenere si va ad agire in sui due parametri tempo e temperatura.

2. Trattamento di tempra

La tempra consiste in un raffreddamento rapido della lega da una temperatura determinata fino alla temperatura ambiente. Quasi sempre si parte da una temperatura tale da far entrare in soluzione, nella matrice di alluminio, determinati composti ed elementi che costituiscono la lega. Tale soluzione si ritrova, se il raffreddamento è stato sufficientemente rapido, a temperatura ambiente in condizioni di metastabilità. Si parla in questo caso di tempra di soluzione.

3. Invecchiamento

L'invecchiamento tende a far precipitare in forma più o meno microscopica i composti o gli elementi che si trovano in soluzione solida sovrassatura. L'invecchiamento può essere: naturale, se avviene a temperatura ambiente; artificiale, se avviene a temperature superiori ai 100°C fino ad un massimo di 220°C.

- T1: raffreddato dopo lavorazione plastica a caldo e invecchiato naturalmente fino a una condizione sostanzialmente stabile;
- T2: raffreddato dopo lavorazione plastica a caldo, deformato plasticamente a freddo e invecchiato naturalmente fino a una condizione sostanzialmente stabile;
- T3: solubilizzato, deformato plasticamente a freddo e invecchiato naturalmente fino a una condizione sostanzialmente stabile;
- T4: solubilizzato e invecchiato naturalmente fino a una condizione sostanzialmente stabile;
- T5: raffreddato dopo lavorazione plastica a caldo e invecchiato artificialmente;
- T6 solubilizzato e invecchiato artificialmente;
- T7: solubilizzato e invecchiato/stabilizzato;
- T8: solubilizzato, lavorato plasticamente a freddo e invecchiato artificialmente;
- T9: solubilizzato, invecchiato artificialmente e poi lavorato plasticamente a freddo.

[14]

4.3 Saldabilità dell'alluminio

Le connessioni realizzate nelle fasi di assemblaggio fra le diverse componenti di una struttura complessa, come può essere ad esempio un pacco batteria, devono essere in grado non soltanto di assicurare quei valori di resistenza determinati in fase di progetto, ma anche e soprattutto di mantenerli costanti durante tutta la vita della struttura.

L'alluminio e le sue leghe, pur se in diversa misura a seconda della composizione e delle caratteristiche fisiche e meccaniche, sono in genere saldabili. Tuttavia la saldatura di questi materiali presenta specifici inconvenienti che richiedono accorgimenti e tecniche particolari. Basti pensare al fatto che non tutti i procedimenti di saldatura sono applicabili indistintamente alle varie leghe.

Le principali problematiche che, sino ad oggi, hanno caratterizzato la saldatura dell'alluminio e delle sue leghe sono imputabili alle proprietà chimiche e fisiche del materiale, e consistono principalmente nei seguenti elementi:

- elevato coefficiente di dilatazione termica lineare;
- elevata conducibilità termica;
- formazione di ossidi superficiali;
- formazione di difetti di saldatura, quali cricche, porosità ed inclusioni;
- presenza di tensioni residue;
- elevate possibilità di distorsioni del giunto saldato.

Il coefficiente di espansione termica lineare delle leghe di alluminio, risulta essere circa il doppio rispetto ai valori di un acciaio tradizionale. Questo fenomeno durante una saldatura per fusione è molto marcato date le temperature raggiunte, le quali sono più elevate rispetto ad esempio ad una saldatura per attrito. Risulta così opportuno eseguire, prima della saldatura vera e propria, un'operazione di puntatura, effettuando dei punti di saldatura lungo i lembi del giunto al fine di bloccare i componenti da saldare e rendere il processo il più stabile possibile evitando possibili imbarcamenti del giunto saldato. Per le leghe di alluminio l'elevato valore della conducibilità termica comporta durante la saldatura, la possibilità di avere una zona termicamente alterata piuttosto estesa. Questa peculiarità comporta un possibile scadimento delle proprietà meccaniche del giunto che possono essere recuperate soltanto in seguito ad opportuni trattamenti termici.

È noto che l'alluminio e le sue leghe, in presenza di aria, si passivizzano. Ovvero hanno la tendenza a formare immediatamente uno strato di ossido sulla superficie, denominato allumina (Al_2O_3). È opportuno rimuovere questo strato di ossido prima di sottoporre l'alluminio ad un processo di saldatura per fusione. Infatti l'ossido Al_2O_3 fondendo a circa 2050°C, valore molto più alto della temperatura di fusione del metallo base, può rimanere intrappolato allo stato solido all'interno del bagno fuso causando gravi conseguenze: tra esse ricordiamo a titolo di esempio la perdita di duttilità, la formazione di cricche e la presenza di zone in cui non si raggiunge la perfetta fusione. La rimozione può essere fatta meccanicamente attraverso operazioni di smerigliatura, limatura e raschiatura oppure tramite pulitura chimica, con l'ausilio di opportuni solventi. Sulla base di quanto detto si comprende immediatamente come durante una operazione di saldatura l'ossidazione deve necessariamente essere prevenuta, e ciò può essere fatto proteggendo l'intera area interessata alla fusione e al riscaldamento tramite gas inerti e flussi antiossidanti, oppure con l'utilizzo di opportuni rivestimenti. Qualora si utilizzino dei gas, la scelta ricade su elio o argon, o una miscela dei due.

Le tensioni residue sono sforzi che si manifestano nei giunti saldati per effetto dell'applicazione localizzata del calore. Esse hanno la caratteristica, da qui il loro nome, di permanere nel giunto anche quando questo è stato ultimato, quando cioè questo si è definitivamente raffreddato. In altre parole le tensioni residue, anche dette tensioni interne o bloccate, sono degli sforzi presenti all'interno del pezzo quando da questo sono stati eliminati tutti i carichi esterni. Tale problema si verifica particolarmente nelle saldature dell'alluminio per le tipiche caratteristiche fisiche che questo metallo presenta, come l'elevato coefficiente di espansione termica lineare, l'elevata conducibilità termica, ma anche il basso modulo di elasticità normale. Tutto questo si traduce, a parità di tecnica di saldatura, in restringimenti superiori a quelli dell'acciaio, proprio perché il calore generato si dissipa più rapidamente. I restringimenti trasversali e longitudinali sono principalmente causati dalla contrazione del metallo base adiacente a quello saldato: durante la saldatura, infatti, tale metallo subisce un'espansione termica e successivamente, nella solidificazione del cordone, subisce un restringimento che è responsabile del fenomeno di distorsione.

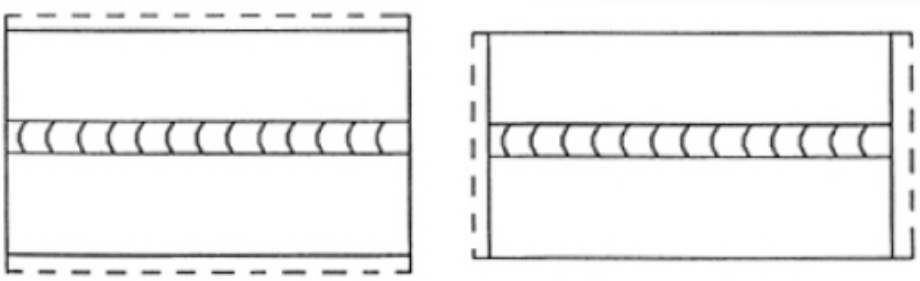


Figura 25: Restringimenti/distorsione trasversale e longitudinale

Altre cause che determinano restringimenti non uniformi sono le distorsioni angolari, ossia la rotazione delle piastre intorno all'asse di saldatura. Quando due piastre vengono saldate, i lati opposti, cioè quelli che non vengono saldati, si muovono generando una distorsione angolare. In molti casi pratici poi, la causa di questa tipologia di distorsioni è imputabile al non corretto posizionamento dei dispositivi di serraggio. Questi, infatti, quando non sono distribuiti uniformemente lungo il giunto possono certamente esercitare una forte pressione in grado di evitare elevati restringimenti trasversali, ma allo stesso tempo possono provocare distorsioni angolari.

Figura 26: Distorsioni angolari

Sono due i principali tipi di saldatura ad arco usate per le varie leghe di alluminio.

-Saldatura MIG: saldatura ad arco con atmosfera protettiva inerte e filo di alimentazione continuo. Il flusso di gas inerte, l'argon, protegge l'alluminio dall'ossidazione riducendo, così, i rischi di corrosione ed i conseguenti danni alla resistenza meccanica.

-Saldatura TIG: saldatura ad arco con atmosfera protettiva inerte ed elettrodo infusibile. È adatta alla realizzazione di giunti fra lembi di spessore ridotto. Offre le medesime garanzie della saldatura MIG.

-Serie 1000: la saldabilità è buona. È necessario usare materiali d'apporto di uguale purezza della base per mantenere la continuità elettrica. Per le leghe commerciali 1060 e superiori la scelta usuale è 1100.

-Serie 2000: le leghe di tale serie non sono saldabili ad arco perché presentano un elevato intervallo di solidificazione che comporta la formazione di cricche a caldo. Se è necessaria una saldatura, conviene usare il procedimento di saldatura a resistenza. La lega 2219 (6.3% Cu) è saldabile ad arco, il materiale d'apporto consigliato è il 2319.

-Serie 3000: la saldabilità è da mediocre a buona. Per i materiali d'apporto si consiglia il 4043, ma si ottengono buoni risultati anche con il 1100.

-Serie 4000: il silicio aggiunto fino a tenori del 12% produce una diminuzione dell'intervallo di temperatura in cui avviene la solidificazione. Per questo motivo le leghe della serie 4000 vengono usate come materiale d'apporto sia per leghe da incrudimento, sia per leghe da trattamento termico. In quest'ultimo caso il materiale d'apporto può assorbire dei costituenti dal materiale base ed essere, dunque, sensibile ai trattamenti termici post-saldatura.

-Serie 5000: la saldabilità è da buona ad eccellente poiché è limitata la riduzione delle caratteristiche meccaniche nella zona termicamente alterata. Ci sono problemi di cricche a caldo per tenori dall' 1% al 3% di magnesio; i danni possono essere limitati scegliendo materiali d'apporto opportuni (5356, 5183, 5556) che contengano una percentuale di titanio avente la capacità di affinare il grano. È utilizzata anche la 4043 ma c'è un calo di resistenza rispetto al materiale base.

-Serie 6000: sono di facile saldabilità. La 6082 (Al-Mg-Si-Mn) ha elevata saldabilità. Con tenori dell'1% di magnesio e dell'1% di silicio si ha un massimo di formazione di cricche a caldo. I materiali d'apporto consigliati sono il 4043 ed il 5356.

-Serie 7000: le leghe Alluminio-Zinco-Magnesio (7020, 7005, 7003) hanno buona saldabilità. Vi è recupero delle caratteristiche meccaniche nella zona termicamente alterata senza bisogno di ritrattamento termico completo. Il materiale d'apporto consigliato è il 5350. Le leghe Alluminio-Zinco-Magnesio-Rame (7075, 7012) non sono saldabili perché presentano il fenomeno delle cricche a caldo; nella zona termicamente alterata, inoltre, presentano caratteristiche meccaniche estremamente ridotte rispetto al materiale di partenza. Queste leghe sono da scartare se prevista la saldatura.

-Serie 8000: possono essere saldate; il materiale d'apporto consigliato è il 2319. [15]

5 Caso studio

Negli ultimi anni il mercato dell'automotive sta cambiando, le normative antinquinamento imposte dall'unione europea sta spingendo i costruttori di automobili a sviluppare sempre più automobili elettriche o ibride. Entrambe hanno l'esigenza di avere una batteria o meglio una serie di batterie raggruppate in un unico contenitore per collegarle tra loro e garantire i kWh per lo stoccaggio dell'energia elettrica.

È stato proprio questo il mio primo lavoro da seguire, il primo progetto da realizzare, un pacco batterie per una nota casa automobilistica italiana.

L'obbiettivo del mio lavoro è stato quello di studiare il processo produttivo del pacco batteria in questione e mettere in atto una serie di controlli per far sì che il prodotto finito rispetti i requisiti di qualità richiesti dal cliente.

I controlli di qualità iniziano già all'arrivo dei materiali grezzi, con analisi chimiche e radiografie dei componenti ricavati per fusioni per garantire la qualità dei materiali utilizzati. Terminato l'assemblaggio segue la lavorazione su macchina utensile, spianatura, foratura, filettatura e poi il controllo dimensionale su macchina di misura per assicurarsi la correttezza delle lavorazioni precedenti. Infine verifichiamo l'integrità del pacco batteria con una prova in pressione.

Solo se tutte prove restituiscono esito positivo i componenti possono essere spediti, e come vedremo più avanti con i primi esemplari ci sono state varie complicanze che hanno richiesto molto tempo, ricerca e modifiche nel progetto.

5.1 L'azienda ospitante

L'Eurodies Italia s.r.l. è stata l'azienda che mi ha dato l'opportunità di entrare nel mondo del lavoro e di avviare questo progetto di tesi in azienda nonostante il periodo di pandemia e forte crisi.

In Eurodies si produce e assemblano componenti in lamiera per prototipi e piccole serie di automobili e altri veicoli stradali. Lo stabilimento di 25.000 m^2 è situato ad Avigliana in provincia di Torino, dove al suo interno viene valorizzata la maestria delle persone che ci lavorano, adattando le tecnologie più all'avanguardia alle esigenze dei clienti. Ogni progetto viene affrontato con rigore e creatività che hanno caratterizzato la storia della manifattura italiana su misura. Per ogni ordine viene dedicato un team, una piattaforma tecnologica e un referente per supportare il cliente in ogni fase di sviluppo. Sono 170 le persone che ci lavorano, tutti si conoscono e tutti sono impegnati nella risoluzione dei problemi e nel miglioramento continuo, ognuna consapevole del valore e della responsabilità del proprio ruolo.

Inoltre Eurodies soddisfa gli elevati standard di qualità richiesti dalle certificazioni di fabbricazione come ISO 14001: 2004, OHSAS 18001: 2007, ISO 9001: 2008, ISO TS 16949: 2009 - e rispetta i requisiti di responsabilità sociale obbligatori per lo standard internazionale SA 8000.

5.1 Materiali utilizzati

Per la realizzazione della commessa del pacco batterie si è usato esclusivamente materiale in lega di alluminio, fusioni, estrusi e fogli di alluminio.

