

POLITECNICO DI MILANO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aeronautica
Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione
Dipartimento di Scienze e Tecnologie Aerospaziali



**Ottimizzazione di Processo:
Accoppiamento Corona-Mozzo di Corona Collettrice AW-139 e
Preparazione diaframmi in Ti, all' EBW per Alberi a Motore.**
Tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria Aeronautica

Relatore: Prof. Luca Angelo DI LANDRO

Co-relatore: Manuel UGGERI

Tesi di Laurea di:

Gianpaolo RE DIONIGI

Matr. 796060

Anno Accademico 2014 – 2015

INDICE

<u>Capitolo 1</u>	3
<u>1.1 Generale</u>	3
<u>1.2 Campi di Utilizzo della E.B.W.</u>	7
<u>1.3 Ambito di Analisi</u>	10
<u>1.4 Discontinuità e Criteri di Selezione</u>	13
<u>1.5 Materiali Metallici Saldabili</u>	20
<u>1.6 Metodologie in Preparazione all' EBW</u>	25
<u>1.7 Obbiettivi</u>	28
<u>Capitolo 2</u>	34
<u>2.1 Electron Beam Welding-Saldatura a Fascio di Elettroni</u>	34
<u>2.1.1 Introduzione Storica</u>	34
<u>2.1.2 Elementi Costitutivi Impianto a E.B.W.</u>	35
<u>2.1.3 Parametri Principali</u>	44
<u>2.2 Lavaggio ad Ultrasuoni</u>	53
<u>2.2.1 Procedura e Parametri Principali</u>	53
<u>Capitolo 3</u>	55
<u>3.1 Allestimento Campagna Sperimentale e Risultati</u>	55
<u>3.1.1 Accoppiamento Corona-Mozzo di Corona Collettrice AW-139</u>	55
<u>3.1.2 Preparazione diaframmi in Ti, all' EBW per Alberi a Motore</u>	64
<u>3.2 Macchinari Utilizzati</u>	68
<u>Capitolo 4</u>	72
<u>4.1 Conclusioni</u>	72
<u>4.1.1 Accoppiamento Corona-Mozzo di Corona Collettrice AW-139</u>	72
<u>4.1.2 Preparazione diaframmi in Ti, all' EBW per Alberi a Motore</u>	74

Capitolo 1

1.1 Generale

La presente Tesi di Laurea Specialistica è stata svolta in collaborazione con AgustaWestland S.p.A. (stabilimento di Cascina Costa di Samarate, Varese) ed il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Aerospaziali del Politecnico di Milano.

La necessità di svolgere un progetto sperimentale dedicato all'analisi ed ottimizzazione del processo di saldatura si è resa necessaria poiché la ricerca di perfezione sia nel processo di lavaggio sia nel processo di produzione degli assemblati stessi, avrebbe aumentato il grado di ottimizzazione della produzione avendo meno scarto di prodotto.

Dal mio canto personale l'interesse di poter valutare da vicino aspetti legati all'ingegneria di processo e collocati sicuramente in un contesto industriale di prestigio e leader nel mercato del settore aeronautico mi avrebbe dato modo di acquisire ed apprendere realtà di sicuro interesse professionale per il mio futuro.

Nella presente Tesi di Laurea, verrà descritta un'attività di sviluppo tecnologico volta all'ottimizzazione di processi di lavorazione in ambito di saldatura a fascio di elettroni o E.B.W. (Electron Beam Welding).

La tecnologia E.B.W. è nata negli anni '50 in Germania e Francia in ambito nucleare. In questo campo, infatti, erano nate richieste di saldature di componenti refrattarie e reattive (ad Ossigeno e Azoto).

Nel proseguire degli anni, si è sviluppata, fino ad essere largamente utilizzata nel ramo industriale in numerosi ambiti che richiedono elevata qualità di saldatura.

Durante il processo, viene utilizzato un fascio di elettroni ad alta energia, indirizzato sulla superficie durante la fase di saldatura; grazie al calore sviluppato, a seguito del contributo di energia cinetica del fascio, si realizza la fusione locale del materiale.

Questo processo avviene senza materiale d'apporto, all'interno di una camera entro la quale viene creato il vuoto al fine di ottenere le migliori condizioni di saldatura.

La tecnologia E.B.W. assicura elevate prestazioni nel processo di saldatura in quanto garantisce i seguenti benefici:

1. basso calore in ingresso nel materiale (rispetto tutti gli altri processi di saldatura ad arco) e minima distorsione dei componenti saldati;
2. quasi totale assorbimento dell'energia del fascio (particelle cariche di energia cinetica);
3. qualità del cordone di saldatura aggiustabile utilizzando i parametri del fascio;
4. saldature che possono essere eseguite anche in punti nascosti o ciechi;
5. possibilità di saldare la quasi totalità dei metalli sia fra metalli simili fra loro che dissimili;
6. possibilità di utilizzare (estremamente raro) o meno materiale d'apporto;
7. alte velocità di saldatura ed elevati ratei di raffreddamento;
8. massima protezione dagli effetti di ossidazione (procedimento condotto a vuoto);
9. parametri di riproducibilità semplici e precisi;
10. assenza di influenza di forze di inerzia sul fascio grazie a campi magnetici variabili con estrema frequenza;
11. sequenza totalmente automatizzata;
12. bassi costi di consumo;
13. può essere commercializzata già completa di ogni apparato necessario;
14. possibilità di saldare anche non sotto vuoto.

La caratteristica più vantaggiosa della E.B.W. è la sua profonda penetrazione. Questo effetto si ottiene proprio grazie al fascio di elettroni che vengono altamente accelerati ed una volta che hanno colpito la superficie, penetrano leggermente al di sotto di essa: a questo punto rilasciano la maggior parte della loro energia cinetica, che si trasforma in termica.

Questo processo, porta ad un enorme riscaldamento del punto di impatto del fascio (punto focale) e quindi alla parziale evaporazione del materiale di base. Il fascio può viaggiare con una facilità molto maggiore attraverso tali vapori che non attraverso il metallo allo stato solido e questo non può che agevolare l'ulteriore penetrazione degli elettroni nel metallo stesso.

Le saldature dunque, presentano un elevato rapporto “profondità di saldatura/spessore sezione trattata”(20/1) e dunque è possibile effettuare giunzioni di dimensioni nell'ordine del centesimo di millesimo [1].

Un altro vantaggio della saldatura a fascio di elettroni a vuoto consiste nel posizionare rapidamente il fascio di elettroni e nel focalizzare tale fascio a frequenze fino a 1 MHz. Poiché la deflessione avviene così rapidamente, è possibile mantenere diverse cavità aperte allo stesso tempo e quindi lavorare con più fasci "contemporaneamente".

La saldatura a fascio di elettroni, presenta anche degli svantaggi, quali:

1. Elevato costo dell'apparecchiatura
2. Dimensioni degli assiemi da saldare limitate all'ingombro disponibile
3. Difficoltà in caso di guasto nel mantenere operativa la linea di produzione
4. Struttura a base fissa; non può essere trasportata in luoghi differenti ma deve mantenere la stessa locazione.

Lo svantaggio maggiore è quello legato alle dimensioni degli assiemi da saldare. Infatti, pur essendo estremamente precisa e conveniente come tecnologia di saldatura, non sempre è possibile introdurre l'assieme da saldare in camera di saldatura a causa delle elevate dimensioni di quest'ultima.

Il comportamento della E.B.W. nei materiali di utilizzo aerospaziale verrà diffusamente trattato nel capitolo successivo. Per quanto riguarda gli altri materiali, è importante sottolineare che la E.B.W. può saldare anche materiali refrattari e reattivi, grazie alla sua applicazione nel vuoto, e può effettuare saldature tra materiali con diverse caratteristiche di conducibilità termica e punti di fusione differenti, anche se non tutte le combinazioni sono ancora possibili. L'unico prerequisito è che il materiale base sia un buon conduttore di elettricità e che venga creato un collegamento a terra per evitare eventuali scariche elettriche. Poiché non è necessario l'impiego di materiali d'apporto o elettrodi consumabili, le caratteristiche della saldatura finita dipenderanno esclusivamente dal materiale di base.

La saldatura a fascio di elettroni fornisce risultati simili a quella a raggio laser ed un requisito che caratterizza il processo a fascio di elettroni è la necessità di un vuoto sufficientemente adeguato che principalmente avviene nell'area della generazione del fascio.

In ogni caso, il vuoto richiesto nella camera di lavoro, protegge i materiali che possono reagire con l'ossigeno ed altre molecole e rispetto i normali impianti di saldatura a punti, la E.B.W. risulta essere maggiormente conveniente anche sotto l'aspetto economico oltre a permettere la saldatura a velocità elevate con adeguate profondità.

Di seguito sono riportate due immagini che rappresentano rispettivamente una saldatura E.B.W. ed una L.B.W.(Laser Beam Welding):

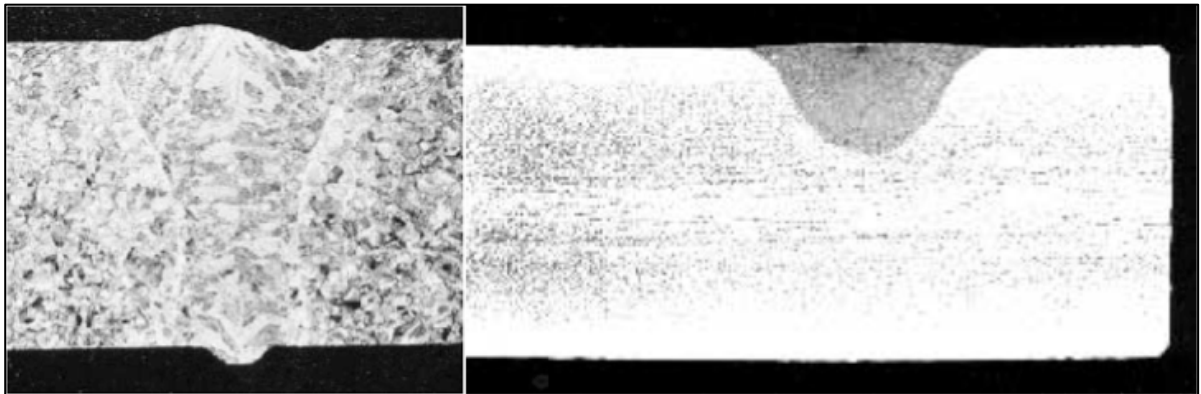


Figura 1: Confronto fra E.B.W. (sinistra) e L.B.W.(destra)

I principali parametri di processo, regolabili, sono l'amperaggio del fascio, la tensione di accelerazione, la velocità relativa tra il fascio ed il pezzo, l'immagine e la distribuzione di densità di potenza del fascio.

La saldatura a pressione atmosferica (non a vuoto) è possibile anche con un fascio di elettroni, ma la distanza tra l'uscita del fascio e il piano del pezzo deve essere breve (max. 30 mm). Come conseguenza si ottiene una dispersione degli elettroni delle molecole/atomi di gas; il fascio viene espanso e la densità di potenza ridotta. Per questo motivo, solo spessori fino a circa 20mm sono saldabili con saldatrici non a vuoto.

1.2 Campi di Utilizzo della E.B.W.

La saldatura a fascio di elettroni viene ampiamente utilizzata per la saldatura di singole parti dopo la lavorazione o anche per la fabbricazione di parti individuali o su larga scala e viene utilizzata in vari settori. Viene qui di seguito riportato un insieme dei settori di utilizzo di tale tecnologia con annesso qualche esempio illustrativo:

Settore Aeronautico: Nel campo aeronautico, il vincolo a cui sottostare durante le varie lavorazioni delle parti meccaniche è quello della totale assenza di difetti nelle saldature. Attraverso saldature a fascio di elettroni, vengono normalmente prodotte la cosiddetta “Front bearing housing” dei velivoli, rotori e palette situate in compressori/turbine, ingranaggi per vari scopi, diaframmi per alberi a motore o per sensori, attuatori e qualsiasi altro assieme metallico che deve sottostare a ristretti criteri dimensionali, qualitativi e quantitativi.



Figura 2: Front Bearing Housing di un generico velivolo

Settore Automobilistico: Attraverso saldature a fascio di elettroni, vengono prodotte giunzioni su vari componenti e per la produzione di telai. Infatti nella normale produzione di turbocompressori, la girante ad alta velocità situata nel cuore del turbocompressore è ottenuta da un ingranaggio, saldato attraverso E.B.W. ad un albero in acciaio al carbonio.

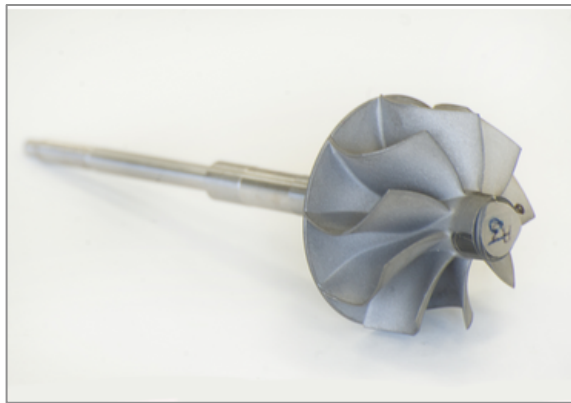


Figura 3: Hi-Speed Rotating Impeller di una generica turbina

Settore Medico: Nel settore medico, la saldatura a fascio di elettroni viene utilizzata sulle protesi per anca, dove viene trattata la superficie di quest'ultima nella zona a contatto con le ossa. In questa zona, la protesi in Titanio deve presentare una superficie adeguatamente rugosa per incoraggiare la ricrescita dell'osso attorno alla protesi. La E.B.W. riesce ad ottenere tale rugosità attraverso un particolare trattamento superficiale dell'assieme utilizzando una serie di bobine per la focalizzazione iniziale del fascio, che viene quindi deviato su punti selezionati della superficie del materiale in modo estremamente rapido e controllato. In ogni punto si forma un bagno fuso, il fascio viene poi spostato lateralmente e il materiale fuso è spinto verso le aree circostanti. Ripetendo questo processo in diverse 'microzone', si possono formare rugosità fino a 2mm di altezza e 0.2mm di larghezza, ognuna delle quali è accompagnata da uno o più micro avvallamenti.

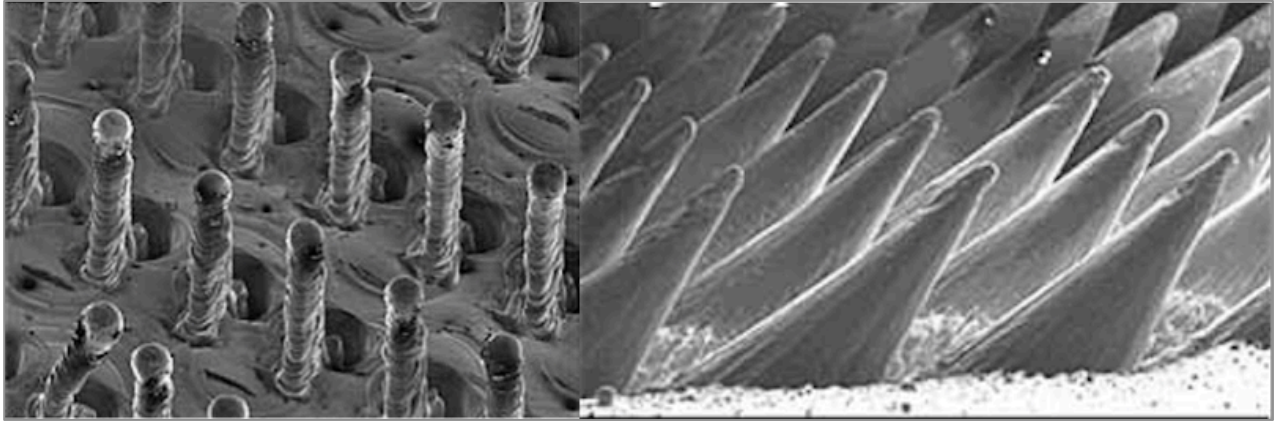


Figura 4: Differenti Tipologie di Trattamento Superficiale

La tecnologia di saldatura a fascio di elettroni, viene anche normalmente impiegata nel ramo nucleare dove, mediante l'applicazione di questa tecnica, vengono ottenute parti strutturali del reattore, valvole e strumentazione a contorno.

Come un processo di saldatura a fusione, la saldatura a fascio di elettroni risulta adatta, soprattutto per la saldatura di materiali metallici simili poiché producono saldature strette e profonde e causa della leggera distorsione dovuta alla potenza termica tipica del processo, il quale è caratterizzato da basse perdite di calore per conduzione (in contrasto con i processi di saldatura ad arco).

1.3 Ambito di Analisi

L'analisi svolta è stata focalizzata sul sistema di trasmissione del moto delle pale di elicotteri della famiglia AW-139 e sul sistema albero motore.

Questa parte del velivolo riveste particolare importanza poiché grazie alla trasmissione del moto è possibile convogliare la coppia derivante dal motore e distribuirla a più utilizzatori e grazie all'albero motore è possibile trasmettere tale coppia. Trasmissione ed albero motore sono dei sistemi dunque di primaria importanza e sono composti da più parti le quali vengono saldate tramite saldatura a fascio di elettroni.

La qualità della saldatura risulta essere dunque, un punto particolarmente critico che potrebbe compromettere la stabilità del velivolo e di conseguenza la sicurezza durante la fase di volo.

Nel motore, due stadi di compressione **(b)** comprimono la massa d'aria entrante dal diffusore **(a)**; a seguito dell'iniezione del combustibile in camera di combustione **(c)**. La miscela espande in due turbine Pratt & Whitney PT6C-67C per poi attraversare un ugello di scarico. Attraverso un sistema di ingranaggi, è possibile ottenere un moto rotatorio a partire dalla spinta generata dall'espansione dei gas uscenti dalle turbine nell'ugello.

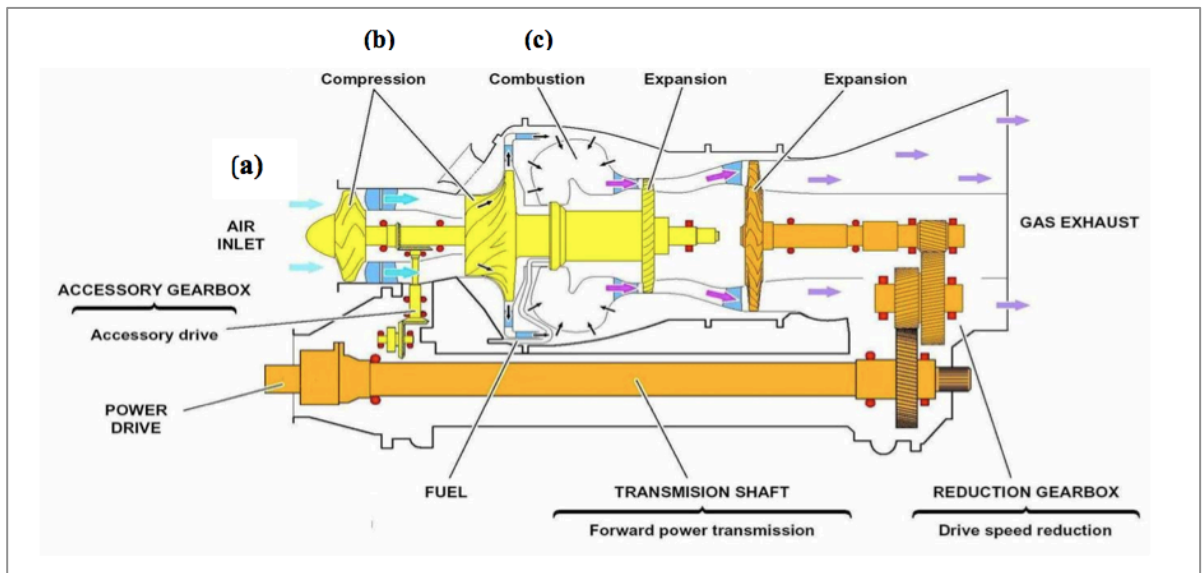


Figura 5: Schematizzazione Motore e Trasmissione di un Elicottero

Il moto rotatorio è trasferito, attraverso un sistema di trasmissione ad alberi, alle pale del rotore principale e di coda generando la portanza necessaria al volo.

La corona collettrice (o Crownwheel Driven) è un importante elemento della trasmissione che permette di trasferire il moto circolare fra gli ingranaggi, alimentando così la coppia alle pale rotanti del rotore principale. Essa è costituita dal sistema “mozzo-corona” che viene saldato in fase di produzione per mezzo appunto della tecnologia E.B.W. , che garantisce prestazioni di saldatura piuttosto elevate in grado di soddisfare gli elevati standard richiesti. La corona collettrice è il cuore del gruppo trasmissione poiché permette di convogliare la coppia derivante dal motore verso altri utilizzatori (*Tail Take-Off*).



Figura 6: Crownwheel Driven di un AW-139

Per quanto riguarda l'albero motore/di trasmissione, esso ha lo scopo di trasmettere appunto il moto dalla turbina al compressore e ad ogni organo ad esso collegato. Nello specifico, è costituito da un albero che deve trasmettere il momento torcente e da un diaframma in Titanio, flangiato e cavo al suo interno avente il compito di non trasmettere i carichi assiali e soprattutto il momento flettente che agisce sull'albero.

Il sistema viene assemblato, saldato e successivamente calettato direttamente alla turbina.

