



**Politecnico
di Torino**

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Monitoraggio dell'usura dell'elettrodo nella saldatura a punti

Relatori:
Prof.ssa Manuela De Maddis

Candidato
Vellucci Michele

Correlatori:
Prof.ssa Giulia Bruno
Prof. Russo Spena

Matricola
254517

Anno accademico 2020/2021
Sessione di Laurea 07/2021

Indice

1	Introduzione ai processi di saldatura	10
1.1	Introduzione alla saldatura	10
1.2	Termini generali.....	11
1.3	Classificazione processi di saldatura.....	12
1.4	Tipi di Giunto	14
1.5	Confronto Saldatura con altre metodologie di giunzione.....	16
1.6	Cenni storici	18
2	Descrizione del processo di saldatura a resistenza per punti	19
2.1	Principi fondamentali - Saldatura a resistenza.....	19
2.2	Saldatura a resistenza per punti	21
2.3	Caratteristiche elettriche	24
2.3.1	Resistenze lamiere.....	26
2.3.2	Resistenze di contatto	27
2.3.3	Resistenze totali.	30
2.3.4	Esempi resistenze di contatto	31
2.4	Caratteristiche termiche.....	33
2.5	Vantaggi e svantaggi.....	35
2.6	Struttura elettrodo	36
2.6.1	Alimentazione e campi applicativi	40
3	Parametri di processo nella saldatura a punti	43
3.1	Parametri di processo.....	43
3.1.1	Finestra di saldabilità.	44
3.1.2	Pressione di saldatura	45
3.1.3	Corrente	46
3.1.4	Temperatura	48
3.1.5	Tempo di saldatura.....	48
3.1.5.1	Cicli di pressione è corrente	50
4	Usura elettrodo e metodi di predizione.	53
4.1	Usura elettrodo nella saldatura a resistenza per punti.....	53
4.2	Metodi di predizione usura elettrodo	55
4.2.1	Albero decisionale	56
4.3	Esempi metodi di predizione applicati all'usura elettrodo	58

4.3.1	Monitoraggio e controllo intelligente dell'usura dell'elettrodo sulla base di una curva di spostamento dell'elettrodo misurata nella saldatura a punti di resistenza [13]	58
4.3.2	Prestazioni del modello di regressione e della rete neurale artificiale nel monitoraggio della qualità della saldatura [14].	67
5	Monitoraggio “usura elettrodo” mediante il segnale di spostamento dell’elettrodo.	79
5.1	Descrizione macchina usata in sperimentazione	81
5.2	Descrizione segnale spostamento elettrodo	84
5.3	Estrazione caratteristiche da segnale di spostamento con DFD	87
5.4	Estrazione caratteristiche dal segnale “spostamento elettrodo” con Matlab.	95
5.4.1	Plot segnale spostamento elettrodo	95
5.4.2	Indice di Deviazione Standard	97
5.4.3	Spostamento massimo	99
5.4.4	Spostamento medio	100
5.4.5	Indice di Curtosi	100
5.4.6	Indice di asimmetria	101
5.4.7	Coefficiente angolare delle curve “spostamento elettrodo”	103
5.5	Caratteristiche non utilizzate	109
6	Conclusioni e sviluppi futuri	112
	Appendice	116
	Bibliografia	119

Indice delle figure

Figura 1.2.1 - Termini generali [1].....	12
Figura 1.3.1 - Classificazione processi di saldatura.....	13
Figura 1.4.1 - Tipi di giunzioni [2]	434
Figura 1.4.2 - Preparazione lembi per giunti di testa al crescere dei pezzi saldare [2].....	15
Figura 1.4.3 - Posizione saldature al variare del tipo di giunto [2]	15
Figura 1.4.a - Tubi fissati meccanicamente [3]	16
Figura 1.4.b - Stampaggio sportello auto [4]	16
Figura 2.1.1 - Tipologie di saldature a sovrapposizione [5]	20
Figura 2.1.2 - Tipologie di saldature di testa [5]	21
Figura 2.2.1 - Schema semplificato saldatura RSW [1]	22
Figura 2.2.2 - Andamento temperatura nella zona di contatto [1]	23
Figura 2.2.3 - Varie forme di elettrodi [1].....	24
Figura 2.3.1 - Schema semplificato circuito elettrico per RSW [6].....	24
Figura 2.3.2 - Resistenza nella zona di contatto [6].....	25
Figura 2.3.3 - Esempi resistività delle lamiere in funzione della temperatura [7].....	27
Figura 2.3.4 - Misurazione resistenza di contatto con diverse condizioni superficiali [7].....	29
Figura 2.3.5 - Superficie effettiva che definisce la resistenza di contatto [5].....	29
Figura 2.3.6 - Esempi resistenza totale lega di alluminio e acciaio in RSW [7].....	30
Figura 2.3.7 - Resistenza di contatto per lamiere di diverso materiale [8]	32
Figura 2.4.1 - Esempi di conducibilità termica per alcuni materiali [7].....	33
Figura 2.4.2 - Coefficiente di espansione termica per alcuni materiali [7].....	34
Figura 2.6.1 - Esempio elettrodo [9].....	37
Figura 2.6.2 - Tipi di innesti per elettrodi [5].....	38
Figura 2.6.3 - Elettrodi normati [10].....	39
Figura 2.6.1.1 - Schema attrezzatura manuale [10].....	41
Figura 2.6.1.2 - Schema attrezzatura robotizzata [10].....	42
Figura 3.1.1 - Ciclo semplificato andamento forza e corrente.....	43
Figura 3.1.2 - Schema finestra di saldabilità [7].....	45
Figura 3.1.3 - Resistenza di contatto in funzione della forza [5].....	46
Figura 3.1.4.1 - regolazione "up slope" e "down slope" [5].....	47
Figura 3.1.4.2 - Resistenza di contatto in funzione della temperatura [5].....	48

Figura 3.1.4.3 - Relazione tempo di saldatura, corrente e diametro del punto di saldatura	50
Figura 3.1.5.1 - Schema base del ciclo di saldatura a resistenza [5].....	50
Figura 3.1.5.2 - Ciclo reale pressione e corrente per saldature RSW [5].....	52
Figura 4.1.1 - Impronte elettrodo usurato [12].....	54
Figura 4.1.2 - Esempio elettrodo usurato [12].....	54
Figura 4.2.1 - Esempio albero decisionale.....	57
Figura 4.3.1.1 - Struttura sistema neuro-fuzzy [13].....	59
Figura 4.3.1.2 - Curva spostamento elettrodo [13].....	61
Figura 4.3.1.3 - Curva spostamento elettrodo ottenuta con analisi Wavlet [13].....	62
Figura 4.3.1.4 - Metodo SPC [13].....	63
Figura 4.3.1.5 - Spostamento e velocità dell'elettrodo in funzione della corrente [13].....	64
Figura 4.3.1.6 - Funzione d'appartenenza sistema fuzzy [13].....	65
Figura 4.3.1.7 - Curva di spostamento dell'elettrodo usurato [13].....	66
Figura 4.3.1.8 - Curva di spostamento dell'elettrodo con corrente ottimizzata [13].....	66
Figura 4.3.1.9 - Confronto durata elettrodi con e senza controllo [13].....	67
Figura 4.3.2.1 - Curve di spostamento di carico per provini sottoposti a trazione [14].....	69
Figura 4.3.2.2 - Giunzioni saldate dopo prove a trazione [14].....	70
Figura 4.3.2.3 - Corrente di saldatura costante [14].....	71
Figura 4.3.2.4 - Segnale di potenza in una lega di titanio [14].....	71
Figura 4.3.2.5 - Segnali di potenza al variare della corrente di saldatura [14].....	72
Figura 4.3.2.6 - Curve di potenza al variare della forza dell'elettrodo [14].....	73
Figura 4.3.2.7 - Segnali di potenza per giunti di qualità differente [14].....	74
Figura 4.3.2.8 - Caratteristiche del segnale di Potenza [14].....	74
Figura 4.3.2.9 - Architettura rete neurale BP [14].....	76
Figura 4.3.2.10 - Dimensioni previste ed effettive "noccioli di saldatura" [14].....	77
Figura 4.3.2.11 - Errori assoluti dei valori dei modelli usati per la convalida [14].....	78
Figura 5.1 - Membri usati in DFD.....	80
Figura 5.1.1 - Macchina saldatrice utilizzata in laboratorio [15].....	81
Figura 5.1.2 - Sensore di posizione [16].....	83
Figura 5.2.1 - Curve spostamento elettrodo.....	84
Figura 5.2.2 - Impostazione dati nell'app DFD.....	85
Figura 5.2.3 - Data processing DFD.....	86
Figura 5.2.4 - Curve spostamento elettrodo max/min/mean.....	86

Figura 5.3.1 - Feature generation DFD.....	87
Figura 5.3.2 - Valori di deviazione standard per gli 80 membri.....	89
Figura 5.3.3 - Distribuzione valori al variare dell'indice di Curtosi [16].....	91
Figura 5.3.4 - Indice di curtosi per gli 80 membri.....	92
Figura 5.3.5 - Distribuzione valori al variare dell'indice di asimmetria [16].....	93
Figura 5.3.6 - Indice di asimmetria per gli 80 membri.....	94
Figura 5.4.1.1 - Dati Matlab.....	95
Figura 5.4.1.2 - Curve spostamento elettrodo.....	97
Figura 5.4.2.1 - Indice di deviazione standard.....	98
Figura 5.4.3.1 - Spostamento massimo.....	99
Figura 5.4.4.1 - Spostamento medio.....	100
Figura 5.4.5.1 - Indice di Curtosi.....	101
Figura 5.4.6.1 - Indice di asimmetria	102
Figura 5.4.7.1 - Curve spostamento elettrodo in 0.7 s.....	103
Figura 5.4.7.2 - Schema semplificato corrente elettrica.....	104
Figura 5.4.7.3 - Pendenza curve "spostamento elettrodo" al variare del tempo.....	105
Figura 5.4.7.4 - esempi di grafici al variare del coefficiente di correlazione [17].....	106
Figura 5.4.7.5 - Coefficiente angolare curve "spostamento elettrodo" a $t= 0.5s$	107
Figura 5.4.7.6 - Curve "spostamento elettrodo" al variare dei membri in DFD.....	108
Figura 5.5.1 - Spostamento minimo.....	109
Figura 5.5.2 - Spostamenti massimi in valore assoluto.....	110
Figura 5.5.3 - Coefficienti di correlazione caratteristiche scartate.....	111
Figura 6.1 - Coefficienti di correlazioni caratteristiche estratte.....	112
Figura 6.2 - Matrice di correlazione.....	114

Sommario

In questo lavoro di tesi dopo un'attenta rassegna bibliografica, si è fatta una descrizione sui vari processi di saldatura che tutt'ora troviamo in uso, con un focus sulla tipologia a resistenza. In particolare, si è descritto dettagliatamente il tipo di saldatura a resistenza per punti, partendo dalla spiegazione dell'intero procedimento necessario alla formazione del "nocciolo di saldatura". Sono stati descritti i campi applicativi dove questa tipologia di saldatura è maggiormente utilizzata, evidenziando i vantaggi e gli svantaggi che quest'ultima possiede rispetto ad altre. Inoltre, sono stati analizzati minuziosamente i vari parametri di processo che influenzano il risultato finale dell'intera procedura, in particolare la qualità del giunto saldato.

In una macchina saldatrice a resistenza per punti, l'elettrodo rappresenta l'elemento fondamentale dell'intero processo, nel lavoro si è scelto di descrivere in maniera dettagliata la struttura e le cause che ne determinano l'usura. Poiché quest'ultima è considerata tra le cause principali di una saldatura non conforme ai requisiti di qualità richiesti, si è dedicato un capitolo della trattazione a richiamare alcuni dei metodi predittivi dell'usura dell'elettrodo trovati in letteratura, e tutt'ora in fase di miglioramento.

Inoltre, si è tentato di individuare un possibile collegamento tra la curva di spostamento dell'elettrodo, ricavata acquisendo informazioni dai sensori montati sul macchinario utilizzato in laboratorio e l'usura dell'elettrodo stesso. Tramite un'applicazione contenuta nel programma Matlab, *Diagnostic Feature Designer*, si è fatta una prima analisi sulle curve di spostamento dell'elettrodo riferite ad un campione di 80 saldature. Con questa applicazione, tramite indicatori statistici, sono state estratte delle caratteristiche dal segnale di spostamento che hanno mostrato un andamento variabile con il tempo, indice di un possibile collegamento tra l'usura dell'elettrodo e le variazioni delle curve di spostamento. Tale relazione inoltre è stata confermata anche dall'analisi di ulteriori caratteristiche del segnale estratte da script Matlab.

Partendo dalle caratteristiche rilevate nella trattazione, in relazione a possibili applicazioni future sulla predizione dell'usura dell'elettrodo, l'obiettivo è di ottimizzare il processo di saldatura, intervenendo tempestivamente al sopraggiungere di anomalie. Intervento che, se esteso alle numerose macchine saldatrici presenti nelle grandi aziende, porterebbe a numerosi benefici in termini economici.

1 Introduzione ai processi di saldatura

1.1 Introduzione alla saldatura

La saldatura può essere definita come:

un processo mediante il quale materiali dello stesso tipo o classe sono messi insieme, causandone la giunzione attraverso la formazione di un legame chimico sotto l'azione combinata di riscaldamento e pressione.

Il risultato dell'operazione è il giunto saldato, più comunemente chiamato saldatura. In letteratura esistono molteplici definizioni per identificare la saldatura tutte simili tra di loro per quanto riguarda il concetto, ma differenti per la loro stesura, il che può portare ad una non corretta interpretazione. Riportiamo di seguito alcune cause di ambiguità che si possono riscontrare nella definizione di saldatura:

- Il processo di saldatura non è applicato solo ai metalli ma è spesso usato anche per ceramiche, composti intermetallici, materiali termoplastici e anche vetro. Spesso, per i materiali su citati, non sempre questo processo viene chiamato saldatura ma incollaggio termico o più semplicemente fusione, ricordandosi che si vuole intendere sempre un processo di saldatura.
- Per "continuità" nel giunto saldato, intendiamo la continuazione della struttura atomica dei componenti utilizzati, ma ciò non vuol dire necessariamente l'omogeneità della loro composizione chimica. Quindi è necessario avere stessa struttura atomica nei pezzi da saldare, cioè che quest'ultimi appartengano alla stessa classe di materiale.

Nelle operazioni di saldatura, il comportamento che assumono i vari materiali è definito dalla loro "**saldabilità**", che identifica l'attitudine che essi hanno nell'essere saldati. Possiamo distinguere la saldabilità in:

- **Saldabilità operativa**, cioè la possibilità di poter realizzare con una data tecnologia operativa, una giunzione di saldatura fra due pezzi di un dato materiale.
- **Saldabilità locale**, riferita alle modifiche che si hanno nella microstruttura del giunto e nella sua zona adiacente, le quali possono essere causate durante il processo di saldatura.

- **Saldabilità globale**, fa riferimento alla “possibilità” del giunto, realizzato mediante saldatura, di inserirsi correttamente in una struttura reale, e che sia in grado di garantire la resistenza necessaria nelle condizioni di esercizio in cui il componente strutturale opera, resistenza valutata attraverso specifiche prove meccaniche.

1.2 Termini generali

Riportiamo un elenco delle terminologie più ricorrenti quando parliamo della saldatura:

- **Metallo base**; cioè il materiale dei pezzi da collegare
- **Lembi**; chiamati anche bordi, intendendo le superfici affacciate dei pezzi che sono interessate per tutta la loro lunghezza al processo di saldatura, la preparazione di essi è eseguita in modo da dare la forma geometrica più opportuna per facilitare l’esecuzione della saldatura, in base allo spessore da saldare.
- **Passata**; definisce lo spostamento dell’operazione di saldatura lungo il giunto. Il risultato della “passata” è proprio la formazione del cordone di saldatura (cordone e passata spesso vengono usati come sinonimi).
Il cordone di saldatura è l’elemento essenziale del giunto saldato e la sua deposizione determina la tecnica di saldatura vera e propria.
- **Bagno di fusione**; è la parte di metallo che durante la fusione si trova allo stato liquido.
- **Metallo d’apporto**; è il metallo che si deposita fuso fra i lembi da unire, può trovarsi sotto diverse forme, come bacchette, fili o elettrodi. Non è presente in alcuni processi di saldatura.
- **Giunto saldato**; è il risultato del processo di saldatura, caratterizzato dalla continuità del materiale. Quest’ultimo può essere ottenuto sia con una che con più passate.
- **Protezione**; intendiamo la protezione del bagno di fusione dall’azoto e dall’ossigeno, essa è necessaria solo in alcuni casi per impedire fenomeni di ossidazione e nitrurazione dannose alle saldature. Per fare ciò si usano gas e sostanze specifiche che fondendo tra di loro ricoprono il metallo fuso ostacolando il contatto con l’aria.
- **Fonte di calore**: può essere di vario tipo, chimica o elettrica, necessaria alla fusione del metallo d’apporto oppure al riscaldamento dei lembi da unire.

Nella figura 1.2.1 è possibile visualizzare alcuni dei termini su citati per avere una più chiara interpretazione di essi.

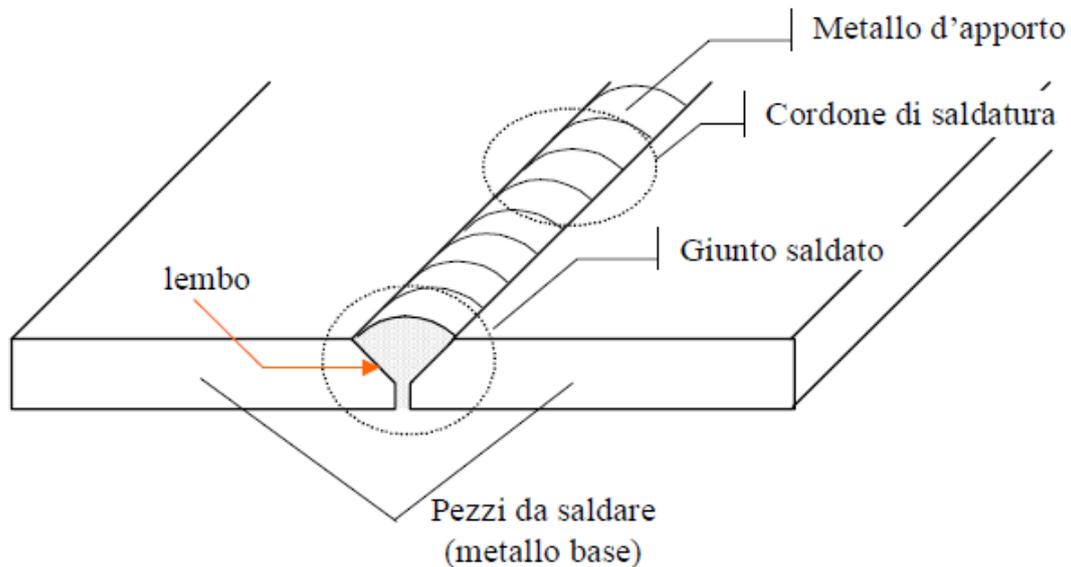


Figura 1.2.1 - Termini generali. [1]

1.3 Classificazione processi di saldatura

Si possono distinguere i processi di saldatura a seconda che il metallo base partecipa o meno alla formazione del giunto saldato, in particolare possiamo definire:

- **Saldature Autogene** quando il metallo base, fondendo, prende parte alla formazione del giunto; a seconda del procedimento e dello spessore, il metallo d'apporto può esserci o meno. Nello specifico, quando esso è presente deve essere simile metallurgicamente al metallo base, perché si dovrebbe ottenere una continuità strutturale ed una resistenza meccanica, nel giunto saldato, uguale a quella dei pezzi base da saldare.

Un'ulteriore distinzione può essere fatta a seconda dello stato fisico che assumono i pezzi nel momento della loro unione, in particolare distinguiamo:

- *Saldature per fusione*, dove i pezzi vengono collegati allo stato liquido. Più in particolare parliamo di saldature a gas o ad arco a seconda di come si produce il calore necessario a portare a fusione il metallo.

- *Saldature a pressione*, dove i pezzi nel momento in cui vengono collegati si trovano in uno stato pastoso e non allo stato fuso. Questo stato viene raggiunto in generale, per **effetto Joule** dovuto al passaggio di una data corrente elettrica.
- **Saldature Eterogene** quando il metallo base non prende parte alla formazione del giunto. Il cordone di saldatura è formato dal solo metallo d'apporto il quale è sempre presente, diverso dal metallo base e con inferiori temperature di fusione.

Anche in questo caso, a seconda di come avviene la formazione del cordone di saldatura, possiamo definire:

- *Saldobrasature*, quando i lembi dei pezzi vengono preparati con cianfrinature e il metallo d'apporto fondendo riempie il cianfrino formando il cordone di saldatura.
- *Brasatura* quando i pezzi da saldare sono appoggiati l'uno sull'altro e lo spazio sottile che rimane tra i due viene riempito dal metallo d'apporto fuso. In questo caso il giunto è costituito da uno strato sottilissimo di metallo d'apporto che ha formato una lega col metallo base.

Nella figura 1.3.1 è riportato uno schema riassuntivo dei vari processi che si hanno a disposizione per eseguire una saldatura:

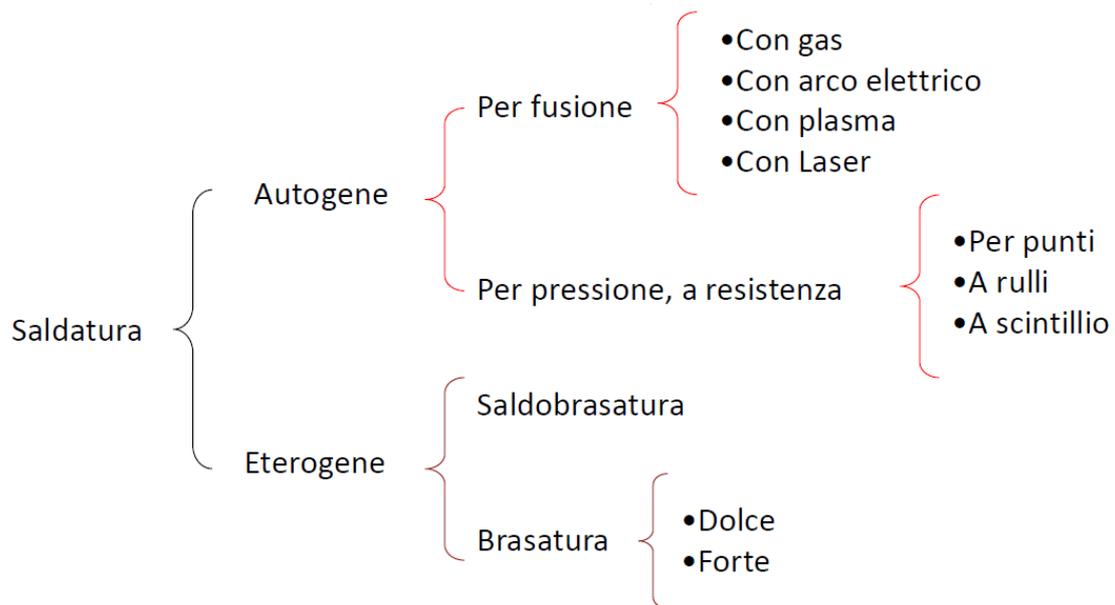


Figura 1.3.1 – Classificazione processi di saldatura.

1.4 Tipi di Giunto

Le richieste geometriche o di resistenza, che il giunto deve essere in grado di sopportare sotto un determinato carico, portano alla determinazione della tipologia di giunzione da utilizzare. Si possono distinguere diverse tipologie di giunti a seconda della posizione reciproca che assumono i pezzi da saldare, come mostrato nella figura 1.4.1

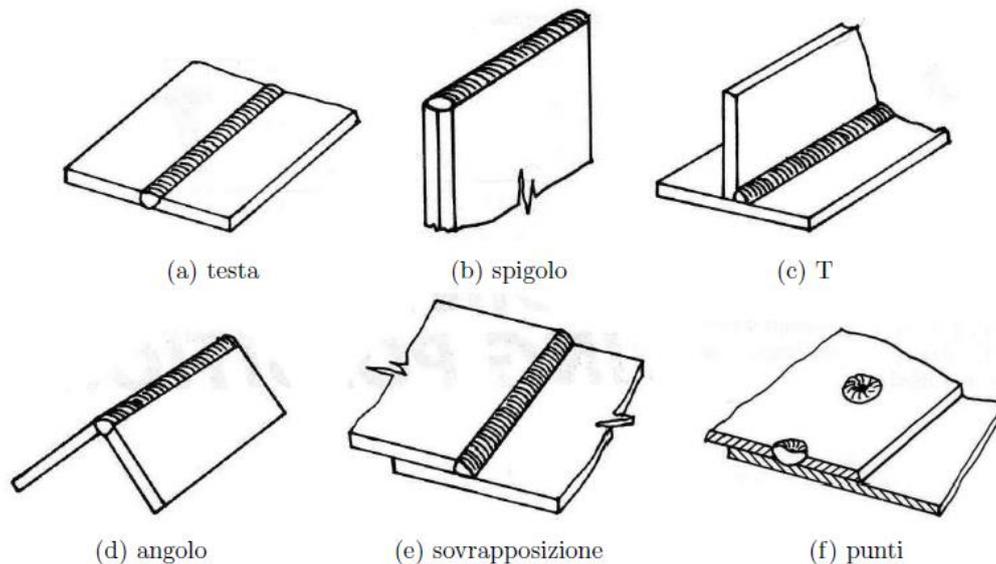


Figura 1.4.1 -Tipi di giunzioni. [2]

Per le tipologie di giunzioni quali quelle a T, ad angolo e ad a sovrapposizione, è possibile affermare che esse presentano la stessa tipologia di giunto saldato, il quale nella sezione trasversale si presenta di forma triangolare. Un particolare tipo di saldatura è quella definita slot (chiamata anche plug se la forma della fessura è tondeggiate invece che allungata), che utilizza la penetrazione sulla superficie superiore per attaccare due pezzi di lavoro tra di loro. Questo tipo di saldatura differisce dalla saldatura a punti ottenuta per resistenza. Spesso nelle saldature si necessita di una preparazione dei lembi, mediante smussi o cianfrinature per avere un processo il più preciso possibile, in modo che la saldatura interessi tutto lo spessore dei pezzi, come mostrato nella figura 1.4.2, dove si possono osservare le preparazioni dei lembi per i giunti di testa al crescere dello spessore dei pezzi da saldare. Un giunto saldato in generale potrebbe occupare qualunque posizione, intendendo per “saldatura in posizione” quando ci riferiamo a qualsiasi posizione diversa dal piano. In figura 1.4.3 sono mostrate le posizioni utilizzate più di frequente. In aggiunta possiamo affermare che la precisione con cui si realizzano tali giunzioni e il numero di quest’ultime determina la semplicità o meno di lavorazione oltre che la variazione dei costi.

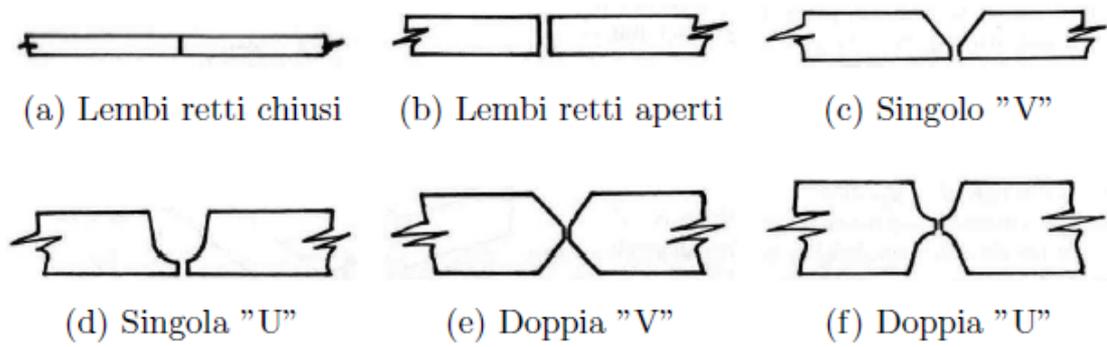


Figura 1.4.2 – Preparazione dei lembi per giunti di testa al crescere dello spessore dei pezzi da saldare. [2]

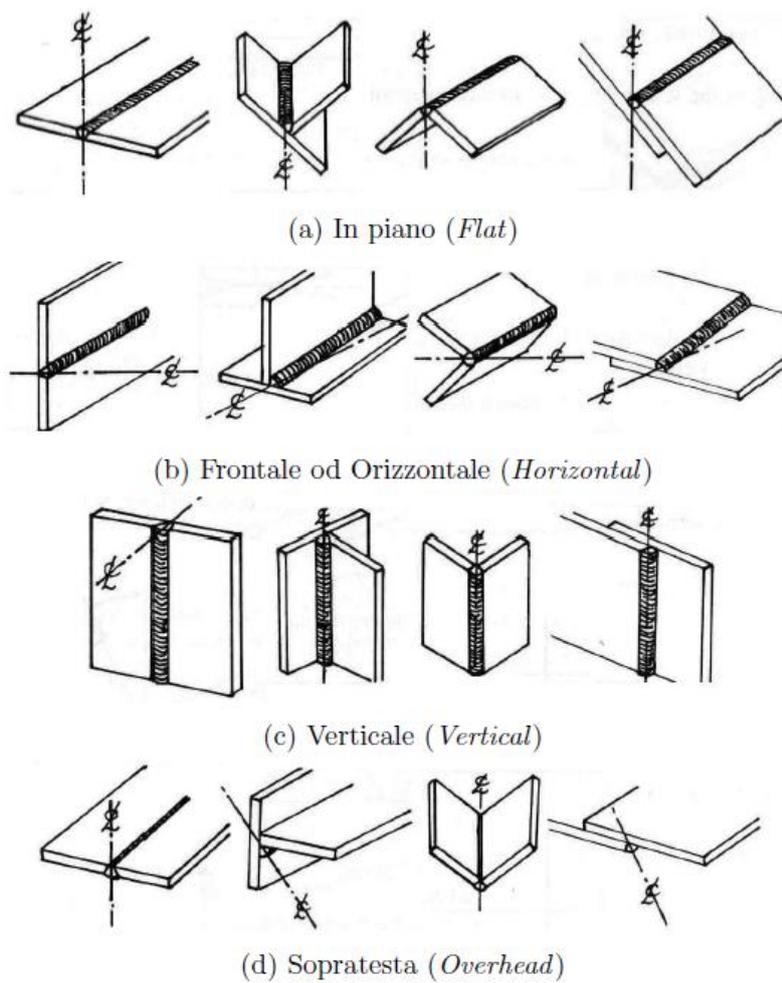


Figura 1.4.3 – Posizione saldature al variare del tipo di giunto. [2]

1.5 Confronto Saldatura con altre metodologie di giunzione

La saldatura non è l'unica metodologia di giunzione, di seguito riportiamo alcuni dei più comuni metodi usati in alternativa alla saldatura;

- **Fissaggio meccanico** attraverso l'uso di opportuni elementi, i quali possono essere, viti, bulloni, dadi, chiodi ed elementi analoghi; ma questa tipologia di fissaggio richiede la realizzazione di fori sull'elemento da unire portando ad un inevitabile indebolimento della struttura stessa. In figura 1.4a, è riportata un esempio di fissaggio meccanico di due tubi ad alta pressione mediante flange bullonate.
- **Incollaggio adesivo**; utilizzato per applicazioni dove si vogliono rispettare, dove possibile, i requisiti di robustezza, isolamento, resistenza alla corrosione e smorzamento alle vibrazioni. Tecnica disponibile con varie tipologie e forme, per esempio sottoforma di liquidi, soluzioni, paste e simili, ed usata anche per materiali diversi tra di loro. Gli svantaggi di queste tecniche sono i lunghi tempi di attesa per permettere il fissaggio ed il rischio che il calore o altri fenomeni esterni possono degradare la giunzione.
- **Stampaggi**; riportato per completezza, non rappresenta un vero metodo di giunzione, ma permette di ottenere componenti meccanici attraverso l'uso di stampi, ciò è ottenuto mediante l'uso di complesse operazioni di fusione. Con questo metodo è necessario un modello della struttura da realizzare. In figura 1.4b, è possibile osservare un esempio di questa applicazione, in particolare è riportato uno sportello automobilistico creato con una tecnica di stampaggio dell'acciaio.