La scelta dei progettisti di realizzare interamente il pacco batteria in alluminio, anziché in acciaio come molti della concorrenza, è stata quella di sfruttare la sua bassa densità per impattare il meno possibile sulla massa totale del veicolo. È vero anche che le proprietà meccaniche dell'alluminio sono più scarse rispetto agli acciai, ma oggi con la padronanza dei trattamenti termici questo non rappresenta più un problema e si riesce a migliorare le proprietà desiderate. Riuscire ad avere un pacco batterie più leggero si ottiene a parità di kWh disponibili, un'autonomia maggiore. Questo può essere tradotto in un risparmio di energia prodotta alla fonte e di conseguenza meno emissioni in atmosfera. L'assemblaggio dell'intero case è avvenuta mediante saldatura di tipo MIG della quale si è parlato precedentemente.

5.1.1 Materiali di base

La maggior parte della componentistica che costituisce il pacco batteria in questione deriva da un processo di estrusione. L'estrusione è un processo di produzione industriale di deformazione plastica che consente di produrre pezzi a sezione costante (ad esempio tubi, barre, profilati, lastre). In Figura 27 possiamo osservare due elementi appartenenti al pacco batterie, sono barre cave con particolari nervature all'interno perciò il processo di estrusione risulta fondamentale per la loro produzione.

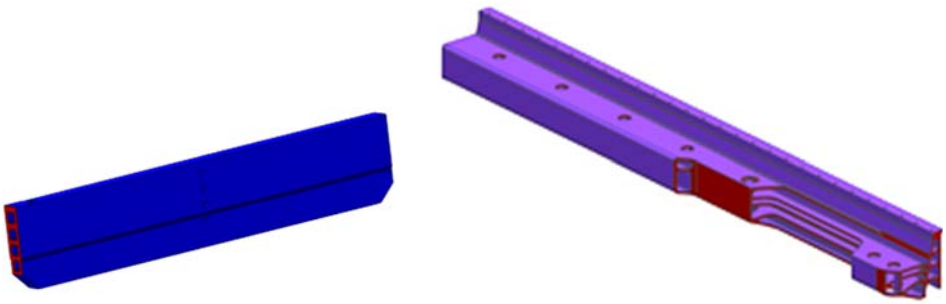


Figura 27: Esempio di due parti realizzate per estrusione

La lega impiegata per tali profili è la lega di alluminio Al 6063 con trattamento termico T6, ovvero solubilizzazione e successivo invecchiamento artificialmente. Nella *Figura 29* sono elencate le caratteristiche meccaniche, fisiche e chimiche di tale lega.

Mentre in *Figura 28* troviamo i valori di resistenza, di allungamento e di durezza minimi che la lega in questo caso deve possedere per soddisfare i requisiti di progetto.

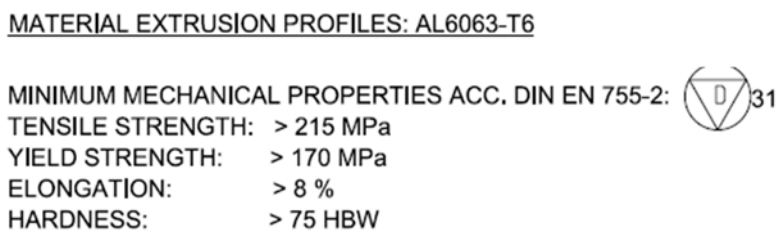


Figura 28: Caratteristiche meccaniche minime per profili estrusi

Lega	Modulo di elasticità (N/mm^2)*	Coefficiente di dilatazione termica lineare ($1/K \times 10^6$)	Conducibilità termica (W/m x K)	Conducibilità elettrica ($m/\Omega \times mm^2$)	Intervallo di fusione (°C)	Peso specifico (g/cm^3)	Coefficiente correttivo del peso teorico
EN AW-6063	69.000	23,0	200	32	>605	2,70	1,00

Lega	Stato		Carico di rottura Rm (N/mm^2)		Limite di snervamento Rs 0,2 (N/mm^2)	Allungamento a rottura A5/A50 (%)	Durezza Brinell (HB)
6063	T6		120-230		65-200	6-17	50-80

Designazione numerica	Stato fisico	Lavorabilità plastica a freddo	Lavorabilità all'utensile	Saldabilità (gas inerte/scintillio)	Lucidabilità	Attitudine alla ossidazione anodica		Resistenza alla corrosione	
						protettiva	decorativa	in atmosfera normale	in atmosfera marina e industriale
6063	T6	4	3	2	2	2	2	2	2

1 ottima; 2 buona; 3 sufficiente; 4 mediocre; 5 insufficiente; 6 sconsigliata

Lega	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Osservazioni	Altri elementi
EN AW-6063	0,20-0,60	0,35	0,10	0,10	0,45-0,90	0,10	/	0,10	/		0,15

Figura 29: Caratteristiche delle leghe Al 6063-T6 [20]

Per verificare la correttezza della lega ricevuta è di buona prassi analizzare alcuni campioni all'arrivo. Confrontando i dati di *Figura 29* e *Figura 30* è possibile affermare che il materiale appartiene effettivamente alla lega Al 6063-T6 come richiesto.

Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Cr%	Ni%	Zn%	Ti%	V%	Pb%	Al%
0,52	0,35	0,1	0,09	0,53	0,11	/	0,1	0,012	0,01	0,001	Remainder rest

Figura 30: Analisi chimica effettuata sui profilati estrusi

Componenti ricavati per fusione: Lega Alluminio AlSi9MgMn-F - T64

Le due parti come l'esempio presenti in Figura 32 presentano una geometria abbastanza complessa per la presenza di molte nervature sulla superficie, e il metodo più rapido e più efficiente è senz'altro la formatura per colata. In particolare si è usata la colata in sabbia. Il processo della colata in sabbia prevede una prima fase di creazione di un modello di materiali vari, attorno a cui sarà costruita la forma. Le forme utilizzate per la colata sono definite a perdere perché dopo l'uso vengono distrutte. Sono costituite in genere di materiali refrattari o di sabbie compattate. Solitamente, è previsto un piano di simmetria per l'apertura corretta della stessa senza danneggiare il modello. Approntata la forma, con tutte le necessarie anime e incavi per la geometria richiesta, si passa alla fase di iniezione per gravità del liquido (metallo fuso). Dopo la solidificazione il pezzo deve essere ripulito dalle incrostazioni e dai residui della fusione.

I prodotti della colata in sabbia sono generalmente dei semilavorati, da destinare ad ulteriori processi di produzione industriale, quali ad es. la forgiatura o la laminazione, oppure varie lavorazioni meccaniche ad asportazione di truciolo. [16]

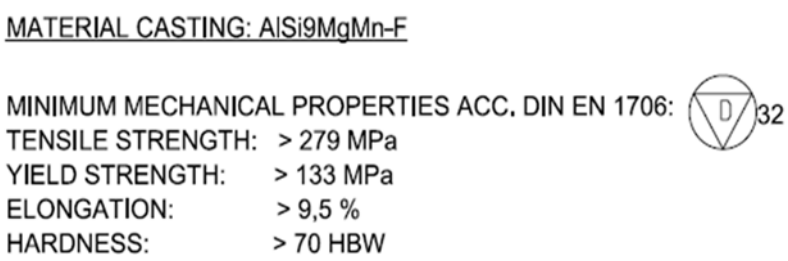


Figura 31: Caratteristiche meccaniche minime per componenti ricavati da fusione

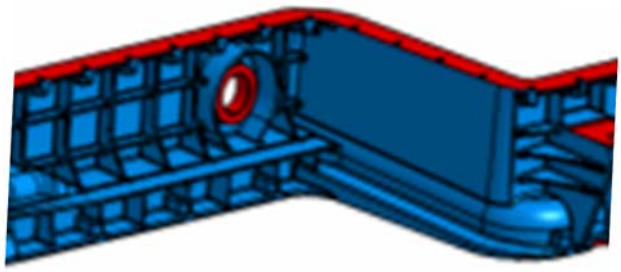


Figura 32: Esempio di una parte ricavata attraverso processo di fusione

Componenti ricavati per laminazione Lega Alluminio AA-6000-HS170

Per laminazione si intende il processo meccanico utilizzato per ridurre la dimensione meno significativa in una lastra di metallo, solitamente lo spessore. Mediante dei cilindri contrapposti che ruotando su sé stessi si imprime al materiale una certa riduzione di spessore. Il processo comprende solitamente più passaggi, in ognuno dei quali i rulli sono posizionati più vicini tra loro.

Esistono diverse tipologie di laminazione:

- laminazione a caldo.
- laminazione a freddo.

Nella laminazione a caldo il materiale subisce un minore incrudimento, dovuto alla maggiore velocità di ricristallizzazione della struttura, con conseguente minore lavoro e spesa di energia. Al contrario, per la presenza di fenomeni di ritiro, la lavorazione tende ad essere meno precisa e con una finitura superficiale minore.

Nella lavorazione a freddo si incrudisce il materiale, aumentando la sua resistenza, ma con maggiore lavoro e dispendio energetico. Si riescono però ad ottenere pezzi più rifiniti e precisi. [17]

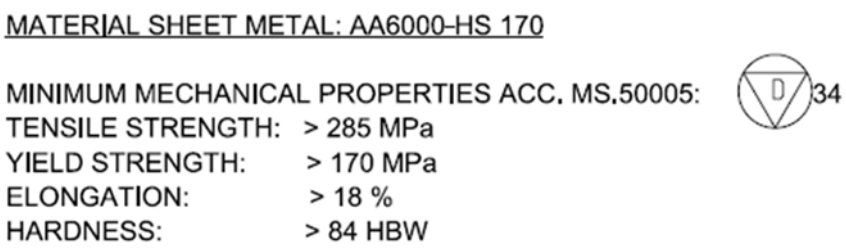


Figura 33: Caratteristiche meccaniche minime per i laminati

Analisi chimica effettuata:

Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Cr%	Zn%	Ni%	Ti%	V%
6,818	0,229	0,007	0,01	0,3299	0,044	0,004	0,052	0,159
Pb%	B%	Ca%	Co%	Sr%	Sb%	Zr%	P%	Al%
0,008	0,007	0,001	0,002	0,001	0,029	0,003	0,007	92,29

5.1.2 Materiale d'apporto

Il materiale d'apporto utilizzato è stato esclusivamente il filo AlSi5 (alluminio tipo 4043).

Il filo AlSi5 è consigliato utilizzarlo per la saldatura di alluminio e leghe di alluminio con un contenuto di silicio fino al 7% sia in forma lavorata che fusa. Adatto per leghe Al-Mg-Si serie 6000 e per saldature dissimili come 6000/1000 o 6000/3000. Grazie alla sua lega di Si, il bagno di fusione è facilmente controllabile. La saldatura non è sensibile alle fessurazioni e la superficie è lucida. Il filo AlSi5 lavora in condizioni ottimali quando si usa come gas di protezione, per la saldatura ad arco con gas protettivo, l'Argon, Elio o una miscela Argon ed Elio.

AlSi5 - Analisi chimica

Al	Si	Ti	Cu	Fe
%	5	≤ 0,2	≤ 0,3	≤ 0,8

AlSi5 - Proprietà meccaniche

Rp_{02} (N/mm^2)	Rm (N/mm^2)	Allungamento A5 (%)
≥ 40	≥ 120	≥ 8

5.2 Saldatura

La saldatura ha avuto un ruolo estremamente importante nella realizzazione del pacco batterie dato che il suo assemblaggio è fatto interamente attraverso la saldatura.

Questa ha dato non pochi problemi, soprattutto nella fase iniziale, tipo deformazioni eccessive, porosità eccessiva, cricche da cratere i quali hanno causato problemi nel montaggio dei moduli batteria e problemi di tenuta in pressione.

La tipologia di saldatura utilizzata è la saldatura MIG attraverso l'uso dell'argon puro come gas protettivo.

Inoltre si è scelto di effettuare la saldatura manuale data la realizzazione di pochi esemplari destinati alla fase prototipale della vettura. Avrebbe aiutato molto l'uso di una stazione saldante robotizzata ma il basso numero di produzione non avrebbe coperto il costo iniziale per l'installazione e la programmazione.

Analizzeremo di seguito l'apparecchiatura di saldatura e i difetti riscontrati in corso d'opera.

5.2.1 Attrezzatura per saldatura

Figura 34: EWM Titan XQ 350 puls / Saldatrice utilizzata

I componenti saldati sono stati ottenuti impiegando la saldatrice in *Figura 34.* Si tratta di una saldatrice digitale della EWM: modello Titan XQ 350 puls. La saldatrice in questione è dotata di un generatore per la saldatura GMAW, un sistema di avanzamento del filo a rullini contro-rotanti EWM eFeed altamente preciso, per un apporto sicuro di tutti i fili pieni e animati. Inoltre la torcia in dotazione possiede dei comandi per la regolazione amperaggio e tensione coni i quali l'operatore può effettuare le regolazioni senza spostarsi dalla sua postazione. Inoltre ci sono anche, il gruppo di raffreddamento ad acqua e la bombola di gas.

Tabella 1: Parametri sul sistema di saldatura

Parametri sul generatore di corrente	
Parametri	**Valori**
Intervallo corrente saldatura	5-350 [A]
Tensione al minimo	82 [V]
Tensione di esercizio	14,2-390 [V]
Parametri sulla sbobinatrice	
Parametri	**Valori**
Diametro filo	0,8-1,6 [mm]
Parametri standard sulla torcia	
Parametri	**Valori**
Stick-out	15 [mm]
Flusso Gas Attivo	15 [l/min]

L'operatore configura i parametri di saldatura agendo sull'unità di controllo remoto a bordo della saldatrice. Nelle saldatrici di più recente sviluppo le variabili del processo (tensione, intensità di corrente e velocità di avanzamento filo) sono legate tra loro da relazioni empiriche individuate in fase di progettazione. Queste relazioni vengono definite "curve sinergiche" e sono memorizzate nel sistema.

Tutti i parametri di saldatura risultano tra loro interdipendenti e questo consente di realizzare delle configurazioni di processo ottimali in base al materiale scelto, in termini di tipologia e geometria, allo spessore, al materiale d'apporto, al diametro del filo e alla tipologia di gas.

Il macchinario "EWM Titan XQ 350 plus" è programmato per funzionare con tre possibili modalità:

I. Saldatura Synergic ad impulsi;
II. Saldatura Synergic di tipo standard;
III. Funzionamento non-synergic per l'impostazione manuale dei parametri di saldatura.