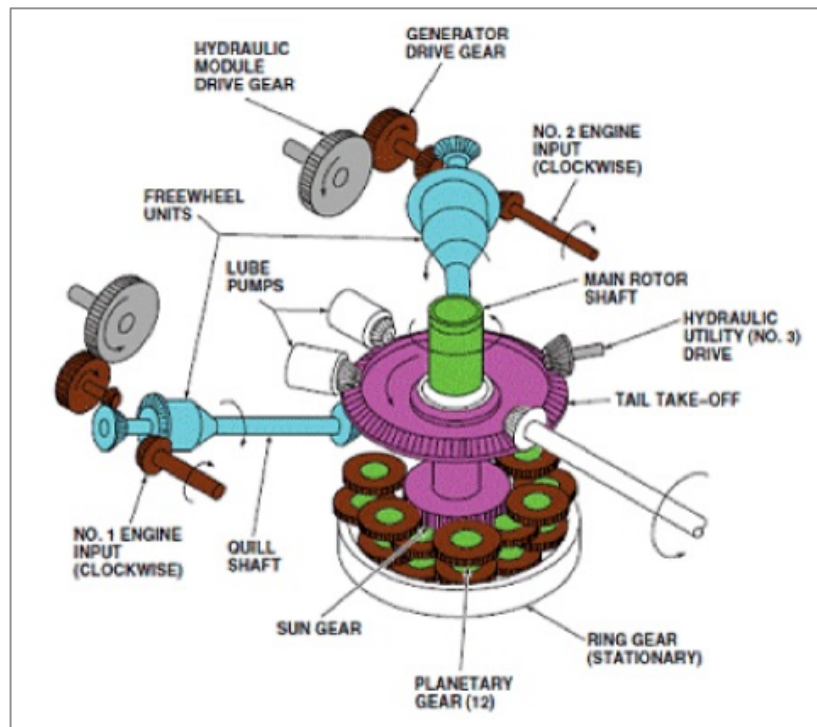


Figura 7: Schema Generale di un impianto di trasmissione del moto

Il materiale selezionato per la costruzione dei diaframmi, risulta essere una lega di Titanio/Alluminio/Vanadio (Ti-6Al-4V). Questo materiale combina due importanti caratteristiche necessarie allo scopo del assemblato finale ovvero:

Elevata resistenza termica: essendo parte dell'interno del motore, il sistema sarà sottoposto a carichi termici piuttosto elevati.

Elevata resistenza a fatica: Il sistema installato sarà direttamente coinvolto nella conversione dell'energia cinetica. La componente di fatica risulterà pertanto la preponderante nella dinamica dei componenti installati.

1.4 Discontinuità e Criteri di Selezione

Verranno analizzati in questo paragrafo, i criteri di selezione e le discontinuità che si possono incontrare a valle del processo di saldatura.

Nel caso in cui, durante la fase di assemblaggio dei componenti da saldare, vengano lasciati gap in prossimità della saldatura (giochi), è possibile che durante il processo di saldatura a fascio di elettroni vengano a formarsi delle discontinuità o difetti.

È possibile risolvere o comunque controllare tale fenomeno, attraverso l'utilizzo di aperture addizionali che hanno lo scopo di far confluire il liquido fuso e garantire una corretta ri-solidificazione, grazie alla differenza di pressione fra assemblato e camera di saldatura.

Il risultato è la diminuzione fino alla quasi totale scomparsa di discontinuità interne. Risulta inoltre preferibile, in presenza di saldature circonferenziali che tali aperture di "ventilazione", vengano praticate alla base del chiodo [2].

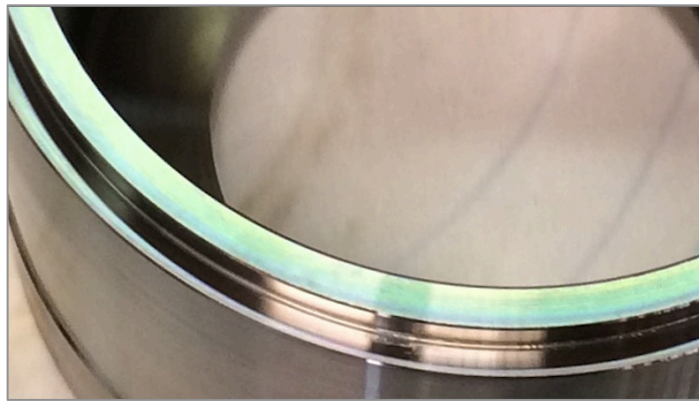


Figura 8: Ingrandimento del "gap" di ventilazione

Come si può notare dalla Figura 8 viene riportato un ingrandimento del gap di ventilazione che viene creato alla base del chiodo, oggetto di studio del mio percorso di tesi.

A causa delle ridotte dimensioni che si stanno gestendo e dell'elevato numero di pezzi che vengono prodotti, risulta economicamente più vantaggioso accettare un numero limitato di cavità interne, piuttosto che ricercarne la totale assenza a patto che, tali cavità, vengano analizzate e giudicate idonee per la saldatura effettuata.

È quindi necessario, investigare sperimentalmente che tali pori e inclusioni interne non possano agire in modo pregiudizievole sulle proprietà del materiale prodotto.

Per maggior chiarezza, verranno esposti parametri e tipologie di difetti che si possono riscontrare in fase di saldatura così come sono riportati da specifica tecnica interna all'azienda:

Difetti: una discontinuità non intenzionale diventa *difetto* quando la sua posizione, orientazione, intensità sono tali da avere effetti deleteri sull'efficienza in servizio della parte.

Fenditura: fessura a forma di disco sulla linea centrale di saldatura. La lunghezza e la profondità variano generalmente tra 10 e 20 volte la sua apertura.

Mancata Fusione: fusione non completa in cui una parte di giunto saldato non è fusa. La mancanza di fusione può essere causata da discontinuità nel giunto da saldare, da scarsa miscelazione delle leghe, da presenza di leghe differenti, fa uno scarso allineamento delle attrezzature di saldatura, da un percorso (o tempo) di saldatura insufficiente o da una deviazione del fascio dovuta ad interferenze di campo magnetico.

Mancanza di Metallo o Avvallamento Superficiale: depressione o una concavità, uniforme presente sulla superficie superiore del bagno di fusione. Di solito si verifica con basse velocità di fusione associate a potenze eccessive usate per ottenere una penetrazione completa per insufficiente accoppiamento del giunto saldato, e per velocità di saldatura non uniformi.

Sottosquadro: solco localizzato al margine della zona fusa tra lato del cordone di saldatura e materiale base, non riempito dal metallo fuso. Un sottosquadro è causato da mancanza di metallo.

Ripiegatura (Bavetta): sporgere di metallo fuso oltre il bordo interno, superiore od inferiore della saldatura.

Porosità: discontinuità interna tridimensionale costituita da vuoti di forma rotonda od ovale. Le porosità possono essere isolate, allineate od ammassate, nella profondità della saldatura. Possono essere causate da materiale gassoso, giunti di saldatura troppo stretti, velocità di saldatura troppo elevate, penetrazione insufficiente, bassa tensione di vapore degli elementi alliganti e da insufficiente accoppiamento del giunto saldato.

Inclusione: discontinuità interna tridimensionale costituita da particelle estranee intrappolate sotto la superficie.

Cricca a Caldo o a Freddo: discontinuità non intenzionale che in ambito aeronautico viene sempre considerata difetto e comporta sempre la rimozione dal servizio della parte metallica che la contiene. Presenta una forma a punta e da un alto rapporto della lunghezza e della larghezza rispetto alla dimensione d'apertura. Le *cricche a caldo* si verificano su materiali sensibili alle cricature che non sono stati preriscaldati o distesi prima della saldatura. Le *cricche a freddo* sono minutissime incrinature che si formano sotto al cordone di saldatura nei primi strati del metallo base e che si formano a partire da 250 °C fino alla temperatura ambiente. Sono solitamente causati da un cordone stretto, da penetrazione insufficiente, da velocità di saldatura troppo elevate e da non corretti parametri d'ingresso e di uscita del fascio.

Probability of Detection o PoD = $\frac{\text{Difetti di una certa dimensione trovati}}{\text{\# totale di difetti}} \%$

Livello di Confidenza = intervallo di valori plausibili .

Controlli Non Distruttivi (CND), che risultano essere tecniche di controllo estremamente vantaggiose a livello industriale, vengono utilizzati in ultimo per verificare i risultati ottenuti e la qualità del pezzo saldato.

Di fondamentale importanza in campo aeronautico è il rispetto rigoroso di tutti i requisiti di sicurezza del volo cui la struttura ed i sistemi dell'aeromobile devono rispondere.

Fin dall'inizio della storia dell'aviazione, si sono verificati incidenti di volo dovuti in gran parte a rotture provocate dallo sforzo cosiddetto a "fatica". Risulta noto infatti che ogni innesco di rottura a fatica è provocato oltre che dalla conformazione del profilo del particolare, dallo sforzo applicato, ma soprattutto dalla disomogeneità della struttura del materiale stesso.

L'esigenza di verificare l'omogeneità del materiale, ha portato all'applicazione nell'industria aeronautica e non, di tecniche di indagine basate su Controlli Non Distruttivi quali, Controllo Radiogeno, Controllo Ultrasonoro [3].

I Controlli Non Distruttivi, utilizzati sin dalle prime fasi di fabbricazione, consentono di rilevare difetti e permettono una rapida individuazione delle cause che li hanno provocati; consentono altresì di evitare sprechi di tempo e di denaro in lavorazioni successive.

Per questo motivo, il personale addetto alle lavorazioni non abbisogna esclusivamente di addestramenti al solo scopo di saper adoperare correttamente le apparecchiature e di conoscere le metodologie d'esame, ma necessita di una conoscenza dei processi di fabbricazione ed in particolare di quelle fasi che possono comportare criticità nella formazione di eventuali difetti.

Verranno analizzate le tecniche utilizzate durante il lavoro di tesi, evidenziandone il loro funzionamento e la classificazione dei difetti che da esse risultano.

Ispezione Radiografica [4-6]: i raggi X furono casualmente scoperti nel 1895 dal fisico Wilhelm Rontgen durante lo svolgimento di alcuni esperimenti utilizzando un tubo di scarica nel gas a bassa pressione incidendo una lastra fotografica che si trovava in uno dei cassetti, pur essendo protetta dalla luce.

Questi raggi avevano la strana proprietà di penetrare attraverso la materia e da successivi esperimenti, fu dimostrato che quest'ultimi si propagavano in linea retta ed erano privi di carica elettrica poiché non venivano deviati in vicinanza di un magnete.

La produzione di raggi X avviene mediante il bombardamento di una piastrina di metallo ad alto numero atomico (Tungsteno o Platino) con un fascio di elettroni accelerati da un intenso campo magnetico (emesso dal catodo).

Nell'urto contro gli atomi della piastrina, detta anticatodo, gli elettroni subiscono un brusco rallentamento con una conseguente perdita di energia cinetica la quale viene convertita parte in calore(99%) e parte in raggi X(1%).

Il fascio di elettroni viene creato attraverso la cosiddetta emissione termoionica per mezzo di un filamento riscaldato con corrente a bassa tensione.

I raggi X vengono proiettati sul cordone saldato da analizzare ed una vera e propria radiografia di tale cordone viene stampata su un negativo e successivamente, l'operatore potrà ispezionare la radiografia per valutare e misurare la qualità e le dimensioni delle inclusioni e giudicare così l'ammissibilità del pezzo.

A fronte dell'ispezione, eventuali difetti possono essere classificati come:

Interni: mancanza di materiale, macchia scura sulla radiografia.

Esterni: eccesso di materiale, macchia chiara sulla radiografia.

Tale metodologia risulta essere stata il principale controllo non distruttivo ed è stata la prima ad essere utilizzata. Inoltre ha anche il vantaggio di fornire una documentazione obiettiva e dimensionale del difetto riscontrato. All'esame della pellicola radiografica, le discontinuità saranno evidenziate da zone più scure o più chiare a seconda della tipologia del difetto come sopra specificato.

Mediante la radiografia sono rilevate anomalie e difetti interni senza distruzione del pezzo o del materiale; inoltre è possibile così ottenere un documento permanente dell'esame, da poter incrociare con ulteriori CND per confermare l'ammissibilità dell'accoppiamento o comunque per essere catalogati per il futuro.

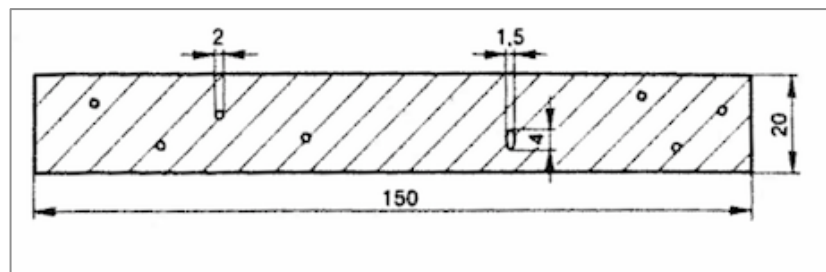


Figura 9: Schematizzazione pellicola radiogena

L'attenuazione che il fascio subisce nell'attraversare il pezzo in esame avviene in funzione dello spessore, numero atomico e della densità del materiale nonché dal potere penetrante della radiazione. È possibile anche localizzare il difetto in larghezza e lunghezza ma non in profondità.

La saldatura viene analizzata dal tecnico seguendo rigorosamente le S.T.A. (Specifica Tecnologica Agusta di Processo) e nel caso, secondo la propria esperienza (requisito propedeutico allo svolgimento dell'analisi), può e deve adattare i parametri dell'analisi alla tipologia del P/N (Part Number) al fine di rilevare la totalità dei difetti e comprenderne l'entità.

I parametri che possono essere adattati, per lo studio dell'immagine sono:

1. energia del fascio, kV;
2. quantità di elettroni in movimento, mA;
3. tempo di esposizione;
4. spessore materiale;
5. densità.

L'operatore tecnico preposto sarà in grado di decidere quali parametri adottare utilizzando una targhetta in Piombo ("penetrametro"), posizionata sopra al P/N in analisi radiografica (siccome tale targhetta andrà a schermare parte della saldatura, verrà in seguito ri-analizzata in assenza del penetrametro).

Ispezione Ultrasonora: il controllo si basa sull'utilizzo di onde elastiche, generate da un impulso elettrico o un cristallo piezoelettrico, emesse da una sonda detta per l'appunto "emettitrice". L'onda elastica, viene trasmessa in tutto lo spessore dell'elemento soggetto all'analisi e, nel caso in cui incontri una discontinuità, essa viene deviata verso un'altra sonda detta per l'appunto "ricevente" e segnalata.

Le due sonde vengono installate ortogonalmente fra loro ma il fascio di onde sarà emesso con una data angolazione diversa dal valore nullo.

La tecnica può essere applicata ad ogni tipo di materiale purchè non sia *spugnoso* ed inoltre, la discontinuità deve essere perpendicolare al fascio.

Possono essere applicate due tipologie di tecniche di ispezione ultrasonora, quali:

TTU (utilizzata nelle procedure): trasparenza; sono presenti due sonde una che riceve e l'altra che emette. Quando la discontinuità non è presente, il fascio di onde elastiche viene emesso dalla sonda emettitrice ed assorbito da quella ricevente. Quando viene attraversata la discontinuità l'onda viene "rimbalzata" indietro e viene segnalata la discontinuità.

PE: riflessione; è presente una sola sonda che svolge il compito di emettitrice e ricevente. Il fascio di onde percorre tutto il materiale e quando incontra una discontinuità ritorna indietro comunicando la discontinuità.

Il controllo viene effettuato da un tecnico specializzato, il quale nella fase iniziale, imposta i criteri di segnalazione della discontinuità che sono specifici per ogni P/N poiché dipendono dallo spessore dell'elemento da analizzare (i.e. "segnalare al 100% le discontinuità da 0.8mm per uno spessore di 10 mm").

L'output fornito dal C.N.D. risulta in un'immagine rettangolare rappresentante l'intera zona saldata. Per evitare che le inclusioni vengano segnalate ai bordi dell'immagine, si posiziona la sonda ricevente a 180° a partire dal punto in cui il fascio di elettroni si è spento detto per l'appunto "slope out" (essendo saldature circolari, coincide con il punto in cui il fascio si è acceso detto "slope in").

Il controllo a ultrasuoni serve a completamento dell'analisi interna della saldatura. Infatti tutto ciò che è visto gli ultrasuoni, viene evidenziato anche negli RX ma non viceversa, poiché come già detto, la RX evidenzia i difetti in larghezza e lunghezza ma non in profondità.

Si rende dunque necessario un controllo incrociato fra le due tecnologie per escludere ogni fonte di errore.

Per garantire il raggiungimento degli standard di qualità imposti, vengono definiti dei limiti per quanto riguarda il numero e la dimensione di tali pori o cavità .

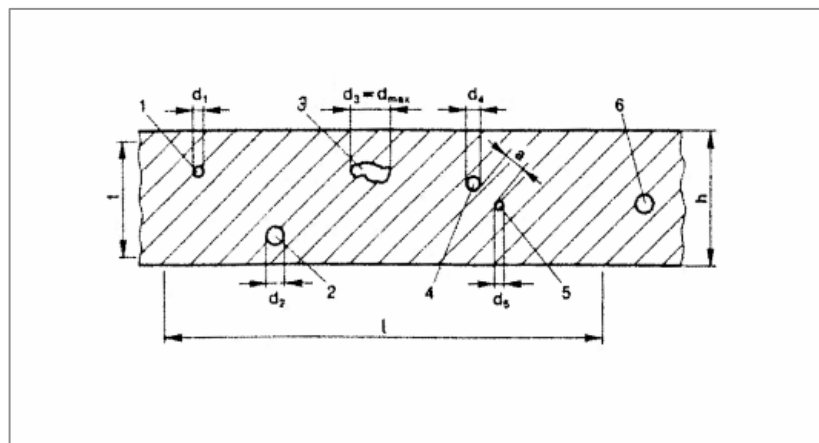


Figura 10: Schematizzazione discontinuità identificate durante la procedura UT

In base alla totalità delle discontinuità, vengono ricercate:

1. discontinuità aventi dimensione massima;
2. somma della superficie di tutte le discontinuità;
3. distanza minima fra le discontinuità.

In base ai criteri e standard di qualità, stabiliti dal Controllo Qualità interno all'azienda, a valle di tali risultati, si potrà determinare se la saldatura è accettabile o meno.

Devono essere giudicati perciò inaccettabili, evidenti difetti di mancata fusione o cricche in tutte le classi di saldatura.

Le saldature che non sono state ancora sottoposte alle normali prove di stress (*in-service stresses*) devono essere quindi attentamente valutate mentre quelle che contengono tali difetti devono essere immediatamente riparate o scartate.

1.5 Materiali Metallici Saldabili.

In questo sotto-paragrafo verranno analizzati i materiali metallici saldabili attraverso la E.B.W. utilizzate durante l'attività di tesi.

Acciaio: gli acciai da indurimento e nitrurazione possono essere saldati con successo previo trattamento superficiale o dopo aver lavorato la superficie da saldare.

Come risultato degli alti ratei di raffreddamento sperimentati, l'indurimento risulta significativo per contenuti di carbonio C nell'ordine dello 0.2%, con un indurimento di 700 HV (prove di durezza Vickers) per contenuti di Carbonio (C) maggiori.

Considerando acciai altamente legati, le cricche a caldo si formano, come risultato dell'interazione fra gli stress da contrazione e la presenza di un basso punto di liquefazione, fasi eutettiche ai limiti del grano austenitico [7].

Le cricche sono inter-cristalline e possono apparire come rotture da rifusione (*remelting cracks*) e nel caso di E.B.W. principalmente, possono essere interpretate come cricche da solidificazione.

In generale, è stato considerato che le cricche a caldo non possono essere prevenute solamente con la presenza di una piccola percentuale di grano δ – ferritico.

Il modo in cui il grano si solidifica è fondamentale; in funzione del tipo di composizione dell'acciaio, potrà avvenire una solidificazione principalmente ferritica avente un'alta resistenza alle cricche a caldo oppure si potrà avere una solidificazione austenitica avente un'elevata tendenza alle cricche a caldo.

Questo limite fra i due tipi di solidificazione, che corrisponde al “piano eutettico” di leghe di acciaio (72% Fe, 15% Cr, 13% Ni) può essere rappresentato sul diagramma di Schaeffler. Quest'ultimo, indica le fasi (martensitica, ferritica, austenitica) che si vengono a formare in funzione della composizione dell'acciaio (%Cr Equivalente e %Ni Equivalente). Il diagramma è suddiviso in tre zone principali alle quali corrispondono tre distinte strutture del cordone di saldatura: quella austenitica, quella ferritica e quella martensitica.

Ai confini di queste tre zone dette “*monofasiche*”, dato che in ciascuna è presente una sola fase o componente, si individuano altre zone a due o più fasi e precisamente: quella dell'Austenite con Ferrite, quella dell'Austenite con Martensite, quella della Ferrite con Martensite, quella dell'Austenite con Martensite e con Ferrite.

Nel diagramma in figura, sono state anche rappresentate schematicamente le zone in cui sono situate le strutture dei cordoni di saldatura di alcuni dei principali acciai inossidabili, saldati. Il diagramma di Schaeffler ha evidentemente una notevole importanza per stabilire a priori, le possibili strutture che saranno presenti nel cordone di saldatura e quindi orientare opportunamente la scelta del materiale d'apporto, in funzione della struttura che si vuole ottenere al fine di evitare la presenza di fasi che possono pregiudicare la resistenza alla corrosione o quella meccanica.

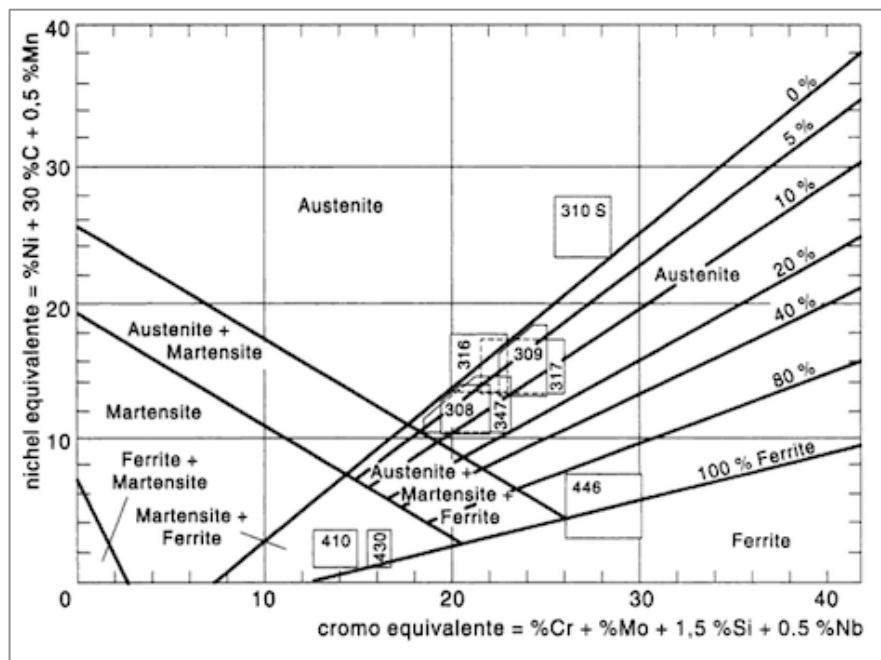


Figura 11: Diagramma di Schaeffler; permette di determinare in sede preventiva, nota l'analisi del cordone di saldatura, quali saranno i costituenti di tale cordone

Da ciò, in generale, segue che potrà essere scelta quella composizione che produrrà una componente δ – ferritica compresa fra 0%-15% nel fuso, e quella che avrà una solidificazione principalmente ferritica.