Figura 1.4a – Tubi fissati meccanicamente. [3]



Figura 1.4b – Stampaggio sportello auto [4]

Nella tabella 1.1 sono riportati i principali pro e contro del processo di saldatura, anche se il principale vantaggio di questo metodo rispetto ad altre tipologie di giunzioni è quello di dotare al componente un'elevata robustezza, riuscendo ad ottenere un'elevata integrità della struttura e quindi producendo delle giunzioni molto efficienti. Ovviamente ciò può essere interpretato come uno svantaggio qualora si dovessero separare parti assemblate mediante saldatura.

Per concludere bisogna precisare che la scelta del metodo di giunzione da utilizzare dipende da numerose variabili, tra le quali troviamo, il tipo di materiale da usare, la loro forma e dimensione ed ovviamente dai costi sia di produzione che manutenzione delle attrezzature.

Vantaggi	Svantaggi
L'efficienza del giunto e la sua integrità non sarà persa accidentalmente.	Impossibilità, senza distruggere le parti, a disassemblare una saldatura.
Numerose metodologie di processo.	Le caratteristiche base dei materiali sono degradate dal calore della saldatura.
Applicabile a molti materiali.	I transitori di temperatura portano all'insorgere di tensioni residue e distorsioni.
Possibile automatizzare il processo, sia in maniera automatica che semiautomatica oltre che la normale esecuzione manuale.	È richiesta un'elevata abilità oltre che una buona conoscenza da parte dei tecnici.
Sono possibili fissaggi ermetici, con l'uso di una saldatura continua.	Alcune tecniche possono richiedere equipaggiamenti o materiali molto costosi.
Costi ragionevoli.	

1.6 Cenni storici

Le prime tecniche di unione dei metalli risalgono all'età del Ferro e del Bronzo, ovvero qualche millennio fa, sviluppate sia nel Medio Oriente che in Europa. La saldatura per forgiatura, sviluppata nel Medioevo, consisteva nel martellamento ripetuto da parte dei fabri, che portavano al riscaldamento del metallo fino all'avvenuta giunzione. Negli anni del Rinascimento gli artigiani si specializzarono sempre più nei processi e di conseguenza l'industria vide sempre un maggior sviluppo nel corso dei secoli successivi. L'arco elettrico fu scoperto nell'anno 1802 dallo scienziato russo Vasily Petrov, comprese le sue applicazioni nell'ambito della saldatura, ma fu solo nel 1882 che l'inventore russo Nikolai Benardos, usando degli elettrodi di carbonio, inventò il primo metodo per saldare ad arco elettrico che prese il nome di saldatura ad arco in carbonio. Durante gli ultimi decenni del XIX secolo è stata inventata la saldatura a resistenza, con i brevetti di Elihu Thomson nell'anno 1885, ulteriori passi avanti si videro negli anni futuri. Nel 1836 è stata scoperta l'acetilene dal chimico Edmund Davy, quest'ultima usata per le saldature solo dall'anno 1900 circa, quando con lo sviluppo di un'opportuna fiamma ossidrica è diventato uno dei principali metodi di saldatura, anche grazie ai costi contenuti e la portabilità degli strumenti. Nel corso del 1920, si fecero molti progressi per quanto riguarda la saldatura automatica, che portò alla progressiva eliminazione del filo dell'elettrodo. Si iniziò a trattare con molta attenzione i gas di protezione, per cercare di proteggere le saldature dagli effetti indesiderati dell'ossigeno e azoto presenti nell'atmosfera. La saldatura ad arco sommerso, usata tutt'oggi, vide la luce intorno al 1930. La tecnica di saldatura ad arco, con elettrodo in tungsteno (TIG), è stata ultimata nel 1941, dopo un intenso lavoro di ricerca e sviluppo, mentre nel 1948 la saldatura MIG (Metal-arc Inert Gas) o MAG (Metal-arc Active Gas), permise saldature molto veloci di materiali non ferrosi, ma richiedendo dei gas di protezione molto costosi. Nel 1950 la saldatura ad arco, con elettrodo rivestito, diventò la tecnica di saldatura più usata manualmente. L'anno 1957 ha visto nascere il processo di saldatura a flusso animato (flux-cored), che ha portato ad una maggiore velocità del processo di saldatura ampliando il suo utilizzo con l'uso di apparecchiature automatiche. Nel medesimo anno vide la luce anche la saldatura a plasma, solo nel 1958 e nel 1961 furono introdotte rispettivamente la saldatura ad elettro-scoria e quella ad elettro-gas. Negli stessi anni vi fu la scoperta della saldatura a fascio elettronico e successivamente quella a fascio laser, quest'ultima dimostratasi molto utile nelle saldature robotizzate. In conclusione, trova spazio la saldatura per frizione inventata solo nel 1991 in Inghilterra, usata in tutto il mondo, soprattutto per applicazioni che richiedono un'alta qualità.

2 Descrizione del processo di saldatura a resistenza per punti

2.1 Principi fondamentali - Saldatura a resistenza

La saldatura a resistenza è una tipologia di saldatura autogena per pressione, dove il calore, necessario a portare le superfici da dover saldare alle elevate temperature di fusione, è fornito per mezzo dell'effetto Joule, attraverso la resistenza elettrica delle zone da saldare. In questo tipo di processo sono molte le variabili che influenzano la formazione del giunto saldato, in particolare le proprietà elettriche, termiche e il rivestimento del materiale, proprietà che andremo ad analizzare più nel dettaglio nei paragrafi successivi. Per sviluppare grandi potenze, quindi forti quantità di energia in un tempo molto breve, occorrono sia alte correnti che alte resistenze concentrate principalmente nella zona da saldare. Si riesce così ad ottenere un processo di saldatura il più rapido possibile, che oltre ad accelerare i tempi di lavoro, ma in ugual importanza, riuscire a diminuire il riscaldamento globale dei pezzi con conseguente riduzione di energia elettrica, evitare la creazione d'impronte e la riduzione del calore nei punti di saldatura, ed infine evitare il deterioramento delle punte degli elettrodi, su quest'ultimo punto ci soffermeremo più nel dettaglio nei capitoli seguenti, in quanto il lavoro di tesi che si sta svolgendo in questa trattazione mira proprio ad un'analisi prognostica, ovvero la previsione di guasti, nel nostro caso l'usura dell'elettrodo, andando ad analizzare la variazione di parametri operativi osservati durante il ciclo di funzionamento della macchina saldatrice, in particolare analizzeremo le curve dello spostamento dell'elettrodo. Per quanto riguarda l'attacco alla corrente, i progettisti presumono di collegarsi alla linea elettrica, spesso trifase, e di trasformare l'energia elettrica in bassa tensione, cercando di ottenere così delle correnti elevate, a parità di potenza, e per quanto riguarda la struttura, cercare che quest'ultima garantisca l'accostamento dei pezzi con parametri quali forza e tempi che possono essere controllati e determinati. La tensione della rete elettrica è ridotta a valori di pochi Volt, mediante un trasformatore, e se necessario trasformato in una tensione di tipo continuo con l'uso di un raddrizzatore di potenza (a ponte a diodi). Gli elettrodi andando a contatto con le parti da saldare determinano la chiusura del circuito elettrico.

Attraverso la saldatura elettrica a resistenza è possibile realizzare diversi tipi di giunti, quelli a sovrapposizione, dove la saldatura è limitata a delle porzioni piccole delle superfici sovrapposte o dei giunti chiamati di testa, dove è possibile estendere la saldatura a tutta la superficie di contatto dei pezzi. Di seguito è riportata una distinzione tra i due tipi di saldatura.

- **Saldatura a sovrapposizione.**

L'applicazione del processo di saldatura elettrica a resistenza su giunti sovrapposti è eseguita applicando delle pressioni, fornite dagli elettrodi, sulle superfici in contatto. Gli elettrodi hanno anche la funzione di trasferire la corrente ai pezzi da saldare. Quindi è realizzata per pressione e fusione nella zona di contatto, che se limitata attorno ad un punto prende il nome di punto di saldatura. La saldatura a sovrapposizione è utilizzata soprattutto nella realizzazione di carpenterie in metallo leggero, sia per la componentistica del settore dei trasporti (ferroviario, tranviario e automobilistico), che per componenti elettronici, o più in generale per oggetti metallici o per la realizzazione di semplici recipienti.

Più nello specifico questo tipo di saldatura può essere:

- A **punti**: la saldatura è realizzata dall'insorgere dei punti di saldatura, caratterizzati da forme ed estensioni variabili in funzione delle dimensioni e forma degli elettrodi (figura 2.1.1.a), oltre che dai vari parametri di processo utilizzati come la pressione degli elettrodi, tempi di saldatura, corrente di saldatura ecc.
- A **rulli**: la saldatura è realizzata mediante una linea di punti, creata con elettrodi a forma di disco chiamati rulli, che ruotano lungo la linea di giunzione (figura 2.1.1. b).
- A **rilievi**: l'estensione e la forma della zona interessata alla saldatura è determinata dalle caratteristiche, quali forma e dimensione, di appositi rilievi creati sulle superfici da saldare (figura 2.1.1.c). Questo tipo di saldatura è chiamato anche a proiezione.

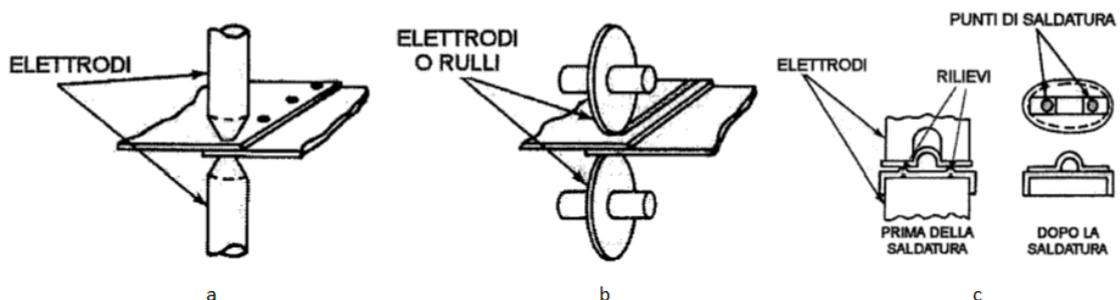


Figura 2.1.1 – Tipologie di saldature a sovrapposizione. [5]

- **Saldatura di testa.**

Rispetto alla saldatura a sovrapposizione l'applicazione di questo tipo di saldatura risulta essere più limitato, viene usata specialmente nei componenti che presentano una piccola sezione frontale da saldare, per esempio i cerchioni per il settore dell'autoveicolo, le bielle prodotte nelle acciaierie e gli anelli per le catene metalliche. L'applicazione di questo tipo di saldatura (elettrica a resistenza sui giunti di testa) può essere eseguita come:

- A **resistenza pura**: in questo caso le superfici che devono essere saldate, sono portate allo stato plastico dal forte calore sviluppato, e tramite un'elevata pressione di contatto, mantenuta per tutto il tempo necessario alla saldatura, le superfici vengono saldate (figura 2.1.2.a).
- A **scintillio**: la saldatura, in questo caso, è ottenuta tramite una violenta applicazione della pressione. Il calore necessario viene prodotto da piccoli archi elettrici che si hanno fra le superfici da saldare (figura 2.1.2.b).

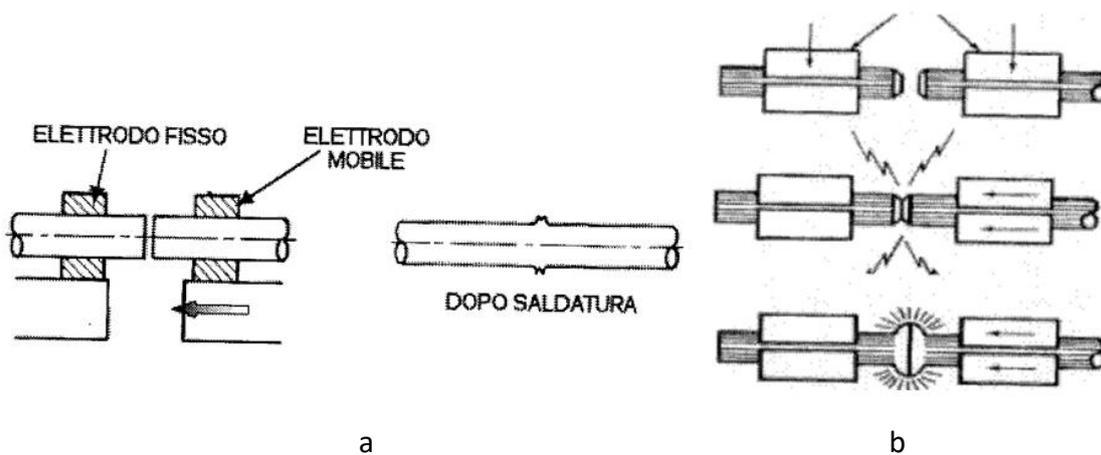


Figura 2.1.2 – Tipologie saldature di testa [5].

2.2 Saldatura a resistenza per punti

Come già detto nel paragrafo precedente, questo tipo di saldatura utilizza il calore prodotto per effetto Joule dal passaggio di una determinata corrente elettrica. I due lembi da saldare vengono schiacciati l'uno contro l'altro ed il passaggio della corrente fa alzare la temperatura fino a quella che porta a fusione il metallo base, in una zona localizzata. Quindi si può affermare che la saldatura avviene per fusione localizzata del metallo base, senza la necessità di metallo d'apporto. Questa tipologia di saldatura è

maggiormente utilizzata alla produzione in serie perché richiede un breve tempo per la lavorazione oltre che un costo elevato delle macchine.

Gli **svantaggi** di questo tipo di saldatura oltre all'elevato costo delle attrezzature sono la scarsa resistenza a trazione del giunto saldato e la discontinuità della saldatura che non assicura la tenuta per i fluidi [1].

La saldatura a resistenza per punti (RSW – Resistance Spot Welding) è diffusa principalmente per la saldatura di lamiere sottili, per esempio carrozzerie, mobili metallici e simili, inoltre è possibile saldare anche acciai inossidabili, leghe leggere e di rame, offrendo la possibilità di saldare lamiere di diverso spessore. Inoltre, si presta molto bene ad un'automazione completa del suo processo. Nella figura 2.2.1 è riportato uno schema semplificato per far comprendere meglio come avviene il procedimento di saldatura; è possibile notare i due elettrodi di rame (o lega di rame) i quali vengono premuti con una pinza sulle lamiere, accostate in precedenza l'una contro l'altra, nell'opportuna posizione in cui si vogliono saldare. Il dispositivo che comanda il serraggio della pinza è del tipo idraulico o pneumatico. Una corrente di elevatissima intensità, variabile dai 1000 ai 100000 Ampere [A], fatta passare dalla macchina elettrica per una frazione di secondi, fa sviluppare una quantità di calore capace di portare il metallo base ad una fusione localizzata. Importante notare che il calore prodotto dipende sia dalla resistenza elettrica del metallo base ma anche dal quadrato dell'intensità di corrente, come mostra la seguente formula:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \text{ (J)}$$

La solidificazione, che avviene mentre gli elettrodi sono ancora premuti, porta alla formazione del punto di saldatura.

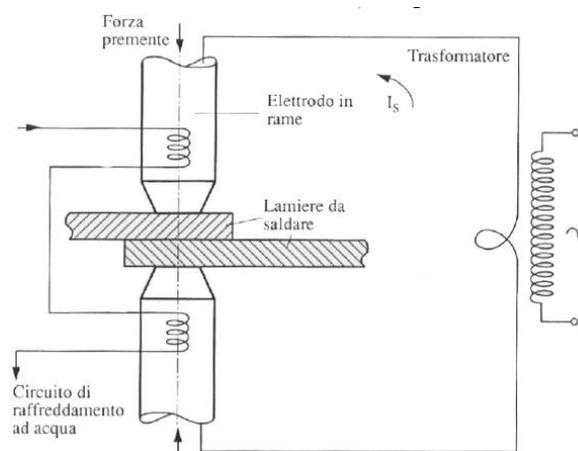


Figura 2.2.1 – Schema semplificato saldatura RSW. [1]

Notare che la fusione del metallo base avviene solo all'interno, più precisamente nella parte di superficie di contatto delle due lamiere sovrapposte, questo principalmente per i seguenti due motivi:

- Nelle zone di contatto delle lamiere la resistenza risulta essere maggiore e di conseguenza per effetto Joule si ottiene una quantità di calore maggiore.
- Il raffreddamento degli elettrodi di rame, e quindi l'esportazione del calore limita l'aumento della temperatura. Andamento mostrato qualitativamente nella figura 2.2.2

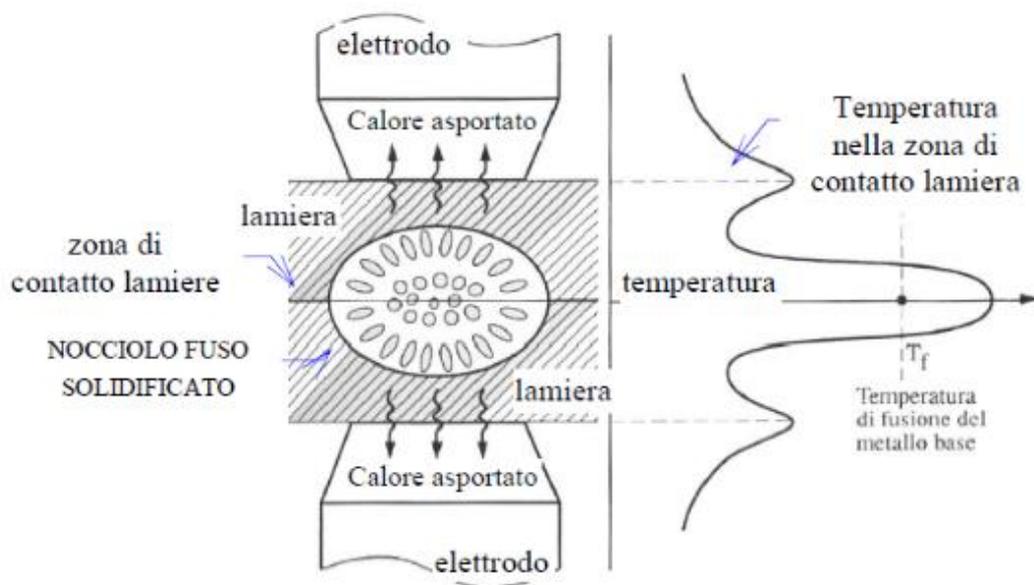


Figura 2.2.2 – Andamento temperatura nella zona di contatto. [1]

Quindi solo nel **Nocciolo**, ovvero la zona centrale, la temperatura supera quella di fusione del metallo base.

Adeguando in modo opportuno gli elettrodi vi è la possibilità di eseguire punti di saldatura anche in zone non facilmente raggiungibili come mostrato in figura 2.2.3

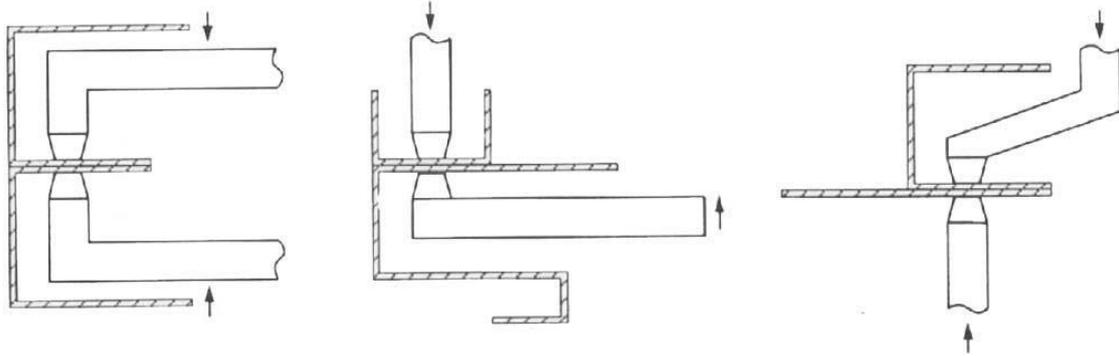


Figura 2.3.3 – Forme varie elettrodi. [1]

2.3 Caratteristiche elettriche

Si considera il caso di una saldatura a resistenza per punti, schematizzata come in (figura 2.3.1), dove due lamiere sono sovrapposte tra elettrodi di rame, quest'ultimi collegati al circuito secondario di un trasformatore.

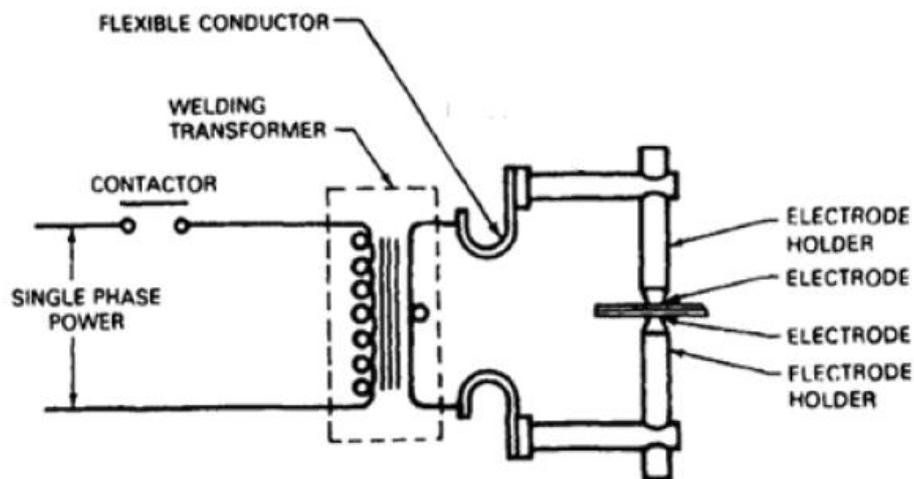


Figura 2.3.1 – Schema semplificato circuito elettrico per RSW. [6]

Quando viene chiuso il circuito primario, la corrente circolante nel circuito secondario è capace di sviluppare del calore, che cresce all'aumentare della resistenza incontrata nelle zone di contatto, secondo la già citata legge:

$$Q = k \cdot R \cdot I^2 \cdot t$$

Dove:

- **Q**: rappresenta la quantità di calore che si riesce a sviluppare, misurata in Joule [J];
- **R**: identifica la resistenza elettrica del circuito secondario, misurata in ohm [Ω]; questa è funzione dei vari collegamenti, degli elettrodi oltre che del materiale e dalla pressione che tiene premuti i pezzi da saldare.
- **I**: è l'intensità della corrente elettrica, misurata in Ampere [A];
- **t**: è il tempo, espresso in secondi [s], necessario alla saldatura;
- **k**: è un opportuno coefficiente correttivo, introdotto per tenere conto delle perdite di calore che si possono avere per conduzione, convezione e irraggiamento.

Il calore generato con questo tipo di saldatura è un fenomeno molto importante da tenere in considerazione, in quanto la velocità di riscaldamento ottenuta risulta essere non uniforme in tutti i punti, ed è quest'ultima che va a determinare la microstruttura del materiale saldato.

Nella zona di contatto è possibile calcolare la resistenza totale come la somma delle singole resistenze poste in serie, come mostrato in figura 2.3.2, dove è possibile notare anche la distribuzione di quest'ultime nella zona di contatto.

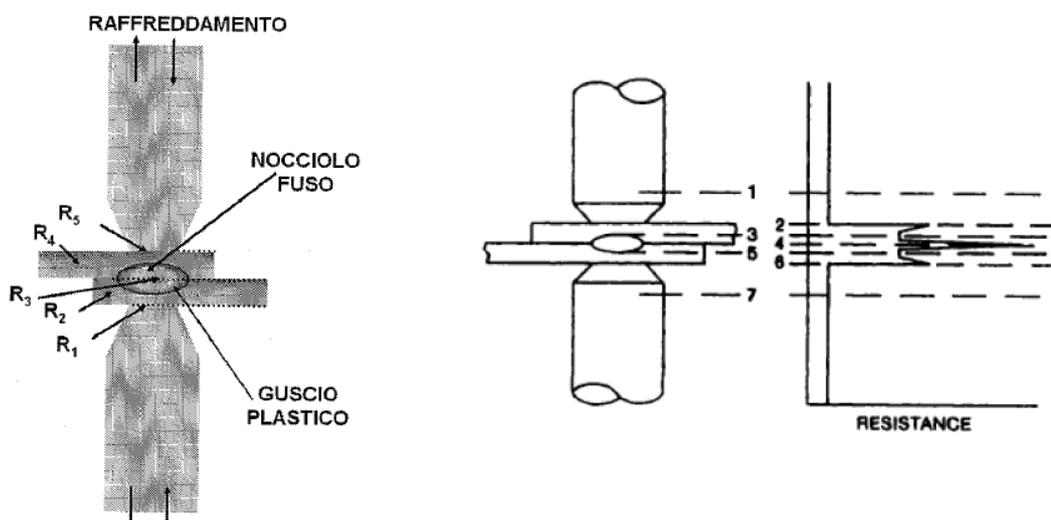


Figura 2.3.2 – Resistenze nella zona di contatto. [6]

Queste resistenze possono essere suddivise come segue:

- **R0**; identifica la resistenza del circuito secondario che si trova tra le punte dei due elettrodi in rame (ottimo conduttore elettrico), e considera anche il loro raffreddamento tramite un'apposita circolazione interna di acqua.
- **R1**; è la resistenza di contatto che si ha tra la lamiera inferiore, e l'elettrodo inferiore, ovvero la resistenza che si ha tra due metalli con conducibilità diverse. L'elettrodo di rame, in questo caso, molto più conduttore della lamiera e con finitura superficiale differente rispetto alla lamiera, in particolare quella dell'elettrodo molto precisa rispetto a quella della lamiera che è variabile a seconda dello specifico caso;
- **R2**; è la resistenza della lamiera posta inferiormente, questa aumenta al crescere della temperatura è risulta minore della resistenza di contatto;
- **R3**; rappresenta la resistenza di contatto che si ha tra le due lamiere, questa è la massima riscontrata nel circuito secondario, dovuta alla ristretta sezione reale attraversata dalla corrente;
- **R4**; è la resistenza della lamiera superiore. Le considerazioni fatte per la resistenza R2 valgono anche per quest'ultima.
- **R5**; è la resistenza di contatto che si ha tra lamiera ed elettrodo superiore. Le considerazioni fatte per la resistenza R1 valgono anche per quest'ultima.

Da notare che le resistenze di contatto tra lamiere ed elettrodi non sono costanti, in quanto dipendono dalla pressione e temperatura, diversamente per le resistenze delle lamiere che dipendono solo dalla temperatura.

2.3.1 Resistenze lamiere

La resistività elettrica, chiamata anche resistenza elettrica specifica, è definita da Wikipedia come:

la capacità di un dato materiale ad opporre resistenza al passaggio delle cariche elettriche.

La resistività è misurata, nel sistema internazionale, in ohm per metro ($\Omega \cdot m$), e non va confusa con la resistenza, in particolare essa rappresenta una proprietà specifica del materiale ed è funzione della struttura microscopica del mezzo a differenza della resistenza, la quale risulta essere una proprietà macroscopica dell'intero conduttore in esame.

Nel caso delle lamiere usate nella saldatura a resistenza, la resistività in funzione della temperatura varia come mostrato nella (figura 2.3.3). Si può notare che la resistività, in generale, aumenta all'aumentare della temperatura ma in modi differenti in base al materiale usato, nello specifico si può osservare che nel caso dell'acciaio la resistività risulta essere maggiormente sensibile alla temperatura e rispetto al rame il suo valore è molto più grande. Questo comporta una generazione di calore maggiore nella zona di contatto delle lamiere. Con un confronto con l'acciaio si può notare che la resistività dell'alluminio è alquanto bassa, vicina a quella del rame prima della sua fusione. Quindi risulta difficile saldare l'alluminio puro usando elettrodi in rame. Generalmente si saldano leghe di alluminio perché hanno una resistività maggiore rispetto a quelle dell'alluminio puro.

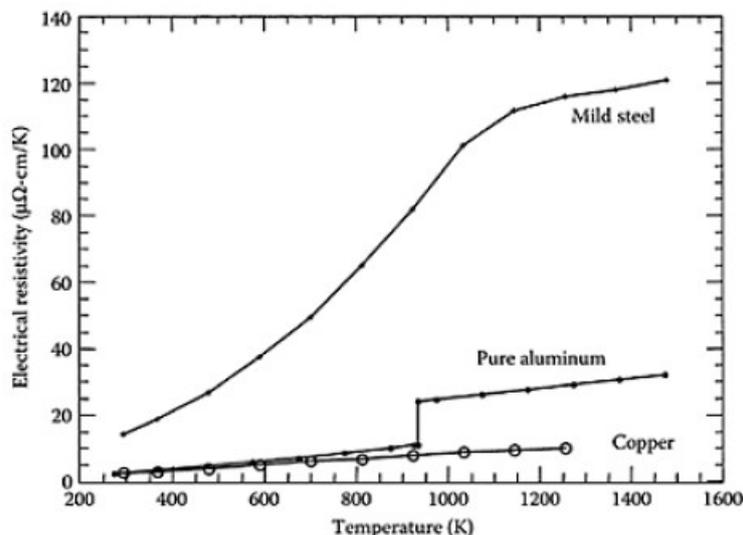


Figura 2.3.3 – Esempi resistività delle lamiere in funzione della temperatura. [7]

2.3.2 Resistenze di contatto

La resistenza di contatto, a differenza di quella delle lamiere che non dipende dalla pressione, ha un'elevata sensibilità alla distribuzione di pressione oltre che alle condizioni della superficie di contatto, perché caratterizzata da rugosità e asperità superficiali. La scelta della giusta pressione di esercizio, durante il processo di saldatura, va fatta considerando che con una giusta pressione si riescono ad eliminare le irregolarità superficiali, oltre che diminuire la resistenza di contatto, viceversa una pressione eccessivamente bassa può risultare insufficiente per creare il giusto contatto.

elettrico necessario, oltre che produrre altri effetti indesiderati, quali dei riscaldamenti localizzati oppure l'evaporazione del materiale.