Inoltre la saldatrice è dotata di funzioni di avvio e di cratere finale regolabili in modo da ottimizzare i picchi che si generano in avvio e in chiusura in maniera da ridurre e di migliorare l'effetto delle cricche a caldo in fase di chiusura del cordone come vedremo più avanti.

5.2.2 Tipologie di giunti saldati

Nel processo di assemblaggio si effettuano più tipi di giunti di saldatura. Abbiamo giunti ad L, a T e giunti testa a testa. I giunti a T sono tra estruso/estruso ed estruso/lamiera, mentre per i giunti ad L abbiamo estruso/lamiera e fusione/lamiera infine per i giunti testa a testa estruso/fusione e fusione/fusione.

Figura 35: Giunto ad L fusione/lamiera

Figura 36: Giunto ad L estruso lamiera

Figura 37: Giunto a T estruso/lamiera

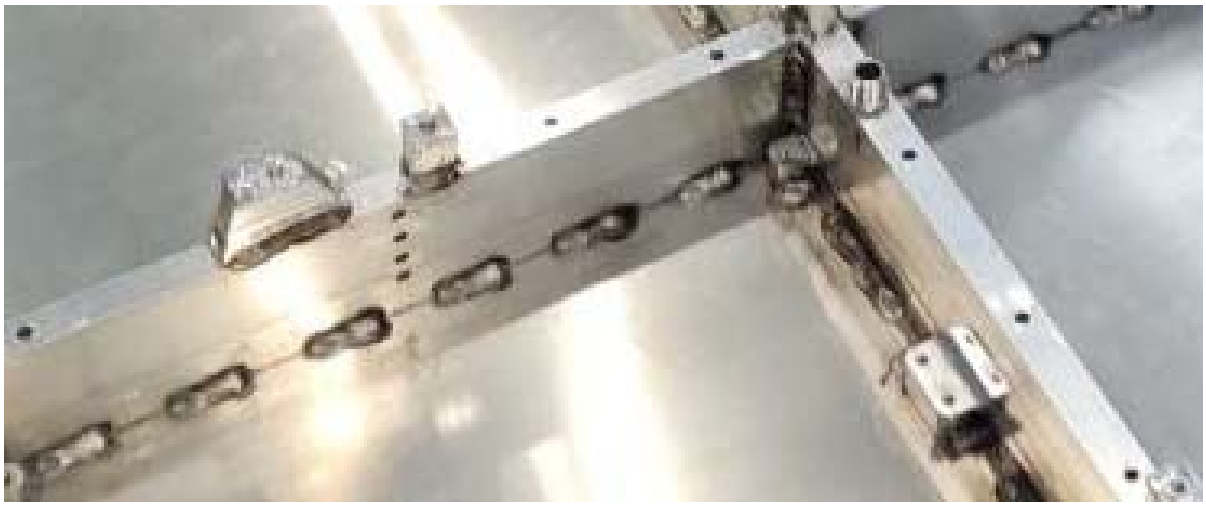


Figura 38: Giunto a T estruso/lamiera

Figura 39: Giunto testa a testa estruso/fusione

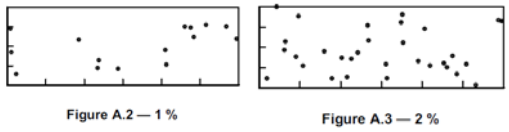
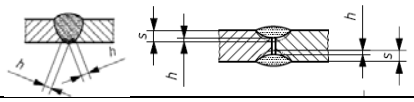
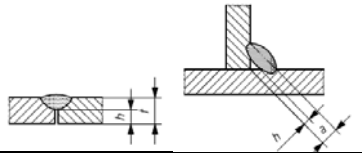
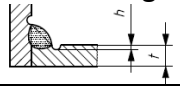
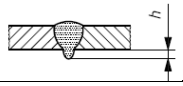
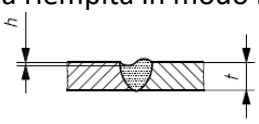
5.2.3 Difetti di saldatura dei giunti saldati

I difetti di saldatura sono definiti come imperfezioni formate nel cordone di saldatura, possono essere associati alla forma del cordone o alle dimensioni. I difetti possono verificarsi all'esterno o all'interno del metallo di saldatura e a volte possono essere accettati se i difetti sono sotto i limiti consentiti, ma altri difetti come le cricche non vengono mai accettati.

Il controllo qualità permette l'identificazione di eventuali difetti che possano compromettere la conformità di un giunto. Tramite la consultazione della normativa "UNI EN ISO 10042-grado C" sono stati raccolti i livelli dei difetti accettabili per i giunti trattati in questo studio in alluminio o sue leghe saldati ad arco elettrico.

Secondo la normativa UNI EN 10042/C i limiti accettabili sono:

Tabella 2: Riepilogo limiti accettabilità difetti da normativa UNI EN 10042/C [18, 16]

Difetti	**superficiali**	**interni**
Cricche	*non permesse*	*Non permesse*
Cratere	*non permesse*	/
Porosità distribuita  Figure A.2 — 1 % Figure A.3 — 2 %	*<1%*	*<2%*
Diametro poro	*Max 1,5mm*	*d<1mm*
Fusione incompleta 	*non permessa*	*h<0,8mm*
Penetrazione incompleta 	*non sistematica*	*h < 1mm*
Incisioni marginali 	*h < 0,5mm*	/
Eccessiva penetrazione 	*h < 4mm*	/
Scanalatura riempita in modo incompleto 	*h < 1mm*	/

d: diametro di un poro di gas
h: altezza o larghezza di un'imperfezione

I problemi nella saldatura si sono riscontrati maggiormente nelle giunzioni testa a testa tra fusione/fusione e giunti ad L fusione/lamiera. Al contrario hanno presentato ottimi risultati le giunzioni estruso/estruso ed estruso/lamiera, già dalle prime prove iniziali.

Come primo approccio a questo lavoro gli esperti hanno optato per usare una saldatura di tipo continuo, ovvero la modalità "II. Saldatura Synergic di tipo standard" con 180A di corrente, 22V di tensione e 12m/min di velocità di estrazione filo.

I difetti maggiormente riscontrati sui cordoni realizzati sono porosità, penetrazione incompleta, eccessiva penetrazione e crateri. Vediamo nelle figure successive alcuni esempi reali di difetti riscontrati.

5.2.3.1 Giunti a L fusione/lamiera

Figura 40: Giunto 1 fusione/lamiera

In Figura 40 è presente uno dei giunti più problematici. Il giunto in questione appartiene al primo pacco batterie saldato, è un giunto ad L tra un pezzo fuso e un foglio di alluminio da 3mm. Sul cordone si osservano pori di grandi dimensioni e in alcuni punti mancanza di fusione del materiale d'apporto su entrambi i lembi. Giunti così fatti non sono accettabili, sia dal punto di vista della normativa sulla qualità dei giunti ma anche dallo step successivo alla saldatura, ovvero la prova di tenuta in pressione. Infatti il 95% delle volte che ci si trovava ad avere dei difetti di questo tipo la prova di tenuta non è andata a buon fine. In una prima analisi fatta si è ipotizzato che ci fossero dei residui di olio lubrificante derivante da scarso lavaggio inseguito alle lavorazioni su macchina utensile dei vari componenti.

Vediamo ora, in Figura 41, un giunto simile al precedente effettuato dopo aver apportato delle migliorie al processo di lavaggio del kit successivo, facendo uso di detergente con tensioattivi capaci di dissolvere l'emulsivo del lubrificante.

Figura 41: Giunto 2 fusione/lamiera

Senz'altro delle migliorie ci sono state, si sono ridotte le zone con mancata fusione e i diametri delle porosità anche se ciò non è ancora sufficiente ad etichettarlo come giunto di qualità.

Inoltre, cercare di recuperare il giunto effettuando una seconda passata o soltanto dei punti di saldatura non sempre si è mostrato efficace, in realtà il test di tenuta migliora ma il maggior apporto di calore ha causato deformazioni di entità maggiori sulla lamiera creando intralcio al montaggio del modulo batteria.

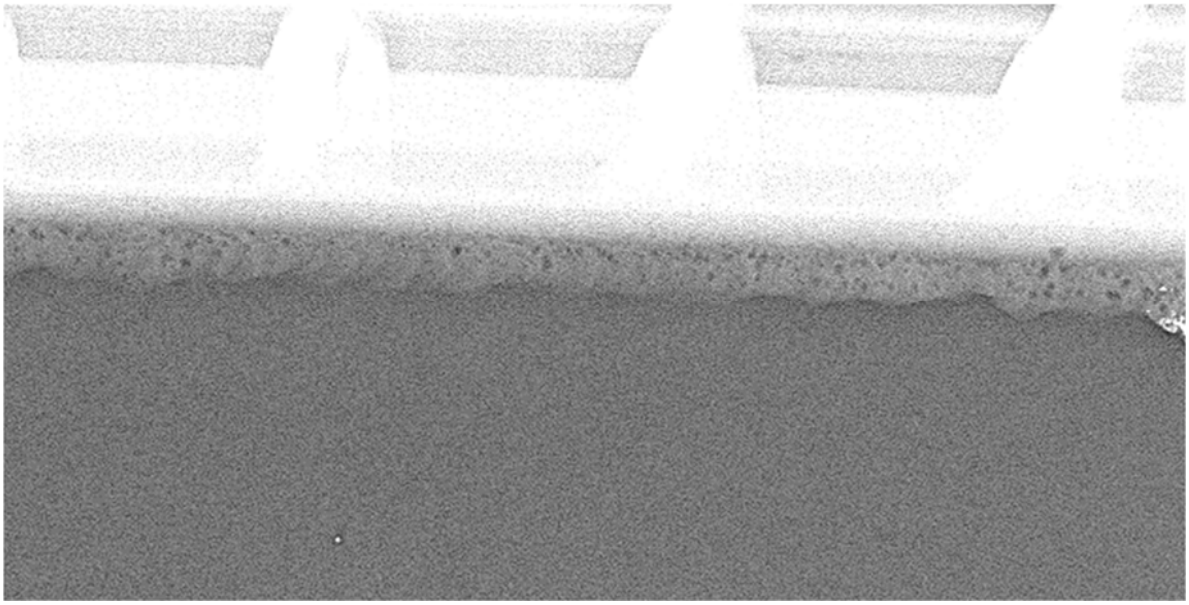


Figura 42: Radiografia del giunto 2

All'interno, il cordone di Figura 41, è anche messo peggio, è ben visibili in Figura 42 l'elevata distribuzione della porosità ben oltre ogni requisito.

In seguito ad una rettifica della velocità di avanzamento del filo di saldatura imponendo un valore di 10 m/min si possono apprezzare ulteriori migliorie.

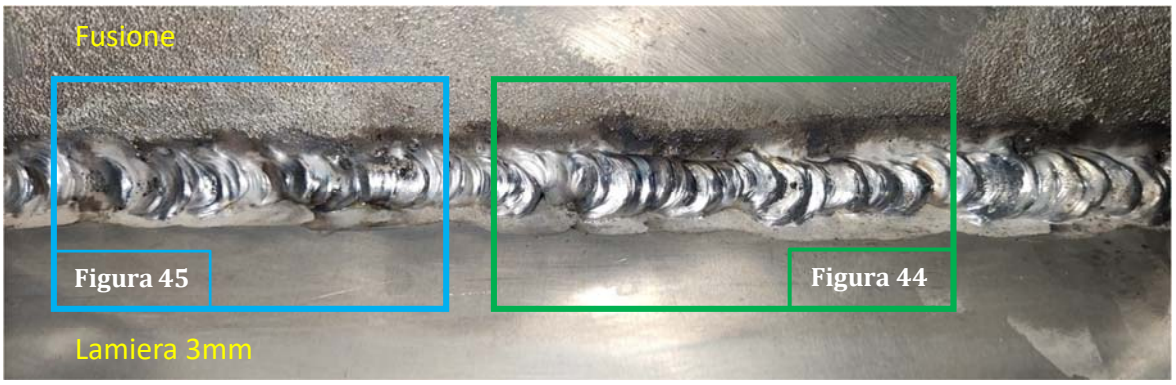


Figura 43: Giunto 3 fusione/lamiera

Il cordone in Figura 43 presenta già un aspetto migliore dei precedenti. Sono pur presenti delle porosità, ma non sono equiparabili alle grandi porosità che affliggevano i cordoni visti in precedenza. Inoltre resta ancora in alcuni tratti mancanza di penetrazione che a volte si presenta sullo stampato e a volte sul tratto della fusione.