Una componente δ – ferritica maggiore del 15% potrà essere dannosa e pertanto dovrà essere evitata. In questo caso, si viene a formare nell'acciaio, una “rete” ferritica (ferrite network) che sotto trattamento termico andrà a dissociare in Carburi e Austenite (fase sigma σ) che potrà essere suscettibile a corrosione intercristallina.

Fase δ – ferritica [8]: A seconda della temperatura alla quale si forma, la Ferrite è denominata Ferrite Alfa oppure ferrite Delta. La Ferrite Alfa e la Ferrite Delta contengono una bassa percentuale di Carbonio al loro interno (fino allo 0,02% in peso per la ferrite alfa e fino allo 0,09% in peso per la ferrite delta), pertanto nel diagramma ferro-Carbonio si trovano a sinistra dell'eutettoide perlitico.

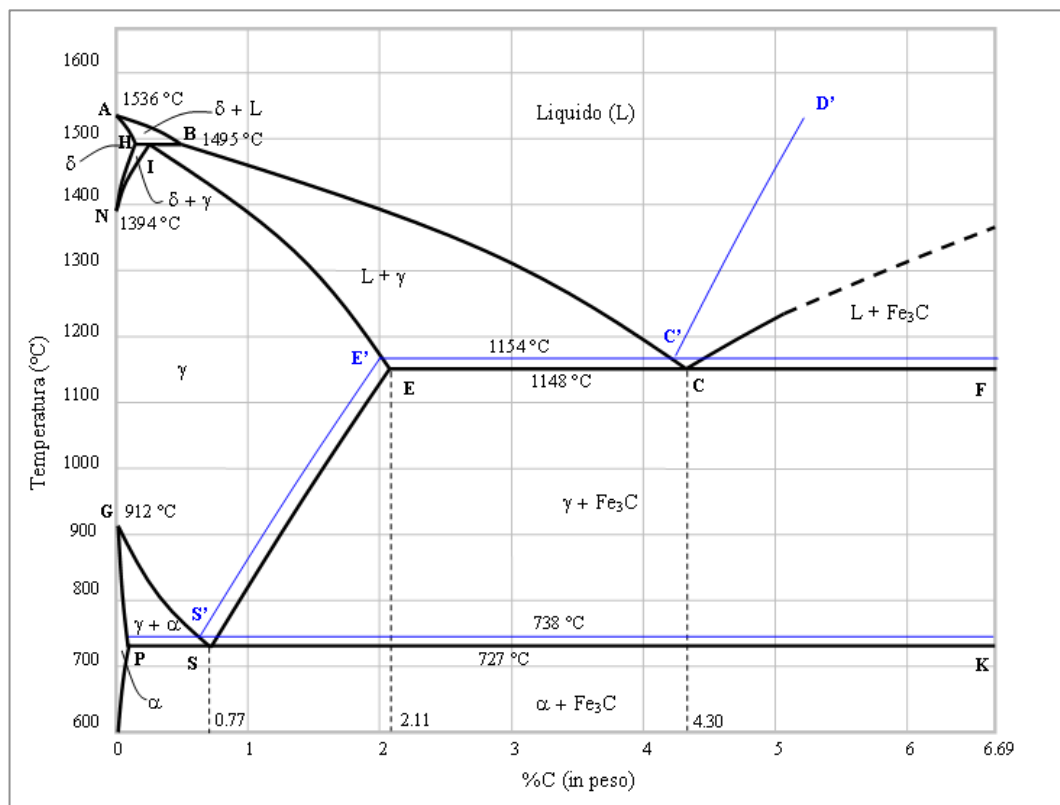


Figura 12: Diagramma Ferro-Carbonio. Nella parte sx alta si nota la fase "delta" ferritica

La Ferrite delta può contenere più Carbonio al suo interno rispetto alla Ferrite alfa, in quanto presenta un valore più elevato della costante di reticolo, ovvero gli atomi di Ferro che costituiscono il reticolo CCC della ferrite delta sono più distanziati rispetto agli atomi di Ferro della Ferrite alfa.

- La *Ferrite alfa* si forma a temperature più basse, più precisamente fino a 911°C. Si trova in forma saturata a 723 °C, a questa temperatura riesce a sciogliere al suo interno lo 0,02% di Carbonio.

- La *Ferrite delta* si forma ad alte temperature, nell'intervallo tra i 1392 °C e i 1536 °C. Si trova in forma satura a 1493 °C e a questa temperatura riesce a sciogliere al suo interno lo 0,10% di Carbonio.

Deve essere preso in considerazione, che con poche eccezioni, la saldatura viene portata a termine in assenza di additivi e non vi è la possibilità di controllare la composizione del metallo durante la saldatura.

Di conseguenza, non si potrà controllare anche il tipo di solidificazione primaria e la proporzione di δ – ferrite che si viene a formare.

Ciò escluso, gli elevati ratei di raffreddamento, ostacolano l'instaurarsi di un equilibrio metallurgico nel fuso. Così per l'E.B.W., assieme agli stress interni localizzati, si rende necessario a volte modificare la posizione del limite della tendenza alle cricche a caldo nel diagramma di Schaeffler [9].

Materiali a base di Titanio: Le leghe a base di Titanio vengono utilizzate in applicazioni che coinvolgono elevati carichi dinamici e dunque, è necessario il più alto grado di preparazione del materiale per garantire una completa assenza di difetti nella saldatura.

Viene qui di seguito mostrato il confronto tra le proprietà meccaniche specifiche di diverse leghe metalliche al variare della temperatura:

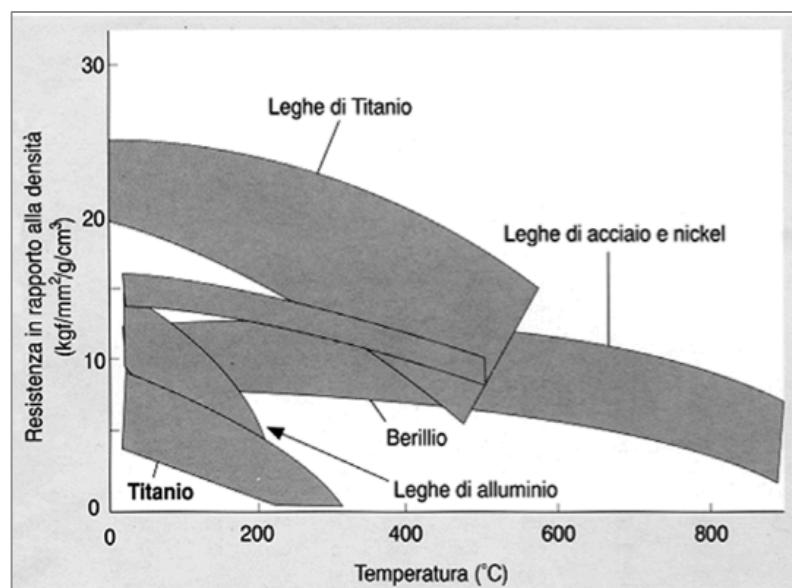


Figura 13: Proprietà meccaniche in funzione della temperatura, di diversi tipi di metalli

Da tenere in considerazione che il Titanio è un metallo altamente reattivo con i gas quali Ossigeno atmosferico, Azoto ed Idrogeno a temperature relativamente basse perdendo così la propria duttilità.

Una pressione di circa $p_A = 7 \cdot 10^{-4}$ mbar può assicurare virtualmente l'assenza di gas residui; tale livello di pressione non può essere raggiunto da nessun "shielding gases" e previene l'insorgere di qualsiasi colore di rinvenimento [10] (ossia uno strato di Ossido superficiale che sarebbe ovviamente dannoso per i trattamenti considerati).

Inoltre, la bassa conduttività termica del Titanio causa una marcata crescita del grano durante la fusione ed in particolare nella zona termicamente alterata tale che, durante le lavorazioni in E.B.W., sono preferite alte velocità di avanzamento.

Deve essere preso in considerazione che durante la solidificazione, avviene un drastico abbassamento della solubilità dei gas (Idrogeno soprattutto) e dunque, ciò può incrementare la tendenza alla porosità del materiale [2].

In aggiunta ai ben noti metodi per ridurre tali porosità, per esempio aumentando la grandezza del bacino di saldatura oppure incrementando il "degassing" (defocusing e oscillazione del fascio), si rende necessario considerare che un'adeguata pulizia delle superfici di contatto aiuta a prevenire tale condizione. Una tecnica utilizzabile può essere il decapaggio, ovvero la rimozione di strati superficiali attraverso un bagno chimico. Tale procedura sebbene assurge ampiamente al suo scopo, può provocare l'insorgere di alcuni problemi causati dal eccessivo attacco chimico dei liquidi utilizzati (il materiale è altamente sensibile all'ossidazione). Per tale motivo, è necessario studiare adeguatamente la procedura di pulizia in funzione della tipologia di materiale, grandezza ed utilizzo.

Si constata che le leghe di Titanio sono risultate ugualmente saldabili sia in stato solubilizzato, sia in condizioni invecchiate e che i componenti vengono cotti in una fornace sotto vuoto per ridurre gli stress interni.

1.6 Metodologie in Preparazione all' E.B.W.

L'elaborazione delle metodologie di preparazione all'E.B.W. è di fondamentale importanza, poiché risulta necessario che la superficie da saldare sia totalmente priva di detriti o qualsiasi altro materiale estraneo all'operazione. Nel caso contrario, tali impurità potranno generare cavità interne, inclusioni e porosità nel cordone saldato e fallendo dunque la giunzione delle due superfici.

Infatti, come risultato della sua elevata densità di potenza, l'E.B.W. è capace di fondere materiali ad una profondità di alcuni centimetri e permette a quest'ultimi di fluire assieme per formare una saldatura solidificata della stessa profondità.

Grazie alla bassa distorsione e solamente se le specifiche richieste vengono applicate sull' assieme sin dalle fasi iniziali di costruzione del prodotto, tale processo è utilizzato con successo ed a ciò, si aggiungono anche ragioni prettamente economiche .

I normali criteri di pulizia delle superfici che devono essere saldate, per quanto riguarda la saldatura a fascio di elettroni, rimangono inalterate e devono essere applicate con maggiore riguardo. Particolare attenzione deve essere prestata alla compatibilità dei fluidi utilizzati in fase di lavorazione alla preparazione della saldatura (i.e. fluidi lubrorefrigeranti) ed ai fluidi utilizzati per la protezione alla corrosione superficiale (i.e. residui di Oakite) con i metalli adoperati durante il processo.

Dei comuni esempi di criteri di pulizia possono essere:

1. sgrassaggio mediante opportuni solventi, più efficacemente se utilizzati in vasca ad ultrasuoni;
2. decapaggio in differenti sostanze acide in funzione del tipo di materiale;
3. risciacquo in acqua distillata;
4. asciugatura con aria preferibilmente calda e filtrata;
5. rimozione di qualsiasi strato superficiale cementato, nitrurato, anodizzato o fosfato oppure qualsiasi rivestimento, inclusione, ossido superficiale che possono provocare pori o altri difetti nella zona termicamente alterata con possibili effetti altamente dannosi sulla qualità della saldatura.

Come regola, l'E.B.W. viene condotta in assenza di materiale d'apporto e dunque, a causa della ristretta zona termicamente alterata, le due facce devono essere attentamente accoppiate, il che implica che non devono esistere "gap" fra le due superfici [2] (se non quelli volutamente cercati).

Nella figura sottostante viene rappresentato il legame fra la massima distanza in larghezza ammissibile e lo spessore "t" del materiale.

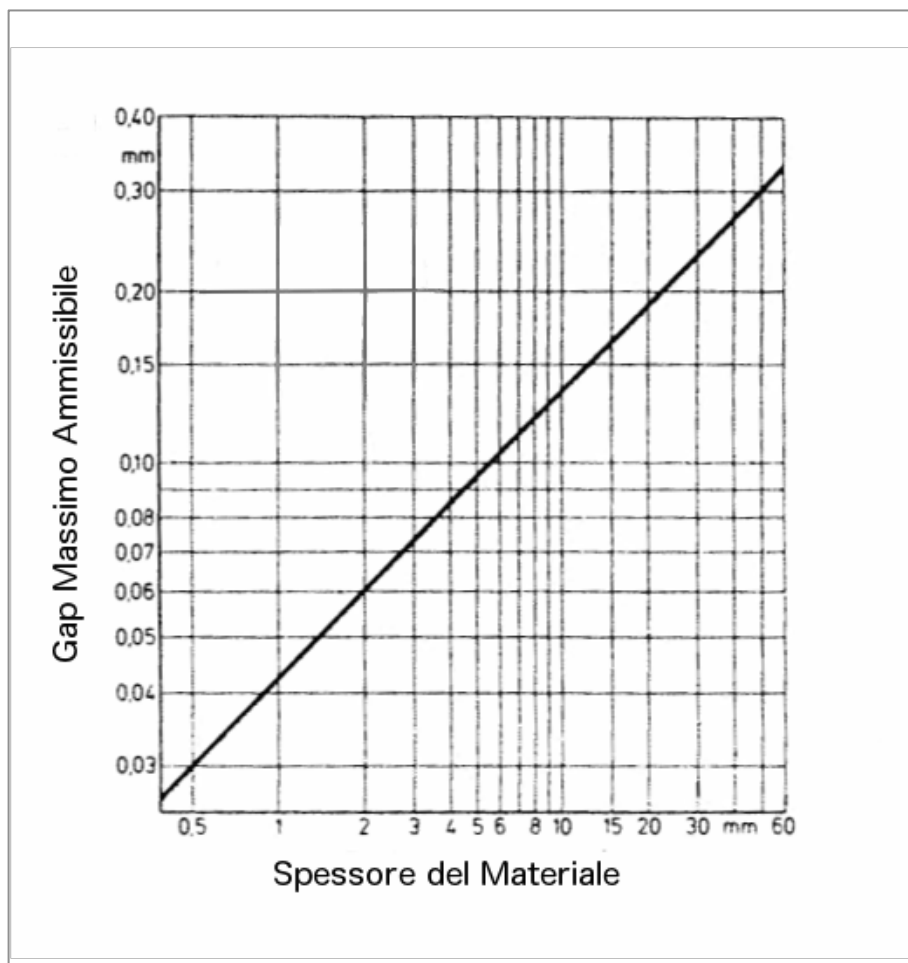


Figura 14: Grafico in scala logaritmica del materiale; Rappresenta il gap massimo ammissibile in funzione dello spessore

Tali risultati sono validi per saldature di testa su assemblati in acciaio, saldature a T e saldature radiali.

Per quanto riguarda saldature circolari invece è possibile prevenire irregolarità su “*slope-in/out*” (punto in cui il fascio di elettroni si accende/spegne) attraverso un particolare controllo sulla corrente del fascio [11].



Figura 15: Esempio di "Slope Out" su una saldatura circolare

Un lento innalzamento o abbassamento di tale corrente assicura che il metallo, in quella zona, sia uniformemente distribuito su tutta la sua lunghezza.

1.7 Obbiettivi

In tale paragrafo, verranno affrontati gli obbiettivi riguardanti la Tesi di Laurea Specialistica che è stata svolta in collaborazione con AgustaWestland S.p.A. (stabilimento di Cascina Costa di Samarate, Varese) ed il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Aerospaziali del Politecnico di Milano.

L'attività di tesi, si è basata sull'allestimento di una campagna sperimentale avente due finalità:

Finalità 1: studio, nell'ambito della saldatura a fascio di elettroni, dell'incidenza del volume risultante dall'accoppiamento gola-smusso della corona collettrice (*Crownwheel Driven*) appartenente all'impianto di trasmissione del moto.

La corona collettrice viene ottenuta mediante un processo di saldatura a fascio di elettroni di due elementi chiamati **mozzetto** e **corona**.

Per ottenere una validità sperimentale e per poter avere il minor impatto economico, la campagna sperimentale è stata eseguita utilizzando simulacri rappresentanti l'assieme mozzo/corona di cui si può osservare una schematizzazione nella figura sottostante:

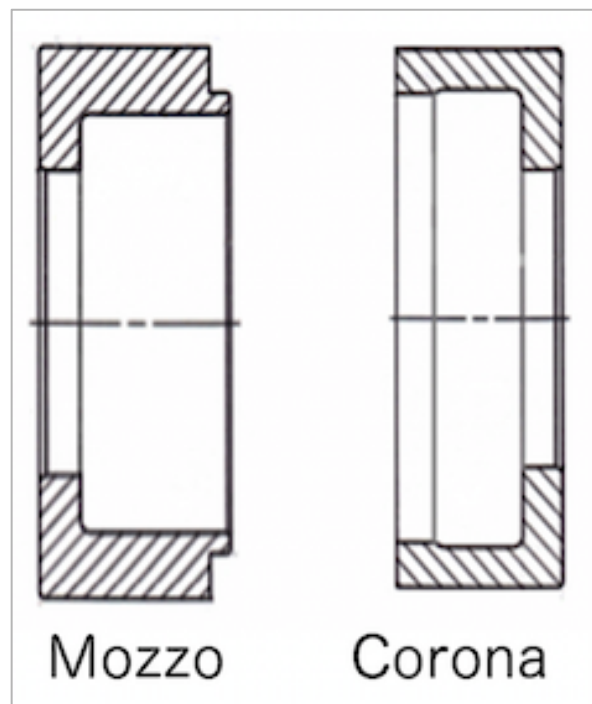


Figura 16: Schematizzazione gruppo Mozzo/Corona

Tali “*simulacri*” vengono normalmente utilizzati per le cosiddette “aperture e chiusure” lotto, ed in questo caso, per ragioni economiche e pratiche si è scelto di utilizzarli per effettuare le prove necessarie allo svolgimento della campagna sperimentale.

Le corone collettrici per poter essere generate, devono percorrere un processo, la cui fase iniziale prevede la saldatura per mezzo di E.B.W. di due componenti chiamate rispettivamente “mozzo” e “corona” i quali giungono in laboratorio dotati rispettivamente di gola di scarico e spigolo vivo.

Per comprendere più intuitivamente quanto appena citato, viene riportato un foglio operativo che rappresenta la schematizzazione dell’assemblato rappresentando in maniera più marcata la zona della gola.

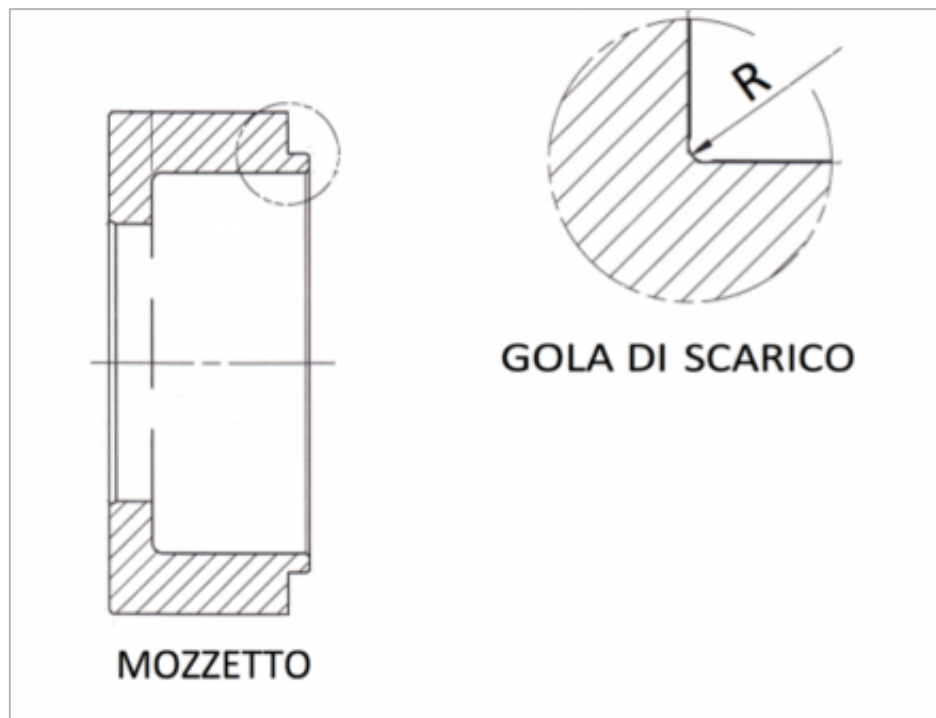


Figura 17: Schematizzazione Gola di Scarico situata sul Mozzo.

La campagna sperimentale dunque, volge il suo interesse, in primo luogo, allo studio sull’incidenza nell’ambito della saldatura del volume d’aria contenuto nella gola di scarico.

Finalità 2: studio di un nuovo sistema di lavaggio per assieme diaframma in Ti saldato a EBW, appartenente all'albero motore.

Per quanto riguarda l'assieme diaframma, esso attraversa numerosi cicli di lavorazioni (che comprendono più saldature) e dunque è necessario che ad ogni saldatura, esso risulti correttamente pulito così che il processo possa continuare.

Per meglio analizzare quanto trattato, vengono riportate nel seguito, i vari processi che i diaframmi subiscono per poter ottenere l'assemblato finale.

Ciclo 1: due semplici dischi in Titanio, vengono saldati lungo la propria circonferenza, per ottenere tale risultato:

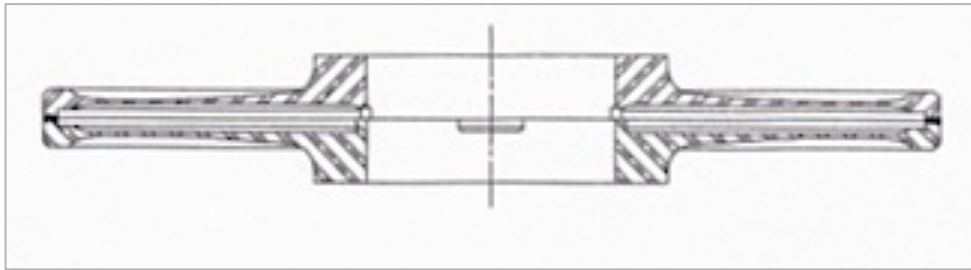


Figura 18: Schematizzazione risultato finale del primo ciclo. Giunzione attraverso E.B.W. di due semplici dischi in titanio.