La resistenza di contatto è influenzata anche dalle sostanze utilizzate per la protezione alla corrosione del materiale o per contrastare fenomeni simili, come la presenza di oli, ossidi, vernici e sostanza affini. Per citare un esempio, le lamiere in acciaio zincato, per compensare la riduzione della resistenza di contatto, dovuta proprio alla presenza dello strato di zincato, richiedono una corrente molto elevata. Oppure nelle lamiere di alluminio dove lo strato di ossido di alluminio, oltre che ad influenzare la resistenza di contatto tra le lamiere, influenza anche quella tra gli elettrodi e le lamiere. Questo strato può addirittura rompersi sotto la forza esercitata dagli elettrodi, ed essendo un materiale molto isolante con un elevato punto di fusione, la sua rottura può essere causata anche da una non regolare distribuzione della corrente elettrica con zone ad elevata densità di corrente su zone con valori di resistenze localizzate basse, tutto ciò può produrre riscaldamenti o al limite fusioni localizzate. Si stima che un valore di resistenza di contatto tra lamiere che porti a saldature stabili ed uniformi sia compreso all'incirca tra i $20 \div 50 \mu\Omega$. Misure effettuate tramite una saldatrice a punti ed un ohmmetro digitale.

In figura 2.3.4 sono mostrati degli andamenti della resistenza di contatto al variare delle condizioni superficiali con diverse metodologie di pulizia dell'elettrodo quali:

- La **sgrassatura**, che consiste nell'immersione delle lamiere in un bagno d'acqua per qualche minuto, successivamente queste vengono asciugate con del cotone per poi essere sciacquate nuovamente con dell'acqua, ed infine essere lasciate ad asciugare con dell'aria.
- Il **trattamento chimico**, in questo caso le lamiere, una volta sgrassate, sono immerse in una soluzione acquosa al 5% di NaOH ad una temperatura di 60°C per qualche minuto. Successivamente vengono sciacquate per tre volte con dell'acqua, per poi essere immerse per circa due minuti a temperatura ambiente, in una soluzione al 30% di HNO₃. Fatto ciò, vengono risciacquate e messe ad essiccare.
- La **pulizia ad arco elettrico** dove le lamiere sono pulite mediante un arco elettrico. La corrente deve essere mantenuta ad un certo valore per un breve intervallo di tempo, per evitare la fusione delle superfici di alluminio.

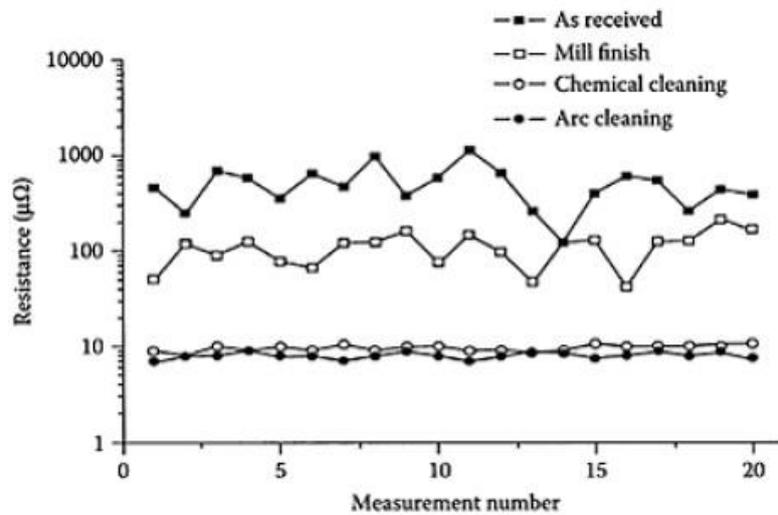


Figura 2.3.4 – Misurazioni resistenza di contatto con diverse condizioni superficiali. [7]

Sempre dalla figura 2.3.4, è possibile notare una rilevante differenza nei valori delle resistenze di contatto delle superfici. Più nello specifico si evince che la pulizia mediante arco elettrico determina il valore di resistenza di contatto minore, grazie all'eliminazione degli strati di ossidi e grassi superficiali, dovuta al forte calore sprigionato dall'arco, mentre la resistenza ottenuta mediante trattamento chimico risulta essere più uniforme con valore di poco superiore rispetto a quella ottenuta mediante pulizia ad arco. Per quanto riguarda le superfici sgrassate, queste hanno un'elevata resistenza di contatto, ovviamente più bassa di quelle non trattate.

Per concludere è possibile affermare che la resistenza di contatto va considerata come conseguenza delle irregolarità superficiali che vanno in contatto solo in alcuni punti, e danno origine ad una sezione ridotta di passaggio della corrente elettrica, come mostrato in figura 2.3.5.



Figura 2.3.5 – Superficie effettiva che definisce la resistenza di contatto. [5]

Di conseguenza, andando a considerare il calore che viene prodotto durante il passaggio della corrente elettrica in ogni punto di saldatura, i punti più caldi si hanno proprio nella zona di contatto tra le lamiere, dove la resistenza risulta essere maggiore, e nelle zone di contatto tra gli elettrodi e le lamiere, infatti proprio per questo motivo gli elettrodi devono essere dotati di un appropriato sistema di raffreddamento.

2.3.3 Resistenze totali.

La resistenza totale, rappresentata dalla somma delle singole resistenze (di contatto e delle lamiere), determina il calore complessivamente sviluppato nella zona di contatto. Quindi consegue che una variazione della resistenza totale viene riflessa anche nei valori delle singole resistenze. Nella figura 2.3.6 è mostrato un esempio che confronta le variazioni di resistenza totale per un acciaio ed una lega di alluminio durante il processo di saldatura.

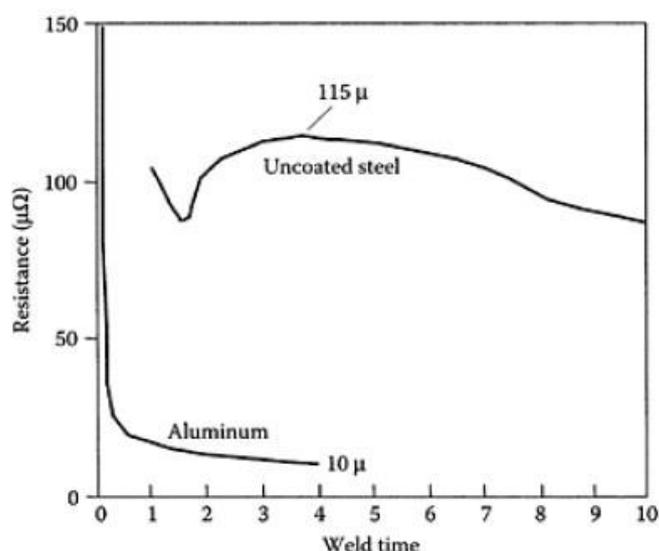


Figura 2.3.6 – Esempi resistenza totale nel processo di saldatura (lega di alluminio e acciaio). [7]

Osservando la figura è possibile notare che l'alluminio presenta un'elevatissima resistenza di contatto negli stadi iniziali, determinata dalla presenza sulla superficie dell'ossido; resistenza che tende subito a diminuire per via dell'eliminazione dello strato di ossido, causata dal calore che viene prodotto durante il passaggio della corrente elettrica. La diminuzione di resistenza come si può notare avanza più lentamente perché inizia a prevalere la resistenza propria delle lamiere. In generale, la resistività dell'alluminio cresce all'aumentare della temperatura, quindi la resistenza totale

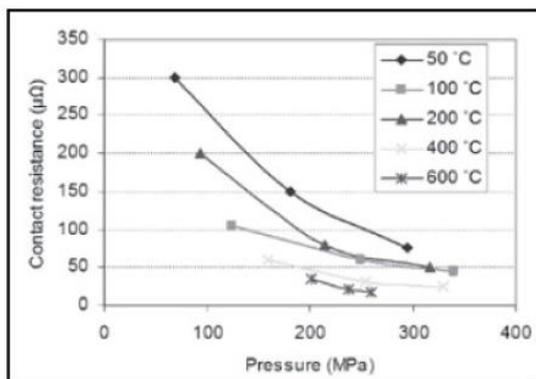
dovrebbe aumentare ma in realtà accade che quest'ultima diminuisce, a causa dell'aumento dell'area di contatto, che si ha durante la fusione, a fronte di una diminuzione dello spessore delle lamiere, quindi questo abbassamento di resistenza totale è dovuto al fatto che la diminuzione della resistenza dovuta all'aumento dell'area è maggiore dell'incremento della resistività dovuta al riscaldamento.

La resistenza totale osservata nel caso dell'acciaio presenta un andamento differente, rispetto al caso dell'alluminio, nonostante il fatto che, anche in questo caso è possibile notare una diminuzione della resistenza nei periodi iniziali, ma quest'ultima avviene in maniera nettamente più lenta rispetto al caso precedente. La causa di questa diminuzione è stata attribuita alla variazione della resistenza di contatto dovuta all'eliminazione di strati di impurità superficiali come per esempio il grasso. Il successivo incremento è dovuto, grazie all'innalzamento della temperatura, all'aumento della resistività dell'acciaio, e una diminuzione di resistenza è riscontrata a fusione completata. Per concludere si può osservare, sempre dalla figura 2.3.6, che la resistenza dell'acciaio risulta essere più elevata rispetto a quella dell'alluminio, a causa delle maggiori conducibilità sia termiche che elettriche che l'alluminio presenta. Conseguenze che per l'alluminio si devono usare alte correnti elettriche e tempi brevi di saldatura.

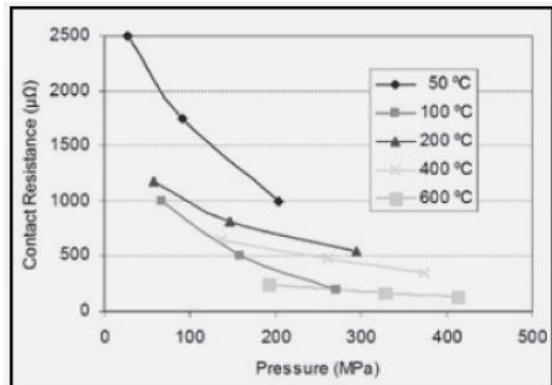
Altro aspetto fondamentale che influenza significativamente il processo di saldatura è legato alle caratteristiche elettriche e termiche degli elettrodi, queste caratteristiche influiscono sulla durata della vita degli elettrodi stessi. Per citare un esempio, nel caso della conducibilità elettrica e termica, che risulta influenzata dalla presenza d'impurità; conducibilità elettrica che all'aumentare di queste impurità diminuisce. Quindi, tutti questi aspetti vanno considerati nel momento in cui si vanno a scegliere i materiali per gli elettrodi al fine di ottenere una qualità della saldatura migliore e per allungare la vita degli elettrodi stessi, con conseguente riduzione anche dei costi.

2.3.4 Esempi resistenze di contatto

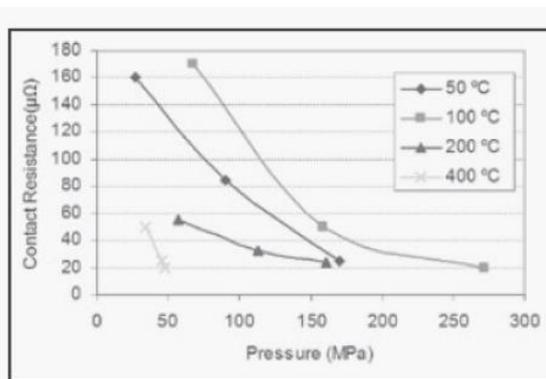
La resistenza di contatto rappresenta un'aliquota importante della resistenza totale ed essendo molto sensibile alla variazione della temperatura e della pressione può variare di molto durante la saldatura. Nelle figure 2.3.7, a titolo d'esempio, sono mostrati gli andamenti della resistenza di contatto in funzione della temperatura e pressione, per diversi tipi di lamiere: acciaio inossidabile, acciaio dolce e alluminio.



a) lamiere di acciaio dolce



b) lamiere di acciaio inossidabile



c) lamiere di alluminio

Figura 2.3.7 - Resistenze di contatto per lamiere di diverso materiale [8].

Dai grafici mostrati è possibile notare la forte influenza che la pressione esercita sulla resistenza di contatto. Nel caso dell'acciaio dolce, ad una temperatura di 50°C, con l'aumento della pressione dà un valore di 70 MPa a 295 MPa la resistenza si riduce da 300 mΩ a 75 mΩ. La velocità con cui diminuisce la resistenza risulta essere maggiore per pressioni basse mentre minore per pressioni elevate. Altro aspetto da considerare, che alle elevate temperature vi è la rottura del film superficiale, infatti la resistenza di contatto ha il valore più elevato intorno a 50 °C, diminuisce ad una temperatura di 100 °C, per aumentare nuovamente a 200 °C e diminuire superata quest'ultima temperatura. Si può ancora osservare che la variazione della resistenza con la temperatura risulta essere minore rispetto a quella con la pressione, in quanto l'aumento di quest'ultima causa una rottura del film superficiale oltre che una deformazione dell'area di contatto. Nel caso dell'acciaio inossidabile, rispetto al caso dell'acciaio dolce, si può notare che il valore della resistenza di contatto risulta più elevata a causa dell'elevata resistività che presenta rispetto all'acciaio dolce. Nel caso dell'alluminio si ha una resistenza di contatto inferiore rispetto a quella degli acciai, a causa della sua minore resistività elettrica. In generale in tutti i tre i casi esaminati, la resistenza di contatto totale

diminuisce con l'aumentare della pressione, perché quest'ultima fa aumentare l'area di contatto e agevola la rottura dello strato di film superficiale che provoca una diminuzione della resistenza di contatto. La rapidità con cui si ha questa diminuzione è attenuata alle alte pressioni perché risultano eliminate totalmente i film superficiali. Anche la temperatura va ad alterare la resistenza di contatto, per esempio l'aumento dell'area di contatto al crescere della temperatura, determina una bassa resistenza di contatto, temperatura che influenza in generale proprietà meccaniche ed elettriche. Gli stessi film superficiali sono sensibili alle variazioni di temperatura, basti pensare all'olio e al vapore d'acqua che evaporando alle elevate temperature sono causa di una riduzione della resistenza di contatto, ma nello stesso tempo le alte temperature possono far nascere strati di ossidazione che fanno aumentare la resistenza di contatto.

2.4 Caratteristiche termiche

Per migliorare la qualità della saldatura occorre avere una durata prolungata della vita degli elettrodi, che usurandosi portano inevitabilmente a saldature non ottimali. Per far ciò bisogna mantenere una temperatura bassa negli elettrodi stessi, per fare in modo che in ogni istante, attraverso quest'ultimi, avviene per conduzione la dissipazione di calore. Nella figura 2.4.1, vengono mostrati gli andamenti della conducibilità termica di alcuni materiali al variare della temperatura, in particolare dell'alluminio del rame e dell'acciaio dolce.

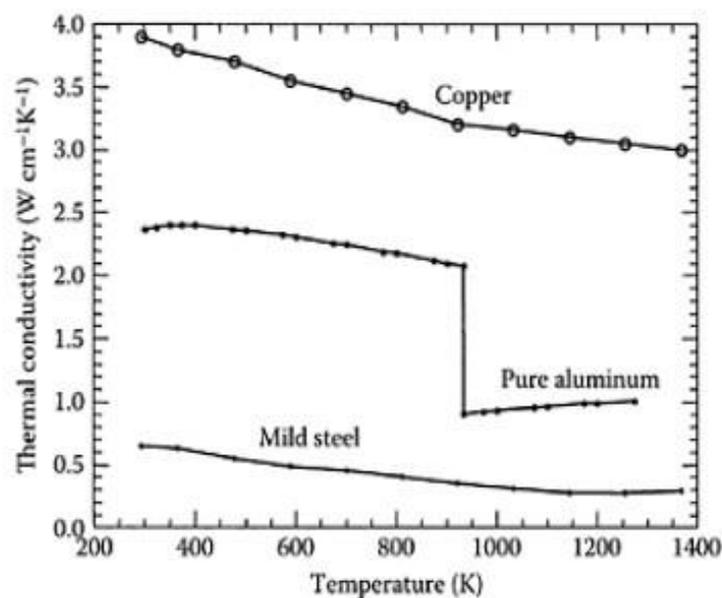


Figura 2.4.1 – Esempi di conducibilità termica per alcuni materiali [7].

Si può notare che il rame presenta una conducibilità termica più elevata rispetto a quella dell'alluminio e dell'acciaio dolce, di conseguenza, se gli elettrodi sono opportunamente raffreddati, è possibile dissipare il calore trasferito per conduzione agli elettrodi stessi. L'alluminio, confrontato con l'acciaio, presenta una conducibilità termica più elevata, questo fa sì che il calore trasferito nelle lamiere, per conduzione, è dissipato più velocemente. Conseguenza che è necessario generare un maggior calore, tramite un'elevata corrente, fatta circolare in un breve periodo di tempo, per evitare delle perdite di calore eccessive. Inoltre, il calore sugli elettrodi favorisce la formazione del bronzo, perché l'alluminio ha una grande tendenza a formare leghe con il rame, quest'ultime ad elevata conducibilità termica ed elettrica. Nella figura 2.4.2 è possibile osservare i coefficienti di espansione termica riferiti al rame, all'alluminio puro e l'acciaio dolce, ricordando che l'espansione termica è diversa per ogni materiale soggetto al riscaldamento.

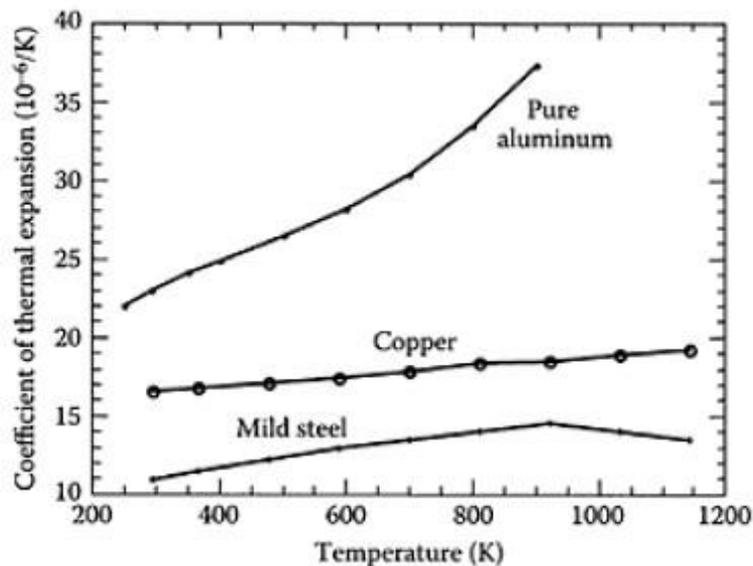


Figura 2.4.2 – Coefficienti di espansione termica per alcuni materiali in funzione della temperatura [7].

Nel corso del processo di saldatura, le lamiere sono premute tra di loro dalla forza degli elettrodi per assicurare il contatto sia elettrico che termico e per non avere l'espulsione del metallo fuso. Calcoli effettuati hanno dimostrato che la pressione nel nocciolo di saldatura dell'alluminio nello stato liquido risulta essere doppia rispetto a quella dell'acciaio. Dato che l'alluminio, rispetto all'acciaio o al rame, presenta un maggior valore del coefficiente di espansione termica, risulta necessaria una forza agli elettrodi decisamente superiore durante la sua saldatura; ne consegue l'utilizzo di trasformatori di elevata potenza, supporti per gli elettrodi più rigidi e resistenti oltre che cilindri pneumatici di dimensioni maggiori.

2.5 Vantaggi e svantaggi

Di seguito è riportata una rassegna dei principali vantaggi che la tecnica di saldatura a resistenza presenta, in particolare:

- Questo metodo di saldatura consente di congiungere in modo preciso, affidabile e veloce materiali di tipo e forma differente.
- La possibilità di saldare con precisione e accuratezza pezzi per applicazioni differenti, quali lamiere, strisce, sezioni, stampaggi, oltre che trefoli e vaci utilizzando elettrodi a punti.
- È possibile evitare le deformazioni impreviste sulla superficie esterna del pezzo in lavorazione, progettando l'elettrodo per offrire la massima superficie di contatto possibile.
- La possibilità di usare più teste di saldatura è una soluzione che meglio si adatta ad applicazioni dove si hanno più contatti di saldatura oltre che aumentare l'accuratezza della giunzione.
- La saldatura a resistenza per punti (RSW) è un metodo, ormai collaudato, per una giunzione durevole dei pezzi, oltre che ad essere disponibile in una ampia gamma di teste di saldatura.

La criticità di questa tipologia di saldatura è soprattutto nei metodi di monitoraggio convenzionali per valutare l'accuratezza del giunto saldato a resistenza, i quali risultano più complessi rispetto agli altri tipi di saldature perché il "nocciolo di saldatura" si trova all'interno del materiale. Per di più, la saldatura a resistenza a punti risulta facilmente interferita da fattori esterni, i quali possono compromettere la qualità della saldatura. Inoltre, riportiamo i già citati svantaggi della saldatura per punti quali: l'elevato costo iniziale delle macchine e la scarsa resistenza a trazione e a fatica del giunto saldato, oltre la non capacità di garantire la tenuta ai fluidi con questo metodo, in quanto non è garantita la continuità della saldatura nei pezzi saldati.

Particolare attenzione va posta sullo stato dell'elettrodo, il quale risulta essere un fattore essenziale per la determinazione della qualità, oltre che stabilità, della saldatura stessa ottenuta con il metodo a resistenza. Lo stato dell'elettrodo è influenzato da molti fattori quali: il materiale del pezzo da saldare, oltre che dell'elettrodo stesso, la sua forma e le condizioni d'esercizio in cui opera. Tutto ciò porta ad un imprevedibile cambiamento dello stato dell'elettrodo che nel prossimo capitolo approfondiremo più nel dettaglio.

2.6 Struttura elettrodo

L' elettrodo definito da Wikipedia come un conduttore di prima specie usato per stabilire un contatto elettrico con una parte non metallica di circuito, dove per conduttori di prima specie si intende quei conduttori elettrici che seguono la seconda legge di Volta. Quest'ultima afferma che "in una catena di conduttori metallici diversi tra loro e posti alla stessa temperatura, la differenza di potenziale tra i due metalli estremi è la stessa che si avrebbe se essi fossero a contatto diretto"¹. In questi conduttori il passaggio della corrente elettrica è dovuto al libero movimento degli elettroni, a differenza dei conduttori di seconda specie dove il trasporto di carica è delegato al moto degli ioni. Nel caso specifico della saldatura a resistenza, più in generale, con il termine "elettrodo" identificheremo quel componente che viene a contatto diretto con i lembi di saldatura e nel quale scorre la corrente elettrica e mediante il quale si riesce ad applicare il carico necessario alla realizzazione del giunto di saldatura.

Gli elettrodi usati nelle saldatrici sono solitamente in rame elettrolitico al fine di ottenere una buona conducibilità, vedi figura 2.6.1, ma si possono trovare anche in bronzo o ottone. Al fine di incrementare la loro durezza spesso vengono utilizzate delle leghe di rame, con elementi droganti quali cromo, zinco, cobalto, berillio. Inoltre per diminuire l'impedenza del secondario, ricordando che quest'ultima è una grandezza fisica che rappresenta la forza di opposizione di un circuito al passaggio di una corrente elettrica alternata, o, più in generale, di una corrente variabile;² gli elettrodi vengono progettati in maniera da essere realizzati quanto più corti possibile. Tra le varie funzioni che gli elettrodi devono svolgere durante il processo di saldatura possiamo riportare:

- **Funzione elettrica;** dovendo garantire il passaggio della corrente alla zona effettiva di saldatura.
- **Funzione termica;** è proprio tramite gli elettrodi che si ha la maggiore dissipazione del calore che viene sviluppato durante il processo di saldatura, infatti come già detto nei capitoli precedenti gli elettrodi sono muniti di un opportuno sistema di raffreddamento, il quale riesce a mitigare le temperature eccessive che si avrebbero sull'elettrodo, che porterebbero ad una contaminazione del materiale di cui è formato o alla deformazione della punta; oltre che a limitare eccessive variazioni dell'intensità della corrente elettrica che provocherebbe un'enorme usura dell'elettrodo.
- **Funzione meccanica;** gli elettrodi devono trasmettere la pressione necessaria alla saldatura, oltre che ad assicurare la tenuta delle lamiere.

¹ Da Wikipedia, l'enciclopedia libera. Effetto Volta.

² Da Wikipedia, l'enciclopedia libera. Impedenza.

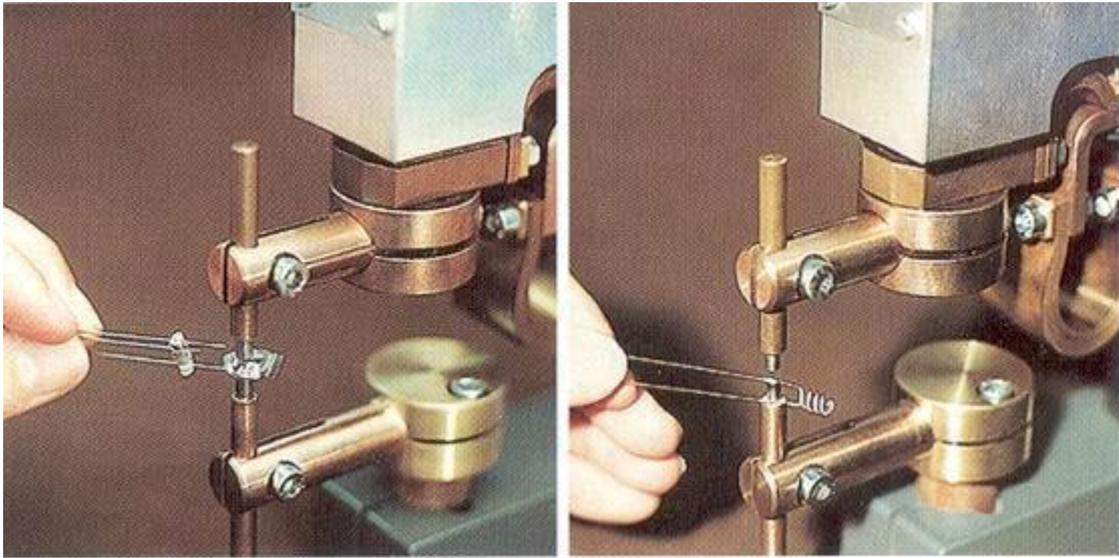


Figura 2.6.1- Esempio di elettrodo. [9]

Per quanto riguarda la forma e geometria degli elettrodi, questa può essere differente in base allo specifico campo di applicazione della saldatura stessa. L'elettrodo in questione presenta delle cavità, realizzate per far passare il liquido refrigerante, la portata di quest'ultimo è scelta in funzione della densità di corrente e come ordine di grandezza si stimano valori intorno a qualche litro al minuto. L'elettrodo è collegato alla macchina tramite un porta-elettrodo. L'innesto, mostrato in figura 2.6.2, può essere di due tipologie, a maschio chiamato anche TIP o a femmina chiamato anche CAP. Il tipo a maschio risulta essere maggiormente utilizzato rispetto a quello a femmina, quest'ultimo utilizzato quando si hanno dei valori di tensione più elevati.

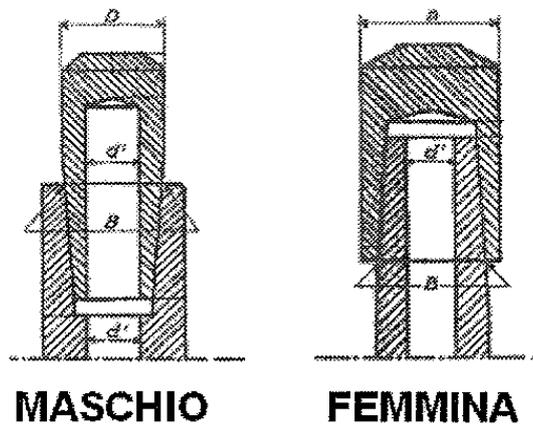


Figura 2.6.2 – Tipologie di innesti per elettrodi [5]

Anche le sezioni degli elettrodi possono avere forma diversa, normalmente troviamo quelle di tipo a sfera o tronco-coniche. In quest'ultime sono stati riscontrati minori problemi legati all'usura, oltre che una sensibilità maggiore a problemi di accostamento, se presenti, tutto ciò ha come conseguenza una minore ripetibilità dei risultati. Per gli elettrodi che presentano una sezione sferica è necessario ricorrere ad operazioni di ripristino della punta, queste operazioni chiamate di rinvivatura vengono eseguite molto di frequente in questo tipo di elettrodo. Rinvivatura che viene eseguita con macchinari specializzati che lavorano tramite asportazione di truciolo; e nel caso di un elettrodo con sezione tronco-conica vi possono essere dei sensori atti a controllare la planarità delle superfici. Queste tecniche di rinvivatura possono essere svolte su entrambi gli elettrodi in contemporanea, sia con una modalità automatica che manuale. Tutto ciò per cercare di limitare l'usura dell'elettrodo, infatti la punta di quest'ultimo deve avere caratteristiche quali; un'alta conducibilità elettrica, elevata durezza e temperatura di ricottura, questo per evitare la creazione di zone ad alta resistenza localizzata.

In definitiva, si evince che le forme usate per gli elettrodi rintracciabili in commercio sono molto vaste, a causa delle numerose e diversificate caratteristiche operative che si possono trovare, sia in termini di materiali usati che di spessori delle lamiere, tipologie di giunti, automazione del processo ecc. In casi eccezionali, di clienti che lavorano su numerosi volumi produttivi, le case produttrici di elettrodi progettano e realizzano quest'ultimi secondo specifiche direttive fatte ad "hoc". Tuttavia, ci sono varie normative che regolamentano le dimensioni e forme di questi utensili, per andare incontro a tutti quei settori produttivi in cui non sono richieste specifiche particolari ma le applicazioni sono standardizzate. Più in generale possiamo affermare che le normative attualmente in vigore prevedono la distinzione di due tipologie di elettrodi fondamentali (vedi figura 2.6.3):

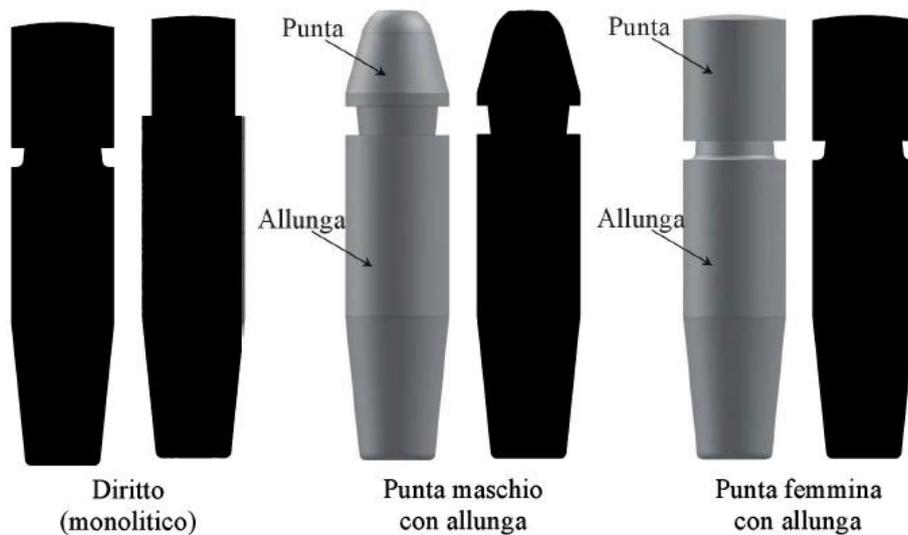


Figura 2.6.3 – Elettrodi normati. [10].