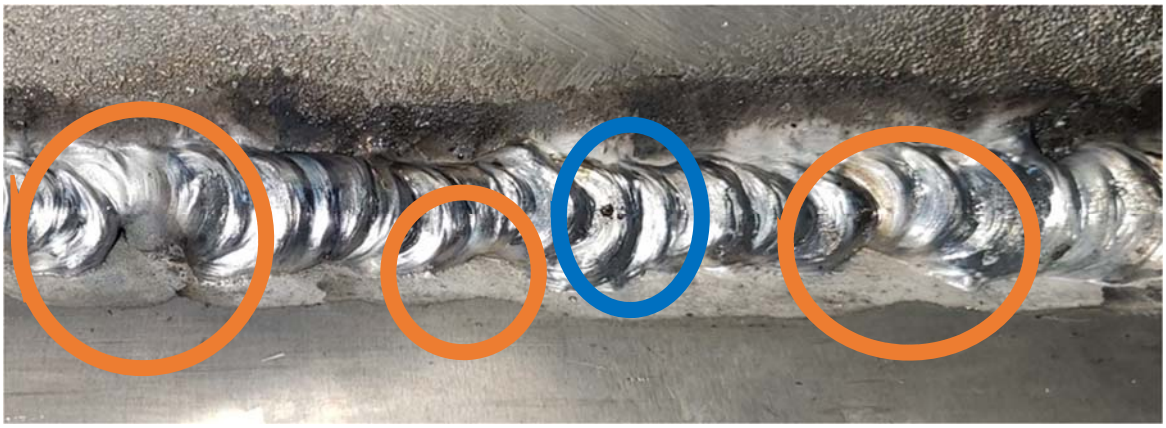


Figura 44: Ingrandimento di Figura 43

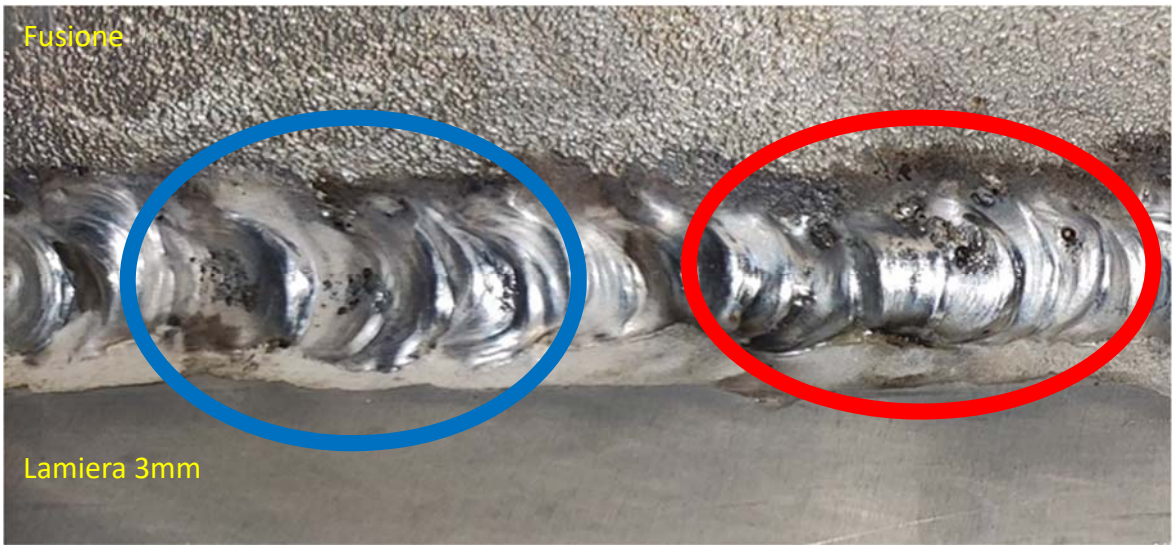


Figura 45: Ingrandimento di Figura 43

Quest'ultimo potrebbe essere dovuto all'operatore. Infatti esso si trova nella condizione di effettuare un intero cordone lungo 1,7 m partendo e terminando in posizioni scomode. Servendosi di un panchetto il saldatore inizia il tratto un po' curvato su sé stesso, perché si trova ad un'altezza più elevata, e termina leggermente disteso in avanti. Considerando la posizione di lavoro scomoda si è subito intervenuti modificando l'attrezzatura, dando la possibilità a quest'ultima di ruotare. In questo modo l'operatore ha la possibilità di inclinare la struttura fino a un massimo di 90° e lavorare in tutta comodità.

Figura 46: Giunto 4 fusione/lamiera

Il giunto 4 si presenta con piccole porosità superficiali nei limiti di accettabilità e con porosità interna (vedi Figura 47) seppur migliore del precedente ma ancora eccessiva. Inoltre se si osserva il cordone si nota ancora una certa irregolarità, non ben distribuito su entrambi i lembi e in alcuni tratti c'è più materiale d'apporto ed è più tozzo e in altri meno materiale d'apporto ed è più snello.

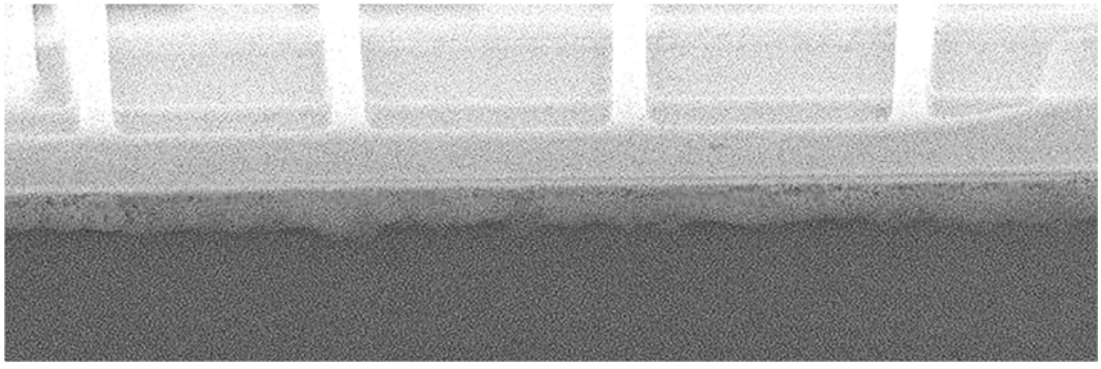


Figura 47: Radiografia del giunto 4

Purtroppo essendo una saldatura manuale, la mano dell'operatore influisce molto e qualsiasi cosa possa facilitare le operazioni è ben apprezzata.

Non ancora pienamente soddisfatti del risultato si è optato nel cambiare la modalità di saldatura nella modalità "I. Saldatura Synergic ad impulsi". La saldatura pulsata è un procedimento di ultima generazione che consente il distacco delle gocce sul bagno di

saldatura in maniera controllata. Si può così controllare anche il calore apportato sul metallo base e ridurre gli spruzzi di saldatura.

Il fatto di usare questa tecnologia a impulsi aiuta il saldatore nella gestione del suo movimento.

Ad ogni impulso si ha l'apporto di una certa quantità di materiale e l'operatore ha il tempo di effettuare un avanzamento. In aggiunta la manualità e l'esperienza permettono di avere una certa costanza garantendo un buon risultato come quello di Figura 48, con un cordone sensibilmente più omogeneo.

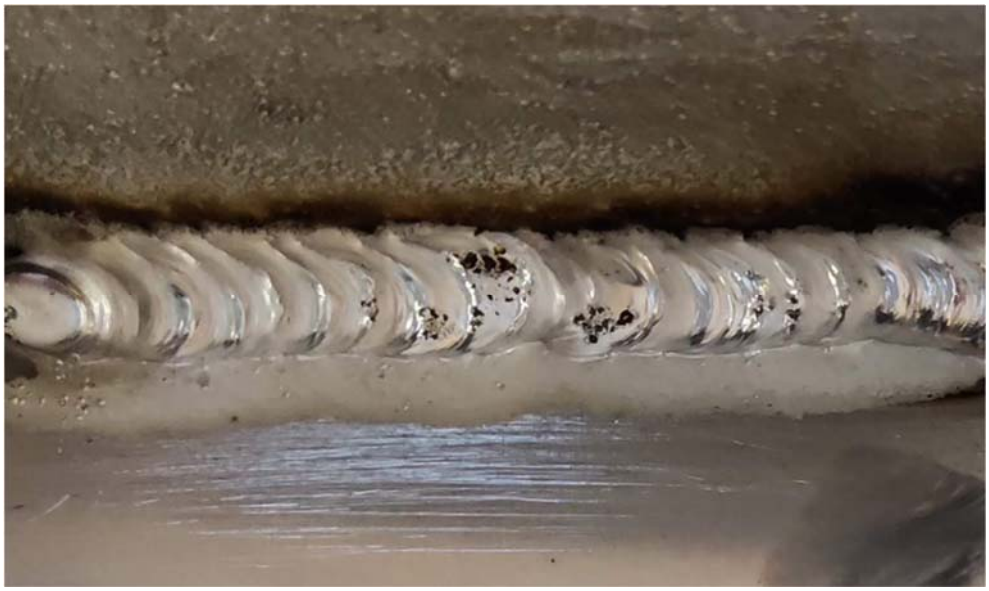


Figura 48: Giunto 5 fusione/lamiera

Contrariamente si sono ripresentate delle porosità superficiali ma il tutto abbastanza sotto controllo dato la modesta entità e bassa diffusione.

Le ultime migliorie apportate a questa tipologia di giunto è stato il grado di pulizia e la preparazione dei lembi. È consigliato soprattutto per l'alluminio effettuare un'attività di pulizia iniziale. La fase di pulitura deve precedere quella della saldatura e lo scopo è rimuovere la pellicola di ossido superficiale (allumina) e contemporaneamente eliminare tutte le impurità basso fondenti che si trovano sulla superficie.

Questo sottilissimo strato di ossido presenta delle temperature di fusione molto più elevate del materiale stesso e può compromette il regolare svolgimento del processo di saldatura. Altro aspetto molto importante è quello legato agli eventuali bassofondenti, che sono tutte le impurità superficiali, che vengono definite con questo termine perché presentano delle temperature di fusione molto più basse rispetto al materiale base. La loro presenza causa una riduzione della qualità del giunto saldato. Quindi, rimuovere le impurità e la pellicola di ossido superficiale è determinante per ottenere una buona saldatura.

Figura 49: Giunto 6 fusione/lamiera

Per rimuovere la pellicola di ossido superficiale, una volta posizionate le parti da saldare si è eseguita la spazzolatura con spazzole dotate di setole in acciaio inox, segue soffiaggio con aria compressa e straccio con solvente.

Il miglioramento è notevole, lo si può apprezzare in Figura 49, solo qualche piccola porosità sufficientemente lontane tra loro. Tuttavia si è constatato che alcuni piccoli trucioli derivanti dalla spazzolatura potrebbero depositarsi negli interstizi tra i due lembi allora si è preferito fare la pulizia dei lembi del tratto perimetrale un attimo prima del posizionamento. Inoltre come ultima modifica, solo per i componenti fusi data l'elevata rugosità della superficie, la spazzolatura non era sufficiente per la rimozione dell'ossido superficiale e si è sostituita con una spianatura manualmente con una moletta in modo da ridurre la rugosità, vedi Figura 50.

Figura 50: Giunto 7 fusione/lamiera

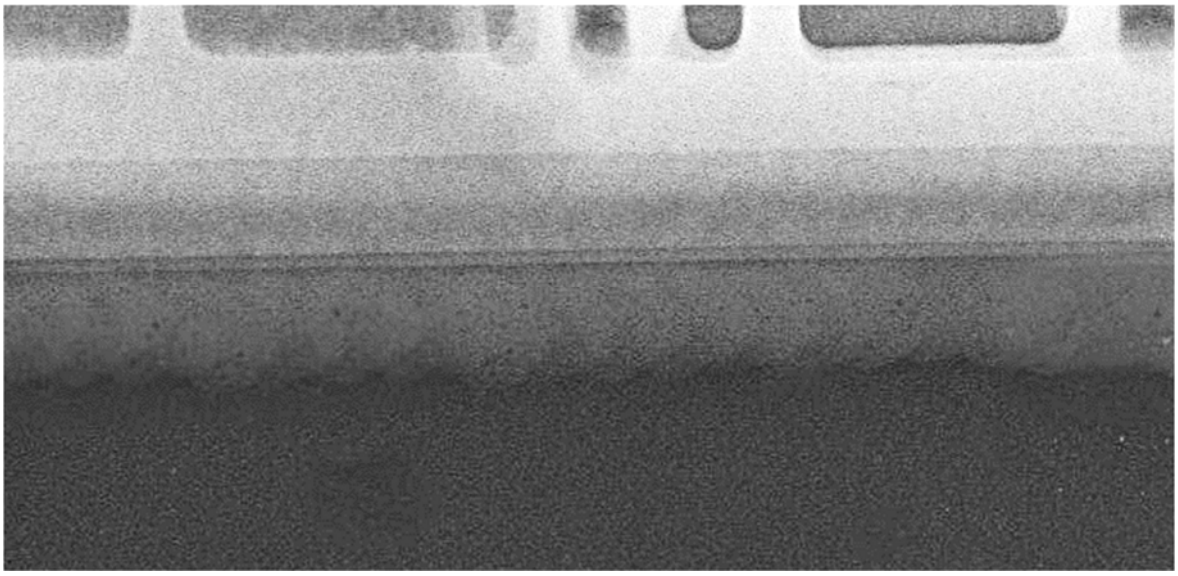


Figura 51: Radiografia giunto 7

Purtroppo non si è riusciti ad eliminare del tutto la porosità interna al cordone per questa tipologia di giunto.

Osservando il provino realizzato per la macrografia in Figura 52 si nota sull'elemento fuso molta porosità e crediamo che la causa principale, sebbene sarebbe da approfondire ma i tempi e i costi al momento non ce lo hanno permesso, è da imputare proprio a questo. Nel seguito analizzeremo brevemente gli altri giunti dove non ci sono elementi fusi saldati e non c'è stata traccia di porosità.

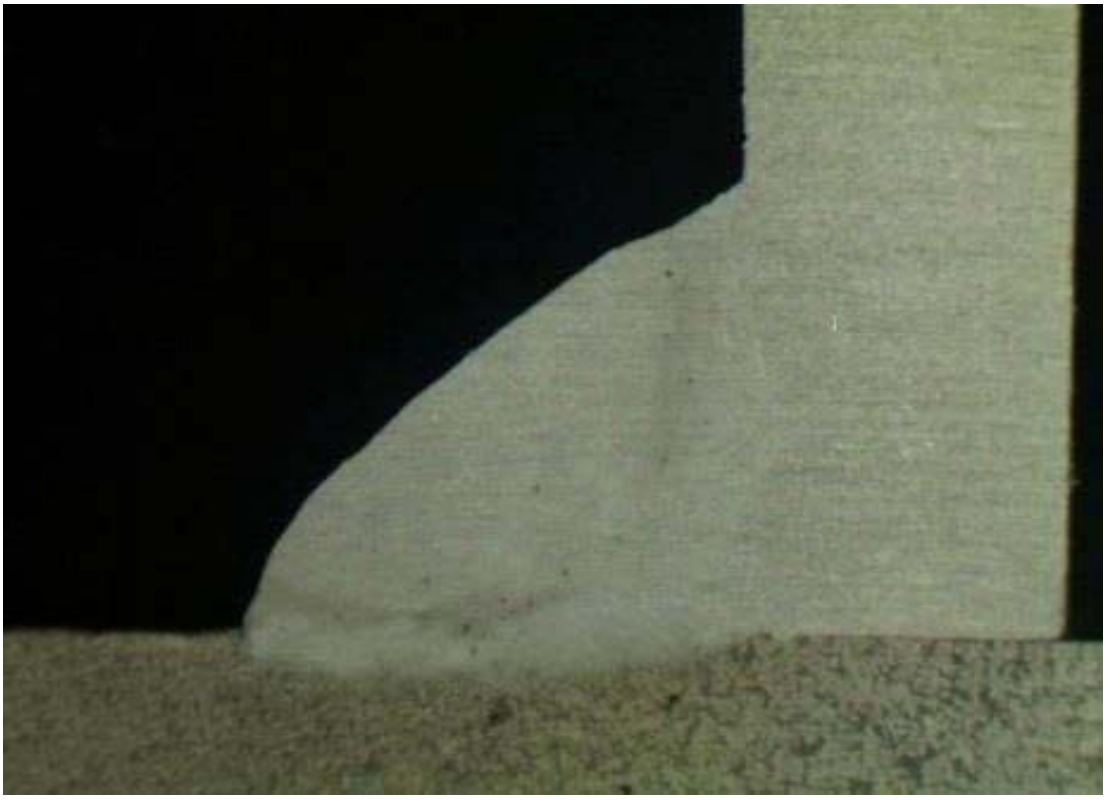


Figura 52: Macrografia giunto 7

5.2.3.2 Giunti a L estruso/lamiera

A differenza dei giunti ad L fusione/lamiera, i giunti estruso/lamiera o estruso/estruso hanno avuto ottime caratteristiche sin da subito come conferma l'immagine di Figura 53.