Ciclo 2: l'assemblato del ciclo 1, viene lavorato, per essere flangiato, ottenendo:

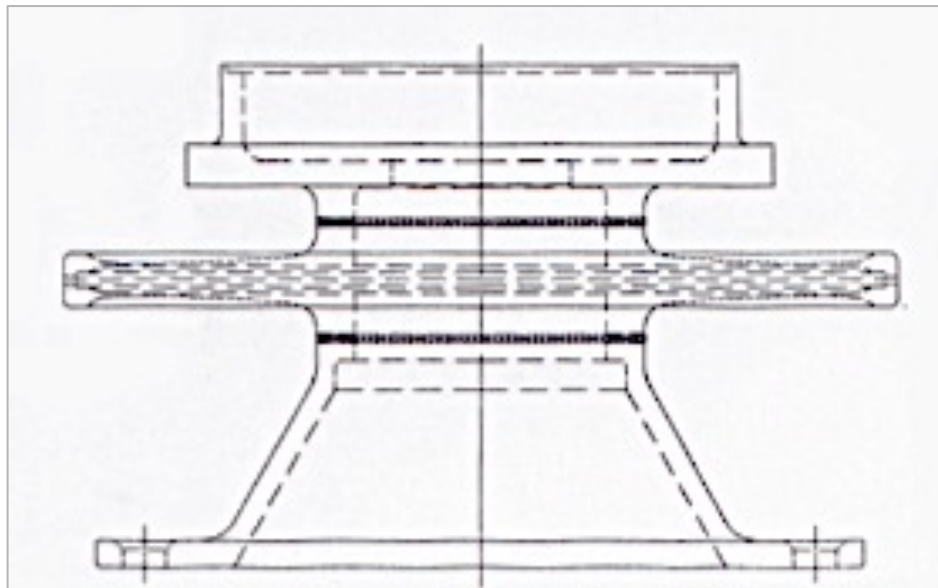


Figura 19: Schematizzazione risultato finale ciclo 2. L'assemblato del ciclo 1 viene saldato a delle flange dello stesso materiale attraverso E.B.W.

Ciclo 3: Successivamente al ciclo 2, sul pezzo viene eseguita una saldatura di un elemento chiamato “*Axial Stop*”; un anello cilindrico che ha il compito di vincolare assialmente il pezzo:

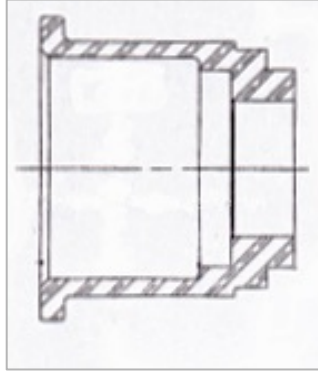


Figura 20: Schematizzazione dell' "Axial Stop"

L'assemblato, al termine del terzo ciclo, avrà questo aspetto:

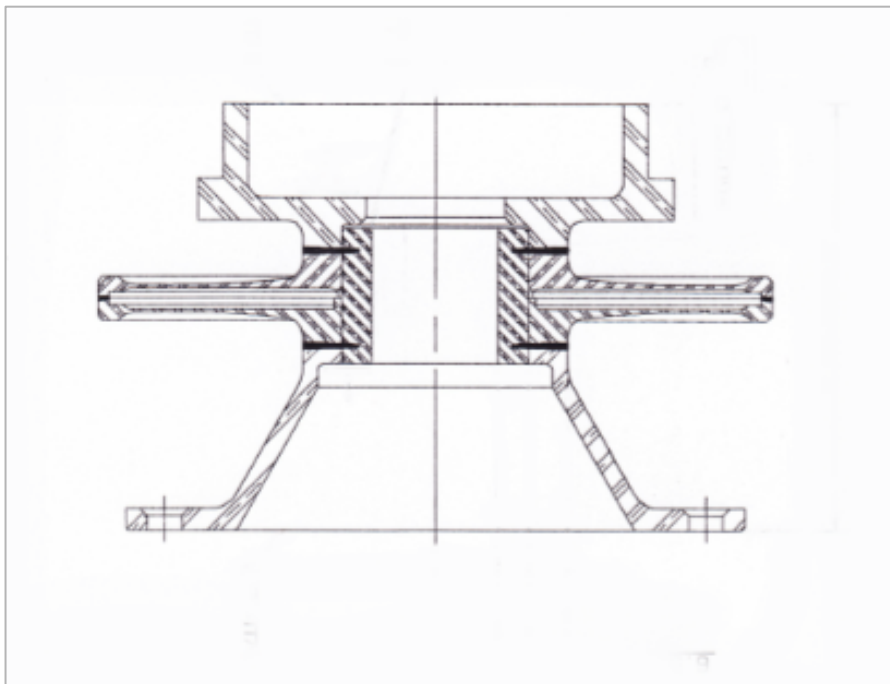


Figura 21: Schematizzazione dell'assemblato al termine del terzo ciclo

Ciclo 4: come ciclo finale, l'assemblato viene saldato ad un tubo; ciò pone termine al ciclo di processo di tale assemblato, ottenendo:

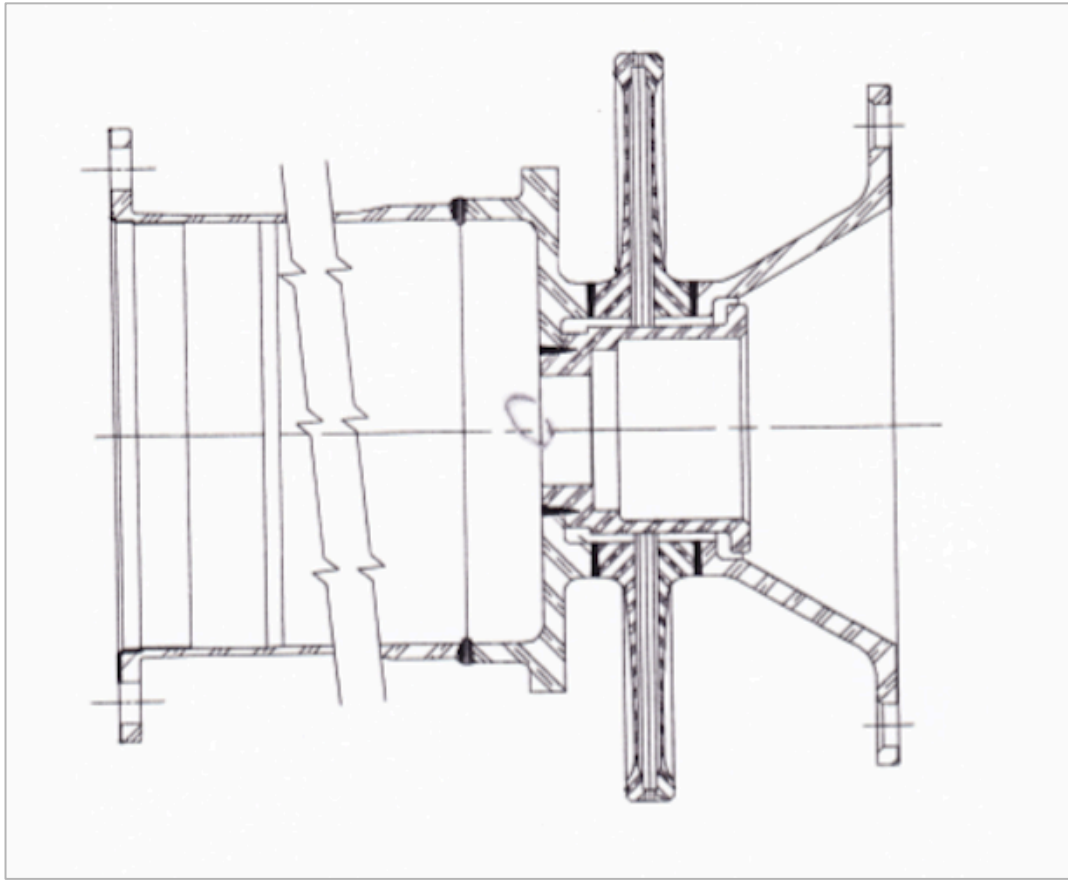


Figura 22: Schematizzazione termine quarto ed ultimo ciclo. Il pezzo viene saldato attraverso E.B.W. ad un tubo dello stesso materiale.

Durante l'attività di tesi è stata sviluppata una nuova procedura di preparazione alla saldatura di tali assiemi, mediante un processo ad ultrasuoni.

Sono stati utilizzati 10 provini, ed è stata allestita una campagna sperimentale volta ad eliminare il processo usuale e sostituirlo con un lavaggio più semplice ed economico che successivamente verrà affrontato.

La procedura standard comprende infatti:

1. sgrassaggio alcalino con Oakite;
2. lavaggio in acqua demineralizzata;
3. sgrassaggio manuale con acetone;
4. soffiaggio manuale del manufatto per mezzo di aria compressa.

Questa procedura di lavaggio è stata modificata, riducendola sostanzialmente ad un lavaggio a ultrasuoni (UT) con Acetone della breve durata di 5 minuti.

Tale sostituzione permette di ridurre notevolmente il tempo impiegato per portare a termine la procedura di preparazione alla saldatura a E.B.W., ottenendo il vantaggio di poter trattare, a parità di tempo, un maggior numero di pezzi.

Lo scopo ultimo è quello di riuscire a portare a termine la totalità della attività, senza inficiare la bontà della saldatura, rispettando gli standard di qualità industriale e le specifiche adottate internamente dalla Azienda attraverso CND portati a termine sugli assemblati al termine di ogni ciclo.

Capitolo 2

2.1 Electron Beam Welding-Saldatura a Fascio di Elettroni

2.1.1 Introduzione Storica

Nel 1869 i fisici Hittorf e Crookes furono i primi a sperimentare la produzione di raggi catodici in ambiente gassoso. In seguito, nel 1879, furono utilizzati per la prima volta, per portare a fusione dell'Acciaio.

Inizialmente tali raggi catodici non erano niente di più che un interessante fenomeno che portò il fisico Rontgen (nel 1895) alla scoperta di un particolare tipo di radiazione in seguito descritta da Thompson (1897) e Millikan (1905) come composta da “elettroni rapidamente accelerati”. Fino a quel momento, l'utilizzo di un fascio di elettroni a scopo di saldatura era proibitivo, a causa delle elevatissime temperature che si raggiungevano sul catodo.

Il primo a sfruttare il calore generato dal fascio di elettroni fu Marcello Pirani un fisico Tedesco, il quale adattò un raggio catodico per costruire un'acerba fornace a fascio di elettroni (prima di allora si utilizzava un sistema di raffreddamento ad acqua).

Numerosi scienziati negli anni successivi si cimentarono nella sperimentazione del fascio di elettroni (i.e Langmuir, Child, Fleger ecc.) ma il vero passo significativo venne fatto dal fisico Tedesco Steigerwald il quale, nel 1948, sulla scia della rivoluzione industriale e grazie alle nuove scoperte tecnologiche, riuscì ad impiegare il calore generato da un fascio di elettroni per la perforazione di pietre preziose e per la fusione, nonché saldatura di metalli sotto vuoto spinto. Da quel periodo in avanti la saldatura a fascio di elettroni venne affiancata a metodi di saldatura, oggi più comuni quali saldatura ad arco od a gas.

Fu circa dieci anni dopo, nel 1958 che si riuscì a saldare assieme due piastre di Zirconio di uno spessore di 5mm ottenendo un chiodo di saldatura sviluppato più in profondità che in ampiezza. Ciò portò ad un rapido evolversi del fenomeno, arrivando fino ai nostri giorni.

Tutt'ora, la cosiddetta “*Electron Beam Welding Technique* ” o “Tecnologia E.B.W.”, rende possibile saldare spessori sempre più sottili, ottenendo fasci di elettroni di potenza sempre più elevata [1].

2.1.2 Elementi Costitutivi Impianto a E.B.W.

In questo sotto-paragrafo, verranno analizzati e meglio compresi, gli elementi ed i parametri che regolano e costituiscono un impianto per saldatura a fascio di elettroni.

Elettroni liberi: considerando la fisica del processo di generazione del fascio di elettroni, potrebbe essere sorprendente che il calore utilizzato per questo tipo di saldatura sia fornito totalmente dall'energia cinetica delle particelle le quali sono le più leggere presenti nella materia (1836 volte più leggera di un protone identicamente caricato).

Apparentemente potrebbe apparire come uno svantaggio che l'elettrone sia una particella caricata elettricamente ma contrariamente è proprio grazie a questa carica elettrica che è possibile accelerare gli elettroni attraverso un campo elettro-magnetico e dunque generare un fascio di elettroni.

Al valore tipico di voltaggio utilizzato in saldatura pari a 150 kV, sotto vuoto spinto, gli elettroni raggiungono velocità tipiche di 2×10^8 m/s, in altre parole 2/3 la velocità della luce [12].

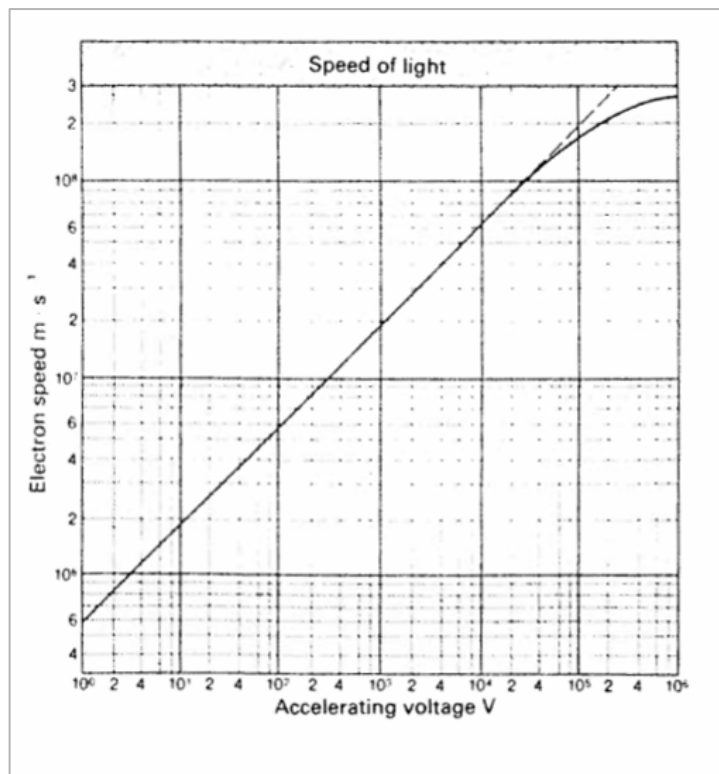


Figura 23: Velocità degli elettroni in funzione del voltaggio di accelerazione

È ben noto che gli elettroni si trovano sugli orbitali energetici che circondano gli atomi, disposti a livelli di energia discreta. Nel caso dei metalli invece, gli elettroni degli orbitali più esterni, risultano essere legati solamente da legami deboli al suddetto nucleo.

Tali elettroni risultano essere più o meno liberi di muoversi attraverso la struttura cristallina del metallo e ciò garantisce l'elevata conducibilità elettrica dei metalli. Questi elettroni sono impossibilitati a lasciare la struttura cristallina a cui sono legati poiché sono costretti da una barriera a potenziale che può essere oltrepassata a patto di fornire ulteriore energia o lavoro (lavoro di estrazione). In fisica il lavoro di estrazione o funzione lavoro (da non confondere con il lavoro) è l'energia minima che occorre fornire per estrarre un elettrone da un metallo. Questa energia dipende dal tipo di metallo e si aggira in genere intorno a qualche elettronvolt. Il modo migliore per fornire tale energia è quello di generare un aumento di temperatura nel metallo in grado di incrementare l'energia degli elettroni dei circoli energetici più esterni in modo tale da oltrepassare la barriera a potenziale e fuggire dalla superficie del metallo; applicando perciò un campo elettrico è quindi possibile convogliare questa fuoriuscita di elettroni in un fascio ed utilizzarlo per saldare i metalli.

Per poter ottenere il più piccolo diametro focale, per esempio quando vengono effettuate saldature di largo spessore, il voltaggio di accelerazione è mantenuto costante a $U_{B_{max}} = 60 \div 150$ kV in funzione del tipo di generatore ad alto voltaggio e dalla pistola ad elettroni utilizzati [2]. In sostanza, avendo un fascio di elettroni dotato di un alto voltaggio di accelerazione, il diametro focale aumenta meno con l'aumentare del voltaggio di accelerazione rispetto al caso in cui si ha un basso voltaggio di accelerazione.

La corrente del fascio, assieme al voltaggio di accelerazione, determinano la potenza del fascio stesso e vanno ad influire sulla futura saldatura inoltre una gran parte degli elettroni costituenti il fascio, viene destinata a formare la corrente che attraversa il materiale e si scarica a terra grazie al tavolo di lavoro a cui è collegato il pezzo. In contrapposizione, l'energia residua del fascio, nella forma di corrente trasmessa, mantiene il foro aperto ed infine, affligge la forma del chiodo di saldatura.

Nell'ipotesi in cui venga impostata un'elevata corrente del fascio durante una particolare operazione, la tensione superficiale accumulata potrebbe non essere sufficiente a sopportare la forza di gravità agente sul metallo fuso.

In questo caso, il metallo liquido, fluisce verso il basso, causando concavità nella corona della saldatura, gocce di metallo lungo la radice oppure la caduta di gocce di metallo dalla radice, figura 26 caso “a” o “b”.

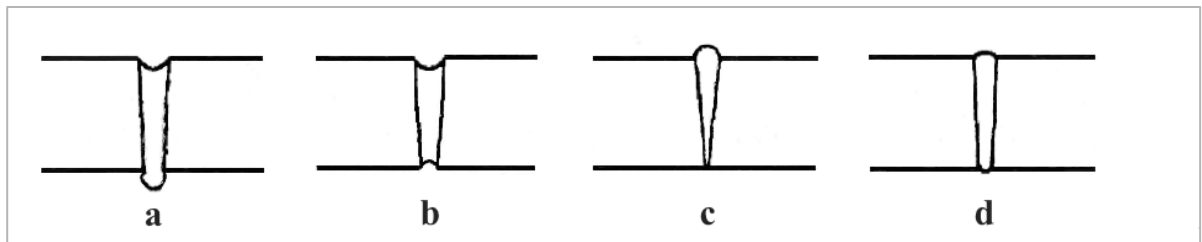


Figura 24: Schematizzazione di saldature risultanti dalla variazione della corrente del fascio elettrico.

In contrapposizione a ciò, se viene impostata una corrente del fascio troppo bassa, non si riuscirà a liquefare tutto lo spessore del pezzo ed in aggiunta, si avrà una corona del chiodo evidentemente convessa figura 26 caso “c”; l’immagine “d” di figura 26, schematizza infine una corretta saldatura.

Oltre a quanto già citato in precedenza, le principali caratteristiche dell’ E.B.W. sono:

1. Elevate densità di potenza, dell’ordine di $10^7 \frac{W}{cm^2}$;
2. Il trasferimento di energia, non avviene per conduzione attraverso la superficie del manufatto ma più efficientemente all’interno del pezzo stesso;
3. Senza riguardo dello spessore, non è necessaria alcuna preparazione degli spigoli (possono rimanere a “spigolo vivo”) ne è necessario materiale di riempimento;
4. L’elevata velocità del processo comporta saldature più strette che presentano una zona termicamente alterata minore;
5. Possibilità di saldare materiali che prima erano considerati scomodi per la saldatura;
6. Possibilità di saldare pezzi di differenti forme;
7. Non è necessario l’utilizzo di gas per prevenire l’ossidazione durante il processo poiché esso avviene sotto vuoto spinto;
8. Possibilità di ottenere camere di saldatura adattate a differenti usi;
9. Controllo numerico (inteso come utilizzo di pc per comandare la macchina);
10. Parametri e qualità della saldatura, facilmente riproducibili ed altamente consistenti.

La saldatura a fascio di elettroni, ad oggi, viene impiegata in numerosi ambiti industriali soprattutto quando si ricerca un' elevata qualità della saldatura in presenza di geometrie di scale inferiori.

Catodo: lontano dall'essere una mera sorgente di elettroni, il catodo deve emettere un gran numero di elettroni in un lungo periodo di tempo consumando la più bassa energia termica possibile, usando il più basso potere calorifico. In altre parole, deve fornire elevati raggi di corrente. In accordo con la legge di Richardson, per avere un' elevata corrente del fascio, la superficie emettitrice del catodo deve essere ad elevata temperatura.

Dunque, è necessario avere metalli costituenti il catodo con il più alto punto di liquefazione onde evitare l'inficiare della validità del catodo.

Anodo: a causa dell'emissione termica, il catodo si carica positivamente attirando a se gli elettroni negativamente caricati, collezionandoli in una nube attorno a se stesso. Un anodo messo a terra viene posizionato al di sotto della nube di elettroni, generando un campo elettrico ed accelerando gli elettroni, convogliandoli in un raggio in direzione dell'anodo stesso. Nello stesso momento, un generatore ad alto voltaggio fornisce corrente al catodo ottenendo una produzione di elettroni continua. Così, una corrente elettrica fluisce in un circuito chiuso dal pezzo da lavorare, alla macchina ed alla connessione a terra per poi tornare indietro al generatore ad alto voltaggio. Il fascio di elettroni può essere regolato agendo un controllo sul voltaggio di tale generatore.

In funzione del tipo di focalizzazione del fascio, il sistema può essere di due tipi :

1. ***Rogowski:*** corta lunghezza focale (tipico equipaggiamento)
2. ***Steigerwald:*** elevata lunghezza focale.