- **Monolitici:** dove la punta e il gambo vengono ricavati nello stesso blocco di materiale. Questa tipologia di configurazione è dominata dalla normativa ISO 5184 (UNO-EN 25184)³ molto semplice e tradizionale, in quanto prevede forme della punta dell'elettrodo in numero limitato ed è utilizzata esclusivamente per produzione di elettrodi "diritti", cioè per i quali l'asse è rettilineo e la forza di processo viene applicata lungo il medesimo asse.
- **A due pezzi:** dove la punta e il gambo sono separati al fine di garantire una maggiore versatilità applicativa e cercare di ridurre i costi relativi agli elettrodi stessi.
 - La punta è quella parte dell'elettrodo che effettivamente è soggetta ad usura. Punta che può venir rimossa dal gambo, chiamato anche "allunga" in questo caso, per minimizzare il quantitativo di materiale che viene scartato ad ogni sostituzione della stessa.
 - L'allunga risulta in questo modo più versatile nei vari campi applicativi, potendo assumere configurazioni differenti come quella ad asse deviato piuttosto che rettilineo. Quest'ultimo componente presenta un innesto, conico o cilindrico, per poter fissare l'elettrodo al resto del macchinario. Innesto descritto nelle righe precedenti, vedi figura 2.6.2.

³ Norme prese dal libro "Introduzione ai processi di saldatura" di Alessandro Ascari e Alessandro Fortunato

2.6.1 Alimentazione e campi applicativi

Il generatore in una saldatrice a resistenza per punti può fornire la tensione di alimentazione sia in maniera continua che alternata, in particolare nel primo caso è possibile trovare soluzioni sia a corrente costante che pulsate, il secondo caso resta comunque il più utilizzato soprattutto in campo industriale in quando riesce ad erogare correnti più elevate. I parametri elettrici hanno un range di variazione che va dai 1000 ai 100.000 [A] per quanto riguarda la corrente, mentre per le tensioni abbiamo un range di variazione che va dai 2 ai 25 [V], ma quest'ultimi valori di tensioni, nella zona di contatto tra elettrodo e materiale, risultano essere la decima parte della tensione al generatore per via delle dispersioni che si hanno per effetto Joule nel circuito di alimentazione, causate dalle elevatissime correnti con cui si sta operando. I materiali che possono essere saldati con una tecnica di saldatura a resistenza per punti sono vari, troviamo gli acciai inossidabili e al carbonio, leghe di alluminio rame e magnesio oltre che di nickel e titanio con un range di spessori saldabili che varia dai 0.5 mm ad oltre i 6 mm.

Per le applicazioni industriali il procedimento di saldatura per punti è unicamente automatico o semi-automatico, dove la testa di saldatura può essere movimentata da un robot antropomorfo capace di realizzare lavorazioni in tutte le direzioni dello spazio, in altri casi la testa risulta essere ferma mentre il pezzo si muove durante il processo. Esistono anche semplici attrezzature manuali controllate da un operatore aventi però un uso limitato, usate per giunzioni di lamiere di spessore ridotto dove si necessitano basse potenze.

In questa tipologia di saldatura l'attrezzatura ha una struttura abbastanza semplice, di norma si ha una testa che racchiude tutta la componentistica riguardante la potenza oltre che i vari sistemi per l'applicazione del carico dai quali fuoriescono due bracci aventi forma tale da poter consentire il montaggio, all'estremità, degli elettrodi. Bracci che muovendosi a forbice consentono l'applicazione del carico e la tenuta delle lamiere da dover saldare. Per gli elettrodi invece, devono essere montati quanto più vicino possibile alla componentistica di potenza, al fine di ridurre il più possibile le dispersioni causate dall'elevate correnti che si hanno in gioco durante il processo. Ovviamente troveremo sistemi differenti in funzione della specifica applicazione da eseguire, e fare una classificazione dettagliata in questa sede risulta essere complesso con il rischio di appesantire la trattazione, riporteremo i due sistemi più utilizzati:

- Macchine dette "a pavimento", chiamate così perché l'attrezzatura è inserita in un blocco unico poggiato direttamente sul pavimento, da cui escono gli elettrodi vedi schema semplificato figura 2.6.1.1. Per quanto riguarda l'azionamento del

processo di saldatura questo può essere manuale o automatico, nel primo caso il processo viene azionato attraverso un pedale (figura 2.6.1.1). Anche la movimentazione del pezzo può essere manuale o automatica.

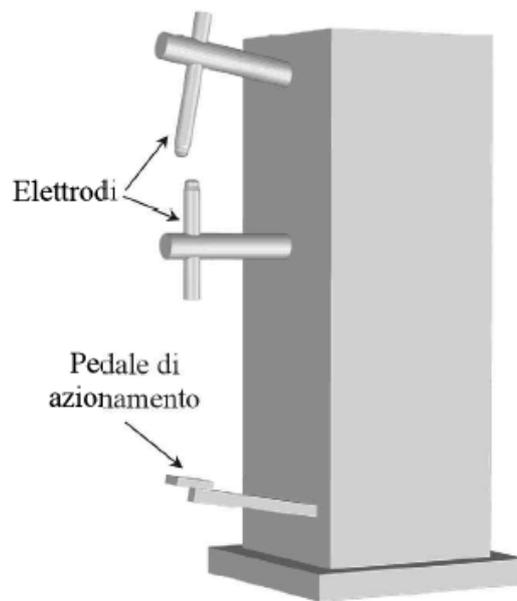


Figura 2.6.1.1 – Schema attrezzatura manuale [10]

- Teste usate per robot antropomorfo, vedi figura 2.6.1.2, dove sia il sistema degli elettrodi che l'organo di potenza vengono montati su un'unica testa montata sul robot, in particolare sul polso. Questo tipo di configurazione risulta essere molto versatile consentendo di realizzare saldature in tutte le possibili posizioni dello spazio, oltre ad avere la capacità di essere inserita in linee di assemblaggio più complesse, come quelle per la realizzazione di carrozzerie per gli autoveicoli. Questa configurazione è adatta principalmente alla saldatura di spessori aventi dimensione ridotta, questo perché, per cercare di avere limitate dispersioni di energia la testa ha integrata anche la componentistica di potenza, la quale rende problematica la manipolazione del sistema quando vengono montate organi di potenza elevata, aventi ingombri elevati e masse eccessive.

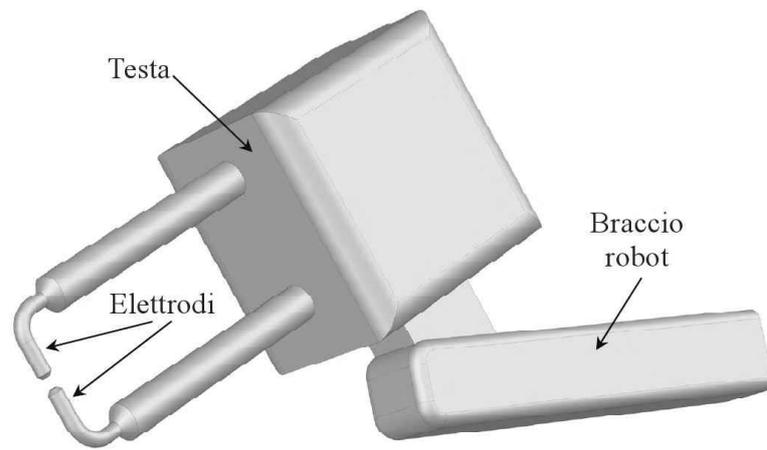


Figura 2.6.1.2 – Schema attrezzatura robotizzata [10]

3 Parametri di processo nella saldatura a punti

3.1 Parametri di processo

I parametri di processo sono quelli che influenzano l'uscita di un processo di fabbricazione e determinano la qualità di un prodotto finito rispetto alle sue specifiche. Questi parametri sono di solito controllati durante un processo di produzione. Tuttavia, ci possono essere alcuni di questi che non possono essere controllati durante un processo per via di complessità legate ad essi.

Riportiamo uno schema semplificato, per agevolare la lettura, sull'andamento di alcuni parametri di processo fondamentali che possono essere controllati durante un procedimento di saldatura, in particolare in figura 3.1.1 possiamo osservare la curva in blu, riferita alla forza esercitata dagli elettrodi in [KN] e l'andamento della corrente alternata [A], entrambe le grandezze diagrammate in funzione del tempo[ms]; per quanto riguarda gli intervalli temporali mostrati, t_1 rappresenta il tempo necessario alla compressione delle lamiera, t_2 il tempo di saldatura nel quale si ha la circolazione della corrente e t_3 è il tempo di attesa e rilascio della saldatura. Nel caso di nostro interesse, ovvero la saldatura a resistenza per punti, più in generale possiamo affermare che i principali parametri che influenzano l'output, ovvero il risultato finale del processo di saldatura possono essere i seguenti [11]:

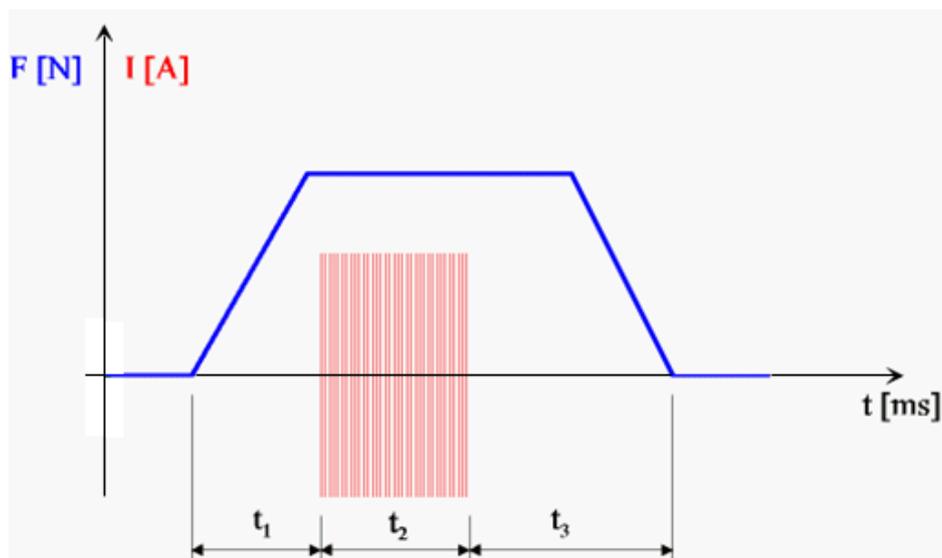


Figura 3.1.1 Andamento forza e corrente in un ciclo semplificato

- Pressione di saldatura
- Corrente di saldatura
- Numero di impulsi/cicli
- Tempo di compressione
- Tempo di saldatura
- Tempo di attesa

La resistenza della saldatura non è un parametro, ma una variabile di processo (valore misurato, non un valore controllato), mentre i parametri quali corrente, pressione e tempo, essendo direttamente collegati tra di loro, vengono considerati contemporaneamente in particolare andando a considerare la “finestra di saldabilità”. Tutti questi parametri vanno ad influenzare il risultato finale del processo di saldatura come la dimensione effettiva della saldatura, diametro del nocciolo, larghezza del punto di saldatura ecc. Infine, è doveroso annoverare anche una serie di altri fattori secondari che possono influenzare il risultato finale del processo di saldatura, tra i principali troviamo errori legati all’elemento umano ove presente, la tipologia di macchinario utilizzato, oltre che alle diverse condizioni in cui si può trovare il materiale da saldare.

3.1.1 Finestra di saldabilità.

Per finestre di saldabilità intendiamo delle rappresentazioni grafiche che mostrano i parametri che rendono ottimale l’esecuzione di una saldatura. Nella figura 3.1.2 è riportato in modo semplificato e di facile lettura un grafico, dove si possono osservare due linee; in particolare quella di minima e massima corrente; la prima va a identificare la corrente con cui si riescono ad ottenere i minimi requisiti necessari per avere una saldatura di dimensioni corrette, diversamente la massima rappresenta il limite superiore da non eccedere, in quanto si possono avere degli spruzzi di metallo fuso. La differenza tra questi due limiti di minima e massima corrente è la cosiddetta “finestra di saldabilità”. Avere una finestra di saldabilità la più ampia possibile riduce il rischio di alterare la qualità della saldatura al verificarsi di una variazione di corrente.

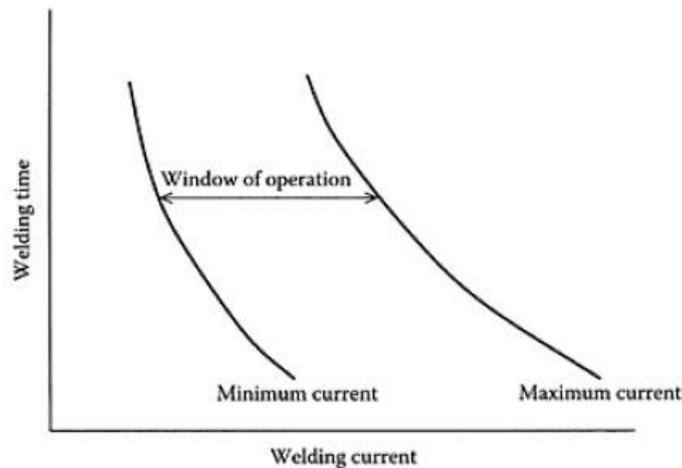


Figura 3.1.2 schema finestra di saldabilità [7]

3.1.2 Pressione di saldatura

Il valore della forza, che agisce sulle superfici dei pezzi da saldare, è determinato dalla pressione, quest'ultima determina l'entità con cui le superfici da saldare vanno in contatto. Forza che influenza anche la resistenza di contatto in quanto va a determinare la compenetrazione delle superfici stesse, oltre che alla capacità di smaltimento, attraverso i circuiti di raffreddamento, del calore prodotto.

Nella figura 3.1.3 è possibile notare l'effetto che ha un aumento di pressione sulla resistenza, in particolare quest'ultima tenderà a diminuire in seguito ad un aumento di pressione perché si avrà un aumento della sezione nella zona di contatto. Quindi risulta opportuno trovare un valore ottimale della pressione da esercitare, in quanto l'uso di valori eccessivi può causare apporti termici troppo bassi che possono causare l'insorgere di punti di saldatura di dimensioni molto ridotte, viceversa l'uso di valori eccessivamente bassi della pressione porta a sviluppare maggiore calore che può portare ad un'esplosione del nocciolo con il conseguente insorgere di spruzzi. Più nello specifico usando pressioni eccessivamente basse possono verificarsi tali fenomeni:

- Il surriscaldamento nella zona di contatto in particolare nella zona tra pezzo ed elettrodo con conseguenza di un calore eccessivo sull'elettrodo stesso.
- L'eccessivo riscaldamento delle lamiere che può portare alla deformazione delle stesse con il rischio di aprirsi.
- Rischio di rottura del guscio plastico, causato da un aumento troppo rapido del nocciolo fuso

Di conseguenza è possibile dedurre che il valore ottimale della pressione va scelto in funzione di vari parametri, i quali possono essere: la specifica caratteristica del materiale, geometria e diametro dell'elettrodo, oltre che lo spessore e numero di lamiere da saldare.

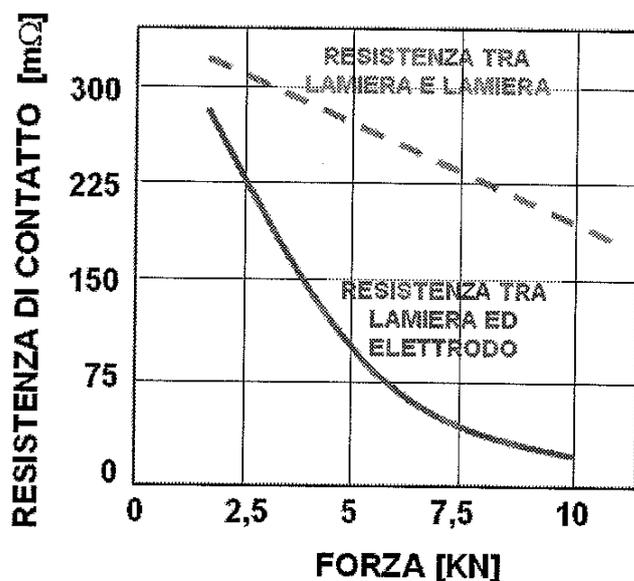


Figura 3.1.3 – Resistenza di contatto in funzione della forza [5]

3.1.3 Corrente

Tra i vari parametri precedentemente elencati, la corrente di saldatura è sicuramente uno dei fondamentali su cui andare ad operare, corrente che deve essere riferita ad una specifica sezione, in corrispondenza del punto dove avverrà la saldatura, questo perché un valore di corrente troppo basso potrebbe portare alla formazione di giunti di dimensioni eccessivamente ridotte, viceversa correnti molto elevate potrebbero portare alla formazione di giunti di dimensioni eccessive con probabile conseguenza di spruzzi. Premesso ciò, parleremo di densità di corrente elettrica, in quanto quest'ultima va considerata in relazione alla sezione del punto da saldare. La scelta dei giusti valori della densità di corrente va fatta considerando il tipo di materiale che si andrà ad usare, più nel dettaglio bisogna considerare:

- La **conducibilità elettrica**, in quanto è all'aumentare di quest'ultima che aumenta la corrente necessaria affinché si abbia il calore, per effetto Joule, necessario per avere una saldatura ottimale.
- La **conducibilità termica**, all'aumentare di essa bisogna incrementare il valore di corrente al fine di poter compensare il calore che viene dissipato per conduzione.
- Il **coefficiente di dilatazione termica** del materiale, per avere un adeguato sviluppo di calore ed evitare che ci sia un' espulsione del nocciolo fuso, possono essere necessari tempi di saldatura più corti abbinati a correnti elettriche di valore maggiore; nel caso i valori di corrente sono troppo elevati si impiegano delle "rampe", rispettivamente di salita e discesa chiamate anche "up slope" e "down slope", vedi figura 3.1.4.1, che consentono di non avere riscaldamenti e raffreddamenti eccessivamente rapidi, i quali potrebbero influire in modo negativo sulla formazione del nocciolo e quindi sulla qualità della saldatura.

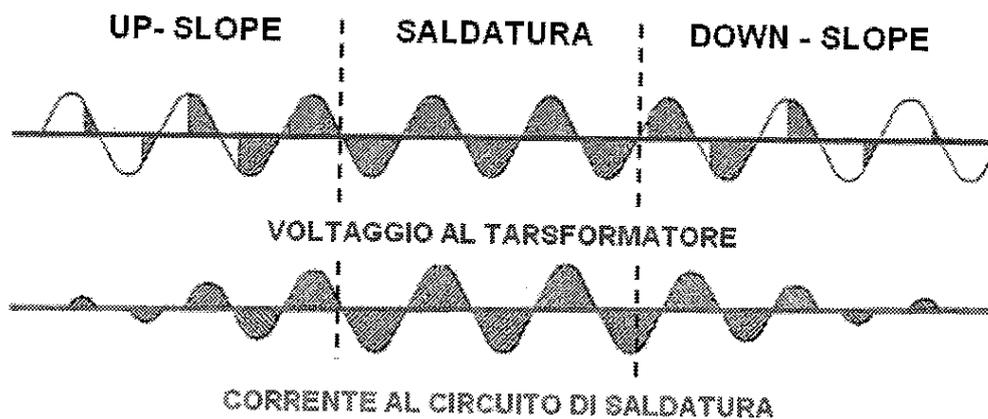


Figura 3.1.4.1- regolazione up slope" e "down slope. [5]

Durante il processo di saldatura il valore dell'intensità di corrente può avere andamenti differenti in base alle specifiche esigenze richieste. Possiamo trovare andamenti costanti piuttosto che pulsanti, quest'ultimi usati quando si necessitano caratteristiche meccaniche migliori, in quanto si riesce ad aumentare lo spessore limitando però le dispersioni di calore. Altra soluzione è quella di operare con una fase di preriscaldamento ed una di post-riscaldamento, la prima con corrente di debole intensità, così anche per la seconda fase, riuscendo a diminuire la velocità di raffreddamento, questo per avere degli effetti di tempra più limitati su materiali che presentano elevata sensibilità.

3.1.4 Temperatura

La temperatura è un altro parametro che va ad influenzare la resistenza di contatto, in particolare questo parametro è molto sensibile alla scelta del materiale da utilizzare. Più nello specifico è possibile osservare che un aumento, anche lieve, di temperatura provoca una sensibile riduzione della resistenza di contatto, come si può osservare dalla figura 3.1.4.2 Diminuzione di resistenza che è attribuibile ad un miglioramento della superficie di contatto, a causa dell'eliminazione delle irregolarità superficiali dovuto al crescere della temperatura.

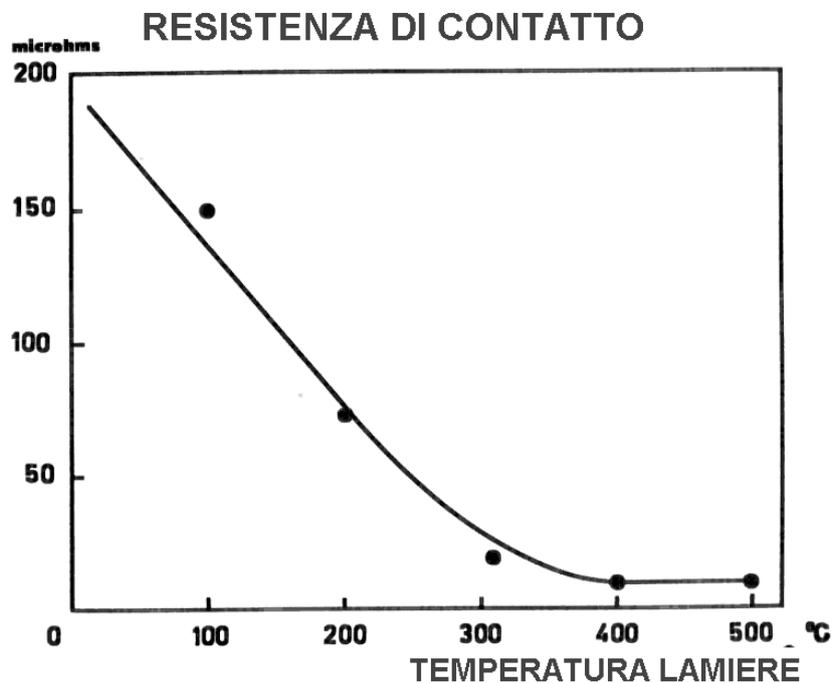


Figura 3.1.4.2 – Resistenza di contatto in funzione della temperatura [5]

3.1.5 Tempo di saldatura

Il tempo di saldatura è definito in funzione dei valori dell'intensità di corrente e della pressione. Ci sono varie formule empiriche usate per determinare la relazione che lega la corrente di saldatura con il diametro del punto saldato, materiale impiegato e tempo richiesto, di seguito è riportata una delle più usate:

$$I = \frac{K \cdot s}{\sqrt{t}} \quad (3.3.1)$$

Dove:

- I è la corrente di saldatura, misurata in Ampere;
- s è l'area del punto di saldatura, misurata in mm^2 ;
- t è il tempo di saldatura, espresso in numero di cicli alla frequenza di 50 Hz;
- K è un coefficiente che varia in funzione delle proprietà del materiale.

Acciaio	K = 1200 [A/mm ²]
Leghe di alluminio	K = 4000 [A/mm ²]

Tabella 1 – Costante per diversi materiali [10]

Al fine di ottenere delle saldature di miglior qualità, analizzando la relazione precedente, si deduce che conviene avere saldatrici capaci di far circolare correnti di valore elevato, consentendo così l'uso di tempi di saldatura minori. Infine, possiamo confrontare l'equazione 3.3.1 che corrisponde al grafico mostrato in figura 3.1.4.3 Si può notare che valori troppo elevati della corrente possono portare ad una variazione significativa del tempo di saldatura, con conseguenza di una significativa variazione del diametro del nocciolo. Per evitare il problema del surriscaldamento del giunto, qualora non si hanno a disposizione dei generatori in grado di erogare una potenza sufficientemente elevata, non bisogna usare dei tempi di saldatura eccessivamente lunghi, in alternativa si ricorre a tecniche chiamate ad impulsi in cui si hanno "tempi caldi", quando circola la corrente, per far riscaldare il giunto alteranti a "tempi freddi" per far raffreddare il giunto grazie allo sfruttamento dell'aumento di resistenza che viene associata ad una diminuzione di temperatura.

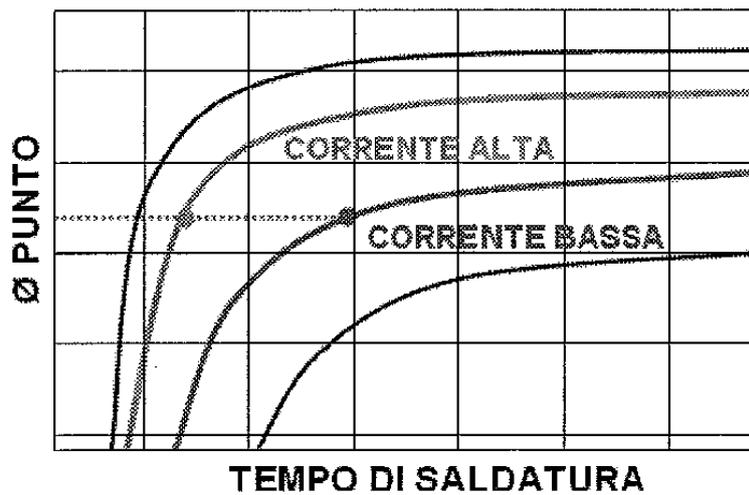


Figura 3.1.4.3 – Relazione tempo di saldatura, corrente e diametro del punto di saldatura [5]

3.1.5.1 Cicli di pressione è corrente

I cicli di saldatura, intesi come l'andamento dei cicli di pressione e corrente in funzione del tempo, determinano la programmazione di una specifica saldatrice a resistenza. In maniera semplificativa un ciclo di saldatura può essere costituito da una prima fase detta di "accostamento", che consente di portare le lamiere in contatto, una successiva fase, dove avviene la saldatura vera e propria, con passaggio di corrente elettrica, e un'ultima fase detta di raffreddamento, vedi figura 3.1.5.1.

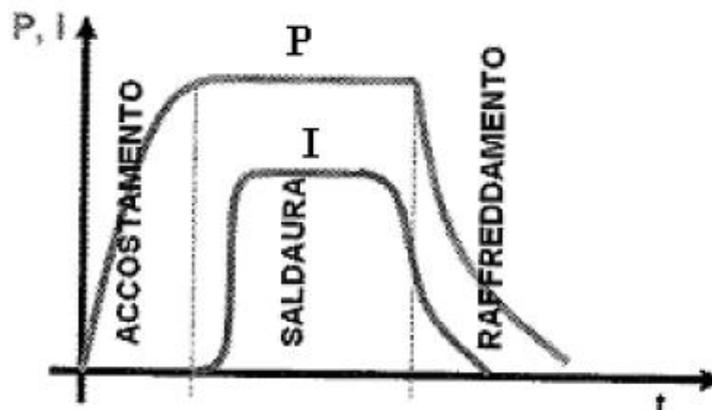


Figura 3.1.5.1 – Schema base ciclo di saldatura a resistenza [5].

Per completezza riportiamo nella figura 3.1.5.2. il ciclo di saldatura completo per una tipologia di saldatura a resistenza per punti dove possiamo notare le seguenti fasi:

- **Accostaggio** (*squeeze*), che rappresenta il tempo necessario agli elettrodi, per portarsi a chiudere sulle lamiere. Per assicurare un risultato finale di qualità maggiore, l'accostaggio è diviso in due fasi, ciò consente al cilindro pneumatico di andare in pressione è sviluppare la forza necessaria in maniere costate.
- **Preriscaldamento** (*preheat*), è il tempo necessario per avere il primo riscaldamento del materiale, riscaldamento che causerà un lieve cedimento delle lamiere al fine di migliorare l'accostamento delle superfici da dover saldare. Questo tempo, in alcuni casi, è seguito da un'ulteriore fase detta di "attesa", per riportare il giunto alla sua temperatura iniziale.
- La **rampa di salita** (*upslope*), in questa fase è apprezzabile un riscaldamento dolce del materiale, grazie ad un incremento graduale della corrente in un tempo prestabilito.
- **Saldatura** (*welding*), corrisponde alla fase dove effettivamente avviene la saldatura con la formazione del nocciolo, ottenuto con il passaggio della corrente elettrica.
- La **rampa di discesa** (*downslope*), dove avviene il raffreddamento del punto di saldatura, per via di una diminuzione di corrente graduale in un tempo prestabilito, questa fase rappresenta la conclusione della saldatura vera e propria.
- **Intervallo di tempra** (*quench time*), rappresenta un tempo freddo dove è possibile aumentare la forza che esercitano gli elettrodi. Questo per aumentare la velocità di raffreddamento tramite la dispersione termica che si ha attraverso gli elettrodi. L'intervallo di tempra è applicabile in qualunque fase del ciclo.
- Il **rinvenimento** (*temper*), si fornisce un calore aggiuntivo al pezzo per realizzare dei trattamenti termici.
- L'**intervallo di mantenimento** (*hold time*), rappresenta l'ultima fase prima del rilascio del punto di saldatura definitivo, è essenziale per assicurare il raffreddamento completo del punto sotto la pressione degli elettrodi, per far "compenetrare" le molecole tra di loro.

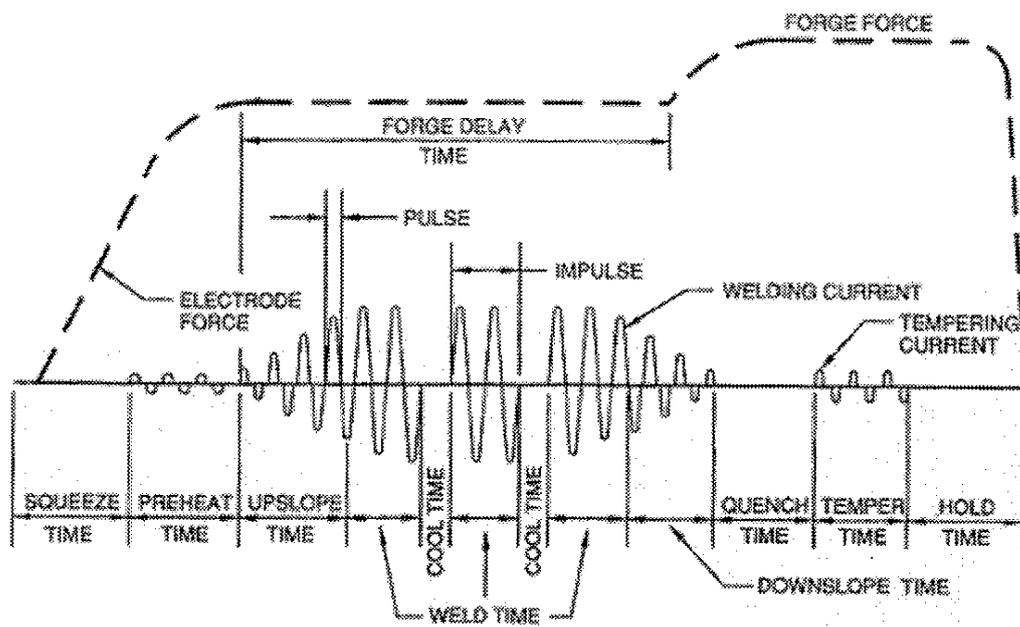


Figura 3.1.5.2. – Ciclo reale pressione e corrente per saldature RSW [5].