Figura 53: giunto 8 estruso/lamiera

Si nota una scarsa regolarità nel deposito del materiale del cordone dovuto solamente alla mano dell'operatore. Ma a differenza di cordoni dove uno dei lembi appartiene a pezzi ricavati da fusione, qui quantomeno in superficie, non abbiamo pori, cricche o altri tipi di difetti.

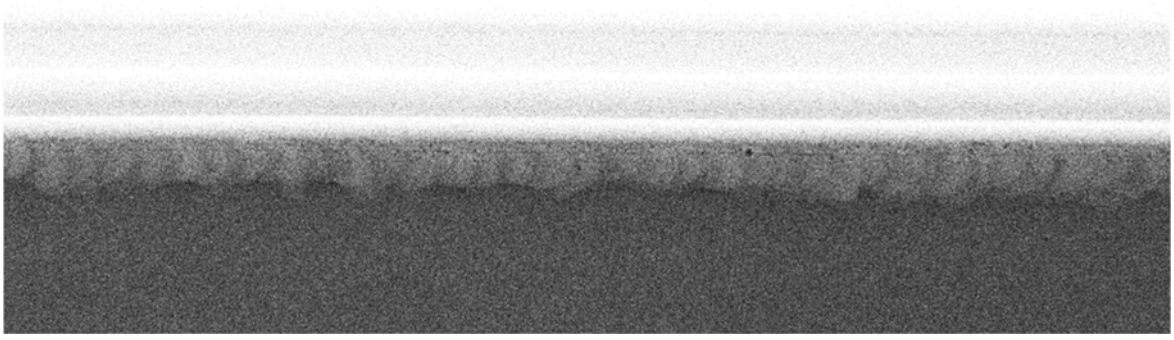


Figura 54: Radiografia giunto 8

Quest'ultimo inoltre, come nei giunti fusione/lamiera è migliorato dopo l'utilizzo della modalità I. Saldatura Synergic ad impulsi, vedi Figura 55.

Figura 55: Giunto 9 estruso/lamiera

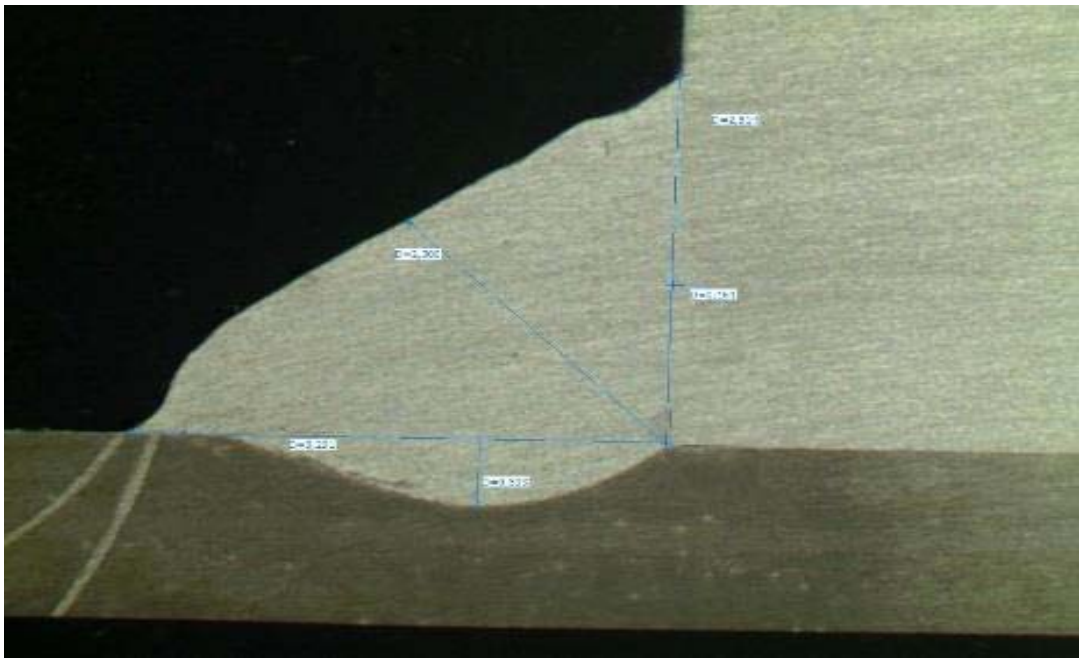


Figura 56: Macrografia giunto 9

Come accennato in precedenza, anche la macrografia dimostra la ottima resa ottenuta per i giunti estruso/lamiera.

5.2.3.3 Giunti a T estruso/lamiera

Altri difetti esterni di saldatura sono le cricche di cratere, queste imperfezioni si formano durante la fase di raffreddamento del bagno di saldatura che si contrae per gli effetti della dilatazione termica. Il ritiro del metallo durante il raffreddamento determina la formazione di un cratere dovuto al risucchio del materiale ancora liquido da parte delle zone circostanti.

La cavità di cratere può essere prevenuta utilizzando opportune tecniche di saldatura. Per prima cosa non bisogna interrompere immediatamente il flusso di corrente alla fine del cordone di saldatura e allontanare la torcia altrimenti questo comporterà la solidificazione rapida di un grande volume di bagno fuso. Invece sarebbe ottimale ridurre progressivamente la corrente di saldatura prima di terminare del tutto il cordone.

Figura 57: cricca di cratere

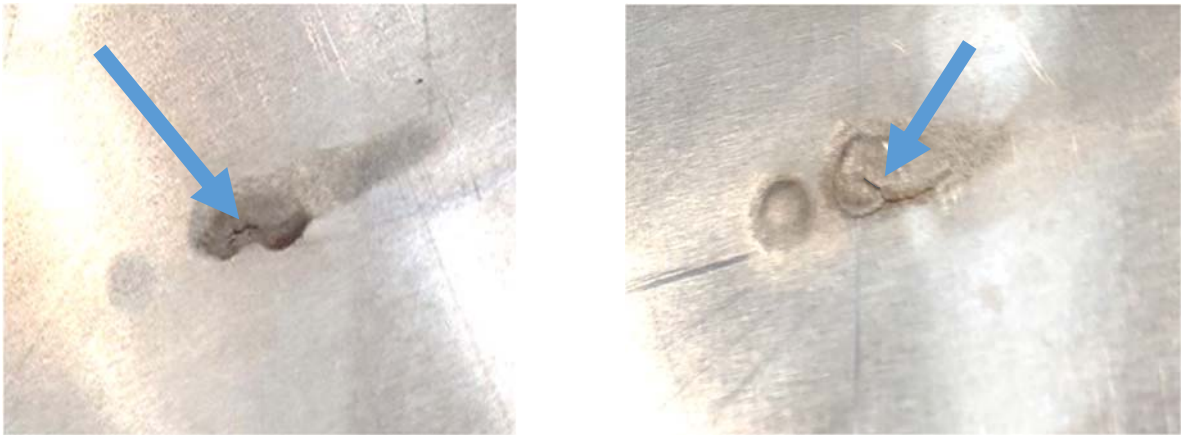
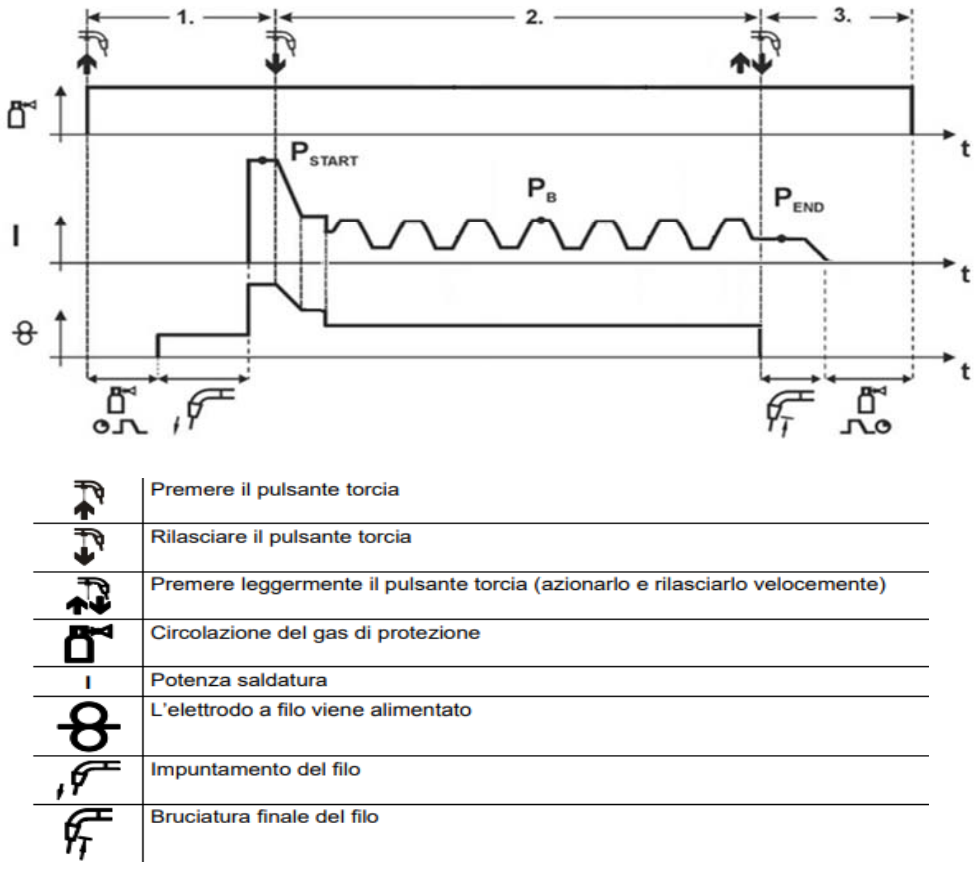


Figura 58: Cricche di cratere oltrepassate

Le immagini sopra delle cricche da cratere appartengono a giunti a T estruso lamiera posti non perimetralmente, d'altronde l'unico difetto che è stato riscontrato in questa tipologia di giunti. Questi profilati estrusi vengono saldati con tanti piccoli tratti da 20mm. Il 15% di questi ha presentato una cricca da cratere. Spesso sono molto piccole e a seconda della direzione della luce difficili da vedere. Inoltre sono state la causa dei primi fallimenti della prova di tenuta in pressione grazie alla quale si è scoperto tale difetto.

Per ridurre progressivamente la corrente di saldatura prima di terminare del tutto il cordone, e quindi risolvere il problema delle cricche da cratere si è usata la funzione PEND in dotazione all'apparecchio di saldatura. La funzione PEND si attiva nel momento in cui l'operatore mentre sta saldando, preme e rilascia il tasto sulla torcia e la saldatrice in automatico mantiene la corrente fissa a valore intermedio tra i due picchi della modalità pulsata e trascorso un tempo prefissato riduce in modo lineare la corrente fino ad azzerarla.



	Premere il pulsante torcia
	Rilasciare il pulsante torcia
	Premere leggermente il pulsante torcia (azionarlo e rilasciarlo velocemente)
	Circolazione del gas di protezione
I	Potenza saldatura
	L'elettrodo a filo viene alimentato
	Impuntamento del filo
	Bruciatura finale del filo

Figura 59: Schermata di regolazione saldatrice Ewm XQ titan plus

5.2.3.4 Deformazioni eccessive

Sui primi prototipi assemblati si sono riscontrate delle problematiche sul montaggio dei moduli batteria e la causa è imputabile alla saldatura.

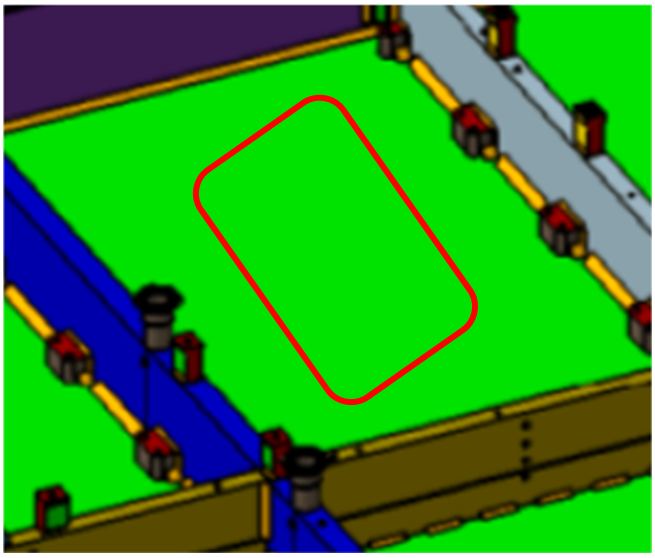


Figura 60: Estratto del pacco batterie

Il problema è dovuto al ritiro termico del bagno di saldatura (parte liquida) durante il raffreddamento. Ritirandosi crea tensioni che deformano i pezzi. Osservando la *Figura 60* possiamo appunto notare l'eccessiva quantità di saldatura (tratti in giallo) prevista per l'assemblaggio dei vari componenti. Facendo riferimento sempre alla stessa immagine è possibile osservare delle suddivisioni all'interno del pacco batteria, realizzati mediante la saldatura di traverse in alluminio. La realizzazione di questi settori servono sostanzialmente per sostenere i vari moduli batteria e per irrigidire la struttura. Ma la scelta di saldare così tanto sul foglio d'alluminio genera delle deformazioni eccessive nei vari settori, ovvero dei rigonfiamenti al centro di ogni settore (zona evidenziata in rosso in Figura 60) fino a circa 2,5 millimetri. Questo rigonfiamento non permette l'assemblaggio dei moduli perché l'appoggio sulle traverse di alluminio è alto 22,5 mm con una tolleranza di ±0,25mm.