Operazione di carica spaziale: quando è in funzione, il catodo subisce una minima ma considerevole perdita di massa a causa di:

1. ***vaporizzazione:*** dovuta all'elevate temperature del catodo;
2. ***polverizzazione:*** causata dall'impatto ad alta energia degli ioni che sono prodotti dall'urto del fascio di elettroni con le molecole di gas che vengono passate attraverso il vuoto ed il metallo che è evaporato nella zona di fusione.

Questa lenta e progressiva perdita di massa, riduce la sezione trasversale del catodo comportando la diminuzione della corrente riscaldante e, simultaneamente, anche la temperatura. Tali variazioni di temperatura possono avere un effetto considerevole sul fascio di corrente. Per saldature aventi stringenti requisiti di riproducibilità questo può risultare un problema; è possibile ad ogni modo, ovviare a ciò utilizzando una legge fisica denominata:

“Legge di Langmuir”.

“Assegnato un determinato voltaggio, dipendente da parametri geometrici quali distanza fra anodo e catodo, ecc. è possibile estrarre solamente una ben determinata quantità di elettroni dal catodo stesso chiamata appunto “space charge limited emission current””.

Così è sufficiente impostare adeguatamente la temperatura del catodo aggiustando opportunamente la corrente riscaldante cosicché anche al massimo voltaggio, si rendano disponibili un numero sufficiente di elettroni.

Lente Focale: la forma geometrica del catodo, elettrodo di controllo ed anodo, ha un effetto anche sul percorso che gli elettroni compiono, fino al punto di saldatura. Il fascio che viene creato è divergente e non ha abbastanza densità di potenza per fondere metalli. Per risolvere questo problema viene installata una lente focale. Viene utilizzata una bobina anulare che permette di influenzare la direzione del movimento degli elettroni negativamente caricati, imponendo così un campo magnetico. La bobina è costituita da un grande numero di avvolgimenti di filo schermati su tre lati da un “case” di acciaio ad alta permeabilità.

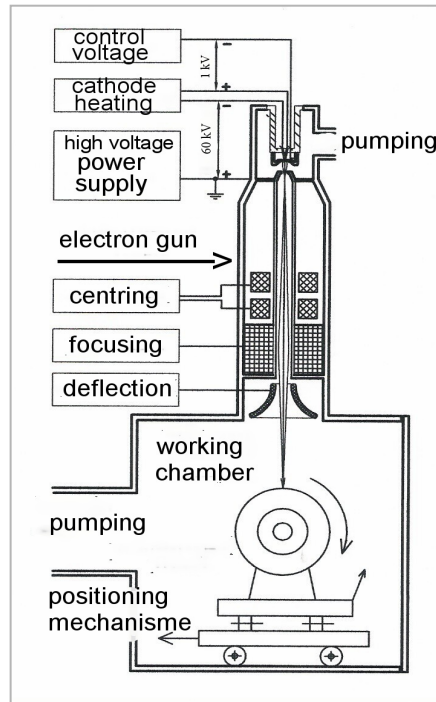


Figura 25: Schematizzazione dell'apparato per saldatura a fascio di elettroni.

La bobina anulare, alimentata a corrente continua, produce un campo magnetico che agisce al contrario dal “case” di acciaio verso il fascio di elettroni, focalizzandolo nella stessa maniera in cui una lente condensatrice è usata per focalizzare un fascio di luce. Nel caso più semplice, prima della saldatura, il fascio di elettroni viene posizionato su un provino, situato alla stessa altezza dell’attuale pezzo da saldare.

Agendo sulla corrente della lente ed osservando il punto di contatto fra fascio e materiale, attraverso un sistema ottico di visualizzazione, è possibile ottenere diametro del fascio necessario per la saldatura.

Sperimentalmente è stato notato che è molto difficile ottenere saldature prive di difetti attraverso questo metodo di controllo. Se il fascio di elettroni viene defocalizzato, è possibile con maggiore probabilità ottenere saldature prive di difetti. La quantità di “defocusing” viene stabilita mediante prove sperimentali (tipicamente viene defocalizzato e fatto oscillare per eliminare difetti sia interni che esterni).

Sistema di deflessione: si rende necessario poter muovere il fascio di elettroni dalla sua normale posizione ad asse non deflesso, per esempio quando si eseguono saldature a T oppure per influenzare dinamicamente il processo di saldatura. Per poter fare ciò, un sistema di deflessione viene installato nella pistola ad elettroni al di sotto della lente focale, che può flettere il fascio di elettroni attraverso l’applicazione di un campo magnetico. Questo sistema di deflessione consiste in quattro bobine avvolte a singolo o multiplo nucleo, connesso ad un

generatore ed amplificatore di funzioni. Usando corrente alternata è possibile far oscillare il fascio.

Sono possibili i seguenti tipi di deviazione del fascio:

1. Deviazione Statica: se le bobine del sistema di deviazione vengono alimentate a corrente continua allora il fascio potrà essere deviato staticamente di un determinato angolo.
2. Deviazione dinamica periodica od Oscillazione del fascio*1: mediante corrente alternata (periodicamente) è possibile ottenere una deflessione dinamica del fascio, priva di forze d'inerzia, in tutte le direzioni, forma e frequenze che il processo di saldatura richiede.
3. Deviazione dinamica aperiodica: in questo caso viene utilizzata corrente alternata aperiodicamente per ottenere una determinata deviazione del fascio.

Nello specifico, il tipo di deflessione, frequenza, ampiezza che produrranno i risultati menzionati, potranno essere determinate solamente attraverso una serie di prove di saldatura.

Ciò è causato dai numerosi fattori, che influenzano il processo, quali:

1. Proprietà chimico-fisiche del materiale sia nella fase solida che liquida;
2. Velocità di saldatura;
3. Spessore di materiale da saldare;
4. Profondità della zona termicamente alterata;
5. Densità e distribuzione di potenza;
6. Varie.

Sistema di correzione del fascio: Le macchine per saldatura a fascio di elettroni risultano essere equipaggiate con numerosi strumenti aventi il compito di correggere e deviare il fascio, poiché è necessaria l'assenza di errori d'immagine in tutte le posizioni del fascio inoltre la posizione del punto di saldatura non deve essere mobile.

Vuoto: Ai fini della saldatura, è fondamentale ottenere il vuoto all'interno dell'apparato, per i seguenti motivi:

1. l'ossigeno deve essere escluso durante il processo di saldatura per evitare danneggiamenti del catodo (temperatura del catodo circa 2750 °C);
2. durante i processi di emissione, accelerazione e collimazione, i leggerissimi elettroni devono scontrarsi con il minor numero di molecole (più pesanti), presenti nello spazio circostante per essere deviati il meno possibile;

3. il campo di forze, richiede un alto grado di isolamento fra anodo, catodo ed elettrodo di controllo. Ciò può essere ottenuto instaurando un adeguato livello di vuoto.

La più alta pressione accettabile all'interno è $p_e = 10^{-4}$ mbar ed in generale il vuoto risulta essere continuato fino a pressioni $< 10^{-4}$ mbar.

Con lunghezze del fascio nell'ordine di 500 mm e voltaggi di accelerazione oltre i 120 kV, è consentito aumentare la pressione fino a circa $p_A = 10^{-2}$ mbar, prima di riscontrare fenomeni di diffusione ottica ("*scattering*": si riferisce a un'ampia classe di fenomeni in cui onde o particelle vengono deflesse a causa della collisione con altre particelle o onde dal punto di vista quantistico).

Velocità di saldatura: il movimento relativo fra fascio di elettroni e assemblato da saldare, permette all'energia del fascio di essere trasferita nel volume di materiale cosicchè per ogni operazione di saldatura, possa essere impostato il calore come input in funzione della geometria (le dimensioni caratteristiche nella E.B.W. sono drammaticamente inferiori rispetto alle altre tipologie di saldatura).

Con l'aumentare della velocità di saldatura, il calore in ingresso diminuisce proporzionalmente e ciò è dovuto alle minori perdite per conduzione. La potenza del fascio assieme alla posizione focale affliggono drasticamente le forze che agiscono all'interno del foro e l'inviluppo di materiale liquido.

Il processo dinamico, che include solidificazione e raffreddamento, è dominato in larga parte dalla velocità di saldatura. Quest'ultima, assieme alla potenza del fascio, determina la profondità della zona termicamente alterata, lo spessore del chiodo di saldatura, il trasporto di materiale fuso nel bacino di fusione e l'inviluppo di materiale fuso.

Pressione di lavoro: nel percorso che va dalla pistola ad elettroni all'assemblato, il vuoto assoluto non può essere ottenuto ma è necessario stabilire un adeguato (basso) livello di pressione. I gas residui nelle vicinanze del fascio non devono quindi:

1. innescare reazioni chimiche come ossidazione nel punto di saldatura;
2. causare effetti di "*scattering*".

Come numerose investigazioni in letteratura hanno dimostrato, per raggiungere questi parametri, è necessario avere una pressione del vuoto non superiore a $p_A = 5 \cdot 10^{-4}$ mbar in particolar modo per i metalli sensibili chimicamente ai gas.

Gli effetti di “*scattering*” sono causati dal fatto che un aumento della pressione comporta un aumento delle collisioni degli elettroni con le molecole dei gas che circondano il fascio. Ciò si traduce in un aumento del punto focale ed una diminuzione di densità di potenza.

La profondità della zona fusa incomincia a crescere a pressioni maggiori di $p_A = 10^{-2}$ mbar quindi tale valore deve essere visto come il massimo tollerabile in camera di saldatura e dunque pressione nominale di saldatura per i metalli comuni [13].

Ottimizzazione di parametri: l’elevata qualità di saldatura viene ottenuta:

1. Mantenendo il voltaggio costante al valore massimo tollerabile.
2. Determinando la corrente che fluisce nella lente;
3. Calcolando la corrente di alimentazione del fascio che dipende in gran parte dalla velocità di saldatura.

In molti casi la corrente ottimale del fascio, necessaria per ottenere una corretta saldatura, può avere dei limiti (superiore ed inferiore) molto vicini fra loro. È possibile incrementare la precisione operando sulla velocità di saldatura e sull’oscillazione del fascio; inoltre, aumentando grandemente la corrente del fascio è possibile eliminare i difetti appena formati (in assenza di dati oggettivi precedenti, l’unico modo per ottenere un elevato livello di saldatura rimane quello della sperimentazione).

Infatti, sono stati formulati in passato modelli matematici del fenomeno in analisi ma tutti questi modelli presentano delle semplificazioni notevoli e possono solamente essere di aiuto, attraverso una stima preliminare di valori stessi. Effetti quali, la geometria del componente, la forma del chiodo di saldatura, il grado di focalizzazione e la distanza focale possono solamente essere presi parzialmente in considerazione.

2.1.3 Parametri Principali

Il comportamento del fascio di elettroni nel penetrare il metallo è una delle più importanti e difficili parti da apprendere. Numerose investigazioni presenti nella letteratura, hanno coinvolto il fenomeno attraverso il quale il fascio possa essere in grado di penetrare il metallo con numerosi centimetri di spessore mentre gli elettroni in sé sono capaci solo di penetrare solo poche decine di millesimi di superficie del materiale.

Gli esatti processi coinvolti sono molto complessi e non sono ancora stati del tutto compresi, poiché il processo di saldatura non può che essere studiato direttamente se non attraverso una sperimentazione diretta. Ne risulta che, osservazioni teoriche possono solamente essere provate attraverso l'esame dei pezzi saldati [2].

Il processo di saldatura a fascio di elettroni è controllabile attraverso un gran numero di parametri come è dimostrato dall'infinito numero di saldature di gran qualità eseguite in numerosi rami dell'industria. Ad ogni modo, ciò prevede la conoscenza delle più importanti leggi fisiche ed una buona dose di esperienza pratica.

Come è stato ampiamente dimostrato, gli elettroni focalizzati del fascio, alla superficie del materiale, impattano ad alta velocità. Quindi il riscaldamento del metallo, è il risultato di un aumento dell'energia cinetica degli atomi del reticolo cristallino. Gli elettroni nel fascio collidono con gli elettroni del guscio atomico ed in particolare con quelli appartenenti agli orbitali più esterni ed in parte anche con gli elettroni liberi di conduzione, dotati di campo elettrico dovuto al loro basso grado di legame.

L'effetto visibile è quello di un aumento di temperatura tale da superare il punto di ebollizione di qualsiasi metallo conosciuto. Il trasferimento di energia è continuato anche durante la fase liquida e gassosa in modo analogo (per collisione).

Come si può notare in Figura 26 una piccola parte di questi elettroni, chiamati "elettroni primari", risultano essere riflessi elasticamente dalla superficie del pezzo, o contrariamente, dopo aver penetrato la superficie del metallo risultano essere diffusi e riflessi in maniera retroattiva causando così una perdita di energia cinetica. In seguito durante la collisione, altri elettroni vengono espulsi dal metallo ed in questo caso essi vengono denominati "elettroni secondari".

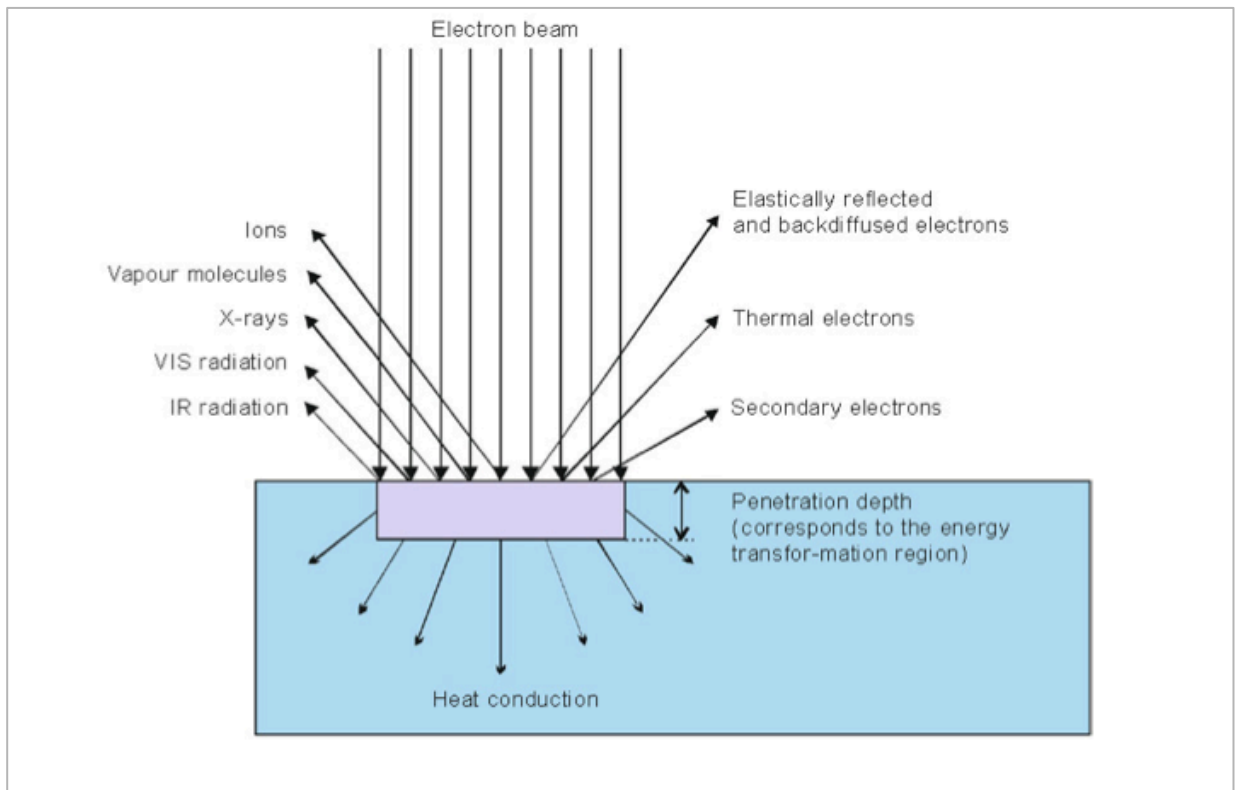


Figura 26: Schema dei processi che coinvolgono l'interazione fra fascio di elettroni e superficie del materiale

La quantità di energia degli elettroni primari e secondari che lasciano la superficie del materiale, dipende in grande misura dalla forma del materiale, dal foro di saldatura e dalla capillarità dei vapori e dunque, quest'ultimi vengono considerati dei parametri fisici misurabili per il controllo del chiodo di saldatura ed aiuto alla focalizzazione del fascio.

È possibile constatare che dopo una sorprendente corta distanza il fascio di elettroni ha già scambiato tutta la sua energia con il materiale e che la profondità di penetrazione degli elettroni, per esempio ad $U_B = 150 \text{ kV}$ è pari a circa 0.06 mm . Rispetto alla saldatura a gas autogeno o ad arco, il “freddo” raggio trasforma la sua energia in calore esclusivamente quando si trova dentro al materiale stesso.

Si è potuto anche rilevare che a densità di potenza oltre i $\frac{10^5 \text{ W}}{\text{cm}^2}$, gli elettroni trasformano la loro energia cinetica in calore così velocemente ed in poco spazio che, il materiale utilizzato fonde al punto di contatto iniziando così a scioglierlo senza emanare una quantità considerevole di calore nelle zone adiacenti [14].

Come si può notare nella schematizzazione in figura 27, a temperature di circa 2700 K ed oltre, i vapori si espandono verso l'alto con la conseguenza che si genera un effetto di pressione sia verso il basso che lateralmente [15].

Questo effetto crea una depressione che permette agli elettroni di "bagnare" nuovo materiale ed il processo diventa così ripetitivo.

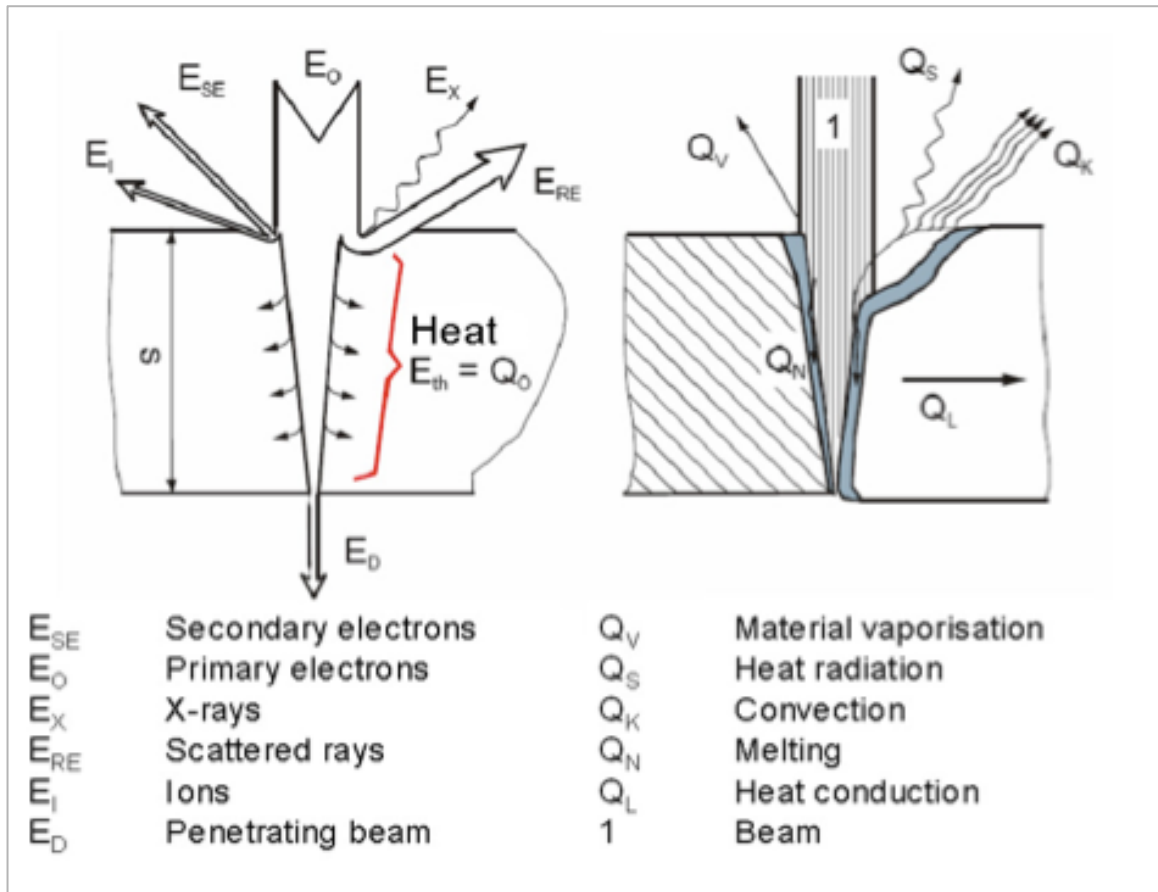


Figura 27: Rappresentazione trasferimento di calore durante il processo di saldatura

Continuando questo procedimento, la depressione continua fino a formare un vero e proprio foro costituito da vapori di metallo circondati da metallo fuso. Il movimento del fascio relativamente al materiale, permette al metallo fuso di mescolarsi e solidificarsi, dunque di saldare almeno due parti di materiale. Si può notare anche in figura 28 che continuando ad operare con questa metodologia, all'interno del foro, interagiscono diverse forze che permettono di mantenere il foro aperto e di continuare così la saldatura.

Il vapore agisce dall'interno verso l'esterno e sui lati del foro, e ciò interagisce contrariamente alla pressione idrostatica ed alla tensione superficiale del materiale fuso.