4 Usura elettrodo e metodi di predizione.

4.1 Usura elettrodo nella saldatura a resistenza per punti.

L'elettrodo, nella saldatura a resistenza per punti, può essere considerato l'elemento fondamentale dell'intero processo. È proprio quest'ultimo che garantisce la tenuta delle lamiera da saldare, la circolazione della corrente, oltre a determinare la dimensione effettiva del "nocciolo di saldatura". Ma come descritto nei capitoli precedenti, il processo di saldatura è fortemente influenzato da numerose variabili chiamate anche "parametri di processo" che influenzano il processo stesso. La scelta di questi parametri viene eseguita in modo molto oculato in funzione del tipo di risultato che si vuole ottenere e tenendo conto del particolare campo applicativo in cui si sta operando; a titolo d'esempio ricordiamo che lo spessore delle lamiera o il materiale di cui sono composte deve indirizzare alla scelta opportuna di questi parametri per ottenere una saldatura ottimale.

Quindi lo stato dell'elettrodo influenza il risultato finale della saldatura, in particolare durante il processo di saldatura l'elettrodo si usura a causa dell'esecuzione di migliaia di punti di saldatura che modificano le condizioni di contatto elettrico, termico e meccanico all'interfaccia elettrodo-lamiera. La superficie di contatto dell'elettrodo aumenta gradualmente a causa dell'usura dello stesso; come conseguenza si ha una minore densità di corrente di saldatura e punti di saldatura di diametro più piccolo e quindi minore resistenza della saldatura finale. Quando l'elettrodo è nuovo, per garantire dei giunti di qualità è necessario scegliere opportunamente i parametri di processo in base allo specifico caso. Con l'avanzamento dell'usura si possono usare diverse strategie per limitare quest'ultima: può essere compensata tramite interventi diretti sull'elettrodo, con operazioni di rinvigorisca, o con compensazioni di corrente, al fine di mantenere la densità della corrente costante, aumentando la corrente di saldatura attraverso dei step in ambiente di produzione. Come e quando aumentare la corrente di saldatura dipenderebbe dall'esperienza dei tecnici di saldatura. In figura 4.1.1 è mostrato l'aspetto superficiale dell'usura degli elettrodi, estratta dall'articolo di Y S Zhang⁴, dove si possono notare le impronte di carbonio dalla faccia superiore dell'elettrodo e tramite queste è possibile misurare la vera area di contatto meccanico tra l'interfaccia elettrodo-lamiera.

⁴ Y S Zhang et al 2007 Meas. Sci. Technol. 18 867 - Monitoring and intelligent control of electrode wear based on a measured electrode displacement curve in resistance spot welding

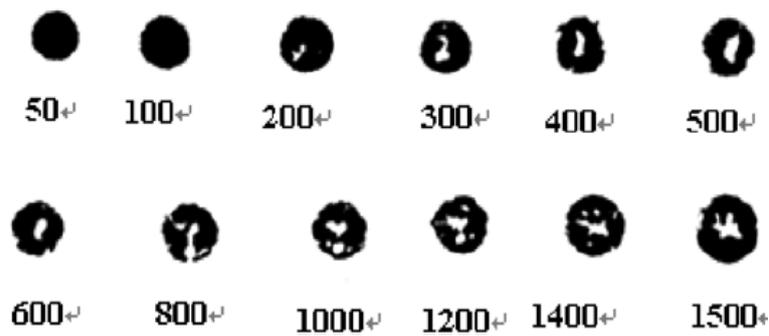


Figura 4.1.1 – Impronte elettrodo usurato [12]

Com'è possibile osservare, con l'aumentare del numero di saldature, quindi dell'usura, il diametro dell'elettrodo è aumentato. Le «pitting» degli elettrodi, mostrate come regioni bianche sulle impronte di carbonio, iniziarono ad emergere a circa 200 saldature e aumenteranno continuamente, ottenendo, come conseguenza, una minore densità di corrente oltre ad avere saldature di diametro più piccolo e quindi minore resistenza della saldatura stessa, che porta a non soddisfare i requisiti di qualità del giunto. L'usura della punta dell'elettrodo è imputabile agli effetti della pressione di saldatura e del calore generato nel processo stesso a causa dei quali il diametro della punta dell'elettrodo aumenterà gradualmente, ciò si traduce in una riduzione della generazione di calore nel "nociolo di saldatura", con conseguente riduzione della qualità della saldatura stessa. Inoltre, il composto sulla superficie dell'elettrodo aumenterà gradualmente, ciò provocherà una distribuzione di corrente irregolare, che influenza ulteriormente la qualità della saldatura. La figura 4.1.2 mostra le variazioni superficiali delle saldature e l'aspetto della faccia dell'elettrodo a diversi numeri di saldature. Come mostrato, la forma della superficie di saldatura e l'aspetto della faccia dell'elettrodo sono diventati più irregolari e ruvidi dopo mille saldature.

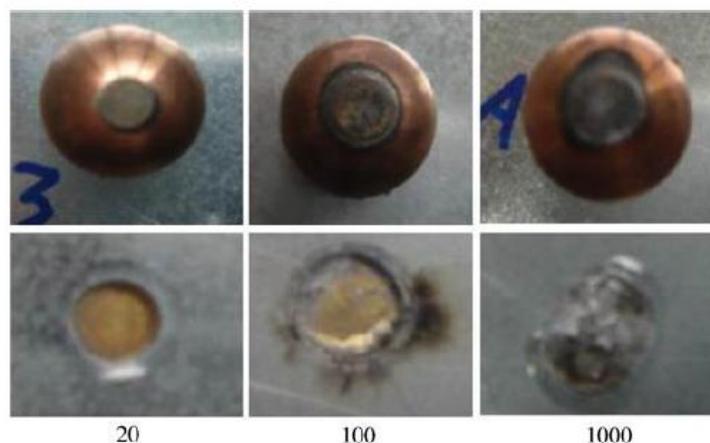


Figura 4.1.2 Esempio elettrodo usurato [12]

4.2 Metodi di predizione usura elettrodo

Nel paragrafo seguente riportiamo, non entrando nel dettaglio, alcuni esempi riguardanti studi scientifici nell'ambito dell'intelligenza artificiale, più nello specifico parleremo di tecniche di *machine learning* applicate alle macchine saldatrici a resistenza per valutare l'usura di uno dei componenti del macchinario, come può essere l'elettrodo, quest'ultimo, elemento fondamentale per la tecnica di saldatura a resistenza per punti. L'intelligenza artificiale, abbreviata spesso con le sigle (IA), è stata definita come un ramo delle scienze computazionali che studia sistemi che imitano l'intelligenza umana; è, quindi, "lo studio di come far fare ai calcolatori cose che, ora come ora, gli esseri umani fanno meglio (Elaine Rich, 1972, Artificial Intelligence). L'intelligenza artificiale iniziò a svilupparsi attorno agli anni 50, trovando come prime applicazioni la dimostrazione di teoremi e la risoluzione di semplici giochi. Come primi esempi troviamo la scrittura di programmi per il gioco della dama, programmi che giocavano contro veri umani, ma soprattutto riuscivano ad usare la propria esperienza, acquisita in queste partite, per migliorarsi per quelle future, quindi "apprendendo". Il "Logic Theorist" è un programma per computer scritto nel 1956 da Allen Newell, Herbert A. Simon e Cliff Shaw ci fu uno dei primi tentativi per la dimostrazione di teoremi matematici attraverso dei codici. Un'altra delle prime incursioni nel territorio dell'IA si concentrò su quel tipo di problemi che affrontiamo tutti i giorni, che è spesso chiamato ragionamento di buon senso. Per studiare questa forma di ragionamento Newell, Shaw e Simon costruirono il General Problem Solver (GPS), ma fu possibile applicarlo solo per attività abbastanza semplici. Con il progredire dell'IA si affrontarono altri problemi: come la percezione (visione e parlato), la comprensione del linguaggio naturale e la risoluzione di problemi specializzati quali la diagnosi medica e l'analisi chimica.

- Limiti dell'intelligenza artificiale

I potenti calcolatori che abbiamo oggi a disposizione sono capaci di memorizzare grandissime moli d'informazioni in tempi molto brevi, dell'ordine dei nanosecondi, oltre che avere la capacità di eseguire calcoli aritmetici molto complessi senza ricorrere ad errori. Hanno il limite di non essere in grado di svolgere alcune attività come l'interpretazione di una scena visiva o la capacità di comprendere una frase, ragionare su oggetti fisici o su azioni e loro conseguenze. Queste attività elencate sono invece molto semplici per l'essere umano. Durante lo sviluppo di un essere umano si acquisiscono, nei primi anni, capacità percettive di linguaggio e di buon senso, solo più tardi si ha l'acquisizione di capacità specializzate, le quali possono essere la progettazione in medicina ecc. Detto ciò, si potrebbe pensare che le prime capacità siano facilmente riproducibili da un calcolatore in quanto più semplici, questa ipotesi si è dimostrata errata. Nonostante le capacità specializzate richiedano delle conoscenze che

non tutti hanno, esse necessitano spesso di una quantità di conoscenza minore di quella richiesta dalle attività della vita quotidiana. Conseguentemente le aree dove oggi l'IA ha più successo sono quelle che richiedono conoscenza specialistica. Infatti, tralasciando i vari problemi legati a questa tecnologia, che in questa trattazione non andremo ad analizzare, possiamo citarne, a titolo d'esempio, uno dei principali che ha sicuramente fattori comuni con gli altri, ovvero il fatto che l'intelligenza artificiale richiede conoscenza.

4.2.1 Albero decisionale

Un albero decisionale è una costruzione grafica che indica un'organizzazione gerarchica, strutturata da una raccolta di nodi e collegamenti. Più nello specifico ogni nodo ha un collegamento in arrivo, ad eccezione del nodo iniziale chiamato nodo radice. Ogni nodo rappresenta una caratteristica predittiva, ed ogni collegamento rappresenta il valore di ogni caratteristica (variabile condizionale). I nodi terminali, chiamati anche "nodi foglia" sono i valori previsti della variabile predittiva in base ai modelli scelti per l'allenamento, ricordiamo che queste tipologie di modelli dell'IA hanno bisogno di essere addestrati, e per far ciò è necessario avere a disposizione moltissime informazioni. I nodi interni contengono delle suddivisioni, che testano il valore della variabile da esaminare. I vari percorsi, che a partire da un nodo interno, la variabile percorre fino ai nodi successivi, culmina in esiti distinti del test. Gli alberi di classificazione e regressione sono metodi di apprendimento automatico per costruire modelli di previsione partendo da un set di dati. Per ottenere il modello di previsione, il sistema ripartisce con ricorrenza lo spazio di dati e misura un modello di previsione semplice all'interno di ogni divisorio. In questo modo, il divisorio può essere rappresentato graficamente come albero di decisione.

Tra i vari vantaggi di questi strumenti, uno dei principali da annoverare, nel caso delle saldature, è quello di poter evitare prove su componenti reali atte a cercare il risultato migliore conducendo numerose analisi, dispendiose di tempo e denaro, ma soffermandoci sulle "raccomandazioni fornite dal modello predittivo".

Gli alberi decisionali ci sono d'aiuto nella determinazione dell'impatto di ogni variabile di input sul parametro di risposta, per riuscire a capire in modo più efficiente la priorità che ciascuna variabile di input ha in fase di progettazione e di processo. Per avere dei punti di saldatura di qualità maggiore, è fondamentale conoscere la corretta comprensione dei parametri di input e soprattutto della loro correlazione con i parametri di risposta, i quali possono essere la dimensione del nocciolo di saldatura o simili. Una delle principali preoccupazioni nel trattare i dati che si hanno a disposizione analizzando il processo di saldatura, sono proprio le possibili incoerenze relative ai set di dati.

Nel mio lavoro di tesi, come si vedrà nel prossimo capitolo è stato analizzato proprio uno dei numerosi parametri estrapolabili in una macchina saldatrice a resistenza per punti, in particolare parleremo della curva di spostamento dell'elettrodo, quest'ultima opportunamente filtrata, ed estraendo da essa delle caratteristiche di tipo statistico. Quest'ultime potrebbero essere usate per uno studio legato all'IA o più semplicemente per una possibile analisi regressiva per stimare l'usura dell'elettrodo. In definitiva vedremo che il lavoro di tesi mira semplicemente a mostrare l'esistenza di legami tra l'usura dell'elettrodo con la variazione del segnale relativo allo spostamento dell'elettrodo.

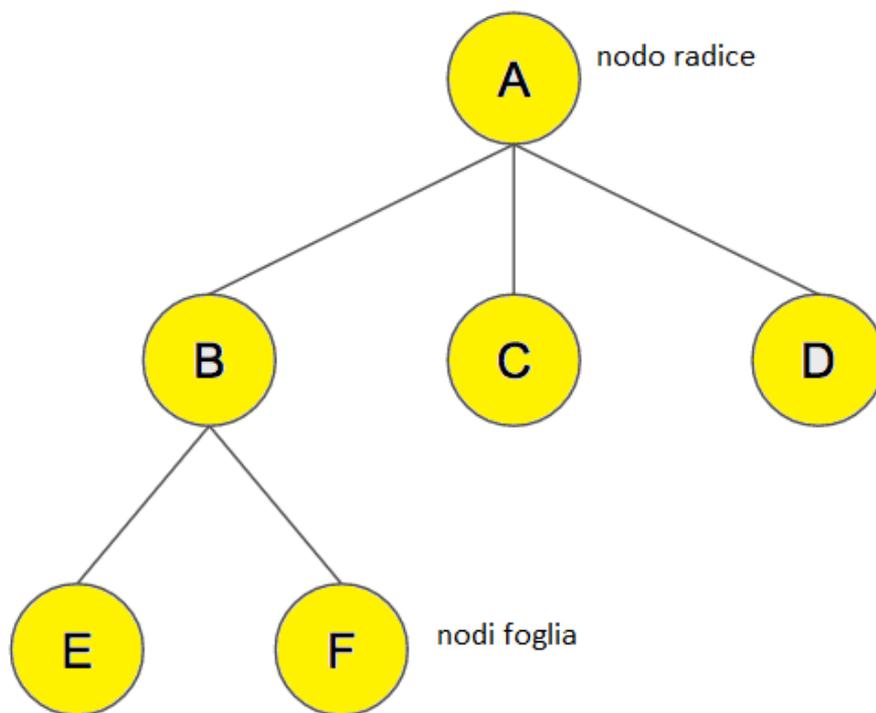


Figura 4.2.1 – Esempio albero decisionale

4.3 Esempi metodi di predizione applicati all'usura elettrodo

4.3.1 Monitoraggio e controllo intelligente dell'usura dell'elettrodo sulla base di una curva di spostamento dell'elettrodo misurata nella saldatura a punti di resistenza [13]

Gli studiosi Y. S. Zhang, HWang, G. L. Chen and X. Q. Zhang, nella loro ricerca hanno mostrato come per gli acciai altoresistenziali, sempre più utilizzati nell'industria automobilistica per ridurre il peso e migliorare il risparmio di carburante, devono essere sviluppati e compresi nuovi parametri di processo e aspetti connessi al processo stesso. Tuttavia, a causa delle maggiori proprietà fisiche e chimiche di questi acciai, è difficile sostituirli direttamente nei processi di produzione attualmente progettati per gli acciai leggeri. Tra tutte le questioni affrontate, la resistenza dell'elettrodo è la più importante. Nel loro studio vengono analizzate in primo luogo le caratteristiche di usura degli elettrodi degli acciai zincati a doppio stadio zincati a caldo (DP600) e l'effetto sulla qualità della saldatura. Una curva di spostamento degli elettrodi, in grado di monitorare l'usura degli stessi è stata misurata da un sistema sperimentale in via di sviluppo che utilizza un servocomando. Un sistema di inferenza neuro-fuzzy basato sulla curva di spostamento dell'elettrodo è sviluppato per minimizzare l'effetto di un elettrodo usurato sulla qualità della saldatura regolando adattivamente le variabili di ingresso in base alla curva di spostamento dell'elettrodo misurata quando si verifica l'usura dell'elettrodo. Una curva di corrente modificata è implementata per ridurre gli effetti dell'usura degli elettrodi sulla qualità della saldatura utilizzando un sistema sviluppato neuro-fuzzy.

- **Sistemi Neuro-Fuzzy:**

I sistemi di logica fuzzy sono visti come un anello naturale tra approcci simbolici e subsimbolici dell'IA. Innanzitutto, essi possono lavorare in tempo reale e non nell'incertezza come le reti neurali ed inoltre possono maneggiare informazioni sia simboliche sia numeriche. Tuttavia, i sistemi fuzzy non incorporano usualmente abilità di apprendimento automatico e configurazioni adattative. Allora si è visto che combinando le reti neurali e i sistemi basati sulla logica fuzzy, si ottiene un sistema che ha una elevata prestazione. Il sistema risultante, detto sistema neuro-fuzzy, è un sistema ibrido dove l'architettura resta fuzzy ma si usano tecniche di apprendimento neurali, che possono essere addestrate automaticamente. Nella figura 4.3.1.1 è riportato lo schema di un sistema neuro fuzzy, in particolare quello riferito all'articolo qui menzionato nel quale sono presenti due variabili di input, lo spostamento dell'elettrodo "De" e la velocità di quest'ultimo "Ve".

Lo schema tipico di un controllo di tipo fuzzy è costituito da tre moduli principali: il modulo di fuzzificazione, di applicazione delle regole e di defuzzificazione. Valori numerici o *crisp*⁵ specificano gli ingressi e le uscite mentre il regolatore fuzzy opera su variabili fuzzy (sfocate), quindi si hanno delle interfacce di fuzzificazione e di defuzzificazione che consentono di associare agli ingressi la loro rappresentazione fuzzy e alla rappresentazione fuzzy dell'uscita l'uscita stessa. La parte centrale dello schema trasforma le rappresentazioni fuzzy degli ingressi nelle rappresentazioni fuzzy delle uscite secondo le regole della logica fuzzy, chiamate anche regole di interferenza. Regole del tipo if-then (se - allora). L'operatore di defuzzificazione converte i valori funzionali delle uscite nei valori numerici o *crisp* dei segnali delle uscite.

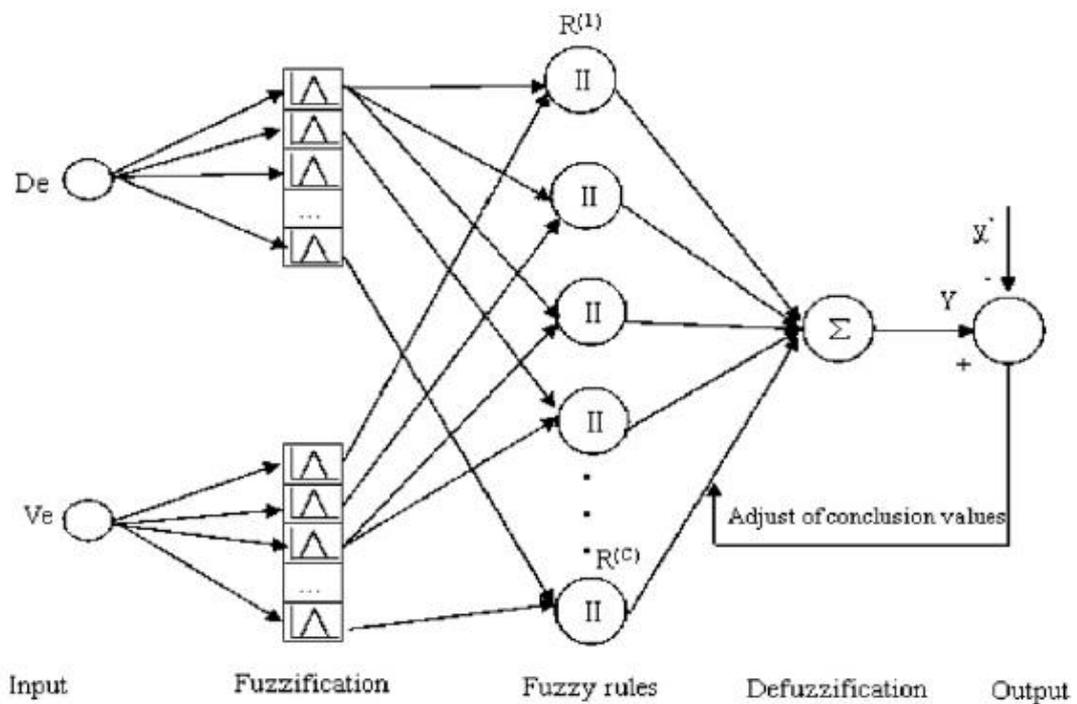


Figura 4.3.1.1 – Struttura sistema neuro-fuzzy [13]

⁵ *crisp* in inglese significa "rigido", "croccante"

1. Caratteristiche di usura degli elettrodi dell'acciaio DP600

Con l'aumento degli acciai altoresistenziali avanzati nel montaggio dei veicoli, l'usura degli elettrodi si verifica molto spesso. La distribuzione non uniforme della densità di corrente diventerà sempre più irregolare quando l'elettrodo è usurato. La “costrizione” nel flusso di corrente causerà un eccessivo riscaldamento. Un elettrodo usurato si tradurrà in fusione superficiale localizzata. Con l'ulteriore erosione dell'elettrodo, il diametro di quest'ultimo aumenterà e la pressione media, come la densità di corrente diminuiranno. Di conseguenza, si formeranno saldature sottodimensionate e la rugosità superficiale della faccia dell'elettrodo aumenterà notevolmente. Nello studio qui riportato si è utilizzato un acciaio a doppia fase (DP600) zincato a caldo con spessore di 0,8 mm. Si sono fatti esperimenti per valutare l'usura degli elettrodi, effettuati con parametri di saldatura costanti. La qualità della saldatura viene valutata con dei test appositi. È stato impostato un valore specifico come limite di resistenza, che identifica una buona saldatura, ed usato il metodo di impronta del carbonio per misurare le condizioni della faccia dell'elettrodo e i diametri della faccia dello stesso a diversi numeri di saldature. La vita del l'elettrodo è stata definita come il numero di saldature in cui la resistenza è scesa al di sotto del l'80% del valore medio impostato all'inizio della prova di vita del l'elettrodo, vedi [13].

Dai risultati sperimentali ottenuti, riportati del dettaglio nell'articolo completo⁶, si è dimostrato che con l'usura degli elettrodi, la dimensione del nocciolo di saldatura e la resistenza della saldatura hanno iniziato a diminuire. Infine, la resistenza della saldatura non poteva soddisfare i requisiti di qualità del giunto. Pertanto, l'obiettivo principale dello studio riportato, è quello di minimizzare l'effetto degli elettrodi usurati sulla qualità della saldatura regolando adattivamente le variabili di ingresso in base a una curva di spostamento dell'elettrodo misurata quando si verifica l'usura dell'elettrodo.

2. Curva di spostamento degli elettrodi per il monitoraggio usura degli elettrodi

A causa del flusso di corrente presente quando si sta eseguendo una saldatura, viene generato calore per effetto Joule, di conseguenza la temperatura delle lamiere d'acciaio inizia ad aumentare durante il processo di formazione del “nocciolo di saldatura”. Lo spostamento dell'elettrodo aumenterà per via dell'espansione termica dovuta al riscaldamento. Pertanto, lo spostamento dell'elettrodo può essere utilizzato per indicare l'inizio e la crescita del “nocciolo di saldatura” durante il processo. I segnali di spostamento dell'elettrodo misurati per un intero ciclo di saldatura sono mostrati nella figura 4.3.1.2. I due elettrodi si uniscono grazie alla forza ad essi applicata, per poi

⁶ Monitoring and intelligent control of electrode wear based on a measured electrode displacement curve in resistance spot welding [13]

allontanarsi l'uno dall'altro ad una velocità costante a causa dell'espansione termica delle lamiere. La massima espansione termica si verifica quando la corrente elettrica è tagliata. Infine, lo spostamento dell'elettrodo inizia a diminuire a causa di raffreddamento.

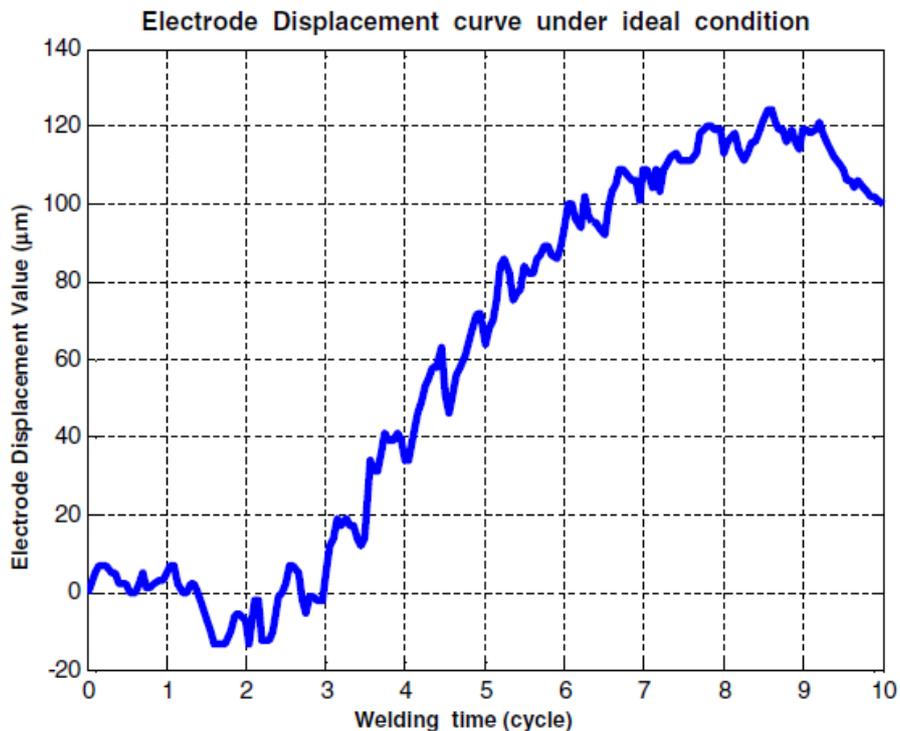


Figura 4.3.1.2 – Curva spostamento elettrodo [13]

Al fine di spiegare chiaramente la curva di spostamento degli elettrodi misurata ed utilizzata per il monitoraggio ed il controllo dell'usura degli stessi, è stato applicato il metodo di analisi Wavelet. Utilizzando l'analisi di Wavelet (vedi [13]), il segnale di spostamento dell'elettrodo potrebbe essere scomposto in bande di frequenza diverse e ricostruito dopo aver rimosso i segnali che avevano una grande quantità di rumore in alcune scale, in base alle differenze tra segnale e rumore a frequenze diverse, ottenendo l'andamento mostrato in figura 4.3.1.3.

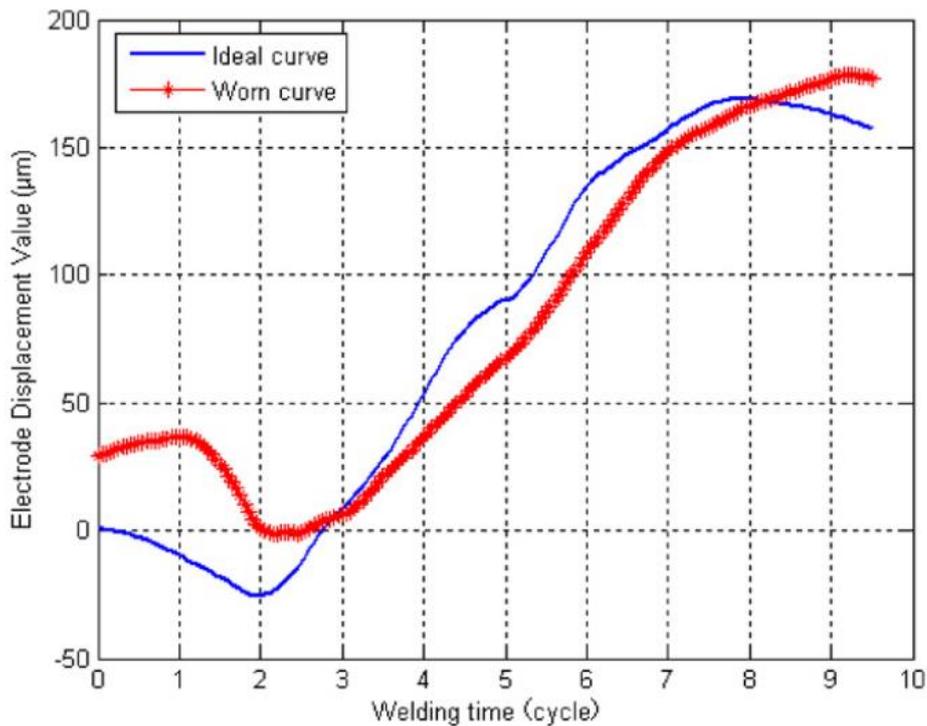


Figura 4.3.1.3 – Curva di spostamento dell'elettrodo ottenuta con analisi Wavelet [13].

3. Valutazione della stabilità di processo dell'usura degli elettrodi utilizzando il metodo SPC

Shewhart ha proposto i fondamenti di base di SPC (controllo statistico del processo). Il grafico di controllo è un buono strumento per controllare un processo nel tempo. Il diagramma di controllo di Shewhart è un test di ipotesi usato come approccio statistico per lo studio della variazione del processo di fabbricazione, allo scopo di migliorare l'efficacia dello stesso. Le informazioni provenienti dai dati analizzati, vedi articolo completo [13] sono valutate per determinare se quest'ultime indicano o meno la presenza di un disturbo di causa speciale. La figura 4.3.1.4 illustra graficamente come Shewhart ha esteso l'idea del test delle ipotesi per fare considerazioni sulla naturale evoluzione del processo con l'evolversi del tempo.

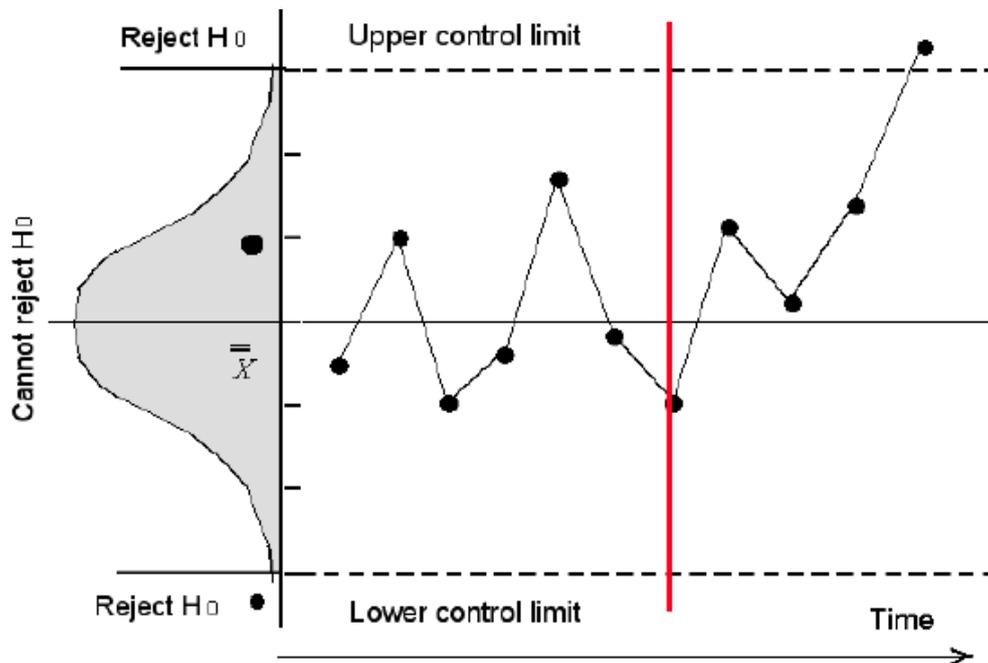


Figura 4.3.1.4 – Metodo SPC [13].