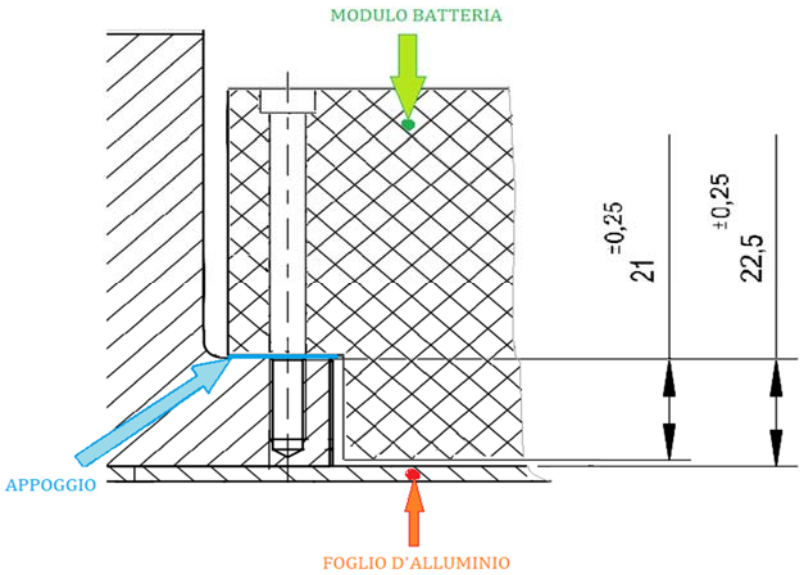


Figura 61: Quote e tolleranze dimensionali tra appoggio e moduli batterie e fondo

Nominalmente è presente un millimetro e mezzo tra il modulo batteria e il foglio d'alluminio sottostante. Supponendo però di trovarci nella condizione di minimo materiale per l'appoggio (22,25 mm) e al massimo materiale per il modulo batteria (21,25 mm) allora ci troveremo con un solo millimetro di gioco e quindi il rigonfiamento di 2/2,5 mm non permette un assemblaggio del modulo in condizioni ottimali. Teniamo presente che un modulo batteria è un elemento delicato e forzare il suo montaggio non è assolutamente permesso, potremmo rovinare l'integrità del modulo, rovinare le celle riduzione della sua efficienza, e tutte le problematiche del caso.

Figura 62: Saldatura circostante i moduli batteria prevista nella fase iniziale del progetto

In Figura 62 è presente un'immagine reale della Figura 60. Ad occhio nudo le deformazioni non sono rilevabili, ma ci sono eccome. Infatti l'analisi dimensionale effettuata nel reparto metrologia dell'azienda ha riscontrato le deviazioni presenti in Tabella 3.

Tabella 3: Misurazioni deviazioni dal nominale della distanza tra appoggio modulo e foglio di alluminio nella zona centrale di ogni settore, per i primi pacchi batteria prodotti (fonte: collaudo dimensionale in Eurodies)

Valori di deviazioni dal nominale nella zone centrale di vari settori [mm]	
1,25	1,7
1,46	1,74
1,17	1,86
1,74	1,8
1,9	1,61
1,71	1,98
2,18	1,73
1,98	1,42
1,95	2,34
1,5	1,53
1,32	1,62
1,4	1,75
2,02	1,57
1,29	1,49
Media	**1,68**

La saldatura così disposta crea delle tensioni nel materiale più cedevole (la lamiera appunto) che tendono ad infletterlo, perciò anche i tentativi di variare la sequenza di esecuzione dei cordoni non ha apportato alcun cambiamento significativo.

Per questo motivo, i progettisti hanno rivalutato il progetto ed applicato una prima riduzione di saldatura tra le traverse e il foglio di alluminio del circa 20%.

Confrontando la Figura 62 e la Figura 63 è possibile comprendere la riduzione dei cordoni di saldatura attuata, ovvero per le traverse longitudinali si è ridotta la quantità dei cordoni da effettuare mentre per le trasversali si è ridotta solo la dimensione.

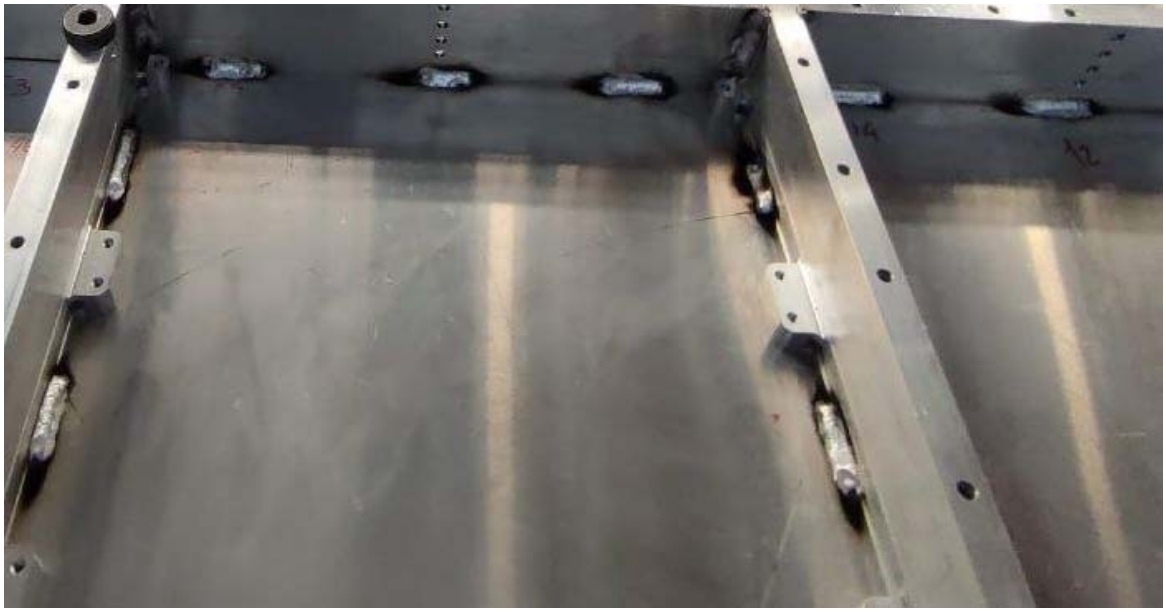


Figura 63: 1° step di riduzione della saldatura

Tabella 4: Misurazioni deviazioni dal nominale della distanza tra appoggio modulo e foglio di alluminio nella zona centrale di vari settori, con una riduzione stimata del 20% della saldatura

Valori di deviazioni dal nominale nella zone centrale di vari settori [mm]	
0,77	1,1
0,98	1,04
0,69	1,12
1,07	1,06
1,23	0,92
1,01	1,29
1,41	1,12
1,28	0,79
1,24	0,71
0,7	0,9
0,72	0,93
0,59	1,1
1,32	0,79
0,69	0,72
Media	**0,94**

Ciò ha portato dei benefici notevoli passando da un valore medio di 1,68mm di deviazione dal nominale a 0,94 mm. Tutte le deviazioni riscontrate sono ora al di sotto del gioco di 1,5mm a disposizione, ma non è sufficiente perché se teniamo conto delle tolleranze imposte, bisogna garantire che le deviazioni non superino il millimetro.

Ulteriore modifica al processo è stata la fresatura degli appoggi delle batterie, ai quali è stata data un'altezza al massimo della tolleranza consentita, 22,75 mm. Ciò non va a migliorare l'entità delle deformazioni ma ci permette di accettare deformazioni massime più elevate, fino ad un massimo di 1,25mm.

Non essendo ancora del tutto positivo, in accordo con i progettisti si è provveduto ad un'ulteriore riduzione della saldatura di circa il 30%. Questa volta i tratti interessati dalla riduzione sono stati i cordoni perimetrali. Ciò ha causato la perdita totale della tenuta stagna del pacco batteria dato che alcuni tratti in comunicazione con l'esterno restano ora scoperti dalla saldatura.

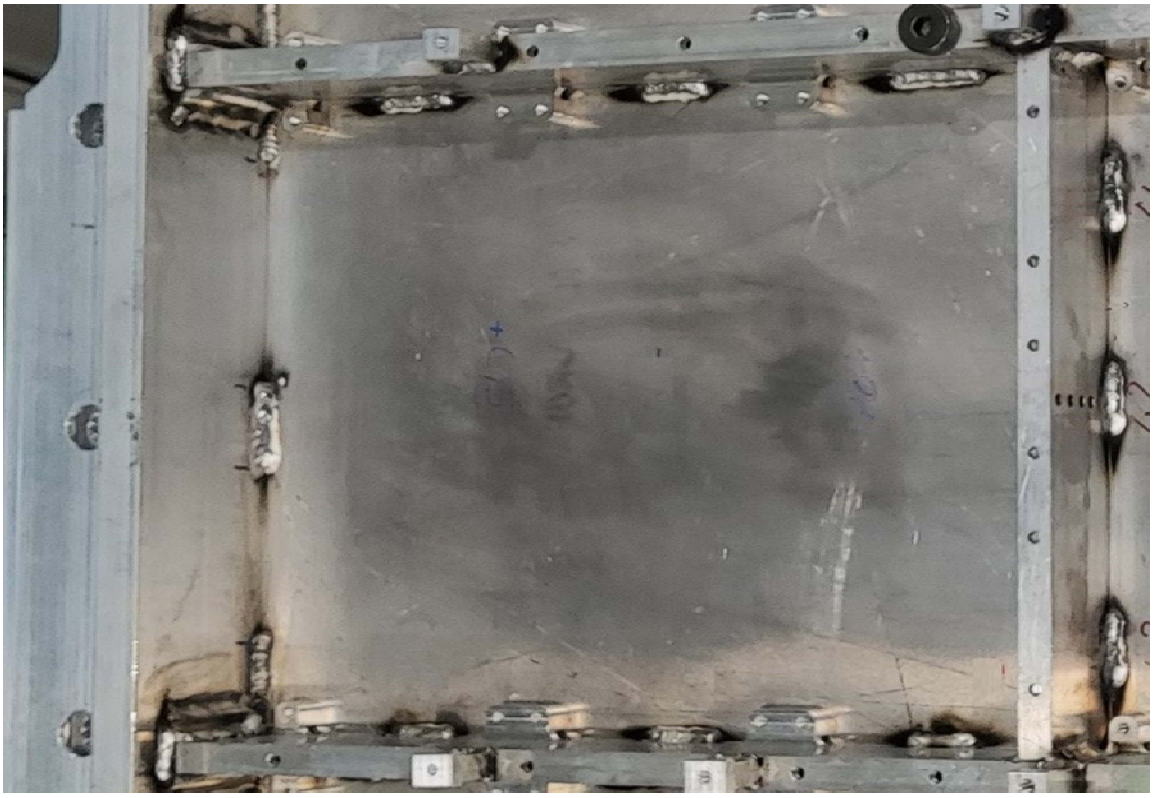


Figura 64: 2° step di riduzione della saldatura

È stato stabilito questo dato che con la sola saldatura la prova non ha mai restituito risultati ammissibili. Vedremo nel prossimo paragrafo i cambiamenti effettuati.

Tabella 5: Misurazioni deviazioni dal nominale della distanza tra appoggio modulo e foglio di alluminio nella zona centrale di vari settori, con una riduzione stimata del 30% della saldatura

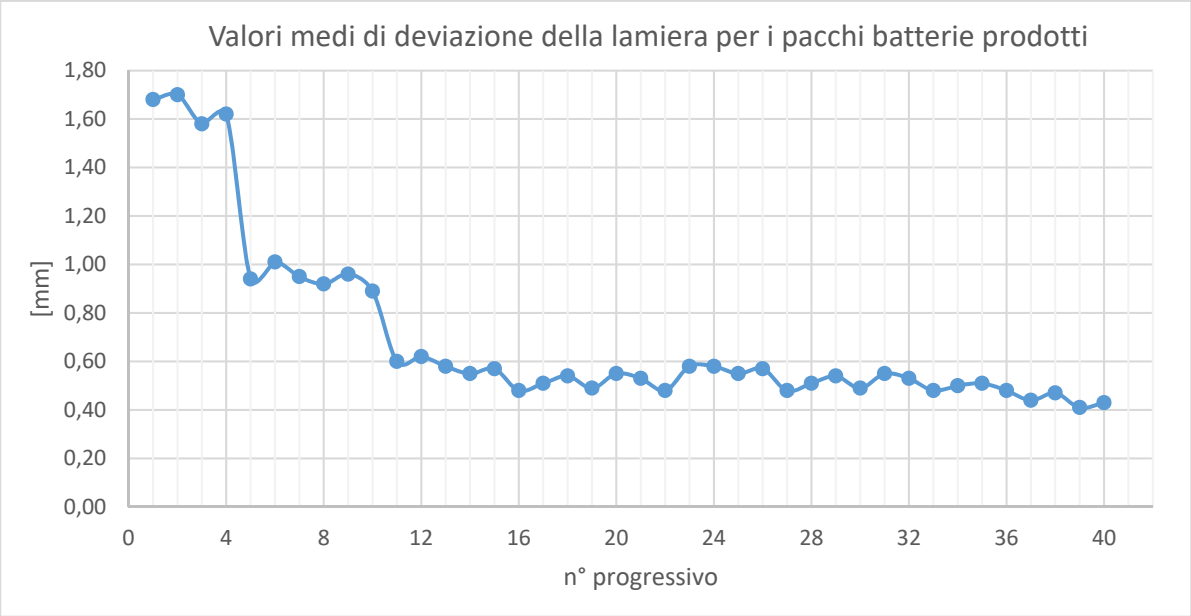
Valori di deviazioni dal nominale nella zone centrale di vari settori [mm]	
0,37	0,77
0,58	0,81
0,29	0,79
0,67	0,66
0,82	0,52
0,70	0,78
0,89	0,88
0,77	0,54
0,84	0,46
0,33	0,65
0,35	0,53
0,22	0,81
0,85	0,5
0,29	0,36
Media	**0,59**

Oltre alla deformazione eccessiva, un ulteriore problema che ha ostacolato il montaggio dei moduli batteria è dovuto alla mancata rimozione di pallini/spruzzi di saldatura che si sono depositati sulla lamiera. La macchina di misura è programmata per rilevare solo tre punti al di sotto del piano dove alloggerà la batteria perciò può capitare che in tutto il resto della zona ci siano dei pallini/spruzzi di saldatura che riducono ulteriormente lo spazio tra la lamiera del fondo e la batteria.