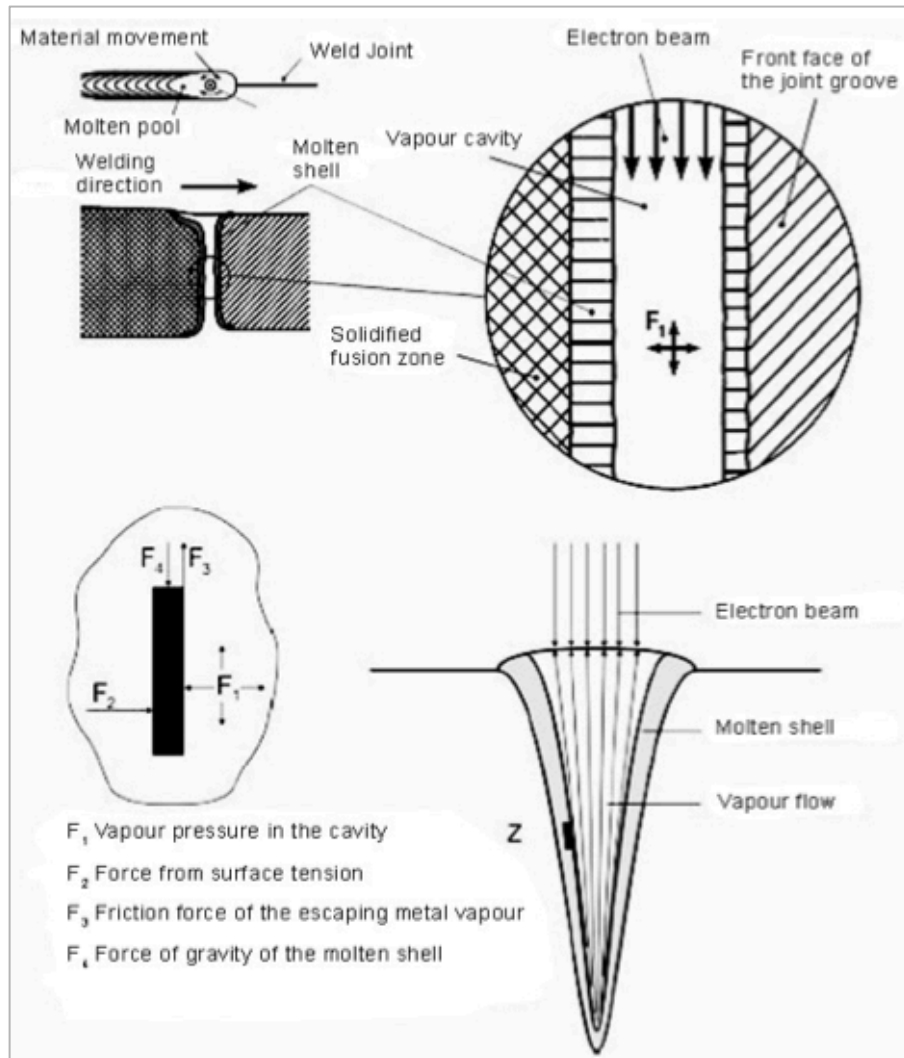


Figura 28: Rappresentazione forze agenti all'interno del foro aperto dal fascio di elettroni.

I vapori che si muovono verso l'alto e verso il basso, applicano, per attrito, una forza sulla superficie laterale dello strato fuso sorreggendo il suo peso.

A basse velocità ed in particolare durante le saldature a penetrazione parziale, nelle quali la zona di fusione finisce all'interno dello spessore, è possibile notare un certo tipo di instabilità [16-17].

In questo caso, la pressione del vapore è incapace di sostenere il metallo fuso in una forma stabile, facendolo collassare e cadere alla base del foro come si può notare nella figura 29, seguente:

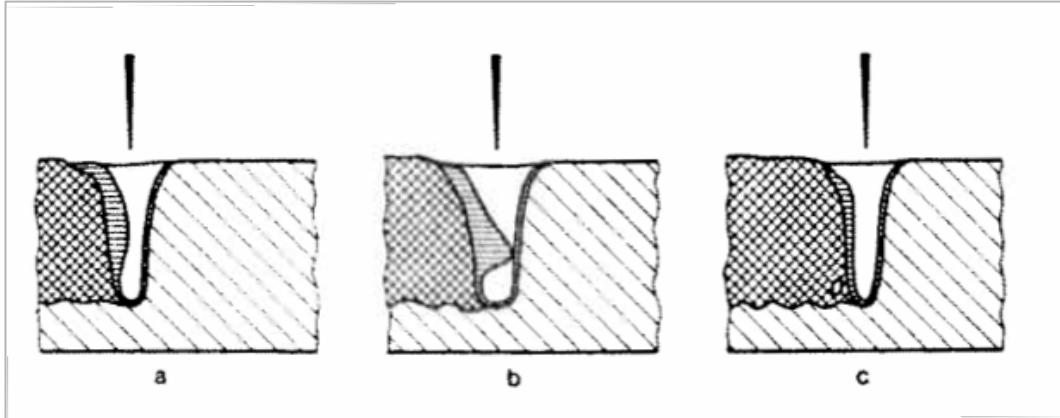


Figura 29: Schematizzazione di saldatura a bassa velocità o cieca

In tale caso, la profondità del foro diminuisce e vengono perse le sue dimensioni geometriche unitamente alle forze fisiche coinvolte. Solamente attraverso l'avanzamento del fascio (o del pezzo) viene permessa la rigenerazione del foro e la continuazione del processo. Come è mostrato nella figura 29, soprastante, il liquido che sta collassando, può anche ostruire parte del foro andando ad inglobare al suo interno parte dei vapori. Questo è il caso della formazione di discontinuità interne dovute alla rapida solidificazione del metallo fuso.

La fase solida e liquida: La liquefazione e la vaporizzazione del materiale all'inizio del processo di saldatura, viene misurato in millisecondi [18].

Misure pirometriche nel punto di contatto hanno fornito misure nell'ordine di 2800 K risultante ancora ben al di sotto della temperatura di vaporizzazione [19].

Risultati simili sono stati ottenuti da prove eseguite su metalli a base di Alluminio, nei quali è stata misurata una temperatura della superficie compresa fra 1300-1500 K [20].

Negli acciai, vengono misurate temperature nell'ordine di 3800 K [12]. In alcuni casi, gli elementi gassosi presenti alla base del foro riescono a fuoriuscire prima che il processo di solidificazione abbia inizio.

Per i metalli che risultano essere altamente reattivi ai gas o nel caso in cui la fase gassosa non riesca a fuoriuscire, allora è consigliabile estendere il processo di degasaggio attraverso un'oscillazione del fascio oppure applicando una passata cosmetica (saldatura su saldatura).

Gli effetti del vuoto: è risultato che il vuoto accentua l'effetto di degasaggio necessario durante la procedura.

Solidificazione: l'elevato (e focalizzato) calore dovuto al fascio di elettroni, lascia il materiale adiacente alla saldatura sostanzialmente inalterato termicamente.

Come risultato di ciò, il materiale è quindi capace di condurre il calore nella zona di fusione in un tempo drasticamente più corto rispetto a qualsiasi saldatura ad arco od autogena (nell'ordine di $10^3 \div 10^5 \frac{K}{s}$) [2]. Il risultato è che la sostanza fusa, incluso le componenti condensate, solidificano per formare un grano avente struttura estremamente fine la quale, in contrapposizione con le elevate temperature, non mostra alcun surriscaldamento. Sintomo significativo ad indicare un infragilimento nelle leghe ad alto contenuto di Acciaio.

L'estrema nonché rapida solidificazione può agire avversamente in merito al degasaggio del fuso e nel punto di chiusura del foro di saldatura. In particolare, si denota un inizio di processo di instabilità alla base del foro di saldatura. Tali effetti, possono generare dei vuoti nella massa fusa, la quale, per mancanza di tempo ed energia, non possono essere riaperti dal fascio di elettroni creando discontinuità.

Nel caso in cui non fosse presente un adeguato involuppo di massa fusa (*molten envelope*) per avere la contrazione di tali vuoti, causati dalla contrazione che avviene durante la solidificazione, si verranno a formare delle cavità o discontinuità che rappresentano delle tacche interne estremamente pericolose, principali responsabili dell'aumento di stress [2]; una immagine di quanto appena descritto viene riportata di sotto.

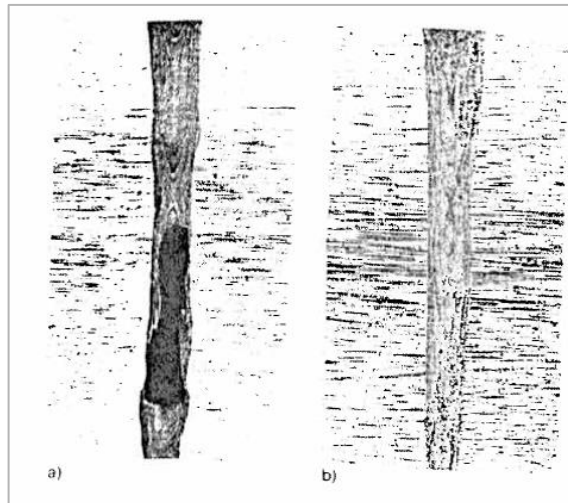


Figura 30: Schematizzazione chiodo di saldatura valido (dx) e con discontinuità interne (sx).

I pori non devono essere, in questa fase, considerati come discontinuità da evitare, a causa della loro sezione trasversale ellittica o arrotondata.

Analizzando attentamente tali pori che si sono formati all'interno della massa fusa, come risultato di metallurgiche reazioni gassose (per esempio durante la saldatura ad alta pressione di componenti in acciaio o durante il raffreddamento come risultato della diminuzione della solubilità dei gas) si può chiaramente affermare che essi sono estremamente utili poiché non permettono la fuoriuscita di gas.

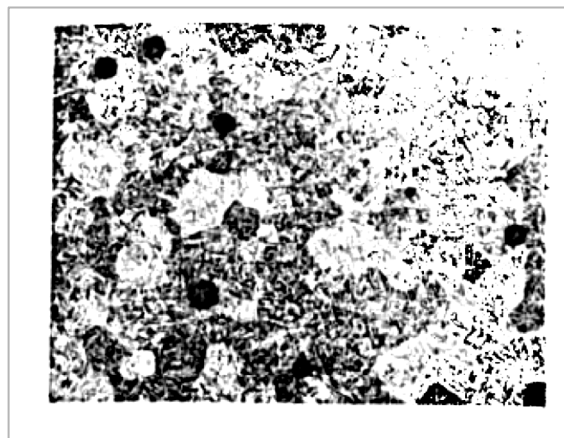


Figura 31: Pori interni che impediscono la fuoriuscita di gas

Il processo di raffreddamento ha inizio al limite esterno con il metallo parente e termina al centro del chiodo mentre cambia simultaneamente la direzione di solidificazione. Nella figura 32, vengono rappresentati due chiodi di saldatura ottenuti a diverse velocità.

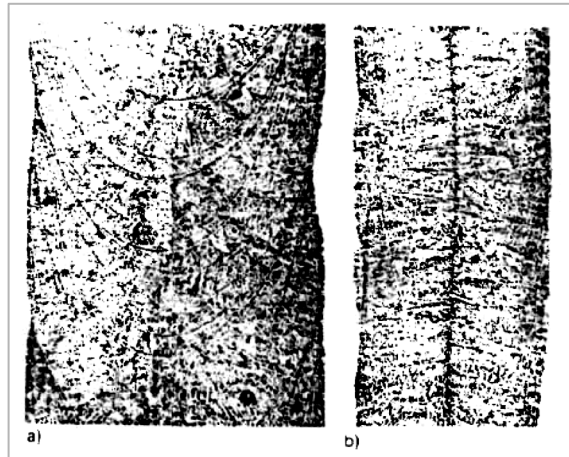


Figura 32: Rappresentazione degli anelli da solidificazione.

Prendendo in considerazione una macro-sezione parallela alla superficie in figura 32 è possibile identificare degli anelli di solidificazione (*solidification rings*) i quali, a fronte di numerose investigazioni, all'aumentare della corrente del fascio diventano più separati e viceversa [21].

Essi si avvicinano se la velocità di saldatura aumenta. E' risultato che non sussiste alcuna relazione primaria fra gli anelli di solidificazione e qualsiasi vibrazione meccanica del materiale o irregolarità nel calore fornito in input durante la saldatura.

Gli anelli di solidificazione sono invece il risultato della presenza di impurità e di elementi di lega che causano un sotto-raffreddamento (*undercooling*) o in altre parole, ritardano localmente il processo di solidificazione ottenendo zone a differente struttura dendritica. Sono evidentemente il risultato del periodico variare del rateo di solidificazione ed inoltre le piccole aree, presenti sull'anello di solidificazione, aventi impurità ed elementi di lega, sono insignificanti.

Se tali zone aumentano di dimensioni o si uniscono a formare una linea continua al centro della saldatura (figura 33), allora ciò affliggerà la resistenza alla corrosione e al sopportare di carichi.

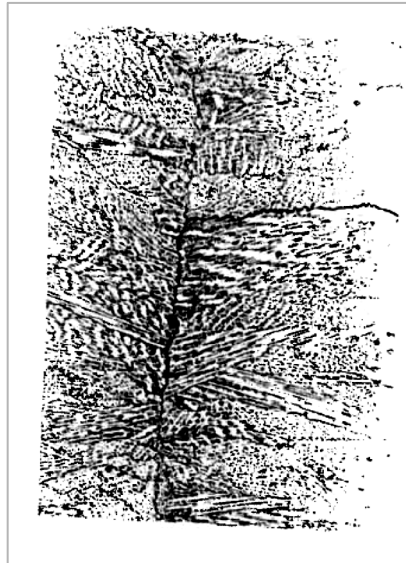


Figura 33: Cricca interna nell'anello di solidificazione

Tale tipo di solidificazione, peraltro molto dannoso, può essere soppressa e corretta attraverso un addizionale movimento periodico del fascio (*si veda “deviazione dinamica periodica”*).

Zona termicamente alterata: le regioni del materiale che rimangono solide durante il processo di saldatura, sono soggette ad un ciclo di riscaldamento e raffreddamento causato da picchi e gradienti di temperatura che sono abbastanza diversi da quelli della zona fusa. I cambiamenti microstrutturali che avvengono nel materiale in fase solida, risultato dell'estremo e rapido ciclo di temperatura, implicano che non avviene nessun ingrossamento della struttura.

Con acciai altamente legati, tale attitudine può risultare di estremo beneficio per quanto concerne le proprietà di resistenza alla corrosione del materiale (tali cambiamenti strutturali appartengono a diverse fasce di materiali in rapporto ad altri processi di saldatura) [22].

Stress interni dovuti alla saldatura: deve essere ricordato che la solidificazione non avviene uniformemente all'interno del materiale, bensì, quest'ultimo si raffredda ovviamente più velocemente sulla superficie esterna che interna. Il risultato di ciò è che si vengono a creare degli stress interni irregolari, chiamati “*quenching stresses*” che causano l'innescarsi di processi di deformazione plastica [23].

2.2 Lavaggio ad Ultrasuoni

2.2.1 Procedura e Parametri Principali

La procedura di lavaggio ad ultrasuoni viene largamente utilizzata per quanto riguarda la pulizia di pietre preziose, componenti di circuiti elettrici, particolari in Argento, Acciaio, Alluminio e Titanio sia nel ramo civile a scopo generale, sia nel ramo industriale per particolari assiemi.

Il lavaggio ad ultrasuoni è il risultato dell'introduzione di onde sonore all'interno di un mezzo liquido mediante una serie di trasduttori piezoelettrici installati alla base di una vasca di lavaggio. La vasca contiene il liquido di lavaggio e la superficie da trattare mentre il suono attraversa il mezzo liquido, generando delle onde di compressione ed espansione che rispettivamente, comprimono ed allontanano fra loro le molecole che compongono il mezzo liquido.

L'energia rilasciata raggiunge e penetra in profondità fessure, fori ciechi e aree che sarebbero inaccessibili mediante un altro processo di pulizia. La rimozione dei contaminanti risulta consistente ed uniforme sebbene la complessità geometrica dell'oggetto.

Uno dei fattori determinanti sono le proprietà del mezzo liquido come viscosità, tensione superficiale, densità, pressione di vapore, temperatura operativa, flusso del liquido (statico-dinamico-laminare) ed i gas disciolti. In generale a basse frequenze vengono generate un numero più piccolo di cavitazioni aventi un elevato diametro ed energia.

A frequenze più elevate si vengono a creare delle cavitazioni molto più dense aventi energie moderate o basse.

Le basse frequenze sono più appropriate per la pulizia di oggetti pesanti e larghi mentre alte frequenze sono indicate per oggetti di dimensioni ridotte. Il *range* fra 35-45 kHz è quello più appropriato ed utilizzato nel ramo industriale [*Ultrasonic cleaning of surfaces: an overview*].

Vi sono numerose variabili che regolano il processo di lavaggio ad ultrasuoni ed alcune di queste sono:

Tempo: la durata del processo può variare tremendamente in funzione di quanto è sporca la superficie, dalla grandezza dell'assemblato e anche dal grado di pulizia che si ambisce ottenere. Periodi tipici di pulizia che si possono trovare nella letteratura più comune, vanno dai 5 ai 20 minuti ed alcuni processi possono anche richiedere più di uno stadio di pulizia ad UT (ultrasuoni).

Temperatura: la temperatura ha un ruolo fondamentale nel processo. Da essa andrà a dipendere lo svilupparsi o meno di reazioni chimiche e dunque potrà influire sulla bontà della pulizia. Tipiche temperature operative sono nell'ordine dei 60°C o 140°F per soluzioni aventi pH abbastanza elevato.

Distanza dai Trasduttori: anche la distanza della superficie dai trasduttori può giocare un ruolo importante nel processo. Più sarà grande la distanza e minore saranno gli effetti di pulizia (a parità degli altri parametri)

Frequenza di Uscita: la frequenza operativa dei trasduttori gioca un ruolo fondamentale nel processo di lavaggio. Sperimentalmente è stato dimostrato che frequenze minori hanno un effetto maggiormente aggressivo sulle superfici mentre frequenze maggiori penetrano più in profondità ma la loro efficacia è ridotta.

Caricamento: come regola generale, si considera che il peso massimo che può essere introdotto nella macchina UT segue la legge qui di seguito riportata:

$$W_{material} \leq \frac{1}{2} W_{liquid}$$

Dove W_i risulta essere il peso dell'oggetto da caricare mentre W_{liquid} è il peso del volume di liquido contenuto all'interno della vasca.

Capitolo 3

3.1 Allestimento Campagna Sperimentale e Risultati

Considerando i capitoli affrontati, verrà qui di seguito riassunta, la procedura di campagna sperimentale che ha permesso lo svolgimento dell'attività di Tesi presso la sede Agusta Westland di Cascina Costa, Samarate (Varese). In seguito, verranno esposti i risultati ottenuti da suddetta campagna sperimentale.

3.1.1 Accoppiamento Corona-Mozzo di Corona Collettrice AW-139

La corona collettrice è un elemento fondamentale appartenente al gruppo “trasmissione” per un elicottero ed essa ha il compito di distribuire la coppia derivante dal motore attraverso un cosiddetto “Gleason” ovvero un gruppo dentellato periferico che ha la funzione di ingranaggio di cui si può avere un'immagine qui sotto:



Figura 34: Esempio di una trasmissione generica in particolare il "Gleason".

Nell'attività sperimentale, sono stati utilizzati due “simulacri” (a perdere) per rappresentare l'accoppiamento corona/mozzetto, che andrà a costituire la corona collettrice, per ragioni di semplicità di gestione del pezzo, di risparmio economico e di facilità di rappresentazione.

I simulacri utilizzati possono essere considerati delle vere e proprie corone collettrici grazie alla geometria ed al materiale utilizzato.

L'attività svolta ha riguardato l'incidenza di una particolare dimensione geometrica, chiamata "gola di scarico", situata sul mozzetto, che assieme allo spigolo vivo della corona assicura che il materiale fuso in fase di solidificazione, si solidifichi in maniera corretta.

Una figura è riportata qui di seguito, per meglio chiarire la descrizione fisica dell'accoppiamento:

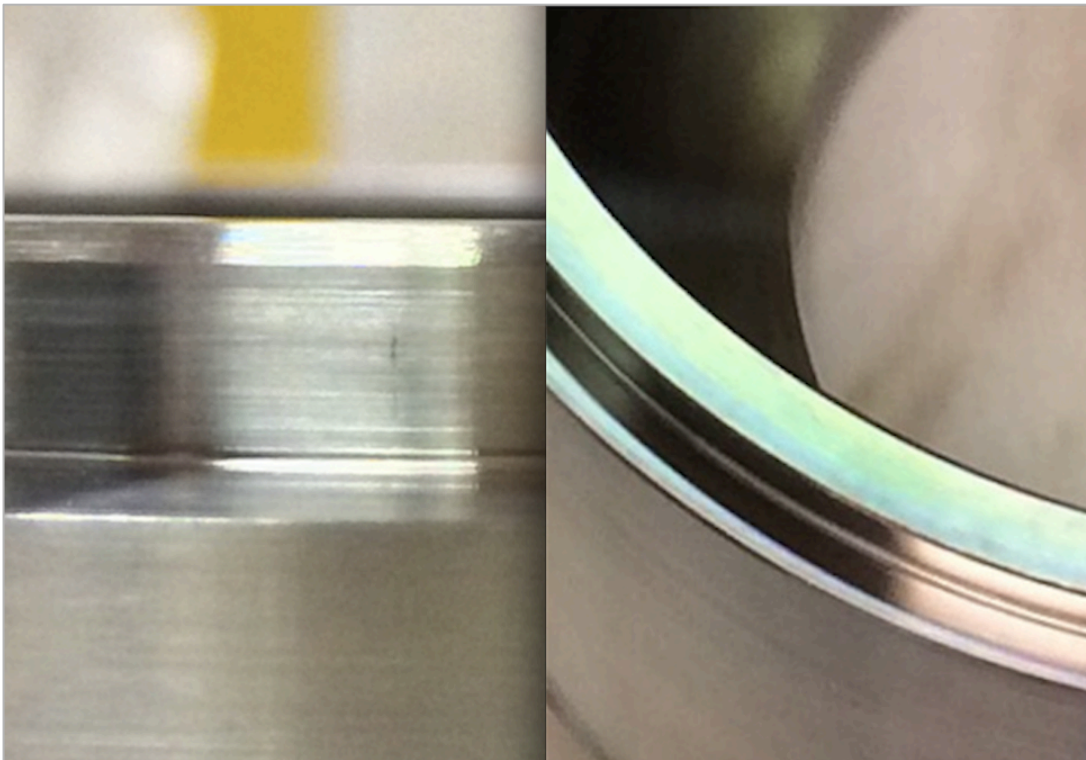


Figura 35: Immagine di un ingrandimento di un mozzo. Nel particolare, la "gola di scarico".

Affinchè la qualità della saldatura non venga inficiata e con lo scopo di ottenere un cordone saldato privo di inclusioni e difetti, risulta necessario che la geometria di tale gola venga progettata in maniera corretta.