Il metodo SPC sarà utilizzato per valutare la variazione del processo di saldatura con l'usura dell'elettrodo sulla base di una curva di variazione raggiunta. Alcuni indici statistici delle curve di variazione ideali e usurate sono stati calcolati e diagrammati (vedi articolo completo [13]).

4. Controllo neuro-sfocato del l'usura degli elettrodi curva di tendenza

I risultati sperimentali descritti sopra, hanno rivelato che la curva di spostamento dell'elettrodo potrebbe riflettere la formazione dei “noccioli di saldatura” e l'usura dell'elettrodo durante un processo di saldatura a resistenza per punti. Lo spostamento dell'elettrodo e la velocità di quest'ultimo in ogni ciclo possono non solo riflettere la crescita del “nocciolo di saldatura”, ma sono anche due parametri di uscita misurabili in base alla curva di spostamento dell'elettrodo. Spostamento e velocità dell'elettrodo variano con la corrente di saldatura, come mostrato nella figura 4.3.1.5. Così, i valori di spostamento e velocità dell'elettrodo sono stati selezionati come variabili di ingresso “fuzzy” per un sistema di controllo neuro-fuzzy (figura 4.3.1.1).

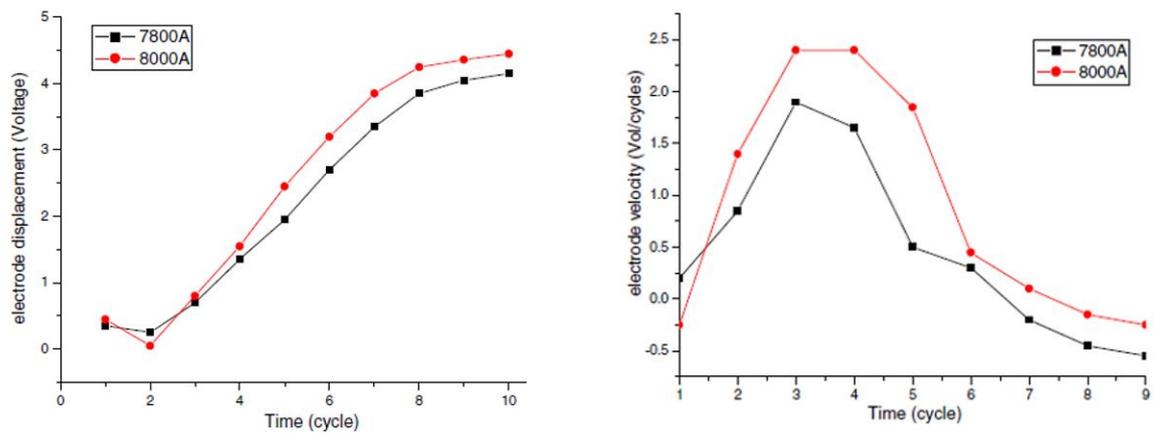


Figura 4.3.1.5 – spostamento e velocità dell'elettrodo in funzione della corrente. [13]

I programmi di saldatura sono stati regolati per soddisfare il controllo della qualità della saldatura secondo un segnale di spostamento dell'elettrodo. La modellazione neuro-fuzzy è stata utilizzata come potente strumento per facilitare lo sviluppo efficace dei modelli. L'uso combinato della capacità di apprendimento delle reti neurali e la capacità di rappresentazione dei sistemi fuzzy può in parte superare la problematica relativa ai dati imprecisi in un sistema fuzzy. Pertanto, l'approccio è ideale per studiare problemi complessi di controllo della saldatura a punti. Questo studio ha proposto un sistema di inferenza neuro-fuzzy con due variabili di ingresso (spostamento massimo dell'elettrodo e velocità dell'elettrodo) e una variabile di uscita (corrente di saldatura). Lo schema neuro-fuzzy è mostrato nella figura 4.3.1.1. In primo luogo, i due input sono codificati in valori linguistici dall'insieme delle funzioni di appartenenza triangolari (vedi [13]). I due ingressi e un'uscita sono separati in sette regioni di appartenenza: {NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB} vedi articolo completo per maggiori dettagli [13]. I grafici "funzione di appartenenza" di input e output fuzzy sono mostrati in figura 4.3.1.6.

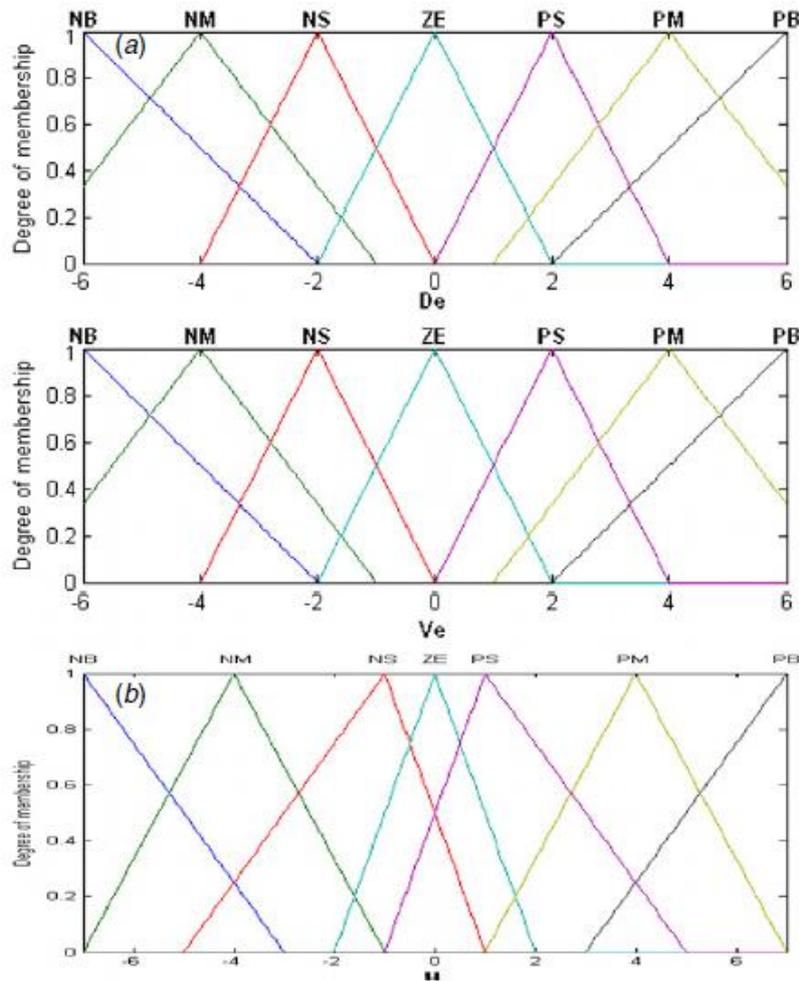


Figura 4.3.1.6 – Funzioni d'appartenenza sistema Fuzzy [13].

Il passo successivo è stato quello di calcolare il rispettivo grado di attivazione per ogni regola. Infine, il meccanismo di inferenza pesa ogni valore conclusivo della variabile d'uscita. Il segnale di errore tra il valore di uscita dedotto e il rispettivo valore desiderato è usato dal metodo di discesa del gradiente per regolare ogni conclusione dedotta delle regole. Per ottimizzare i parametri in un sistema fuzzy, si possono applicare algoritmi di addestramento di discesa a gradiente noti dall'area delle reti neurali [vedi [13]]. L'algoritmo di discesa del gradiente cambia i valori di conclusione per minimizzare una funzione oggettiva. Modificando il parametro del tasso di apprendimento e il numero di iterazioni di apprendimento eseguite dall'algoritmo, ogni conclusione viene aggiustata. La figura 4.3.1.7 mostra la curva di spostamento dell'elettrodo per un elettrodo usurato e senza azioni di controllo.

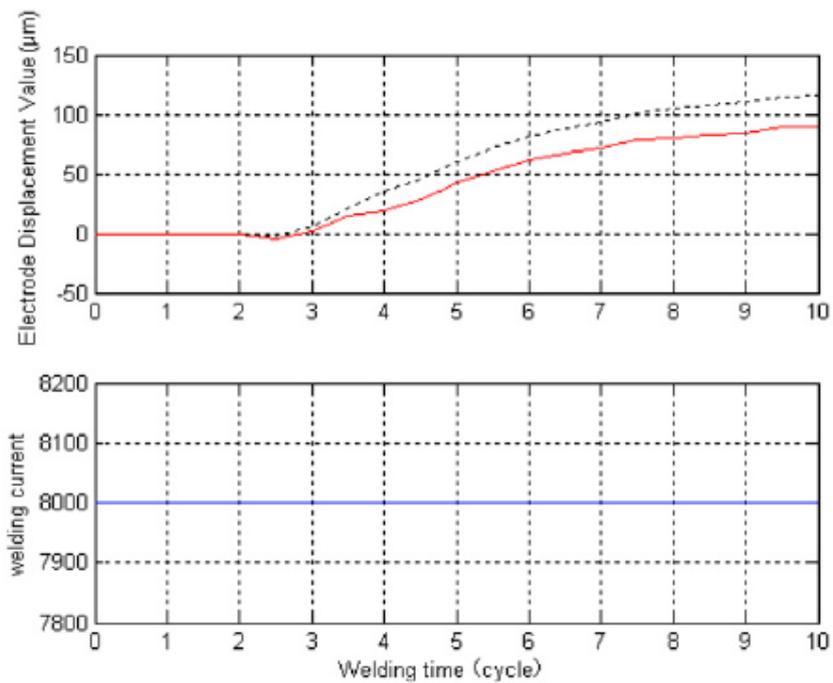


Figura 4.3.1.7 – Curva spostamento elettrodo usurato [13].

Con l'utilizzo di un sistema di controllo neuro-fuzzy, è stato possibile implementata una curva di corrente ottimale rendendo lo spostamento effettivo dell'elettrodo vicino allo spostamento dell'elettrodo desiderato. I risultati sono mostrati nella figura 4.3.1.8.

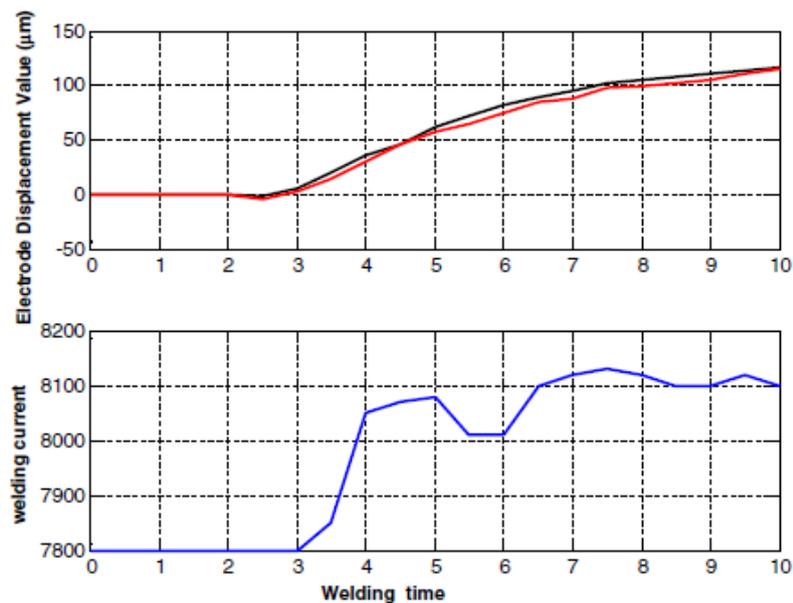


Figura 4.3.1.8 – Curva spostamento dell'elettrodo con corrente ottimizzata [13].

Ciò dimostra che il sistema proposto è in grado di compensare le variazioni di qualità causate dalle condizioni di usura degli elettrodi. Al fine di verificare ulteriormente l'efficacia del controllo dei sistemi neuro-fuzzy sviluppati, sono stati utilizzati esperimenti sulla durata della “vita degli elettrodi” per confrontare l'accuratezza del controllo. Osservando la figura 4.3.1.9, si può dedurre che la vita degli elettrodi, usando metodi di controllo neuro-fuzzy, può aumentare di più di 400 punti di saldatura.

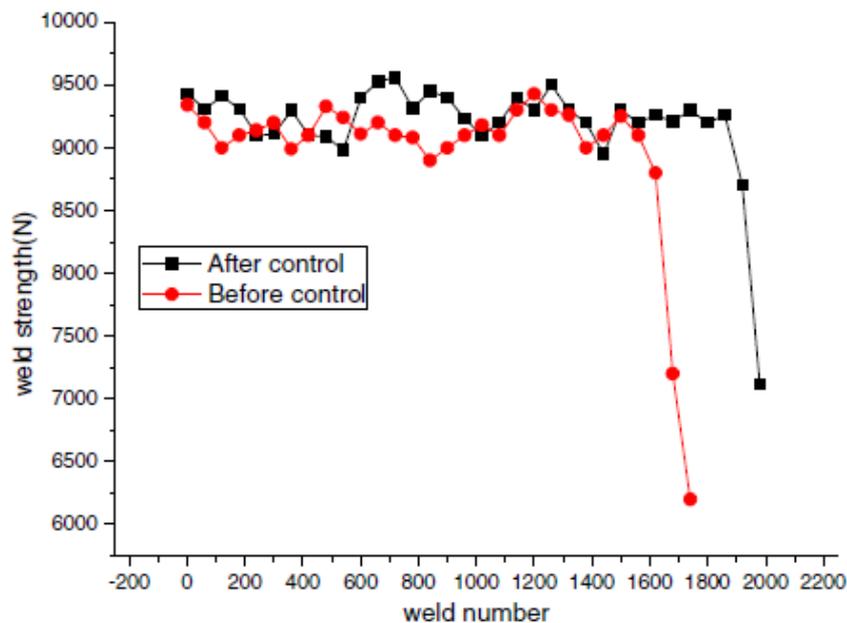


Figura 4.3.1.9 – Confronto durata elettrodi con e senza controllo [13].

4.3.2 Prestazioni del modello di regressione e della rete neurale artificiale nel monitoraggio della qualità della saldatura [14].

In questo studio, è stata condotta una ricerca sistematica per confrontare le prestazioni del modello di regressione e della rete neurale artificiale nella previsione del diametro dei “noccioli di saldatura” nei giunti saldati con la tecnica RSW, mediante il monitoraggio dell'impronta di potenza dinamica. Il materiale utilizzato è una lega di titanio TC2 avente un'altezza di 0,4 mm, mentre una bobina di precisione ad alta frequenza è stata utilizzata per unire le lamiere in lega di titanio. La curva dinamica della corrente di saldatura è stata ottenuta utilizzando la bobina Rogowski⁷, mentre la curva di tensione è stata rilevata da due cavi agganciati agli elettrodi, quello superiore e inferiore, durante l'intero processo di saldatura. Inoltre, sono state esaminate le variazioni del segnale di potenza di saldatura nel processo di saldatura ed analizzate le caratteristiche dei segnali di

⁷ https://it.wikipedia.org/wiki/Bobina_di_Rogowski

potenza per le diverse correnti di saldatura e le forze degli elettrodi. I segnali di potenza nei diversi tipi di giunti di saldatura variavano significativamente. Dal segnale di potenza, sono state estratte cinque caratteristiche atte a descrivere la forma della curva. L'analisi regressiva e la rete neurale, state utilizzate rispettivamente per classificare i giunti di saldatura in tre categorie: saldature difettose, saldature buone e saldature con "espulsione". Le prestazioni dei due modelli di previsione stabiliti sono stati confrontati.

5. Materiali e metodo

Il materiale utilizzato negli esperimenti condotti da, Dawei Zhao, Yuanxun Wang, Dongjie Liang, Mikhail Ivanova, nel loro articolo [14] è una lega di titanio di 0,4 mm di spessore. La lega di titanio TC2 è considerata un materiale da costruzione ideale per paratie e pannelli murali utilizzati in applicazioni ad alta temperatura. La sua composizione chimica e le sue proprietà meccaniche sono elencate all'interno dell'articolo [14]. Le lamiere sono state tagliate a una dimensione di 100 x 30 mm e successivamente immerse in soluzioni acide per alcuni minuti (vedi [14]). Le lamiere di base sono state saldate per sovrapposizione con una saldatrice a piedistallo a corrente alternata ad alta frequenza, avente elettrodi in lega di rame a punta piatta raffreddati ad aria. La corrente di saldatura, il tempo di saldatura e la forza dell'elettrodo controllano l'apporto di calore fornito alla zona di saldatura, mentre il tempo di tenuta è correlato alla velocità di raffreddamento del "nocciolo di saldatura". Quest'ultimo cresce rapidamente con l'aiuto della forza dell'elettrodo durante il tempo di attesa. I parametri di saldatura dettagliati, ed il layout utilizzato per ottenere le misure sono presenti in [14]. Inoltre, sono state eseguite delle prove di taglio sui provini analizzati e misurati i diametri dei "noccioli di saldatura" in prossimità delle sezioni di frattura dei provini, vedi [14]. Nello studio si è mostrato che la qualità delle giunzioni saldate presenta una correlazione con la dimensione dei "noccioli di saldatura", con il carico di picco e soprattutto con le modalità di guasto. In particolare, si è evidenziato l'esistenza di un diametro critico che indica il tipo di guasto predominante tra quello interfacciale (IF) e quello d'estrazione (PF). Proprio il diametro del "nocciolo di saldatura" si è rivelato l'indice chiave per determinare la qualità della saldatura.

6. Risultati e discussione

Nella figura 4.3.2.1 sono mostrate le curve di spostamento del carico tipiche dei provini sottoposti a trazione-taglio per i casi che indicano una buona saldatura, saldatura difettosa e saldatura con espulsione di materiale. Le modalità di guasto dei giunti di saldatura possono essere facilmente distinte osservando le loro parti di frattura. Nella modalità IF, il guasto è controllato dal taglio all'interfaccia delle lamiere. In modalità PF, la tensione di trazione intorno al "nocciolo di saldatura" controlla l'insorgere di un

guasto. I campioni di PF dimostrano una capacità di trazione vantaggiosa con una buona combinazione di resistenza e duttilità; di conseguenza, sono considerati buone saldature. I giunti di saldatura con espulsione presentano una tendenza al ribasso dell'energia di cedimento. È evidente che la minore energia è dovuta alla fragilità della frattura. Inoltre, l'espulsione è considerata uno dei difetti più comuni nel processo di saldatura RSW, e di solito è causata da surriscaldamento locale all'interfaccia pezzo-pezzo o pezzo-elettrodo. Gli spruzzi di metallo possono causare gravi danni all'ambiente di lavoro ed all'uomo.

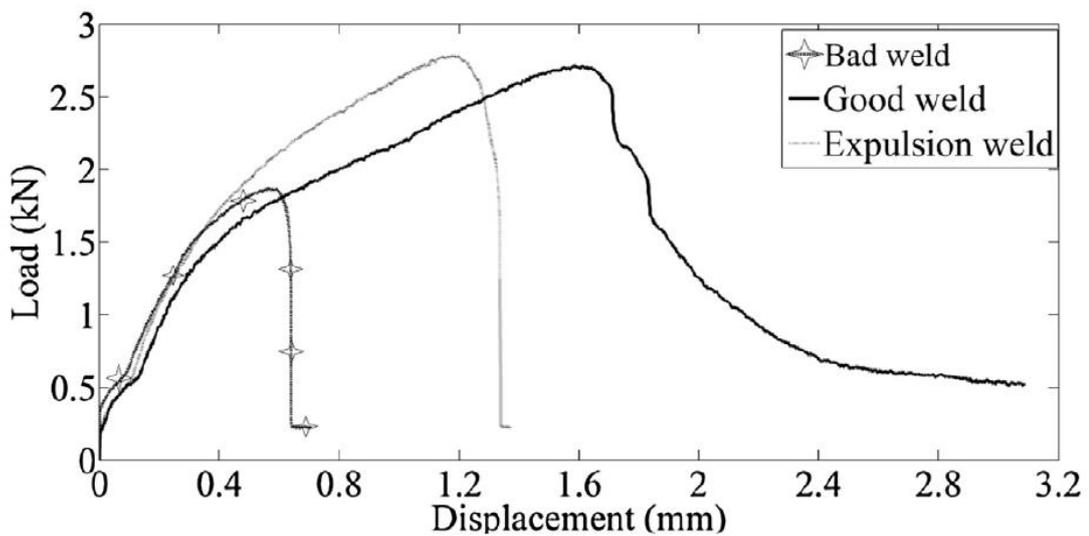


Figura 4.3.2.1 – Curve spostamento di carico per provini sottoposti a trazione [14].

In figura 4.3.2.2 sono mostrate tre tipi di giunzioni saldate dopo l'esecuzione di prove di trazione. La giunzione rappresentata in figura 3a è della tipologia IF, indicando così che si tratta di un “nocciolo di saldatura” sottostimato. Mentre la figura 3c presenta l'interfaccia di rottura a trazione della modalità PF. I metalli fusi espulsi sono osservati nella figura 3b. I risultati degli studi precedenti indicano che la maggior parte delle saldature con espulsione subiscono più facilmente una frattura fragile nella prova di trazione [14], quindi difetti di saldature con espulsione dovrebbero essere evitati. Sulla base delle curve di spostamento del carico, delle modalità di guasto e di espulsione, le qualità di saldatura possono essere classificate in tre livelli: saldatura difettosa, buona saldatura e saldatura di espulsione.

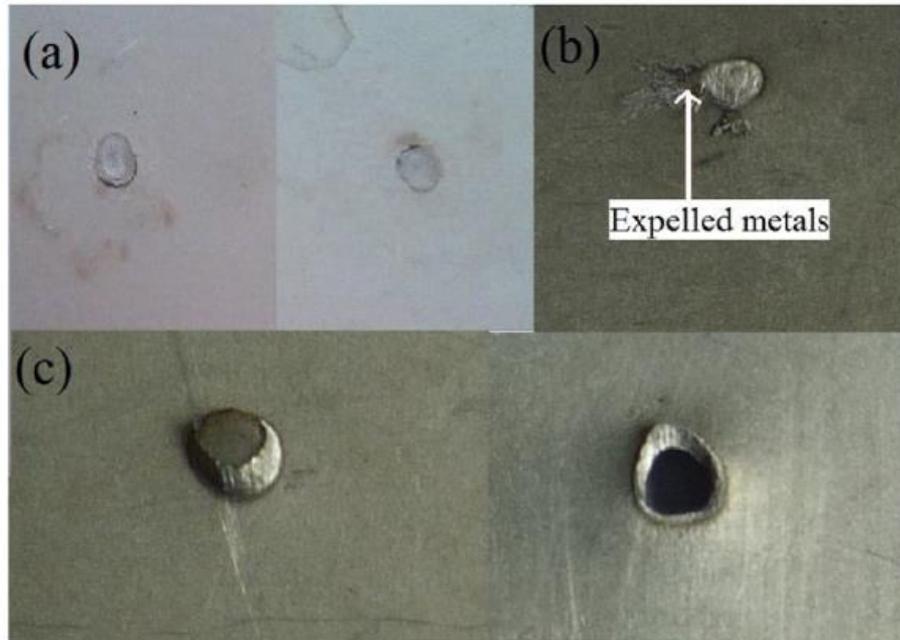


Figura 4.3.2.2 – Giunzioni saldate dopo prove a trazione [14].

7. Caratteristiche delle firme di potenza dinamica per diverse condizioni di saldatura

Nell'articolo [14], la corrente di saldatura e i segnali di tensione sono stati misurati ed elaborati per stimare il segnale di potenza. Quest'ultimo può essere calcolato moltiplicando la corrente per la tensione di saldatura:

$$P(t) = V(t) * I(t)$$

t è il tempo di saldatura, $P(t)$ è la potenza dinamica, $V(t)$ è la tensione, e $I(t)$ è la corrente di saldatura. Potenza che può anche essere scritta come segue:

$$P(t) = V(t) * I(t) = I^2(t) * R(t)$$

$R(t)$ rappresenta la resistenza dinamica nel processo di saldatura. Se, in quest'ultimo viene utilizzata una corrente di saldatura costante, come mostrato in figura 4.3.2.3, è facile dedurre che il segnale di potenza dovrebbe presentare una tendenza simile a quella della resistenza dinamica.

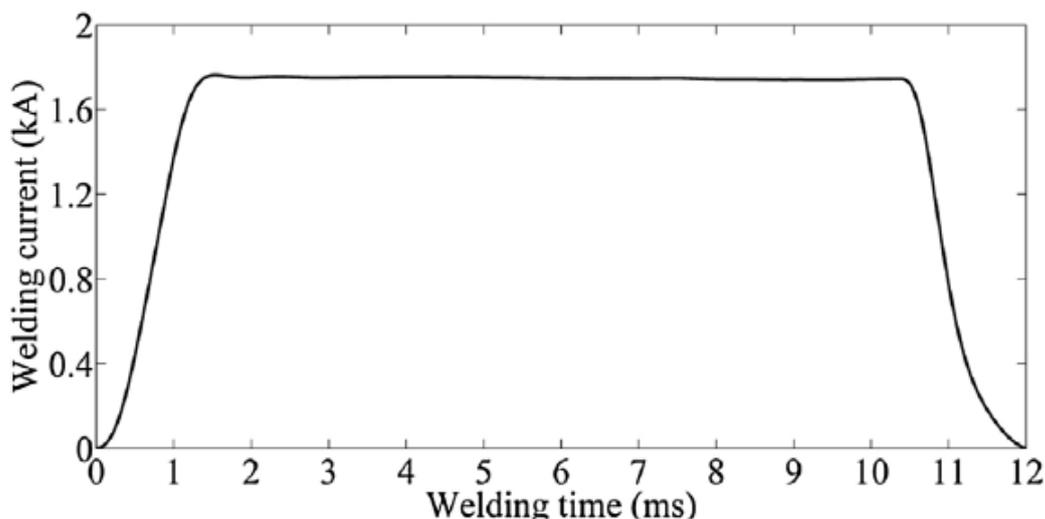


Figura 4.3.2.3 – Corrente di saldatura costante [14].

La figura 4.3.2.4, presenta il tipico segnale di potenza di una lega di titanio. Il valore di potenza aumenta sino a raggiungere un picco per poi avere una tendenza discendente fino a raggiungere il punto terminale.

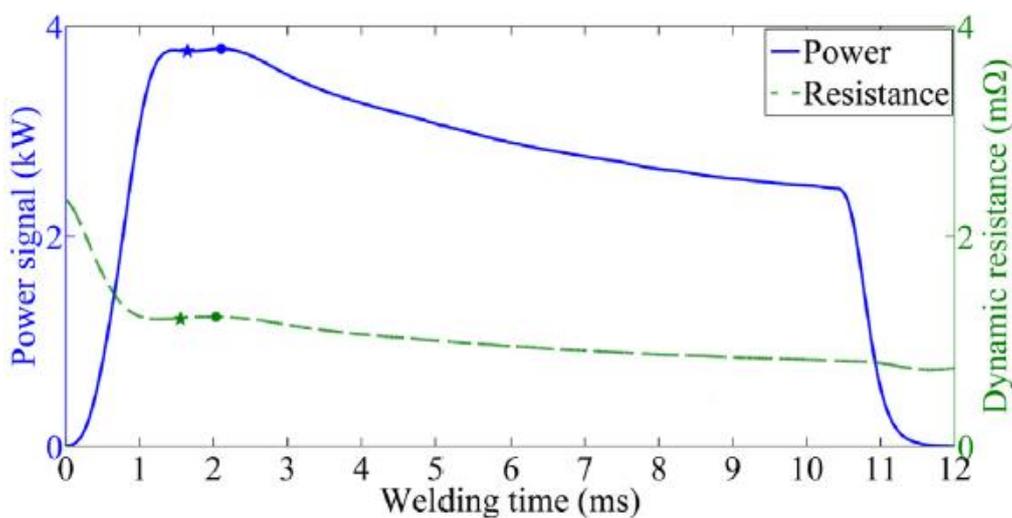


Figura 4.3.2.4 – Segnale di potenza in una lega di titanio [14].

Il trend mostrato dalla curva di potenza è attribuibile a specifici fenomeni fisici che si verificano nel processo di saldatura. La prima fase di aumento è imputabile ai seguenti fenomeni: la forza dell'elettrodo e il calore di saldatura, che causano un aumento dell'asperità superficiale, l'area di contatto cresce, per cui la resistenza diminuisce. Allo stesso tempo la corrente di saldatura aumenta significativamente e anche la potenza. Mentre la temperatura aumenta nella zona di saldatura, il metallo si fonde e si forma il

“nocciolo”. L'effetto della resistenza gioca un ruolo di primo piano mentre la corrente è costante in questa fase. Nella fase decrescente, l'aumento del diametro del “nocciolo” e la diminuzione della corrente di saldatura predominano sugli altri effetti. Il segnale di potenza presenta una tendenza al cambiamento simile a quella della resistenza dinamica. Inoltre, rispetto alla resistenza dinamica, la potenza ha un effetto maggiore sul calore fornito alla zona di saldatura, che è il fattore essenziale, determinante la formazione e la crescita del nocciolo. Tuttavia, il solo valore della resistenza è irrilevante per fornire il calore necessario alla saldatura, perciò deve essere utilizzata in combinazione con la corrente o la tensione di saldatura. La figura 4.3.2.5 mostra i segnali di potenza per correnti di saldatura che variano da 1,2 kA a 2,0 kA. Il tasso di aumento del segnale nei primi secondi aumenta costantemente insieme ai diversi livelli di corrente di saldatura. Anche il valore di picco del segnale di potenza aumenta con il crescere della corrente di saldatura.