Il saldatore dovrebbe, al termine dell'operazione di saldatura, controllare e se presenti rimuovere i pallini in modo meccanico. Ma la grande superficie da analizzare e l'affaticamento oculare potrebbe far sì che alcuni pallini gli sfuggano.

Se il modulo batteria incontrasse un pallino di saldatura in una zona dove lo spazio a disposizione è già abbastanza risicato, il serraggio del modulo potrebbe causare delle tensioni tali da danneggiare l'integrità del modulo stesso. Pertanto si è introdotta una fase di pulizia accurata con dei revisionatori per la rimozione dei pallini/spruzzi di saldatura.

Di seguito troviamo un grafico riassuntivo dei valori medi di deviazione nelle zone centrali di ogni settore di alloggiamento batteria.


Valori medi di deviazione della lamiera per i pacchi batterie prodotti
[mm]
1,80
1,60
1,40
1,20
1,00
0,80
0,60
0,40
0,20
0,00
0
4
8
12
16
20
24
28
32
36
40
n° progressivo

5.3 Prova di tenuta in pressione del pacco batterie

Il controllo delle perdite del pacco batteria è molto simile al grado di protezione IP (o marcatura internazionale di protezione, in inglese Ingress Protection e abbreviato in IP) è un parametro che classifica e valuta il grado di protezione fornito da involucri meccanici e quadri elettrici contro l'intrusione di particelle solide (quali parti del corpo e polvere) e l'accesso di liquidi.

Iniziamo col vedere cos'è una perdita. Una perdita implica la fuoriuscita di liquido o gas da una custodia, o da un sistema sotto pressione o sotto vuoto. Le perdite richiedono una differenza di pressione per generare un flusso, passano sempre da una pressione più alta a una pressione più bassa.

Il controllo delle perdite viene effettuato mediante delle prove di tenuta. Il test di tenuta è un processo utilizzato per rilevare i difetti di fabbricazione che aiuta a verificare l'integrità dei prodotti e migliorare la sicurezza per i consumatori.

L'obiettivo della prova di tenuta è individuare e/o misurare la quantità di liquido o gas che scorre attraverso una discontinuità.

Si eseguono i test di tenuta per diversi motivi:

- economico: per evitare perdite di materiale che interferiscono con il funzionamento del sistema/ per evitare l'intrusione di particelle esterne;
- Sicurezza: previene incendi e la contaminazione dell'ambiente;
- affidabilità: rileva componenti inaffidabili e quelli con perdite che superano lo standard

I tassi di perdita sono generalmente misurati in termini di quantità di un gas che fuoriesce in un secondo. Altre unità di tasso di perdita più comunemente utilizzate sono: standard cm^3/secondo, atmosfere standard per cm^3/secondo; per in sistema internazionale pascal per metri cubici al secondo.

5.3.1 Metodi per il test di tenuta in pressione

5.3.1.1 Bubble leak testing

Noto anche come immersione in acqua o prova di osservazione delle bolle d'aria.

Per una corretta esecuzione della prova, la superficie superiore del campione deve essere coperta da almeno 25 mm di fluido.

Questo test di tenuta è più qualitativo che quantitativo, infatti non è possibile misurare le perdite ma solo vederle. Inoltre bisogna tenere conto della sensibilità di questa tipologia di test di tenuta che si attesta intorno a 10^{-3} atm cm^3/s. È possibile solo distinguere se la perdita è piccola o grande rispetto alla sensibilità, infatti piccole perdite producono numerose piccole bolle, ma è difficile determinare il tasso di perdita effettivo. la dimensione delle bolle e la frequenza di emissione dipendono da: il tipo di flusso di gas, la dimensione della perdita, la tensione superficiale del liquido.

Vantaggi:

- semplice da usare;
- rapido ed economico;
- consente all'osservatore di individuare il punto di uscita delle perdite in modo molto accurato;
- sicuro da applicare.

Svantaggi:

- le perdite non sono quantificabili;
- è necessario asciugare il componente dopo il test;
- dipende molto dall'affidabilità dell'operatore;
- perdite molto basse non sono visibili.

5.3.1.2 test di tenuta con liquidi penetranti

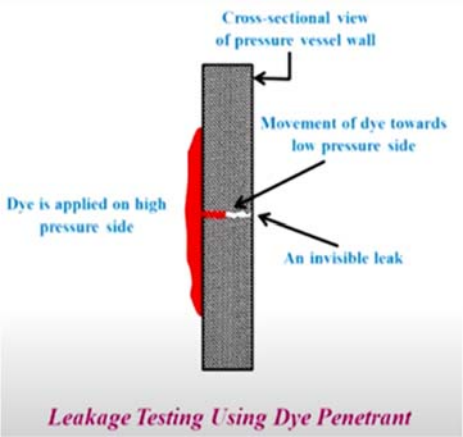


Figura 65: Test di tenuta con liquidi penetranti

il test con liquido penetrante colorato è anch'esso un test di tenuta economico. Il colorante viene spruzzato sul lato ad alta pressione delle aree sospette di perdita. Se è presente una perdita, la pressione differenziale del sistema farà sì che il colorante penetri attraverso la perdita e appaia sul lato a bassa pressione dell'oggetto.

Questo metodo può richiedere un'ora o più, e proprio a causa del lungo tempo impiegato, questo metodo di prova è usato raramente.

5.3.1.3 Test di tenuta a variazione di pressione

I test di tenuta a variazione di pressione sono anche chiamati test di mantenimento della pressione, test di decadimento della pressione o test di perdita di pressione. È il metodo di prova di tenuta più usato nelle linee di produzione.

In Figura 66 possiamo osservare in modo stilizzato come viene eseguita questa tipologia di prova. La parte in prova viene pressurizzata riempiendola di aria o altro gas fino a raggiungere un valore prefissato di pressione.

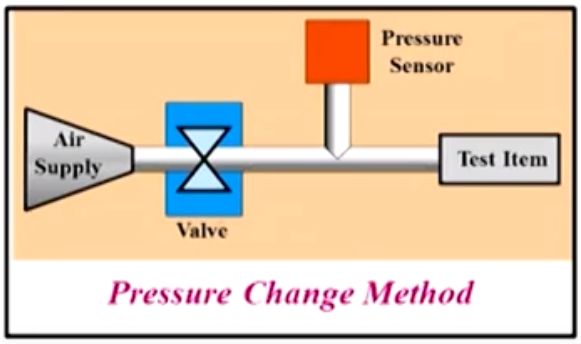


Figura 66: Schema circuito per test a variazione di pressione

Viene quindi utilizzata una valvola di isolamento per scollegare il campione da testare dalla pressione di alimentazione. La pressione all'interno della parte viene monitorata utilizzando un sensore di pressione. Se nel seguito la pressione diminuisce significa che c'è una certa perdita. Per misurare la perdita in questo caso si definisce il tasso di perdita che può essere calcolato in base alla variazione di pressione in un determinato periodo di tempo, tenendo conto del volume dell'oggetto.

Utilizzando questa tecnica, il tasso di perdita viene calcolato come:

$$Tasso\ di\ perdita = Q_L = \frac{P_1 - P_2}{t} \cdot V$$

Dove:

- P1 = Pressione iniziale,
- P2 = Pressione finale,
- V = volume della parte di prova,
- t = Periodo di tempo di misurazione.

5.3.1.4 test di perdita in pressione differenziale.

È una variante più accurata del metodo del decadimento della pressione e usa una camera aggiuntiva da alimentare in pressione. Questa camera aggiuntiva prende il nome di volume di riferimento ed è necessario che sia una camera stagna, quindi senza alcuna perdita. È un metodo indiretto per misurare il tasso di perdita perché i dati di tempo e pressione devono essere convertiti in tasso di perdita.

Procedura di esecuzione: Con le valvole 1 e 2 aperte, il campione di prova e il volume di riferimento sono pressurizzati. Raggiunta la pressione imposta viene chiusa la valvola 1 per isolare il sistema dall'alimentazione. Il volume di riferimento viene successivamente isolato dall'elemento in prova chiudendo la valvola 2.

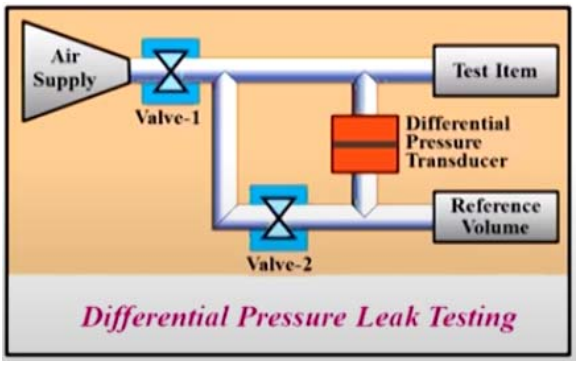


Figura 67: Schema circuito prova in pressione differenziale

Chiudiamo la valvola 2 in modo che qualunque sia la pressione in questo oggetto di prova è uguale a quella di un oggetto di riferimento.

Usando un trasduttore di pressione differenziale posto tra i due volumi è possibile capire se ci sono perdite e l'entità di tali perdite calcolando il tasso di perdita, se c'è qualche perdita questa pressione verrà ridotta mentre se non c'è alcuna perdita la pressione rimarrà la stessa per entrambi i volumi per un tempo più lungo.

5.3.1.5 Test di tenuta con flusso di massa.

Questi sistemi di test delle perdite utilizzano sensori di flusso di massa che possono fornire test rapidi e accurati su una gamma molto più ampia di rapporti e test del volume di perdita.

Anche in questo metodo si usa un volume di riferimento e la prova inizia alimentando entrambe le parti fino al raggiungimento della pressione imposta. La pressione dell'elemento di prova e la pressione del volume di riferimento quindi sono uguali, e vengono chiuse le valvole 1 e 2.

Dopodiché, se questo elemento di prova ha delle perdite, accade che il gas fluirà dalla pressione più alta a quella più bassa, ed è costretto ad attraversare il sensore di flusso di

massa il quale ci restituisce la quantità di aria che scorre nella parte per sostituire un flusso di perdita, viene misurata in standard cm^3/min.

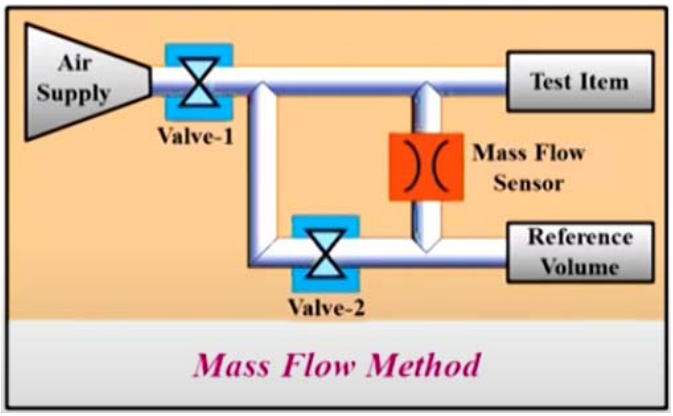


Figura 68: Schema circuito per test di tenuta del flusso di massa

5.3.1.6 Spettrometro di massa ad elio test di tenuta.

Generalmente il rilevatore di perdite dello spettrometro di massa ad elio, è il più versatile dei metodi di rilevamento delle perdite industriali e di laboratorio. Questi metodi sono stati sviluppati negli anni '40 per soddisfare i requisiti più severi nello sviluppo di dispositivi nucleari. La parte principale del dispositivo è lo spettrometro di massa un sensore per diverse masse di gas elio che è un tipo di gas inerte in modo che non reagisca con nessun altro tipo di gas o i liquidi.

I metodi precedenti ci consentono di misurare l'entità della perdita ma no di individuarla, se risulta essere necessario individuare la perdita per poterla riparare è sufficiente sostituire l'alimentazione, quindi utilizzando elio invece dell'aria e utilizzando lo spettrometro di massa ad elio è possibile individuare la perdita. Ottenendo così la misurazione e l'identificazione della o delle perdite. [19]

5.3.2 Prova di tenuta in pressione controllo perdite

La tipologia di prova effettuata per il controllo della tenuta è il mass flow test come richiesto dal cliente.

Richieste da parte del cliente:

LEAKAGE TEST: (D) 2

INTERVAL:	100 %
TEST METHOD:	MASS FLOW TEST
MEDIUM:	AIR @ AMBIENT TEMPERATURE
REDUCED AIR VOLUME INSIDE:	50 l
TEST PRESSURE:	80 mbar OVERPRESSURE
MAX. ALLOWED LEAKAGE RATE:	15 cm³/min

Questa prova è molto importante al fine di garantire la sicurezza del pacco batterie e per questo motivo si è costretti ad eseguirla su tutti i pacchi batterie prodotti.

La macchina per la realizzazione di questa prova è stata auto costruita in azienda. Essa prevede un platò d'acciaio con guarnizione lungo tutto il perimetro sul quale viene posizionato il pacco batterie in modo da simulare un coperchio. Una volta posizionato si inserisce su di esso una lastra d'acciaio. La lastra d'acciaio ha una massa di circa 950kg e viene compattata con il platò attraverso dei bulloni in modo da comprimere la guarnizione sottostante.

Il circuito è stato realizzato secondo lo schema in Figura 68.

Attraverso degli appositi connettori inseriti sul pacco batteria si immette aria compressa a 80mbar. Una pressione di 80 mbar può sembrare innocua ma come ben sappiamo la pressione è una grandezza fisica, definita come il rapporto tra il modulo della forza agente ortogonalmente su una superficie e la sua area. Conoscendo l'area del pacco batterie è possibile calcolare la forza di spinta esercitata d'aria compressa che è di circa 16000 *N.* Tale forza tende a sollevare il pacco batteria e a far perdere pressione dalla sede della guarnizione. Ed è proprio per contrastare questa spinta che viene usata una lastra di massa 950kg più 6 bulloni da M20 ognuno dei quali ha un carico minimo di rottura a trazione di 98000 *N.*

Raggiunta la pressione imposta si attendono 5 minuti per stabilizzare il sistema per poi procedere alla registrazione del valore delle perdite per un totale di 10 min.