Dunque, la prima parte dell'attività di stage è stata improntata su:

“Determinare la configurazione migliore (raggio della gola), in riferimento al volume d'aria presente fra mozzo e corona, tale per cui siano assicurati gli standard di qualità e la bontà della saldatura non venga inficiata”.

Durante l'attività sperimentale svolta, in accordo agli standard interni aziendali (Specifica Tecnologica Agusta di Processo), per eseguire una corretta prova sperimentale, devono essere svolte un minimo di 3 prove e dunque, per ogni gruppo Mozzetto-Corona verranno effettuate 3 prove per un totale di 18 provini rappresentanti l'accoppiamento Corona-Mozzetto.

L'immagine seguente rappresenta una parte dei 18 provini ed è stata riportata qui di seguito per meglio chiarire il contesto:

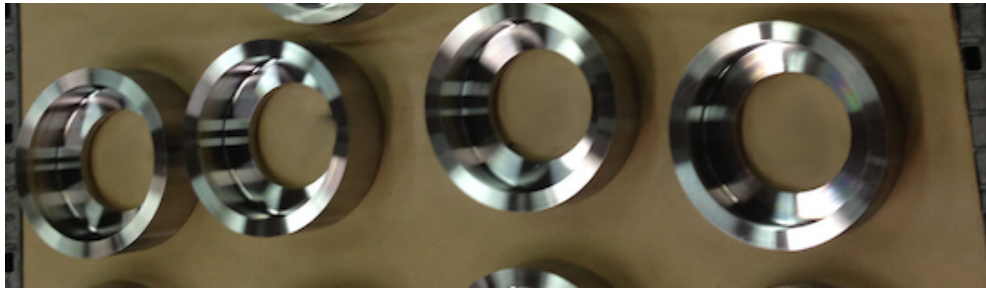


Figura 36: Immagine di parte dei mozzi utilizzati durante l'attività.

L'attività sperimentale, ha reso necessario in primis, ottenere una conoscenza adeguata del processo, nonché dei materiali coinvolti. È stato necessario indagare i fenomeni fisici che avvengono durante la saldatura e i parametri principali sui quali è possibile agire per controllare e regolare il processo di saldatura, sia a livello didattico, che a livello industriale, tenendo in considerazione l'effettiva implementazione di quanto analizzato ed ottenuto.

Sulla base di dati sperimentali e considerazioni, ottenute attraverso la letteratura, non è consigliato agire sui parametri legati all' E.B.W. in sé , quali voltaggio di accelerazione, amperaggio, *defocusing*, ecc.. poiché non si rispetterebbero i limiti economici imposti [3].

Si è deciso allora, di concentrare l'attenzione su parametri geometrici che possono essere utilizzati per controllare la ri-solidificazione dopo saldatura.

Perciò, attraverso un processo di tornitura, è stata creata la suddetta gola di scarico sopra ogni mozzetto, facendo variare le sue dimensioni ogni tre gruppi di provini. Le dimensioni considerate, possono essere schematizzate nella figura successiva:



Figura 37: Schematizzazione mozzetto e gola di scarico

Si deve considerare, che in questa fase, la creazione di suddetta gola di scarico, la quale avviene per tornitura della superficie attraverso una punta da lavoro, che viene appoggiata alla superficie del mozzo, piano piano penetra il materiale fino alla distanza desiderata. La gola così ottenuta, fintanto che la profondità di penetrazione è minore del diametro della punta da lavoro, può essere assimilata per semplicità come una parte di semicirconferenza, mentre quando la profondità supera il diametro, non è più possibile schematizzare tutto come una parte di semicirconferenza (problema che verrà analizzato nei paragrafi successivi). Le dimensioni che varieranno, saranno chiamate “piano” e “diametro” ma potrebbero anche essere raggruppate in una unica dimensione rappresentante la distanza di penetrazione della punta da lavoro nel materiale (si è deciso di distinguere le due dimensioni per semplicità di calcoli e analisi).

Per ogni gruppo di simulacri (denominati come “S/N” acronimo di “Serial Number”), sono state ottenute le seguenti geometrie dopo la fase di lavorazione:

S/N [mm]		Piano [mm]	Diametro [mm]	Raggio [mm]
0.025	I	0.032	0.034	0.339
	II	0.018	0.058	0.343
	III	0.044	0.055	0.344
0.05	I	0.058	0.032	0.348
	II	0.067	0.036	0.346
	III	0.050	0.042	0.349
0.1	I	0.099	0.107	0.347
	II	0.099	0.080	0.352
	III	0.114	0.102	0.342
0.2	I	0.184	0.189	0.339
	II	0.180	0.182	0.332
	III	0.193	0.209	0.343
0.3	I	0.283	0.273	0.331
	II	0.320	0.262	0.333
	III	0.306	0.269	0.344
0.4	I	0.422	0.383	0.316
	II	0.410	0.368	0.328
	III	0.398	0.370	0.338

Le suddette quote, sono state dovutamente verificate prima di procedere con l’attività, attraverso una macchina per il controllo dimensionale ottenendo dei profili rappresentanti la gola relativa. In funzione dei dati pervenuti riguardanti le geometrie di riferimento si è notato che le configurazioni aventi gola di 0.025mm e 0.05 mm non vanno a completo accoppiamento poiché è presente una evidente interferenza fra corona e mozzo.

Si è scelto di procedere comunque nella saldatura, per confrontare fra loro i risultati ed avere maggior sensibilità al fenomeno.

In aggiunta, è stato possibile calcolare anche il volume presente fra mozzo e corona al fine di analizzare e comprendere meglio il fenomeno.

Tale volume è stato calcolato a partire dal solido di rivoluzione generato dall'area della gola, attorno all'asse longitudinale passante per il centro dell'assemblato.

Sono riportati in Tabella i dati relativi al calcolo dell'area e del volume d'aria per ogni configurazione:

<u>S/N</u>	<u>R</u> <u>[mm]</u>	<u>Piano</u> <u>[mm]</u>	<u>Diametro</u> <u>[mm]</u>	<u>Raggio</u> <u>[mm]</u>	<u>Area</u> <u>[mm²]</u>	<u>Volume</u> <u>[mm³]</u>
<u>0.1</u>	58.75	0.099	0.107	0.347	0.0707	26.094
		0.099	0.080	0.352	0.0681	25.127
		0.114	0.102	0.342	0.080	26.2050
<u>0.2</u>	58.64	0.184	0.189	0.339	0.1436	52.909
		0.180	0.182	0.332	0.1363	50.227
		0.193	0.209	0.343	0.15822	58.294
<u>0.3</u>	58.54	0.283	0.273	0.331	0.2152	79.16
		0.320	0.262	0.333	0.2275	83.68
		0.306	0.269	0.344	0.2318	85.25
<u>0.4</u>	58.43	0.422	0.383	0.316	0.3352	123.193
		0.410	0.368	0.328	0.3356	123.2
		0.398	0.370	0.338	0.3406	125.574

R: Distanza di rivoluzione (usata per il volume).

Il calcolo delle aree (e perciò dei volumi) è stato svolto come già affermato in precedenza, considerando la gola come una semicirconferenza che, a seconda del S/N, è situata maggiormente in profondità o meno. Nella figura sottostante viene riportato lo schema di calcolo dell'area per tutti gli accoppiamenti eccetto per gli S/N da 0.4mm in seguito discussi.

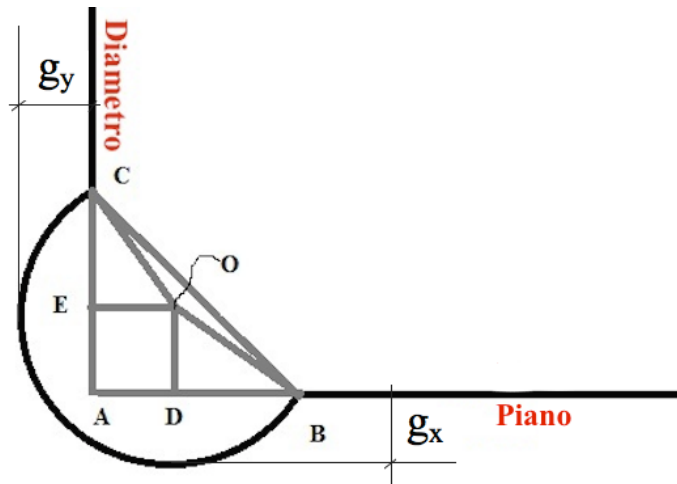


Figura 38: Schema di calcolo dei parametri geometrici necessari per il calcolo delle aree e volumi (riferito al caso in cui la profondità di penetrazione risulta minore del diametro).

A partire dalla figura soprastante, è possibile distinguere le seguenti grandezze:

$$\begin{aligned}
 gola &= \{g_x; g_y\} \\
 \overline{AD} &= r - g_y = \overline{EO} \\
 \overline{OD} &= r - g_x = \overline{AE} \\
 \overline{AO} &= \sqrt{(r - g_y)^2 + (r - g_x)^2} \\
 \overline{OB}^2 &= \overline{AB}^2 + \overline{AO}^2 - 2 \cdot \overline{AB} \cdot \overline{AO} \cdot \cos(\theta) \\
 \overline{OC}^2 &= \overline{AC}^2 + \overline{AO}^2 - 2 \cdot \overline{AC} \cdot \overline{AO} \cdot \cos(\alpha) \\
 \overline{BC}^2 &= \overline{OC}^2 + \overline{OB}^2 - 2 \cdot \overline{OC} \cdot \overline{OB} \cdot \cos(\theta) \\
 A^* &= \frac{1}{2} r^2 (\alpha - \sin(\alpha)) - \frac{\overline{AC} \cdot \overline{AD}}{2} - \frac{\overline{AB} \cdot \overline{OD}}{2}
 \end{aligned}$$

con $\alpha = 360^\circ - \theta$

In questa fase per tutti i S/N eccetto 0.025mm-0.05mm (poiché non vanno ad accoppiamento) sono stati calcolati Area e Volume di gola.

Bisogna considerare che per i S/N da 0.4mm siccome il raggio della gola è minore della misura della rispettiva gola (sia piano che diametro) non è più possibile assimilare la gola ad una circonferenza (e quindi pervenire al valore di area e volume come per gli altri S/N).

In questo ultimo caso si è considerato che la suddetta gola è composta da una semicirconferenza, un rettangolo e due triangoli. Per meglio comprendere le approssimazioni utilizzate viene riportato uno schema qui di seguito:

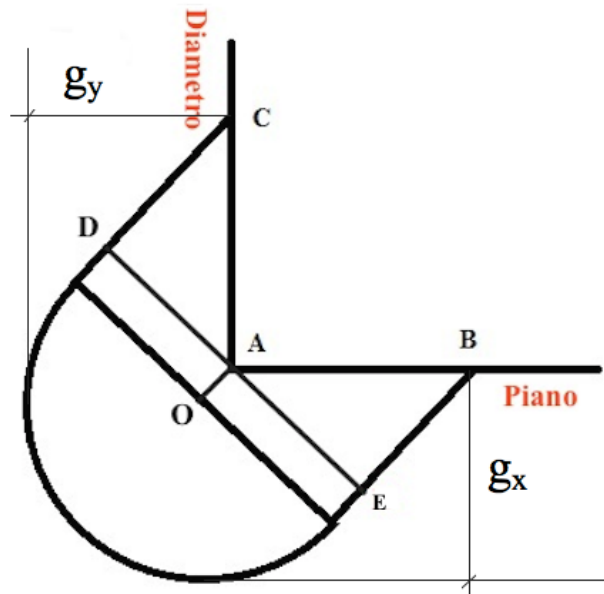


Figura 39: : Schema di calcolo dei parametri geometrici necessari per il calcolo delle aree e volumi (riferito al caso in cui la profondità di penetrazione risulta maggiore del diametro).

Analogamente al caso precedente, anche qui è possibile identificare le seguenti dimensioni, necessarie per svolgere i calcoli:

$$a = g_y - r$$

$$b = g_x - r$$

$$\overline{OA} = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\overline{DC} = \sqrt{AC^2 - r^2}$$

$$\overline{EB} = \sqrt{AB^2 - r^2}$$

Aree e volumi, sono stati calcolati per ulteriore confronto mediante software denominato “Cadra”, il quale è capace di ottenere misurazioni a partire dalle analisi dimensionali ed inoltre di svolgere i normali compiti di un software di disegno CAD.

I risultati forniti da tale software utilizzato dal reparto di Ingegneria di Processo di Augusta Westland, sono riportati in Tabella sottostante:

<u>S/N</u>	<u>Angolo</u> [° deg]	<u>Area(S)</u> [mm ²]	<u>Area(V)</u> [mm ²]	<u>Volume(S)</u> [mm ³]	<u>Volume(V)</u> [mm ³]	<u>Errore</u> [%]
0.1	179.36°	0.070	0.071	25.839	26.094	0.98
	173.43°	0.067	0.068	24.732	25.127	1.59
	176.45°	0.074	0.071	27.316	26.205	4.07
0.2	140.12°	0.149	0.144	54.898	52.909	3.62
	140.66°	0.142	0.136	52.319	50.227	3.99
	135.02°	0.164	0.158	60.425	58.294	3.52
0.3	104.57°	0.232	0.215	85.334	79.155	7.2
	101.69°	0.247	0.227	90.851	83.679	7.8
	105.19°	0.250	0.232	91.955	85.250	7.2
0.4		0.335	0.335	122.987	123.193	0.16
		0.334	0.336	122.620	123.199	0.47
		0.338	0.341	124.089	125.574	0.75

3.1.2 Preparazione diaframmi in Ti, all' EBW per Alberi a Motore.

Un secondo aspetto dell'attività sperimentale svolta, ha riguardato la preparazione di accoppiamenti in lega di Ti (Ti-4V-6Al) alla saldatura a fascio di elettroni.

Per quanto già accennato, il processo di E.B.W. si è rivelato essere molto vantaggioso relativamente al trattamento delle giunzioni; tali vantaggi possono essere raggiunti solo attraverso un'accurata pulizia delle superfici da trattare come già ampiamente discusso precedentemente.

È stata dunque studiata una procedura di preparazione alla saldatura a fascio di elettroni, che ottimizza in termini economici, di tempo e materiali utilizzati, il processo di saldatura a fascio di elettroni per la produzione di un elemento fondamentale appartenente al sistema "albero motore". Questo sistema è costituito da un diaframma flangiato in lega di Ti-V-Al(Ti-6Al-4V) che ha lo scopo di impedire la trasmissione dei carichi assiali e flessionali agenti sull'albero in fase operativa.

Un'intuitiva rappresentazione di tale assemblato è riportata in nella figura seguente:

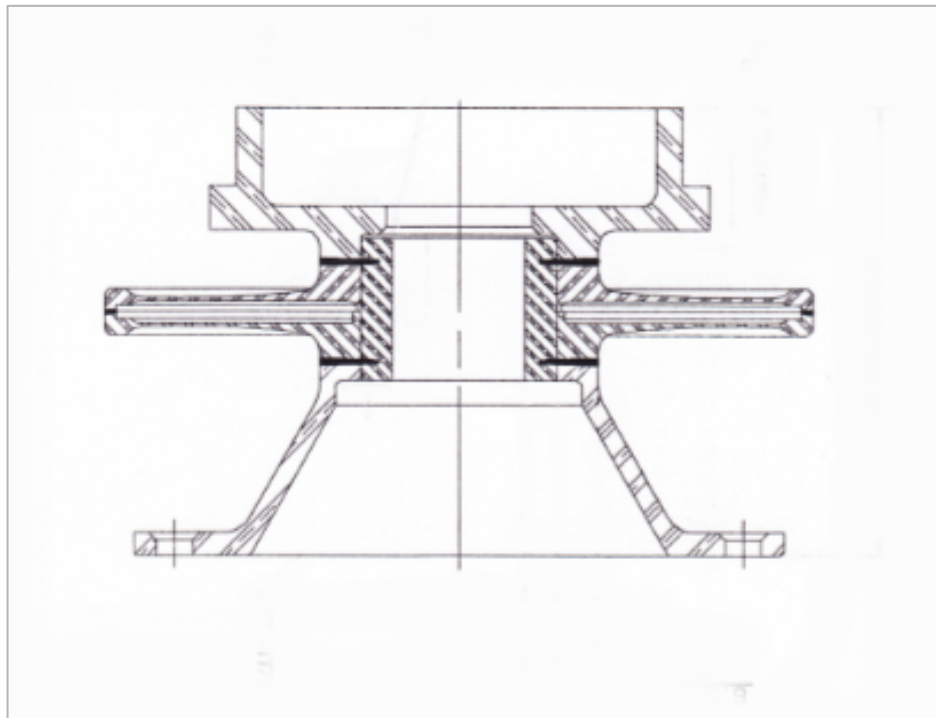


Figura 40: Diaframma per alberi motore AW-109 utile per impedire la trasmissione dei carichi assiali e flessionali agenti sull'albero motore.

Durante il processo di creazione di tale assemblato descritto nel capitolo 1.7, prima di procedere con qualsiasi processo di E.B.W., l'assemblato deve essere adeguatamente preparato secondo quanto analizzato nei capitoli precedenti.

La procedura che è stata oggetto della campagna sperimentale, ha avuto l'obiettivo di ottimizzare la preparazione di tali assemblati .

Infatti, precedentemente, la preparazione dei pezzi veniva effettuata attraverso un processo di lavaggio, che prevedeva l'utilizzo di un detergente chiamato "Oakite 99" contenente Carbonato di Sodio, Idrossido di Sodio, Acido Pirofosforico, Acido Silicico.

Il suddetto lavaggio ha portato innumerevoli problemi poiché gli assemblati, dopo tale lavaggio, presentavano residui di Soda depositatisi sulla superficie del materiale.

Questo effetto è dovuto alla tipologia di liquido utilizzato durante il ciclo di lavaggio (miscela contenente alte % di Sodio) ed alla particolare geometria dell'assemblato.

Infatti, come è possibile notare in figura 40 che rappresenta il diaframma in una delle sue fasi iniziali, è presente un'intercapedine al centro dell'assemblato motivo per il quale viene chiamato diaframma (parte evidenziata in verde).

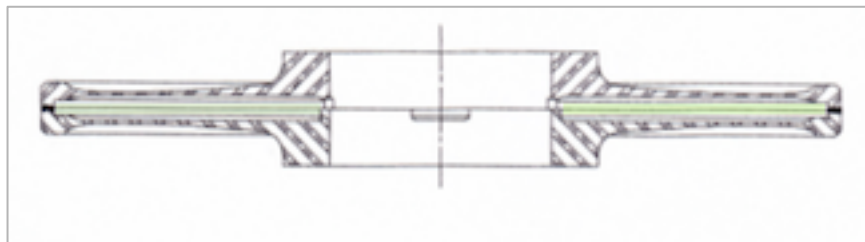


Figura 41: Fase iniziale del diaframma. Nel particolare, in verde, l'intercapedine centrale causa del depositarsi di impurità

In tale cavità, è possibile che del liquido utilizzato in fase di lavaggio, rimanga intrappolato e in questa sfortunata ipotesi, il diaframma, dopo la saldatura, presenterà dei residui di Soda che porteranno al fallimento della saldatura, ed a scartare il pezzo.

Durante l'attività sperimentale dunque, si sono considerate un numero di 5 prove, utilizzando 5 "diaframmi", allestendo così una campagna volta a comprendere e migliorare il metodo di lavaggio sopra illustrato.

La tecnologia ad ultrasuoni, è stato rilevato, che può risultare un processo migliorativo della fase di preparazione alla saldatura poiché per mezzo di onde sonore rilasciate nel mezzo liquido permette di ottenere un'adeguata azione detergente della superficie.

Si sono considerati dunque 5 diaframmi ed è stata seguita la preparazione alla E.B.W. a partire da C.D. singoli (fase iniziale del processo figura 41) sino ad arrivare al pezzo

prodotto in fase finale, utilizzando un processo di lavaggio ad ultrasuoni in una soluzione di Acetone.

Per omogeneizzare la procedura e verificare che le lavorazioni precedenti non vadano ad inficiare la bontà della pulizia ad UT, si è deciso di immergere le parti in esame durante la campagna sperimentale, nella soluzione lubrorefrigerante utilizzata in fase di torneria e rettifica.

Gli assiemi sono rimasti bagnati da tale soluzione per circa 24 ore e successivamente lavati per mezzo di tecnologia ad ultrasuoni secondo una procedura che può essere schematizzata come:

1. Caricare la lavatrice ad UT con circa 7.5 L di Acetone
2. Degassing a 60 °C e frequenza operativa minima: durata circa 25 minuti (deve raggiungere i 60°C).
3. Durata lavaggio: 5 minuti
4. Temperatura Operativa: 60°C
5. Frequenza Operativa: 70% di potenza massima: 23.1 *kHz*.
6. A metà lavaggio, 2.5 min, ruotare di 180° gli assiemi cambiando orientamento alla superficie (il piano che prima era rivolto verso l'alto ora verrà rivolto verso il basso).
7. Al termine del processo, risciacquare **ABBONDANTEMENTE** in Acetone, asciugando accuratamente per mezzo di aria compressa (anche e soprattutto nella cavità interna).

Dalla letteratura si è notato come la maggior parte dei lavaggi industriali ad ultrasuoni di questa natura, la durata del lavaggio non deve essere troppo lunga poiché causerebbe una perdita di superficie del materiale, la quale in questa circostanza, se fosse eccessiva, giocherebbe a sfavore della bontà della saldatura. Inoltre, il problema è stato identificato nella procedura originale di lavaggio, e dunque si è reso necessario indagare una procedura che permettesse di avere la maggior parte degli assemblati puliti che non coinvolgesse liquidi aventi la caratteristica di depositarsi sulla superficie a seguito dell'evaporazione e asciugatura. L'acetone, per sua natura, non lascia depositi superficiali, e risulta adeguato ritenere che 5 minuti di lavaggio siano adeguati (a fronte dei C.N.D. svolti).

Per quanto riguarda la temperatura operativa, essa risulta essere quella mediamente utilizzata anche in letteratura per la tipologia di lavaggio considerata.

Successivamente ad ogni saldatura che ha interessato l'attività in analisi, sono stati eseguiti controlli C.N.D. quale ispezione Radiogena, la quale andrà a verificare la qualità della saldatura ed a stabilire la corretta saldatura dell'assemblato.