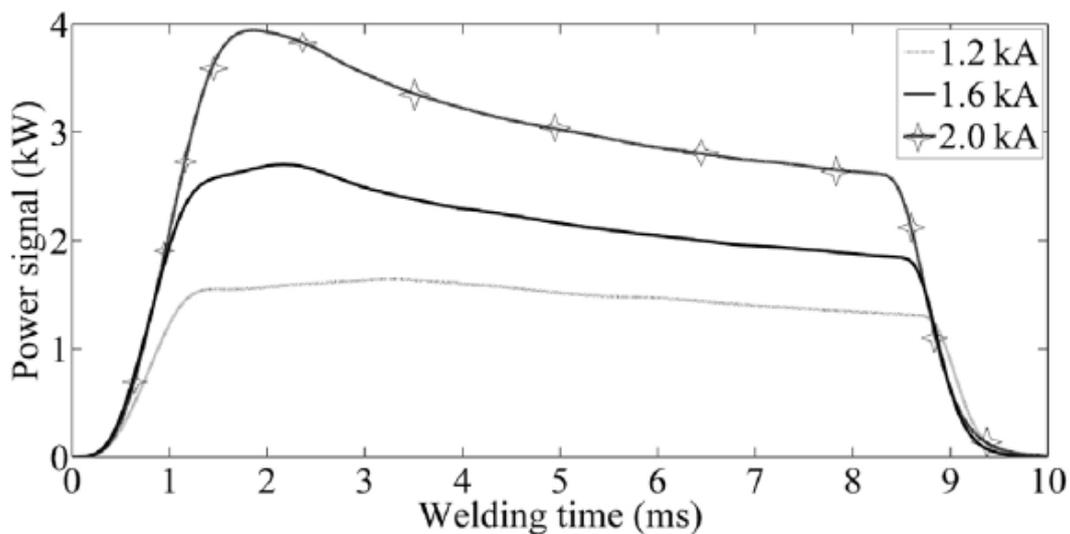


Figura 4.3.2.5 – Segnali di potenza al variare della corrente di saldatura [14].

Siccome il calore necessario alla saldatura è proporzionale all'apporto di calore dell'alimentatore, più alto è il livello di quest'ultimo, più veloce sarà il riscaldamento della saldatura e più breve sarà il tempo richiesto per la formazione del “nocciolo”. Nelle fasi successive, con l'aumentare della corrente, la curva di potenza diminuisce. Anche la forza dell'elettrodo ha un'influenza significativa sulla qualità della saldatura. Nella figura 4.3.2.6, sono riportate le curve di potenza per varie forze applicate, registrate dagli autori di questo studio, vedi [14].

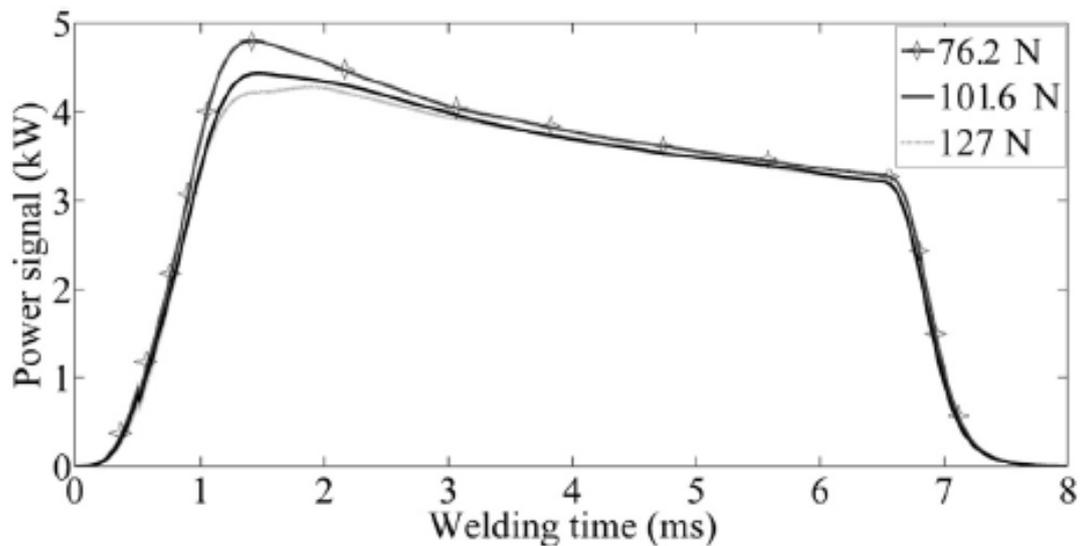


Figura 4.3.2.6 – Curve di potenza al variare della forza dell'elettrodo [14].

È possibile osservare, come con l'aumentare della forza dell'elettrodo, il valore di picco diminuisce, inoltre l'intera curva di potenza presenta una tendenza generale a spostarsi verso l'alto al diminuire della forza dell'elettrodo. Quest'ultimo è il fattore principale che influisce sulla superficie di contatto tra l'elettrodo e il pezzo. L'area della superficie di contatto aumenta all'aumentare dell'elettro-deformazione, mentre la lunghezza della via conduttiva diminuisce al crescere della forza dell'elettrodo, con conseguente minore valore di resistenza. Questo porta ad una riduzione del calore di saldatura. Gli esperimenti condotti in [14], sono stati eseguiti con lo stesso livello di corrente, quindi la zona di saldatura si riscalda più lentamente con una forza dell'elettrodo maggiore e all'aumentare di quest'ultima la formazione del "nocciolo" viene ritardata.

La figura 4.3.2.7 mostra tre livelli di qualità di saldatura con i relativi segnali di potenza. Si osserva che esistono notevoli differenze tra le curve. Il punto di picco della saldatura difettosa sembra essere meno evidente, indicando così una leggera fusione locale e "noccioli" di dimensione insufficiente. Il segnale di potenza per una buona saldatura presenta esattamente il tipico segnale di potenza. Si può notare come il tempo di picco per la buona saldatura avanza marcatamente rispetto a quello della cattiva saldatura. Il segnale di potenza, della saldatura con espulsione, diminuisce significativamente dopo aver raggiunto il punto massimo, a causa del metallo fuso che schizza fuori dalla zona di saldatura. Le firme di potenza sono molto diverse l'una dall'altra a causa delle loro diverse caratteristiche fisiche. Sono state selezionate cinque caratteristiche per individuare la traccia di energia. Le caratteristiche estratte comprendono il tempo di punta, la potenza di picco, la potenza di inflessione, le velocità relative e il calore di saldatura. Alcuni di questi sono schematizzati nella figura 4.3.2.8. Descrizione delle caratteristiche tratte dal segnale di potenza si possono trovare in [14].

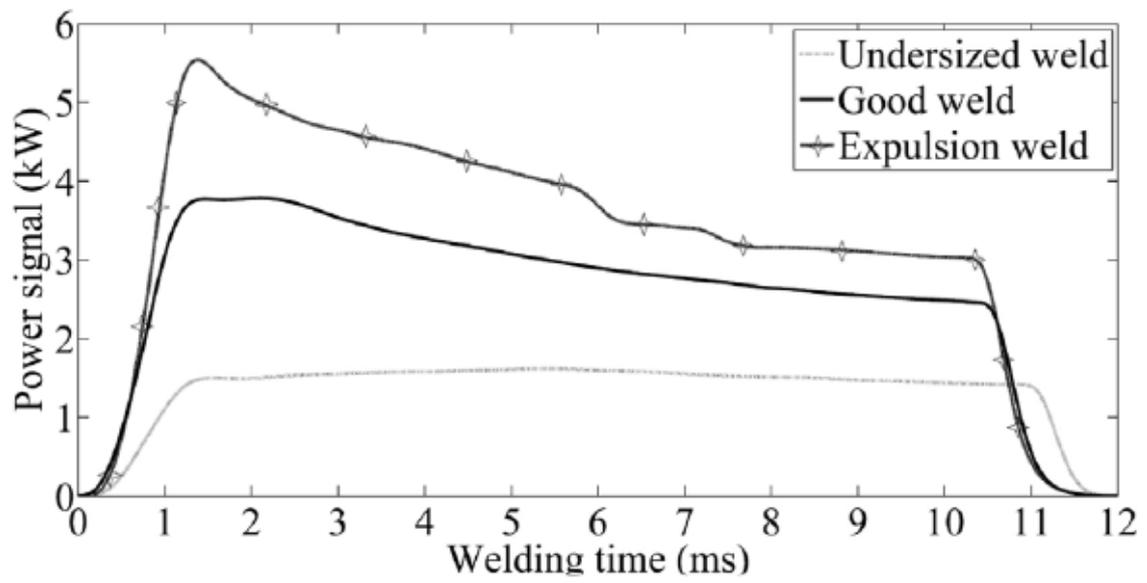


Figura 4.3.2.7 – Segnali di potenza per giunti di qualità differente [14].

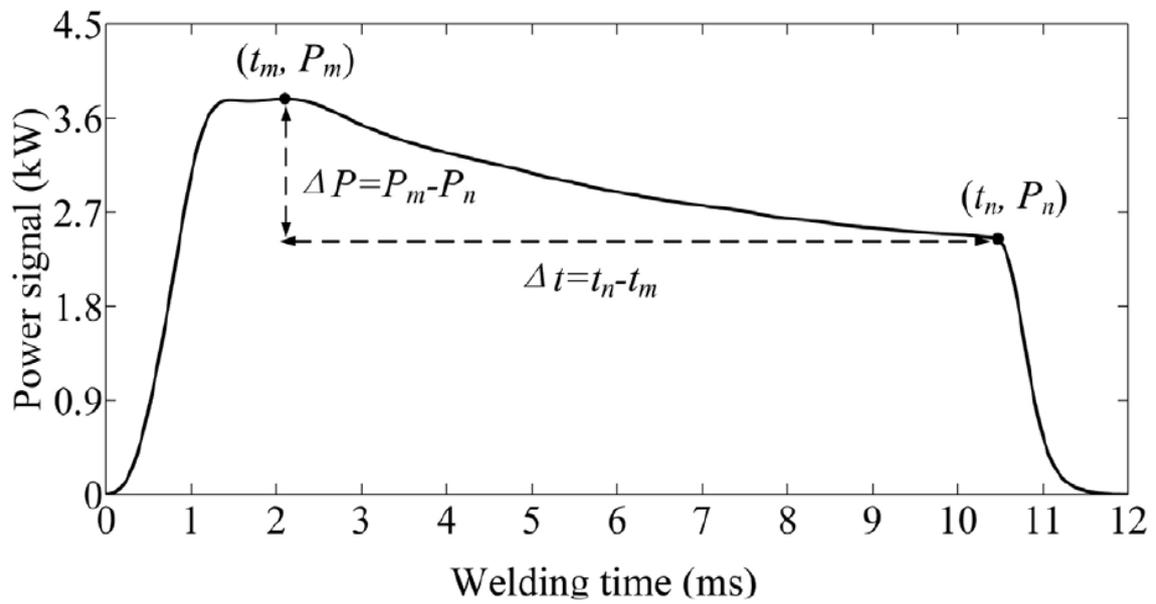


Figura 4.3.2.8 - Caratteristiche del segnale di Potenza [14].

Riportiamo una tabella riassuntiva per descrivere le caratteristiche estratte dal segnale:

Caratteristiche	Equazioni	Descrizione
P_m	-	Valore di potenza al picco.
P_n	-	Valore di potenza al punto di flesso.
ΔP	$\Delta P = P_n - P_m$	Variazione di potenza tra il punto di flesso e quello di picco.
P_s	$P_s = \frac{P_m}{\Delta P}$	Riduzione di potenza tra il punto di flesso e quello di picco.
Q	$Q = \int P(t) dt$	Valore dell'integrale del segnale di potenza durante il processo di saldatura.

8. Selezione di un modello accurato

Modello di regressione

I modelli di regressione comunemente usati comprendono la regressione lineare e non lineare. Il modello di regressione è impiegato per stabilire una relazione tra le variabili indipendenti (x_1, x_2, \dots, x_n) e le variabili dipendenti Y secondo la generica formula:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Il modello di regressione di secondo grado è il più utilizzato, ed è dato come segue:

$$Y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \sum_{i=1}^n \alpha_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1, 1 < j}^n \alpha_{ij} x_i x_j$$

dove α_i , α_{ij} , e α_{ii} sono i coefficienti da calcolare, ottenuti spesso con il metodo dei minimi quadrati. In questo articolo [14], le caratteristiche estratte dai segnali di potenza sono le variabili indipendenti, e il diametro del "nocciolo di saldatura" è la variabile dipendente. I coefficienti sono determinati con il metodo di regressione graduale. Quest'ultimo è un metodo statistico che può essere utilizzato per selezionare diverse variabili importanti per stabilire l'equazione di regressione. Utilizzando il metodo di regressione graduale, l'importanza di ciascun termine nel modello di regressione può essere facilmente rilevata in base al suo valore, vedi riferimenti contenuti in [14], per maggiori dettagli. In definitiva si è riscontrato che il modello di regressione utilizzato per calcolare il diametro del "nocciolo di saldatura", in base alle caratteristiche selezionate dal segnale di potenza, può essere espresso come segue:

$$D = 0.1596P_m + 5.1538P_s + 1.0963P_m P_s - 2.38315P_n P_s - 9.6121P_s^2 - 0.0007Q^2$$

Modello della rete neurale

Le reti artificiali sono considerate molto efficienti se applicate a problemi complessi, in quanto possono realizzare la linearità libera o la mappatura di funzioni non lineari. In questo articolo è stata utilizzata la rete neurale BP (*back propagation*), vedi [14]. Quest'ultima può apprendere e immagazzinare una grande quantità di relazioni e riuscire a fare una mappatura dei dati di input-output senza dover prima rivelare le equazioni matematiche per identificare le relazioni tra questi dati. Queste caratteristiche gli conferiscono alcune proprietà come l'auto-apprendimento, l'auto-adattabilità e una forte robustezza. In questo studio, è stata utilizzata una rete neurale BP per distinguere la complessa relazione tra le caratteristiche estratte nel segnale di potenza e il diametro del "nocciolo di saldatura".

La regola di apprendimento della rete neurale BP è il metodo di discesa a gradiente, che regola costantemente i pesi di rete e il valore di soglia, usando la propagazione posteriore per minimizzare la somma degli errori dei quadrati, per maggiori dettagli vedi [14]. Il numero di neuroni usato per lo "strato di input" è uguale a quello delle variabili indipendenti. I neuroni dello "strato nascosto" eseguono il *pattern matching* delle informazioni di input del processo e rispondono ai pattern di input, mentre ci sono uno o più punti nodali nello strato di output, che genera i dati di output. Nel caso in cui la rete neurale BP sia utilizzata per la predizione della dimensione del "nocciolo" sulla base del segnale di potenza, i parametri usati per lo "strato d'ingresso" comprendono l'intera gamma di caratteristiche estratte dal segnale di potenza dinamica. Per maggiori dettagli su questa tecnologia utilizzata vedi [14]. In figura 4.3.2.9 è rappresentata la struttura della rete neurale BP con uno strato nascosto. Il software MATLAB 2013a è stato impiegato per costruire il modello di rete neurale BP, vedi [14].

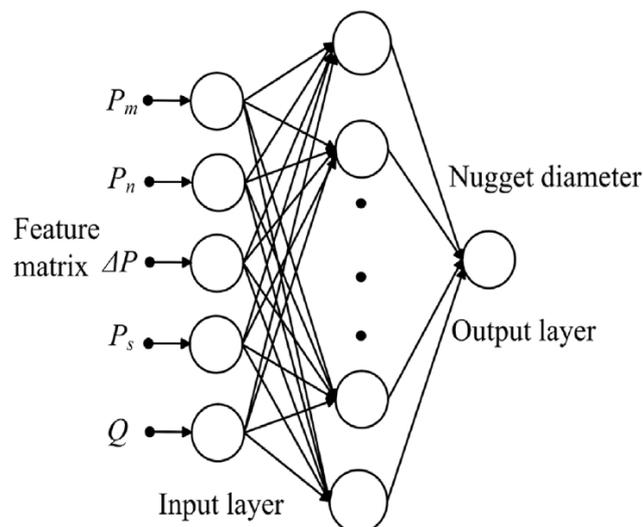


Figura 4.3.2.9 – Architettura rete neurale BP [14].

Dopo aver studiato la rete, [14] , è stata ottenuta la matrice dei coefficienti di ciascuna unità, che comprende gli strati di input, nascosti e di output. Regolando il peso e, calcolando il tasso di errore, modificando i parametri dei nodi nascosti, si sono ottenuti risultati ottimali nella procedura di apprendimento. Utilizzando i dati raccolti nell'addestramento della rete neurale, è stato definito un modello di rete neurale per valutare la qualità della saldatura.

9. Selezione di un modello accurato

Nello studio sono stati utilizzati 80 coppie di dati sperimentali per testare l'accuratezza dei modelli di predizione analizzati che utilizzano il segnale di potenza. I diagrammi a dispersione rappresentanti i diametri del "nocciolo" misurati rispetto a quelli previsti con il modello di regressione e con il modello di rete neurale BP sono rappresentati in figura 4.3.2.10 e utilizzati per verificare l'accuratezza di previsione di questi modelli.

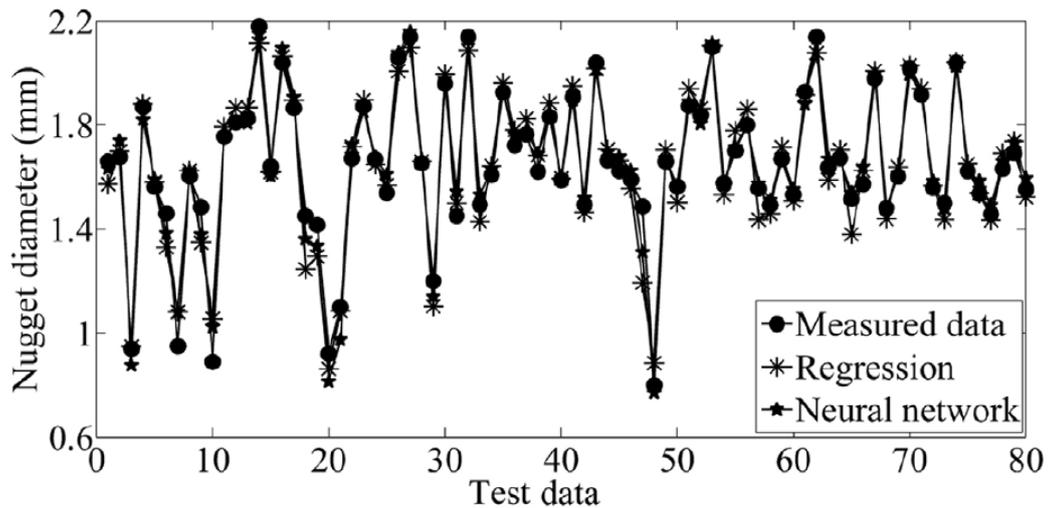


Figura 4.3.2.10 – Dimensioni previste ed effettive dei "noccioli" in base al modello di regressione e rete neurale [14].

Le prestazioni dei modelli sono state determinate in base ai loro errori e alla varianza degli stessi. La figura 4.3.2.11 presenta gli errori assoluti dei due modelli basati sui dati di convalida. I valori caratteristici statistici degli errori assoluti di ciascun modello sono riportati in [14]. Una delle ragioni principali per la superiorità delle prestazioni del modello di rete neurale BP è che esso svolge una migliore capacità predittiva rispetto al modello di regressione nell'applicazione reale, grazie alla sua capacità di mappatura casuale non lineare.

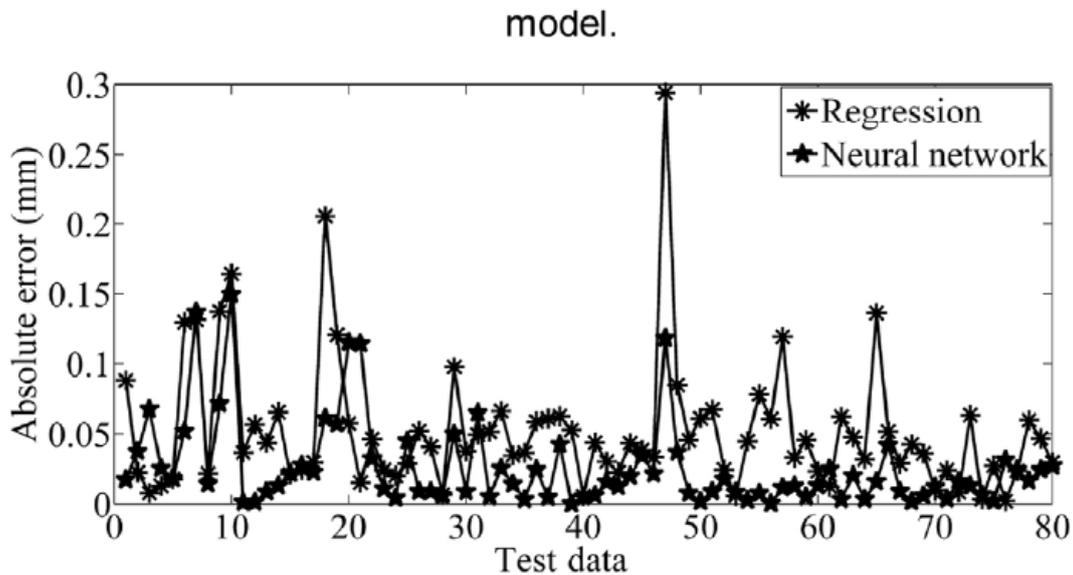


Figura 4.3.2.11 – Errori assoluti dei valori dei modelli usati per la convalida [14].

In conclusione, riportiamo l'iter estratto da quest'articolo [14]:

- Il segnale di potenza contiene informazioni utili per valutare la resistenza dinamica, quest'ultima identifica gli stati dei “nocioli di saldatura” nel processo di saldatura, oltre che influire in modo significativo sull'apporto di calore generato; si può quindi osservare che si tratta di un valore altamente correlato alla qualità della saldatura.
- Il segnale di potenza nel processo di saldatura viene analizzato, e vengono estratte cinque caratteristiche. Le caratteristiche estratte non solo forniscono informazioni sul segnale di potenza, ma riducono anche le possibilità di supervisione delle variazioni nel segnale.
- Il modello di regressione quadratica è stato illustrato sulla base dei risultati sperimentali utilizzando il metodo di regressione a gradino. Nel caso del modello di regresso polinomiale quadratico, l'analisi della varianza indica che P_m , P_n , P_s e Q sono molto significativi ($P < 0.05$), mentre il valore di ΔP non ha significato ($P > 0.1$), vedi [14].
- I risultati sperimentali dimostrano che, rispetto al modello di regressione quadratica che comprende l'uso di un'analisi di regressione graduale, una rete neurale artificiale può fornire risultati più accurati di previsione del diametro dei “nocioli di saldatura”. Inoltre, il metodo di regressione quadratico-polinomiale-graduato può fornire valori non precisi per alcuni punti per via di equazioni altamente non lineari.

5 Monitoraggio “usura elettrodo” mediante il segnale di spostamento dell’elettrodo.

In questo lavoro di tesi si è tentato di trovare un collegamento tra la curva di spostamento dell’elettrodo e l’usura di quest’ultimo. Il monitoraggio dell’usura dell’elettrodo, ricercato analizzando le caratteristiche trovate dal segnale “curva di spostamento dell’elettrodo”, risulta essere uno strumento molto potente in quanto ci consente di intervenire tempestivamente, per risolvere eventuali problemi, senza aspettare che quest’ultimi rechino danni al lavoro che si sta svolgendo. La saldatura a resistenza per punti è una tecnica molto utilizzata nei settori dove si lavorano grandi moli di pezzi prodotti in serie. Per esempio, basti pensare al settore automobilistico, dove la maggior parte dei lamierati presenti in un’auto viene proprio saldato con questo tipo di tecnica. Quindi, pensare di interrompere la linea di produzione per analizzare la qualità di una saldatura, risulta essere una procedura richiedente un forte dispendio di tempo oltre che di denaro. Fermare una macchina saldatrice, per valutare lo stato dell’attrezzatura o di una sua parte, come può essere l’utensile elettrodo, andando ad analizzare il giunto saldato per vedere se rispetta i requisiti di qualità, oppure osservando l’usura dello stesso utensile, sono tutte operazioni che se attuate contemporaneamente alle numerose macchine saldatrici presenti nelle grandi aziende, rendono ancor più l’idea di come ciò può provocare ritardi nella produzione con conseguenti perdite a livello economico. Da qui l’importanza di riuscire a capire quando l’utensile elettrodo si sta usurando, attraverso l’analisi indiretta di alcuni parametri, per intervenire tempestivamente alla sua sostituzione.

- Diagnostic Feature Designer

Nella prima parte riguardante l’analisi del segnale “spostamento elettrodo”, si è fatto uso di un’applicazione presente nel programma Matlab, parliamo dell’app “*Diagnostic Feature Designer*” (DFD), quest’ultima consente di sviluppare funzionalità e valutare potenziali indicatori di condizione, per la diagnosi e la prognosi, utilizzando un’interfaccia grafica multifunzione. L’applicazione opera su insiemi di dati. Un insieme è una raccolta di set di dati, creati misurando o simulando un sistema in condizioni diverse. Si parlerà anche di **membro**, ovvero di un sottoinsieme dell’insieme di dati generali, tenendo presente che ogni membro dell’insieme principale contiene lo stesso tipo di variabili.

Nel nostro caso, abbiamo analizzato un insieme di dati contenenti le curve dello spostamento dell’elettrodo, in particolare si è studiato l’andamento di 80 membri i quali rappresentano rispettivamente i segnali analizzati di 80 punti di saldatura scelti

campionando i 1242 totali. L'idea è di riuscire a vedere se con l'avanzare del numero di saldature, effettuate partendo da un elettrodo nuovo, la curva di spostamento di quest'ultimo si modifica seguendo una certa logica, e se tramite la variazione di questa curva sia possibile ricercare degli indicatori statistici per correlare l'andamento di questi con l'inevitabile usura dell'elettrodo che si ha con il passare del tempo.

L'analisi delle 1242 curve dello spostamento dell'elettrodo totali porterebbe a costi computazionali molto elevati, per cercare di ridurli si è pensato di prendere un campione di 80 punti di saldatura scelti intervallando il numero di saldature totali circa ogni 15 punti. Nella tabella sottostante (figura 5.1) è riportato il numero di saldatura effettiva a che membro dell'insieme corrisponde

1	1	21	339	41	645	61	951	membro saldatura equivalente
2	18	22	354	42	660	62	966	
3	33	23	369	43	675	63	984	
4	48	24	384	44	690	64	999	
5	63	25	399	45	708	65	1014	
6	78	26	414	46	723	66	1029	
7	93	27	432	47	738	67	1044	
8	108	28	447	48	753	68	1059	
9	123	29	462	49	768	69	1074	
10	138	30	477	50	783	70	1089	
11	156	31	492	51	798	71	1104	
12	171	32	507	52	813	72	1122	
13	186	33	522	53	828	73	1137	
14	201	34	537	54	846	74	1152	
15	231	35	552	55	861	75	1167	
16	246	36	570	56	876	76	1182	
17	261	37	585	57	891	77	1197	
18	294	38	600	58	906	78	1212	
19	309	39	615	59	921	79	1227	
20	324	40	630	60	936	80	1242	

Figura 5.1 – Membri utilizzati in DFD.

Le caratteristiche del segnale che analizzeremo forniscono metriche statistiche generali basate sul segnale che possono essere applicate a qualsiasi tipo di segnale, compreso un segnale di vibrazione media sincronizzata nel tempo (TSA). Cambiamenti in queste caratteristiche possono indicare cambiamenti nello stato di salute del sistema.

5.1 Descrizione macchina usata in sperimentazione

Nel seguente paragrafo riportiamo alcune informazioni sul macchinario usato in laboratorio per eseguire le saldature studiate in questo lavoro di tesi. Tali informazioni sono state reperite dal catalogo Tecna. È stata usata una saldatrice rettilinea a punti a proiezione a media frequenza 90 - 200 kVA, nello specifico l'articolo (II22000001) prodotto nel 2018. Quest'ultima, a differenza delle saldatrici tradizionali che usano un trasformatore di saldatura monofase, e la corrente di saldatura viene regolata da tiristori con la tecnica della parzializzazione di fase, usa nuove tecnologie. Nello specifico viene impiegato un inverter alimentato dalla linea trifase. Nell'inverter la corrente viene raddrizzata, filtrata da un banco di condensatori e convertita da un ponte ad IGBT in corrente alternata a media frequenza (1000Hz). Viene utilizzato uno specifico trasformatore di saldatura dotato di un raddrizzatore che eroga una corrente di saldatura continua. Nella figura 5.1.1, riportiamo uno schema del macchinario utilizzato.



Figura 5.1.1 – Macchina saldatrice utilizzata in laboratorio. [15]

La saldatrice a media frequenza, rispetto ad un saldatore tradizionale offre i seguenti vantaggi:

- Un carico ridotto sul servizio elettrico primario dell'impianto.
- Distribuzione equilibrata del carico sulle tre fasi.
- Nessun effetto dei materiali magnetici tra i bracci sulla corrente di saldatura.
- Costi di installazione ridotti.

Tra le ulteriori caratteristiche di questa macchina saldatrice elenchiamo le seguenti:

- Cilindro con stelo cromato per lavori gravosi a lunga durata.
- Componenti pneumatici esenti da lubrificazione.
- Discesa elettrodi senza pressione per messa a punto e servizio.
- Doppia corsa regolabile con comando a chiave.
- Filtro aria compressa e serbatoio integrati.
- Silenziatori per scarico aria compressa.
- Pedale elettrico a due stadi per il bloccaggio e la saldatura dei pezzi solo se correttamente posizionati.
- Trasformatore, inverter, piastre, porta elettrodi ed elettrodi, raffreddati ad acqua; trasformatore con avvolgimenti rivestiti in resina epossidica.
- interruttore di flusso che arresta il saldatore se l'acqua di raffreddamento non circola.
- Valvola di arresto del raffreddamento ad acqua a macchina spenta.
- Dispositivo per raffreddamento inverter con sonda di temperatura.
- Unità di controllo della saldatura a corrente costante.
- Inverter con ponte IGBT, raffreddato ad acqua con termostato di protezione.
- Pulsante di emergenza per l'arresto immediato della macchina.

Descrizione controllo della saldatura

Il TE700 (vedi [15]) è un'unità di controllo di saldatura a microprocessore per saldatori a resistenza dotati di tecnologia inverter. Il compito dell'unità di controllo della saldatura è quello di gestire i componenti della saldatrice, in particolare l'unità di IGBT che regola la corrente di saldatura. La TE700 è una centralina particolarmente versatile in quanto si adatta a diversi tipi di saldatrici. Oltre a quelle a punti e di proiezione, può anche essere installata su saldatrici che realizzano cordoni continui, e lavorare con corrente costante, potenza costante, tensione costante, regolazione dell'energia costante e in modalità dinamica. Il numero di ingressi e uscite può essere aumentato per adattare meglio l'unità di controllo di saldatura alle macchine automatiche.

L'unità di controllo può gestire fino ad un massimo di quattro diversi trasformatori di saldatura. È possibile memorizzare fino a 300 diversi programmi di saldatura, 255 dei quali vengono richiamati direttamente da un dispositivo esterno. Un identificatore alfanumerico può essere associato a ciascun programma per simulare la sua identificazione. Ogni programma comprende diversi parametri programmabili che descrivono il ciclo di lavoro. Oltre al normale ciclo di saldatura a quattro stadi, l'unità di controllo consente l'esecuzione di processi di saldatura con corrente di pre-saldatura, corrente post-saldatura, ed a impulsi.

Descrizione sensore di posizione

L'utilizzo del sensore di posizione consente di migliorare la verifica dei punti saldati. Tramite il quale, collegato all'unità di controllo è possibile:

- Misurare lo spessore tra gli elettrodi prima delle statistiche del processo di saldatura.
- Misurare il valore del rientro degli elettrodi tra i materiali durante il processo di saldatura.
- Impostare un limite di rientro al quale l'unità di controllo arresta il flusso di corrente (solo sulle unità di controllo TE700 e INVERTE1500R).