La lettura viene effettuata attraverso un flussimetro digitale con sensibilità di 0,1cm³/min e una portata massima di 100cm³/min. Se la prova restituisce un valore al di sotto dei 15cm³/min la prova è superata e termina qui. Se invece come accaduto per i primi battery case il valore di perdita è maggiore di 15cm³/min si effettua la ricerca della o delle perdite.

Per effettuare la ricerca delle perdite viene svotato il circuito dall'aria compressa e si immette elio in pressione. Poi attraverso uno spettrometro di massa, capace di rilevare elio, l'operatore va alla ricerca delle perdite girando intorno all'involucro batteria e segnala la zona incriminata dove lo spettrometro rileva tracce di elio.

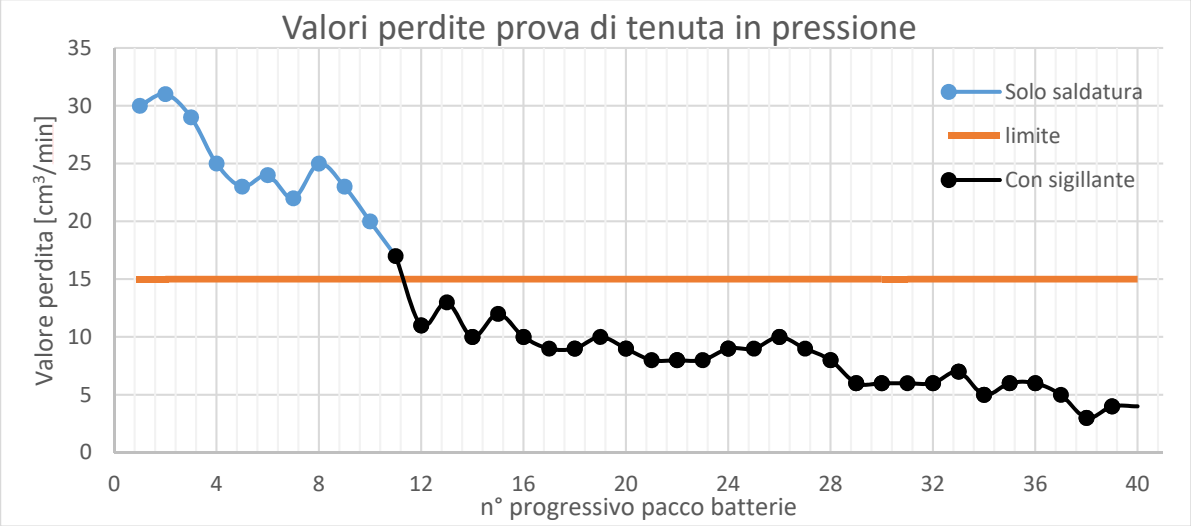


Figura 69: Valori perdite prova di tenuta in pressione

In realtà i primi test di tenuta effettuati hanno rilevato perdite importanti, non si sa il valore preciso della perdita perché la macchina rilevava valori di perdita di 100cm³/min, valore massimo del flussimetro oltre il quale non riesce a misurare. È stato grazie alla prova di tenuta che si sono rilevate le prime cricche da cratere di cui si è discusso nel paragrafo 5.2.3.3. Segnate le zone di perdita gli operatori hanno tentato il recupero del case realizzato attraverso dei punti di saldatura sulle zone interessate, non solo cricche da cratere ma anche su porosità come i cordoni in Figura 40 e Figura 41. Dopo diversi tentativi possiamo dire che l'operazione ha dato un buon risultato riducendo la perdita a 30cm³/min.

Non riuscendo ad ottenere valori di perdita nei limiti consentiti per i primi battery case si è ottenuta una deroga. Poi i vari miglioramenti dei cordoni di saldatura hanno contribuito a ridurre la perdita nell'intorno di 20 cm^3/min.

Data la simultanea questione delle eccessive deformazioni e del mancato superamento della prova di tenuta, insieme con i progettisti si è deciso di ridurre i cordoni per contenere le deformazioni e di adoperare del sigillante sulle varie giunzioni per tentare di ottenere risultati positivi.

Tenendo presente che la fase di sigillatura non era prevista in principio e che le parti da sigillare non sono state progettate per facilitare l'applicazione del sigillante stesso le prime prove hanno riscontrato esiti migliori ma comunque negativi.

Migliorando l'illuminazione e costruendo spatole che meglio si adattando a distendere il sigillante si sono ottenuti i primi risultati positivi. Man mano che gli operatori acquisivano esperienza si sono ottenuti risultati sempre più soddisfacenti come dimostra il grafico in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** migliorando il valore di perdita da 17cm^3/min fino ad un minimo registrato di 3cm^3/min.

6 Conclusioni

Il lavoro di tesi svolto ha riguardato la produzione di un involucro batterie per auto elettriche. Gli obbiettivi di tale lavoro sono stati migliorare il prodotto attraverso dei controlli qualità al fine di verificare che il prodotto soddisfi i requisiti minimi richiesti:

Qualità cordoni di saldatura secondo la norma UNI EN 10042/C;

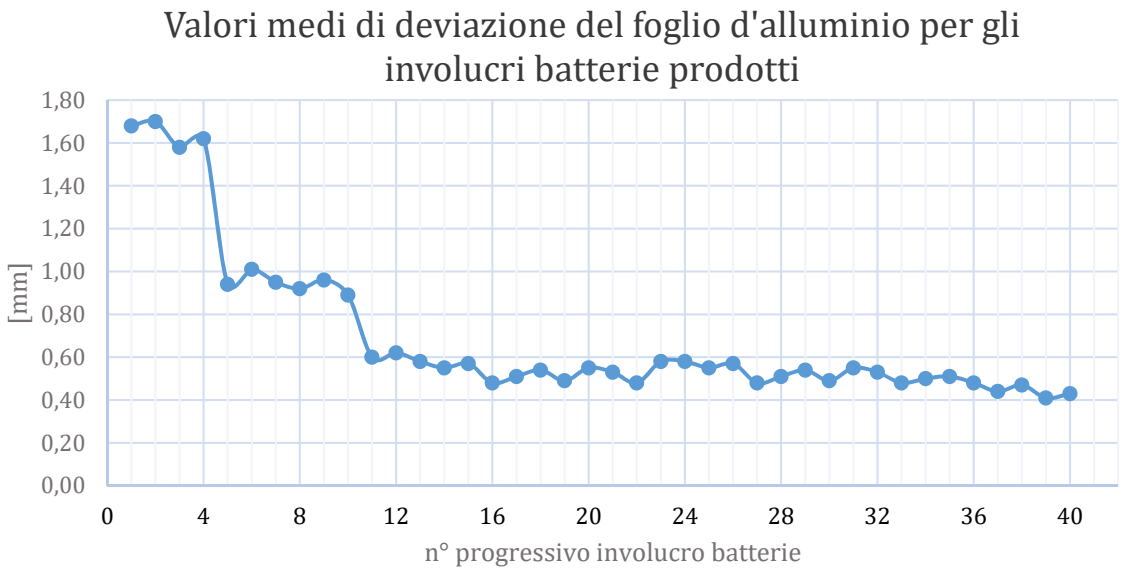
Contenere le deformazioni dovute alla saldatura;

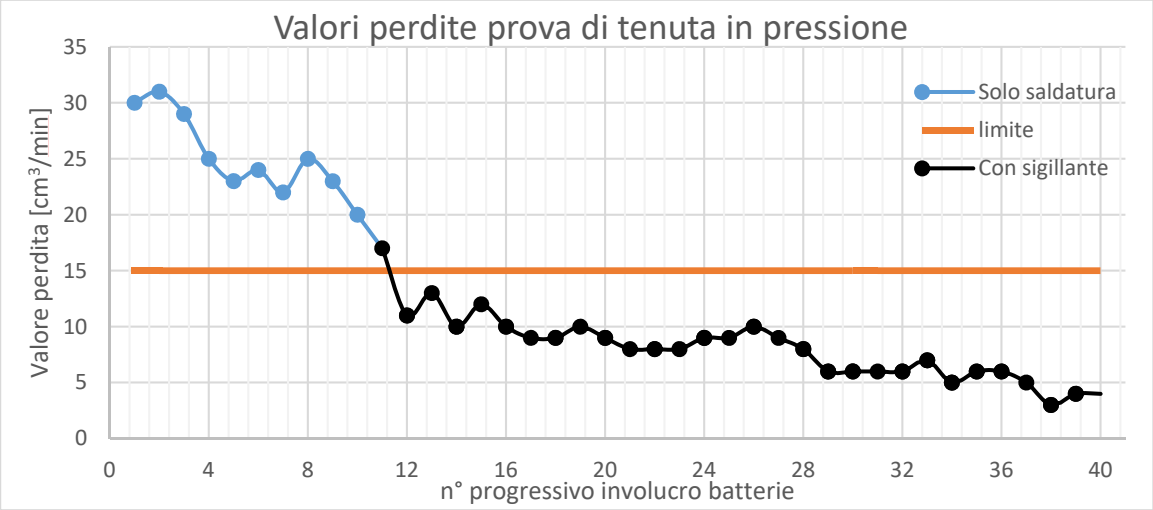
Raggiungere la tenuta in pressione del pacco batterie con una perdita massima di $15cm^3/min$.

Il raggiungimento di tale obiettivo, sebbene complesso, è stato possibile grazie alla collaborazione e al duro lavoro di tutte le personalità coinvolte.

Giunto 1 fusione/lamiera

Giunto 7 fusione/lamiera





In particolare, le problematiche riscontrate hanno fornito importanti feedback per la valutazione di migliorie da apportare al processo per la futura produzione in serie.

A mio parere il processo di saldatura resta una soluzione ottimale ma attualmente non applicale. Il raggiungimento degli stringenti obiettivi di deformazione e tenuta imposti con il solo processo di saldatura è un argomento di particolare interesse ma ancora inesplorato. Si spera, infatti, che al più presto la comunità scientifica possa fornire delle linee guida per l'ottimizzazione del processo in queste particolari applicazioni. Attualmente gli stringenti requisiti, l'inesperienza, i tempi e i costi costringono le imprese all'utilizzo del sigillante dopo la saldatura per garantire la tenuta o alla valutazione di soluzioni alternative, come l'applicazione di colle strutturali. Quest'ultime permetterebbero l'incollaggio del foglio di alluminio

azzerando il difetto delle deformazioni e riducendo i costi di pulizia, inficiando, però, sulla resistenza delle giunzioni. Risulta, quindi, necessario approfondire tale tematica (saldatura di leghe dissimili per la produzione degli involucri dei pacchi batterie) per sostenere la prevedibile domanda di veicoli elettrici che sommergerà il mercato nei prossimi anni.

7 Bibliografia

[1] D. D. P. EUROPEE, «Patto verde europeo,» DIPARTIMENTO DELLE POLITICHE EUROPEE, 2020. [Online]. Available: http://www.politicheeuropee.gov.it/it/comunicazione/approfondimenti/patto-verde-europeo/.

[2] «Auto elettrica in Italia, le proposte al Governo per farla decollare,» 2019. [Online]. Available: https://insideevs.it/news/377257/auto-elettrica-proposte-governo-per-farla-decollare/.

[3] A. Mirra, «Batterie LA LORO EVOLUZIONE,» *QUATTRORUOTE,* 2020.

[4] «TEKNORING, Il portale delle professioni tecniche,» 2019. [Online]. Available: https://www.teknoring.com/news/trasporti-e-automotive/auto-elettriche-storia-veicoli/.

[5] L. Morello, «ilGiornale.it,» 2020. [Online]. Available: https://motori.ilgiornale.it/storia-ed-evoluzione-dellauto-elettrica/.

[6] «Ev-volumes.com,» [Online]. Available: https://www.ev-volumes.com/news/86364/.

[7] AlVolante.it, «Auto elettriche, ibride, ecologiche, news su modelli,» 2019. [Online]. Available: https://www.alvolante.it/categoria/green#:~:text=Autonomia%20fino%20a%20590%20km..

[8] «vigilidelfuoco.it,» 2018. [Online]. Available: https://www.vigilfuoco.it/allegati/biblioteca/RischiConnessiConLoStoccaggioDiSistemiDiAccumuloLitio-Ione.pdf.

[9] "Saldatura per fusione", Volume 1, Istituto italiano della saldatura.

[10] L. Jeffus, Welding: Principles and Applications, seventh edition.

[11] F. C. Campbell, Elements of Metallurgy and Engineering Alloys,cap. 26.2, 2008.

[12] F. C. Campbell, Elements of Metallurgy and Engineering Alloys, cap.26.5, 2008.

[13] I. C. PESENTI, Scrittore, *Alluminio e sue leghe.* [Performance]. 2015.

[14] G. Elio, *ALLUMINIO E SUE LEGHE, Classificazioni e trattamenti termici.,* Torino.

[15] G. Mathers, The welding of Aluminium and its alloys, Woodhead Publishing Ltd, 2002.

[16] s. kalpakjia, Tecnologia meccanica, cap.5 Processi di fonderia e trattamenti termici.

[17] s. kalpakjia, tecnologia meccanica, cap.6 processi di deformazione massiva.

[18] I. STANDARD, «Giunti di alluminio e di sue leghe saldati ad arco, UNI EN ISO 10042,» 2007.

[19] P. K. Pal e D. o. M. a. I. Engineering, Scrittori, *Inspection and Quality Control in Manufacturing.* [Performance].

[20] Aludelta Metalli s.r.l., *Estrusi in lega di allumino.*

8 Ringraziamenti

Giunto al termine di questo progetto e del mio percorso di studi, desidero ringraziare tutti coloro i quali hanno contribuito al raggiungimento di questo traguardo.

In primis ringrazio il Prof. Lombardi e la prof.ssa De Maddis per avermi dato la possibilità di svolgere questo lavoro e in particolare il Prof. Mattia Orlando per la sua professionalità e disponibilità fornita durante lo sviluppo di quest'attività.

Desidero inoltre ringraziare tutto il personale dell'Eurodies Italia, in particolare l'ing. Vincenzo Rosati per avermi accolto nella sua azienda.

Un sentito ringraziamento va a tutti gli amici e i colleghi che ho avuto la fortuna di conoscere in questi anni e che hanno rappresentato una seconda famiglia qui a Torino, in particolare Angelo ed Emilio

Un ultimo ringraziamento, il più importante direi, va alla mia famiglia e alla mia fidanzata, pilastri della mia vita, a cui il presente lavoro è dedicato.