Come già accennato, sono stati considerati dunque un numero di 5 diaframmi ed è stata seguita la loro lavorazione fino alla fase finale utilizzando il procedimento sopra descritto.

I cinque diaframmi sono stati denominati:

1. V-134
2. V-135
3. V-140
4. V-148
5. V-150

Per avere una più chiara comprensione della geometria dei suddetti pezzi, viene riportata di seguito un immagine reale del diaframma nel particolare, in fase di primo lavaggio :

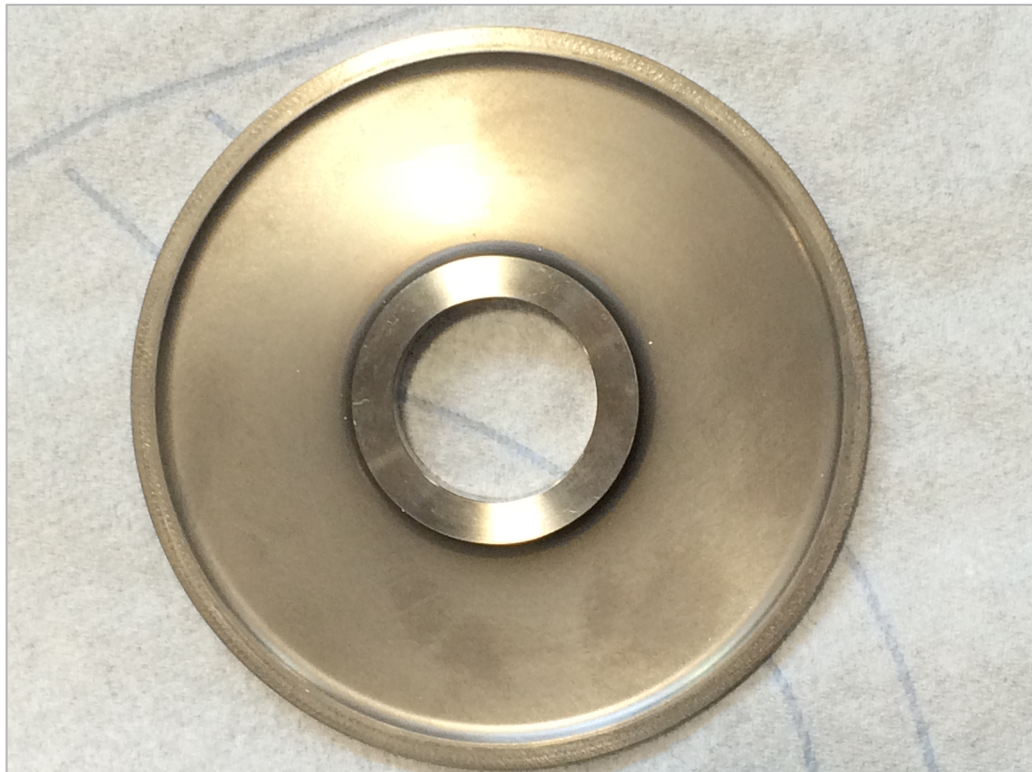


Figura 42: Immagine reale del diaframma (fase iniziale).

Per il lavaggio è stata utilizzata una lavatrice ad ultrasuoni interna all'azienda, dalla capacità in litri pari a 9L di liquido avente una potenza pari a 22kHz-33kHz.

3.2 Macchinari Utilizzati

In questo sotto capitolo, verrà esposto l'impianto utilizzato per la saldatura a E.B.W, il quale si tratta di una macchina con cannone a triodo ad alta tensione, al massimo 120 kV, mantenuto ad un livello di pressione intorno ai 10^{-2} Pa; inoltre, il catodo è a riscaldamento diretto. La figura successiva rappresenta una macchina a E.B.W utilizzata durante l'attività di tesi:



Figura 43: Impianto a E.B.W. utilizzato.

Il suo sistema di movimentazione consente il controllo numerico (CN) degli assi x, y, a, ossia i moti di traslazione nel piano del carrello di posizionamento e la rotazione del mandrino porta-pezzo.

Il volume della camera vale all'incirca 0.6m^3 e presenta le seguenti dimensioni:

1. lunghezza utile: 1050 mm.
2. profondità utile: 710 mm.
3. altezza utile: 850 mm.

A questa camera è stata aggiunta successivamente una “prolunga”, assimilabile a un cilindro, in modo da poter ospitare anche gli alberi più lunghi; il volume interno utile vale circa 0.07m^3 e presenta le seguenti dimensioni:

1. lunghezza: 1350 mm.
2. diametro interno: 250 mm.

Il sistema di pompaggio è di tipo “a vuoto dinamico”, ossia durante la fase di svuotamento della camera è sempre in funzione, ed è composto da una pompa di tipo a lobi Pfeifer/Balzers WKP 500°, di cui si riporta il disegno del componente in Figura 43.

Il livello di pressione (totale) raggiungibile arriva fino all'incirca a 1 Pa, con portata massima di $490\text{m}^3/\text{h}$. Il componente precede la pompa Duo 120 A e costituisce il primo stadio di riduzione, in quanto può operare a partire dalla pressione atmosferica.

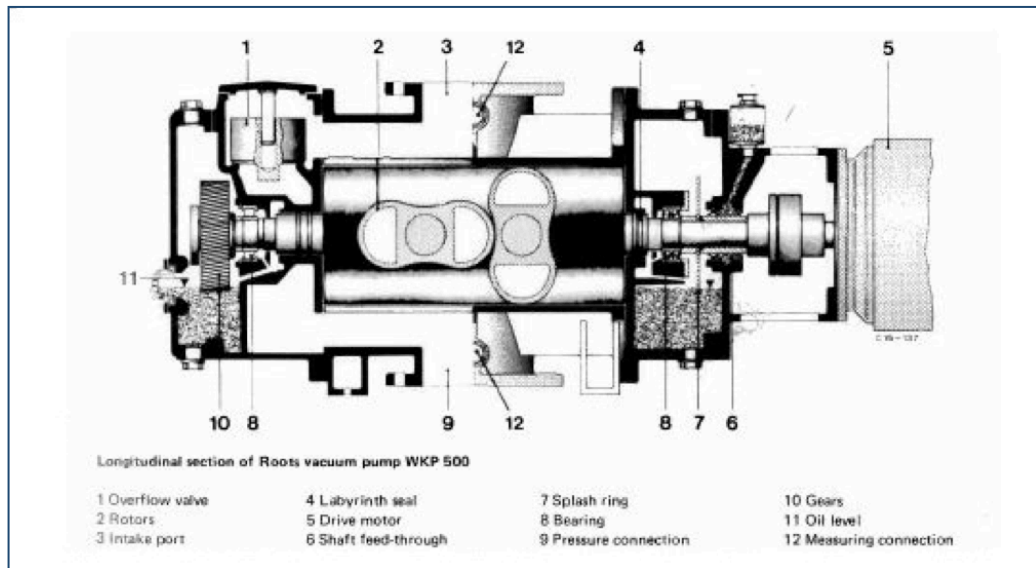


Figura 44: Schema costruttivo della pompa WKP-500A

La pompa volumetrica Pfeifer/Balzers Duo 120, a rotore eccentrico, con due stadi in serie di cui è possibile notare la schematizzazione a Figura 43 è installata per costituire il secondo stadio di pressurizzazione. Il disegno in Figura 44 presenta la pompa Uno, a singolo stadio,

ma è del tutto analogo alla Duo. Il livello di pressione raggiungibile vale circa 10^{-2} Pa, con portate anche di $128 \text{ m}^3/\text{h}$.

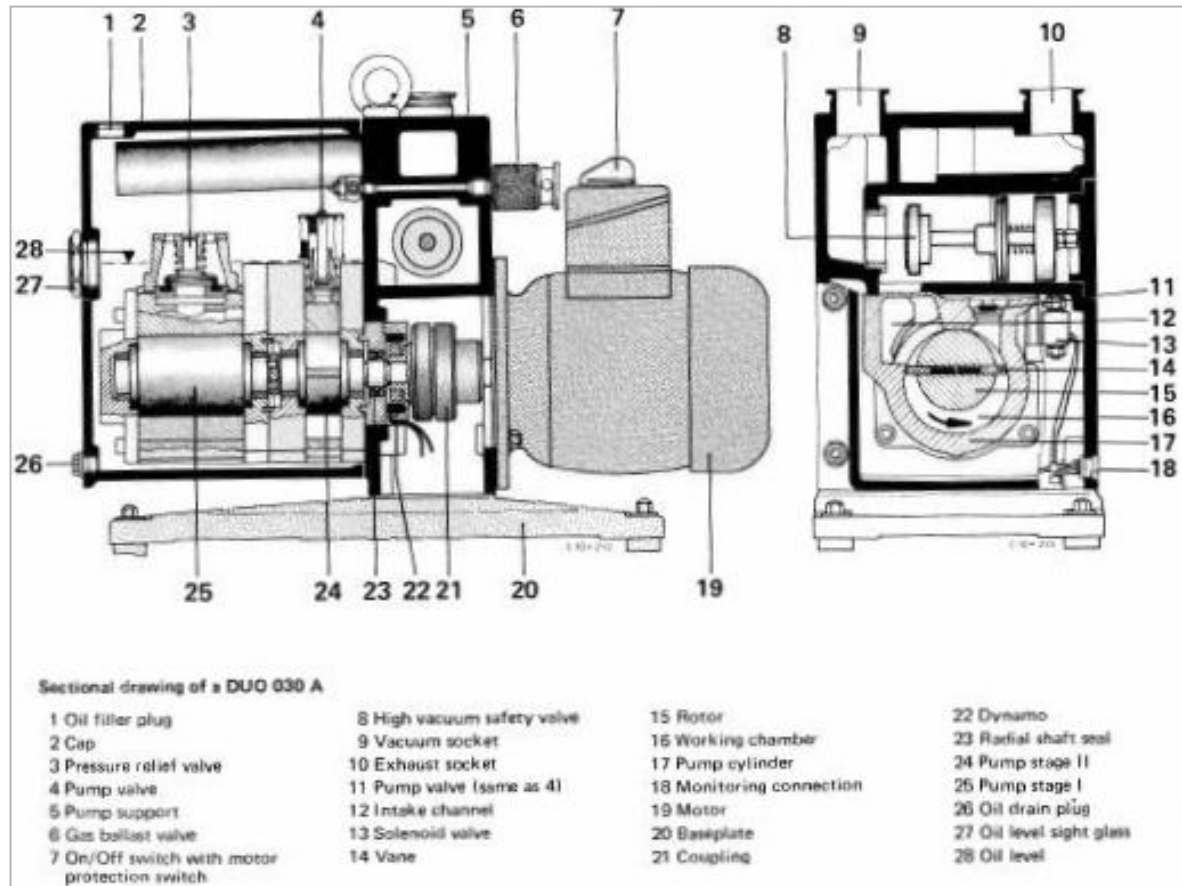


Figura 45: Schema costruttivo della pompa Uno

È inoltre installata una pompa a diffusione Leybold Leybodiff 1010, che sfrutta oli a bassa tensione di vapore (nell'ordine di 10^{-8} Pa) per generare il vuoto; essa necessita di un pre-vuoto ed ha rapporti di compressione molto elevati; se la pressione in "aspirazione" vale 10^{-9} Pa, in mandata si hanno 10^{-2} Pa, con un rapporto di compressione pari a 10^7 .

Le portate elaborate da questa macchina sono in un intervallo compreso fra 0.78 e 1.01 m³/s ed è possibile notare una schematizzazione nella figura seguente:

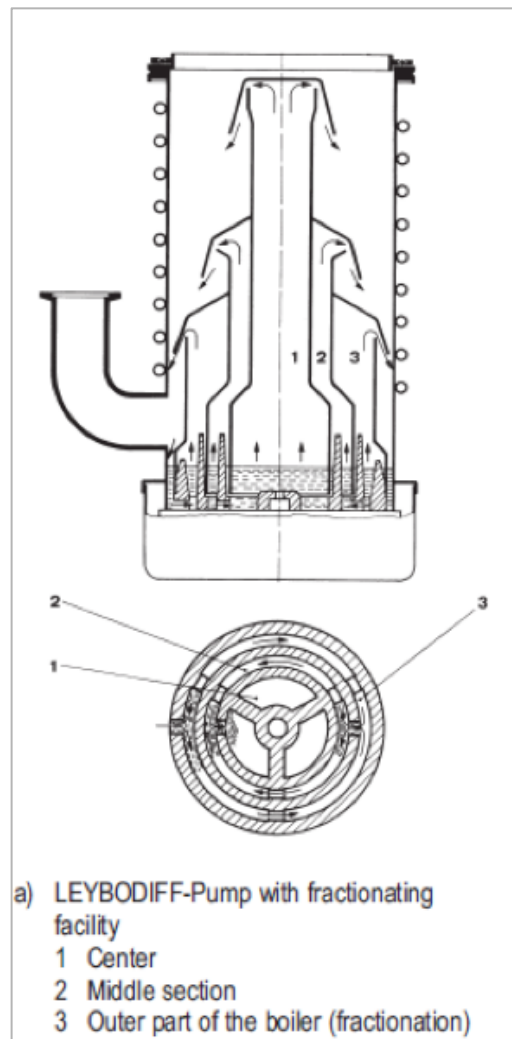


Figura 46: Schema costruttivo del sistema Leybold Leybodiff 1010

Infine, il sistema di pompaggio del cannone è costituito da una Pfeifer/Balzers Duo 016 B, una pompa volumetrica, del tutto analoga alla precedente Duo 120 A il cui livello di pressione raggiungibile vale circa 10^{-2} Pa, con portata massima di 14 m³/h.

Capitolo 4

4.1 Conclusioni

In questo paragrafo, verranno esposte le conclusioni derivanti dalla campagna sperimentale che hanno permesso lo svolgimento della Tesi presso Agusta Westland.

4.1.1 Accoppiamento Corona-Mozzo di Corona Collettrice AW-139

L'analisi svolta in tale ambito, è stata utile per meglio comprendere la fenomenologia del processo nel caso in cui venga applicato alle geometrie considerate.

In questo caso, quando si cerca di saldare assieme due componenti, è stato confermato sia da dati appartenenti alla bibliografia, sia attraverso i risultati ottenuti, che una apertura avente lo scopo di far convogliare i liquidi ed espellere i gas prodotti, può risultare comoda e aumentare di molto la qualità della saldatura.

Mentre uno dei pezzi dunque, può presentare una gola di scarico, è consigliabile che il suo complementare, sia dotato di "spigolo vivo" così come si sono gestiti gli assemblati nel corso della attività di tesi. In seguito alla saldatura, sono stati svolti C.N.D. sulla totalità dei provini, ottenendo i seguenti risultati:

S/N:		Note:
0.025	I	Somma 0.5 Slope-Out
	II	Leggera 0.3 Slope-Out
	III	Somma 0.8 in uscita
0.05	I	Somma Oltre i Limiti in uscita
	II	Nessuna imperfezione
	III	Somma Oltre i Limiti in uscita
0.1	I	Somma 0.9
	II	Nessuna imperfezione
	III	Leggere 0.6-0.4 non sommabili
0.2	I	Somma 0.4
	II	Leggera 0.2
	III	Nessuna imperfezione

0.3	I	0.2 slope out
	II	Leggera 0.5
	III	Singola 0.4
0.4	I	Singolarità pesante 0.5
	II	0.4-0.2 non sommabili
	III	Somma 0.7 leggere

I risultati riportati nella tabella, riassumono ciò che viene ottenuto dai C.N.D. svolti a posteriori della saldatura. Si può notare come la totalità degli assemblati, non presentano discontinuità o imperfezioni oltre i limiti previsti dagli standard interni di qualità. Per ogni S/N infatti, sono state verificate che le imperfezioni riscontrate, non solo rispettino i limiti imposti come discontinuità singole, ma anche come somma delle rispettive superfici.

Tali risultati sono frutto del controllo radiogeno ed ad ultrasuoni, svolti e interpretati da tecnici-operatori specializzati. Come già accennato in precedenza è sintomo comune determinare discontinuità (seppur lievi) all'interno del chiodo di saldatura; dall'interpretazione di tali risultati, si indagherà dunque la configurazione che permette di ottenere il minor numero di imperfezioni.

La geometria analizzata, composta da gola di scarico e spigolo vivo, ha permesso dunque di ottenere la totale validazione delle 18 prove svolte durante l'attività di Tesi. Tale validazione è avvenuta attraverso un operatore adeguatamente formato, attraverso l'utilizzo delle tecniche di Controlli Non Distruttivi quali Controllo Radiogeno e Controllo Ultrasonoro.

L'attività, per quanto riguarda la sua prima fase, è stata portata a termine, ottenendo i migliori risultati sperati, che hanno portato alla conclusione che la miglior configurazione, ovvero sia quella che presenta il minor numero di inclusioni è quella che presenta la grandezza $gola = \{g_x; g_y\}$ compresa fra i valori:

$$0.2 < Gola \text{ [mm]} < 0.3$$

Tali valori corrispondono a circa:

$$50 < volume \text{ [mm}^3\text{]} < 85$$

mentre si mantiene la configurazione a spigolo vivo sul lato corona e dunque, in fase di processo, le corone collettrici e, più nello specifico, il lato "mozzetto" delle corone collettrici dovrà essere prodotto avente una gola di scarico secondo la geometria appena citata.

Tale procedura può dunque essere riassunta e definita come :

1. Caricare la lavatrice ad UT con circa 7.5 L di Acetone
2. Degassing a 60 °C e frequenza operativa minima: durata circa 25 minuti (deve raggiungere i 60°C).
3. Durata lavaggio: 5 minuti
4. Temperatura Operativa: 60°C
5. Frequenza Operativa: 70% di potenza massima: 23.1 *kHz*.
6. A metà lavaggio, 2.5 min, ruotare di 180° gli assiemi cambiando orientamento alla superficie (il piano che prima era rivolto verso l'alto ora verrà rivolto verso il basso).
7. Al termine del processo, risciacquare **ABBONDANTEMENTE** in Acetone, asciugando accuratamente per mezzo di aria compressa (anche e soprattutto nella cavità interna).

Tale procedura, rispetto a quella precedente, presenta numerosi vantaggi, poiché è possibile eliminare il problema di processo precedente, che causava l'inficiare di numerose saldature, utilizzando una procedura che prevede limitati impieghi in termini di tempo grazie al vantaggio di lavare gli assemblati in 5 minuti. Tale metodologia se applicata, presenta ridotti impatti economici grazie alla particolarità di poter lavare più pezzi contemporaneamente (la vasca a UT utilizzata in questa tesi poteva contenere solo cinque pezzi ma esistono vari tipi di lavatrici per lavaggi industriali che assicurano ottime performance lavando un numero maggiore di cinque pezzi) ed il liquido utilizzato, se utilizzato sotto cappa aspirante, risulta essere poco costoso e sicuro e quindi da non sottovalutare infine, tutti gli aspetti economico-operativi da esso derivanti a beneficio dell'ottimizzazione ottenibile in campo industriale.

Bibliografia

1. Bunshah R. F.: *The history of electron beam technology*, in: Bakish R. , *Introduction to electron beam technology*, J. Wiley & Sons, Inc., New York-London 1962.
2. Schultz H. : “*Electron Beam Welding*”. Woodhead Publishing, 1993
3. Schütz W., and W. Oberparleiter : “*influence of welding flows on the fatigue strength of Electron beam weldments in Ti-Al6-V4.*”
4. Bushberg, Jerrold T.; Seibert, J. Anthony; Leidholdt, Edwin M. and Boone, John M. (2002). : *The essential physics of medical imaging*. Lippincott Williams & Wilkins. p. 42.
5. Bushburg, Jerrold; Anthony Seibert; Edwin Leidholdt; John Boone (2002).: *The essential physics of medical imaging*. USA: Lippincott Williams & Wilkins. p.116.
6. Science Direction: How “X-Ray got it’s ‘X’ ” 2010-06-18. Retrieved 2014-03-23.
7. Thier, H.: *Delta-ferrite e cricche a caldo di saldatura di acciai resistenti* Chemisch. DVS-Verlag , Düsseldorf 1976
8. Di Landro L. : “*Dispense Tecnologie e Materiali Aerospaziali.*”
9. Lippold J. C. : “*Centerline cracking in deep penetration electron beam welds in type 304L stainless steel.*” Wdg. Res. Suppl. 64 ,1985:
10. Di Caprio G. : “*Gli acciai Inossidabili.*” Hoepli 2003.
11. Kirpack I. P. et al. : “*Deformation of gas turbine rotor disks during electron beam welding.*” Automatic Wdg. 1984.
12. Schiller S. et al: “*Electron beam technology*”. Scientific Technology Stuttgart 1977.
13. Petrov P. Georgiev C. Petrov G. : “*Experimental investigation of weld pool formation in electron beam welding*”. Elsevier Science 1998.
14. Mauer K. O. : *Relationship between secondary electron current frequency and current in the work during electron beam welding and geometry of the weld*. Autom. Wdg (1982).
15. Dorn L. : “*Analysis for electron - welding process and the strength behavior electron beam welded metal compounds*”. Dissertation TU Hannover 1969.
16. Schauer D. A. and W. H. Giedt : *Prediction of electron beam welding spiking tendency*. Wdg. Res. Suppl. (1978).
17. Arata Y. : *Some dynamic aspects of weld molten metal in electron beam welding*. Trans. Jpn. Wdg. Res. Inst. 2 (1973).

18. Hesse P. : *“The weld pool during electron beam welding- state of knowledge and research results”*. DVS Verlag Düsseldorf 1977.
19. Dorn L. : *“About the interactions between the electron and matter”*. DVS Verlag Düsseldorf 1969.
20. Schauer D. A. : *Electron beam welding cavity temperature distribution in pure metals and alloys*. Wdg. Res. Suppl. (1978).
21. .Kreye H. : *“The results of solidification in welds”*. Schw.1975.
22. Dorn L. : *“Analysis for corrosion behavior of Cr18Ni8”*. DVS Verlag Düsseldorf 1978
23. *Merkblatt DVS 1002 : “Welding stresses Part 1: Classification wording declarations (1983) Part 2: Methods designed to reduce welding residual stresses (1986)”*.