A seconda dell'unità di controllo a cui è collegato il sensore, è possibile impostare una finestra di limiti sia a livello di spessore che di rientranza.

Alle unità di controllo TECNA è possibile collegare il sensore di posizione lineare 23480 (figura 5.1.2), che consente di rilevare le variazioni di posizione ad una risoluzione di $2\mu\text{m}$. Questo sensore è dotato di uscita protocollo di comunicazione CANbasic, con velocità Baud pari a 500KBit/s compatibile con l'uscita CAN delle unità di controllo TECNA



Figura 5.1.2 – Sensore di posizione [16]

5.2 Descrizione segnale spostamento elettrodo

Nella figura 5.2.1, vengono riportate le curve relative allo spostamento dell'elettrodo per gli ottanti punti di saldatura ricavate tramite l'app DFD. L'app accetta dati di input sotto forma di set di dati di singoli membri o insiemi di dati di gruppo (multimember ensemble).

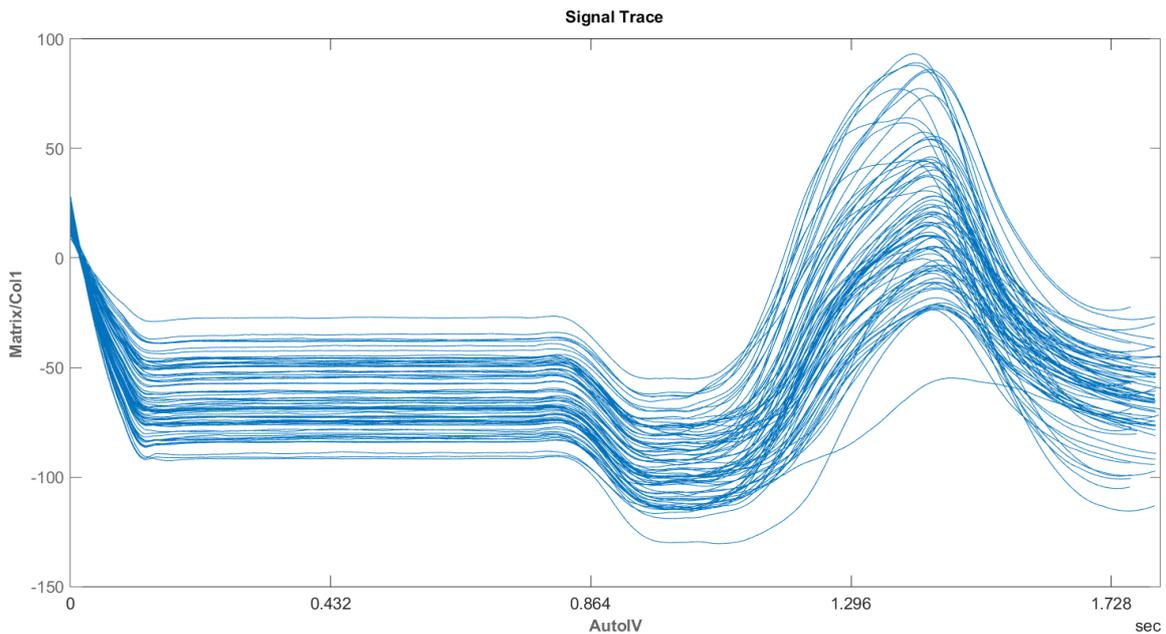


Figura 5.2.1 – Curve spostamento dell'elettrodo.

Nel nostro caso abbiamo Importato un insieme di dati multimember perché i dati sorgente sono combinati in un insieme di dati collettivi che include i dati per tutti i membri. Quindi prima di importare i dati da Matlab all'applicazione, sottoforma di (multimember ensemble), mi sono stati forniti degli insiemi di set di dati (.mat) formati rispettivamente da 80 sottoinsiemi, ognuno di questi contenente i valori acquisiti dai sensori (con una frequenza di 2.5×10^{-5} secondi) della curva spostamento elettrodo, vedi figura 5.2.2

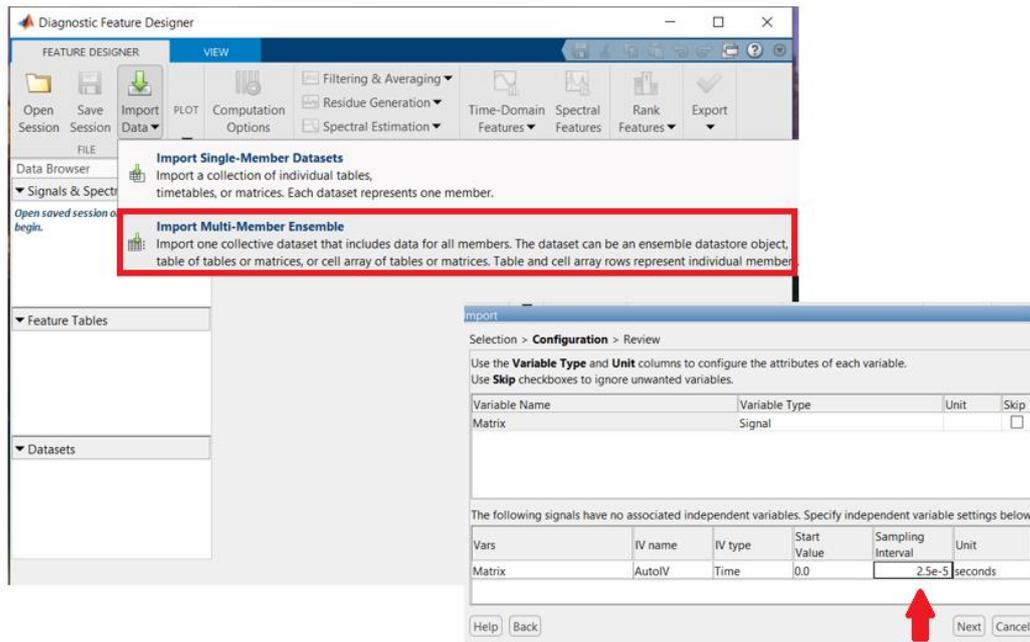


Figura 5.2.2 – Importazione dati nell'app DFD.

Osservando il grafico (figura 5.2.1), andiamo subito a fare una considerazione sul tempo di acquisizione dei dati che risulta essere di 1.732 [s], in realtà il tempo effettivo di saldatura, dove avviene il passaggio della corrente elettrica e solo una frazione di quello mostrato; la corrente inizia a circolare all'incirca ad 1 [s], per terminare intorno ad 1.5 [s]. La forza sugli elettrodi è applicata in due step temporali differenti, della durata di 800 [ms] e 200 [ms] rispettivamente. Proprio per questo, è possibile notare, nel primo secondo, due tratti discendenti delle curve dello spostamento dell'elettrodo seguiti da due rispettive fasi costanti, la prima maggiore della seconda a causa delle diverse durate temporali in cui la forza agli elettrodi viene applicata.

Soffermandoci nel tratto dove avviene l'effettivo passaggio di corrente, possiamo notare un fronte di salita delle curve, che si arresta in prossimità del punto massimo per poi scendere più o meno rapidamente a seconda del membro considerato. I valori dello spostamento dell'elettrodo, da considerare in valore assoluto sono dell'ordine dei μm . Visto l'eccessivo numero di curve plottate risulta difficile ricavare informazione sul segnale da una semplice osservazione grafica di quest'ultime.

Attraverso l'app (DFD), nella sezione relativa al "DATA PROCESSING" del segnale (vedi figura 5.2.3) è stato possibile ricavare, tramite l'uso di opportuni filtri atti proprio al processamento del segnale, la curva di spostamento massimo, minimo e medio (vedi figura 5.2.4) tra le 80 curve totali mostrate precedentemente.

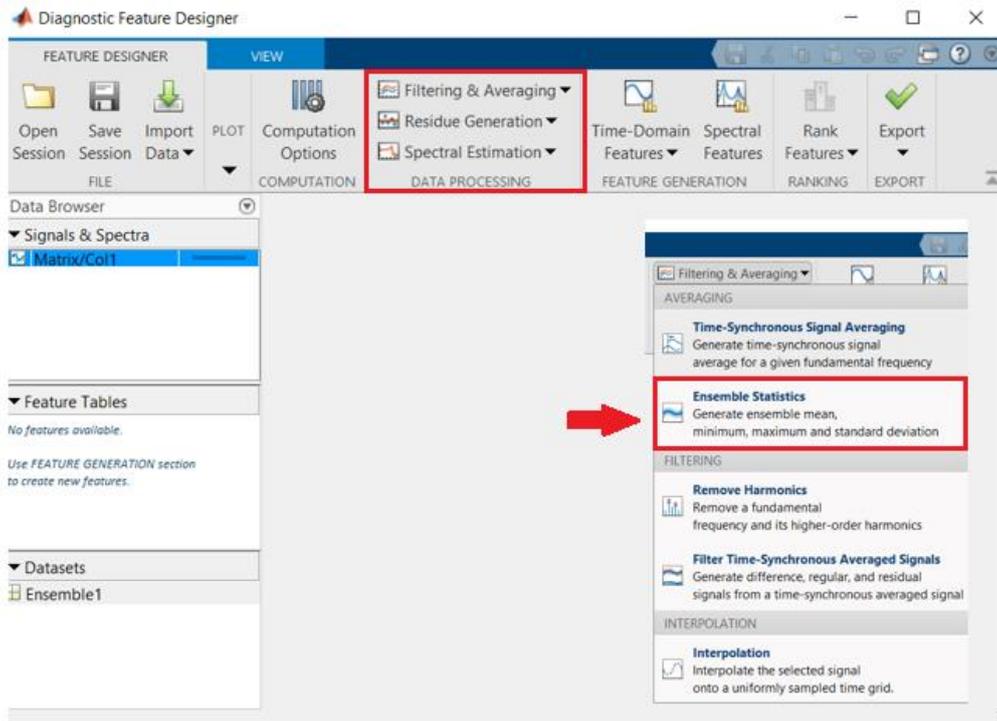


Figura 5.2.3 - Data processing DFD

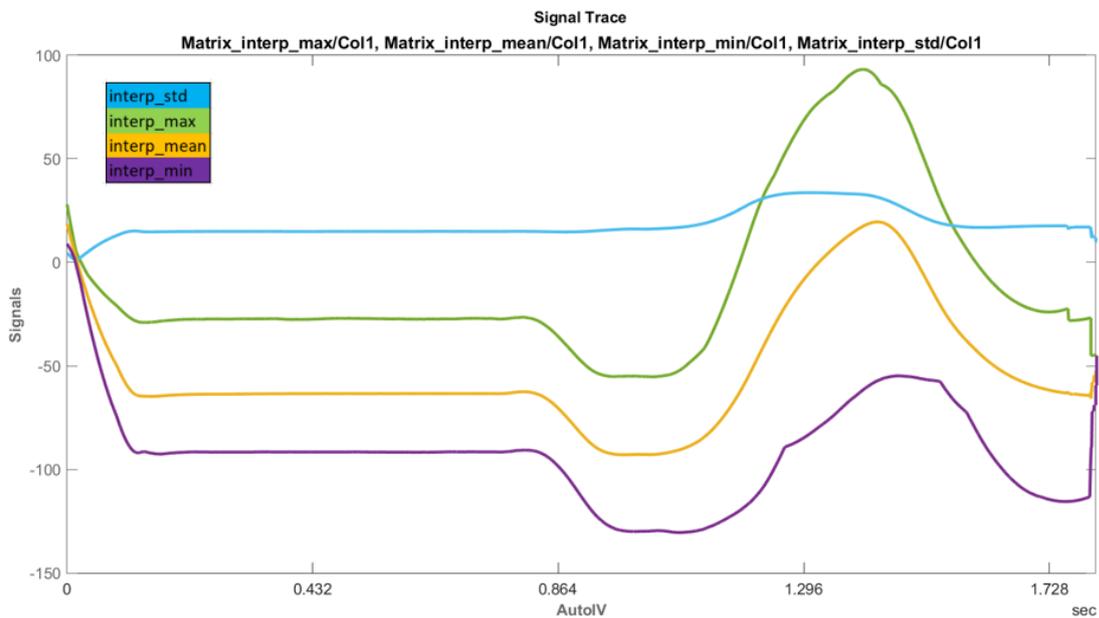


Figura 5.2.4 – Curve spostamento dell'elettrodo max/min/mean.

Osservando il grafico di figura 5.2.4, risulta subito evidente come la curva relativa allo spostamento dell'elettrodo massima (curva verde), sia caratterizzata da un valore di picco maggiore rispetto a quella minima (curva viola), valore di picco che in quest'ultima si trova ad un tempo leggermente superiore rispetto a quello relativo alla curva di

massimo spostamento. Inoltre, dato che la curva di spostamento massima è riferita al membro 1 e quella di minimo spostamento riferita al membro 69, quindi uno degli ultimi tra gli 80 totali, potremmo pensare che esista una qualche correlazione tra l'usura dell'elettrodo e il cambiamento della curva relativa al suo spostamento.

5.3 Estrazione caratteristiche da segnale di spostamento con DFD

Nel paragrafo precedente, osservando graficamente le curve di spostamento dell'elettrodo riferite agli 80 punti di saldatura, con le considerazioni su fatte, si è ipotizzata l'esistenza di una qualche relazione tra la variazione della curva di spostamento e l'usura dell'elettrodo. Per ricavare informazioni di tipo quantitativo l'app (DFD) permette di identificare opportuni indicatori di condizione, i quali sono da ricercarsi nei dati del sistema, il cui comportamento può variare in modo prevedibile man mano che il sistema si degrada. Un indicatore di condizione può essere qualsiasi caratteristica utile per distinguere il funzionamento normale da quello difettoso o per prevedere la vita utile residua, nel nostro caso dell'elettrodo.

Nella sezione "FEATURE GENERATION" dell'app (vedi figura 5.3.1), andando nella sezione relativa al dominio del tempo, è possibile estrapolare delle caratteristiche dal segnale spostamento elettrodo. In questo capitolo riporteremo solo quelle che hanno mostrato dei valori positivi per una possibile predizione dell'usura dell'elettrodo.

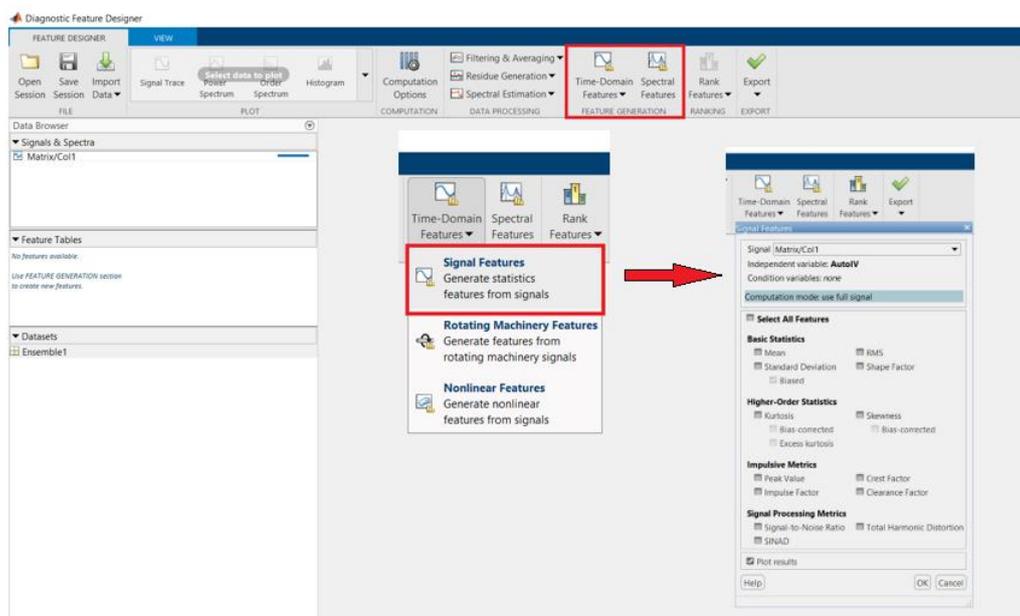


Figura 5.3.1 – Feature Generation in DFD

- Statistiche base

Le statistiche di base includono media, deviazione standard, quadratura media (RMS) e fattore di forma. Tutte queste statistiche possono essere previste per valutare come un difetto deteriorante invade sul segnale nominale. Nello specifico ci soffermeremo sulla deviazione standard

La **deviazione standard** o scarto quadratico medio, è un indicatore di dispersione di tipo statistico, in particolare fornisce una stima della variabilità di una popolazione di dati o di una variabile casuale⁸. Con questo indicatore è possibile esprimere la dispersione dei dati attorno ad un indicatore di posizione, per esempio la media aritmetica o simili. Per un vettore di variabile casuale A, composto da N osservazioni scalari la deviazione standard è definita come:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |A_i - \mu|^2}$$

Dove μ è la media di A

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i$$

Nel nostro caso il vettore delle variabili casuali A è rappresentato da un singolo membro dell'insieme, e le N osservazioni scalari sono i valori acquisiti dal segnale di posizione, rispettivamente per ogni membro. Quindi l'app calcola la caratteristica deviazione standard per ogni membro; visualizzando i risultati sotto forma di diagramma a dispersione, otteniamo il grafico mostrato in figura 5.3.2

⁸ Definizione presa da Wikipedia – Scarto quadratico medio

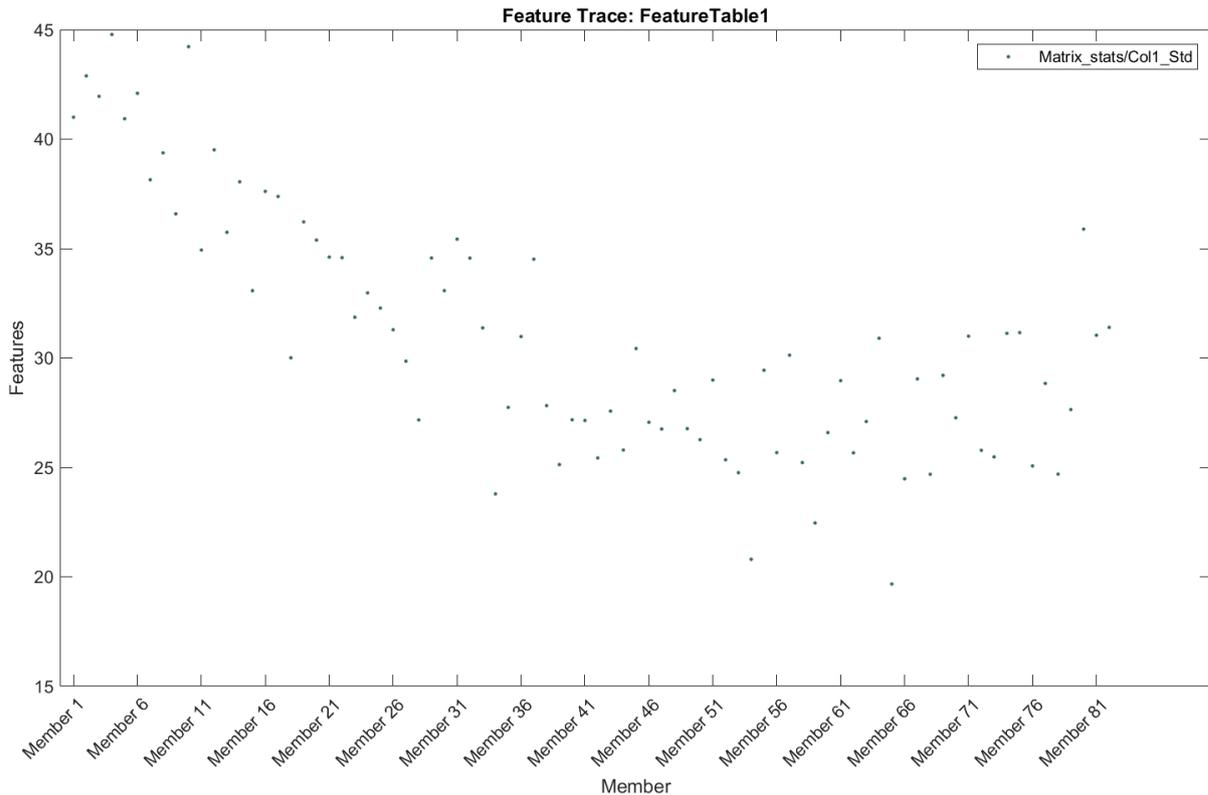


Figura 5.3.2 – Valori di deviazione standard per gli 80 membri.

Osservando il grafico (figura 5.3.2), che riporta la Features estratta “Deviazione standard” in funzione dei membri, rappresentanti i punti di saldatura analizzati; è possibile notare come i primi membri presentano i valori maggiori, valori che tendono a diminuire con i membri successivi. Più nello specifico possiamo osservare che nel primo tratto del grafico, che va dal primo membro fino all’incirca al quarantacinquesimo, i valori di deviazione standard hanno un andamento mediamente discendente, tendenza che si stabilizza ad un certo punto, per poi proseguire con valori che oscillano mediamente in un range costante. Questo andamento ci potrebbe far pensare, che nei membri dove avviene il cambiamento della caratteristica estratta, ci possa essere un collegamento con l’usura dell’elettrodo, associato ad una variazione delle curve dello spostamento dell’elettrodo. L’osservazione di una singola caratteristica del segnale non basta a giustificare quanto supposto nelle righe precedenti, infatti nelle pagine successive mostreremo altre caratteristiche estratte utilizzate per rafforzare l’ipotesi su citata.

- **Statistiche di ordine superiore**

L'app DFD ci permette di calcolare altri tipi di statistiche, estratte dalle curve dello spostamento elettrodo, chiamate di ordine superiore. Di seguito mostreremo le formule usate dall'applicazione per il calcolo di questi indicatori, non soffermandoci troppo nello specifico sulla teoria che sta alla base di questi. L'uso di quest'app, che sfrutta un'interfaccia grafica per estrapolare queste caratteristiche, quindi molto intuitiva da usare, è stata adoperata proprio per fare una prima analisi, delle caratteristiche estratte associate al segnale spostamento dell'elettrodo. Come vedremo, nella parte successiva del mio lavoro di tesi, si è passato allo scrivere script Matlab per confermare i risultati ottenuti con l'app, e nell'aggiungere nuove caratteristiche che si rileveranno dare informazioni utili alla nostra trattazione.

Le statistiche di ordine superiore forniscono informazioni sul comportamento del sistema attraverso il quarto momento (Curtosi) e il terzo momento (Asimmetria) del segnale. Significato del momento in statistica non è stato approfondito in questo lavoro di tesi (per approfondimenti vedere)⁹.

- La **Curtosi** rappresenta la lunghezza delle code di una distribuzione del segnale (vedi figura 5.3.3) o equivalentemente quando è incline ad un segnale anomalo. Lo sviluppo di difetti, nella nostra analisi l'insorgere dell'usura nell'elettrodo, può aumentare il numero di valori anomali e quindi aumentare la metrica della Curtosi. I valori di quest'ultima sono uguali a tre per una distribuzione di tipo normale. La "**Curtosi in eccesso**" sposta i valori di tre, per fare in modo che il valore della caratteristica sia zero per una distribuzione normale. In particolare, parleremo di curva NORMOCURTICA quando il valore dell'indice di Curtosi è zero, rispettivamente LEPTOCURTICA o PLATOCURTICA quando l'indicatore è maggiore o minore di zero (vedi figura 5.3.3).

La Curtosi (nota anche come kurtosi, dal greco κυρτός), nel linguaggio della statistica rappresenta un allontanamento dalla normalità distributiva, rispetto alla quale si verifica un maggiore appiattimento (distribuzione platocurtica) o un maggiore allungamento (distribuzione leptocurtica)¹⁰.

⁹ [https://it.wikipedia.org/wiki/Momento_\(probabilit%C3%A0\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Momento_(probabilit%C3%A0))

¹⁰ Definizione presa da Wikipedia – Curtosi.

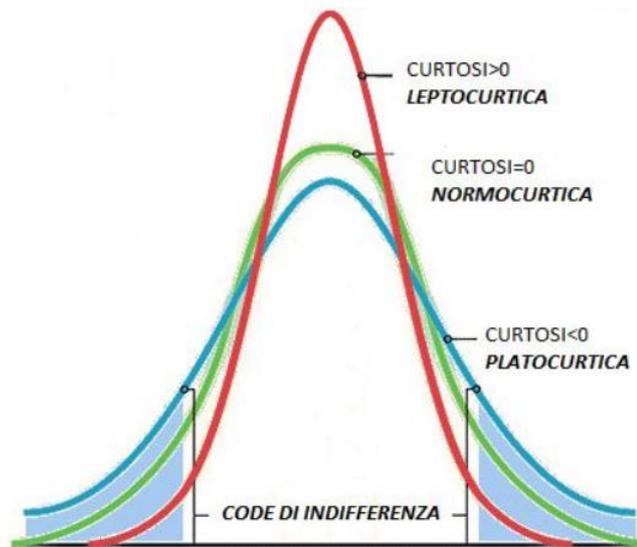


Figura 5.3.3 – Distribuzione valori al variare dell'indice di Curtosi. [17]

L'applicazione calcola l'indice di Curtosi per ogni membro tramite la seguente formula:

$$x_{Kurt} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right]^2}$$

Anche in questo caso N rappresenta il numero di valori contenenti in ogni membro, x_i è il generico elemento mentre \bar{x} è il valore medio tra i valori del membro.

Nel grafico seguente (figura 5.3.4), vengono mostrati i vari indici di Curtosi calcolati dall'app per gli 80 membri a disposizione. Il grafico a dispersione in giallo e rappresentativo della Curtosi in eccesso ovvero vengono traslati, come su citato, i valori di una quantità pari a tre. Per le osservazioni su questo grafico a dispersione, ci soffermeremo su quello della Curtosi in eccesso. Le considerazioni che faremo varranno anche per l'andamento della caratteristica estratta dal segnale relativa all'indice di Curtosi generale (valori viola nel grafico). Osservando l'andamento dei primi punti del grafico, si evince che questi hanno prevalentemente un valore dell'indice di Curtosi maggiore di zero, cosa non vera andando ad analizzare la seconda parte del grafico. Infatti, si può notare che dal membro numero 45 in poi i valori di Curtosi si abbassano, diventando predominanti quelli negativi, inoltre la variazione di questi indici risulta

oscillare in un range più ampio rispetto a quello che si può osservare nel primo tratto. Cosa interessante da sottolineare è che anche in questa caratteristica del segnale estratta, così come per la deviazione standard, si osserva una variazione del trend del segnale che si presenta all'incirca allo stesso momento, ovvero nei punti di saldatura rappresentati dal membro 45 in poi.

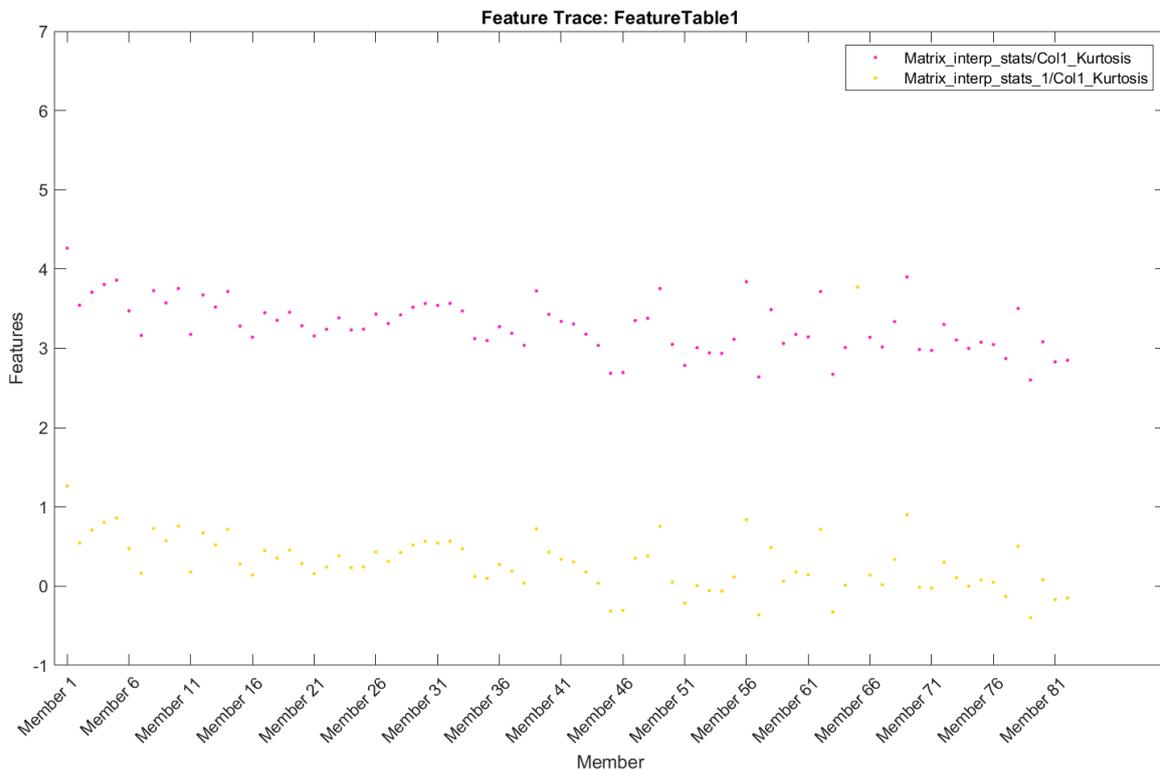


Figura 5.3.4 – Indici di Curtosi per gli 80 membri.

- **L'indicatore di asimmetria (Skewness)**, ci mostra come può variare la distribuzione dei valori, ricavati del segnale spostamento elettrodo, all'interno di ogni membro. I guasti, o anomalie presenti, possono influenzare la simmetria della distribuzione e quindi aumentare il livello di asimmetria della stessa. In figura 5.3.5, è riportata in maniera schematica la variazione della distribuzione dei valori che si hanno al modificarsi del valore dell'indice di asimmetria, quest'ultimo può essere uguale, minore o maggiore di zero. Nel primo caso si ha una distribuzione normale dei valori, nei restanti casi rispettivamente si hanno curve spostate a sinistra o a destra, tanto più asimmetriche quanto il valore si discosta dallo zero.

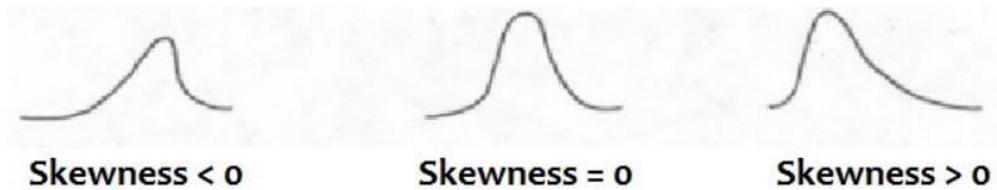


Figura 5.3.5 – Distribuzione valori al variare dell'indice di asimmetria. [17]

Indicatore che viene calcolato per ogni membro dell'insieme con la seguente formula:

$$x_{skew} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right]^{3/2}}$$

Anche in questo caso N rappresenta il numero di valori contenenti in ogni membro, x_i è il generico elemento mentre \bar{x} è il valore medio tra i valori del membro. Il grafico mostrato in figura 5.3.6, è relativo all'indice di asimmetria, caratteristica estratta dal segnale spostamento elettrodo con l'app DFD. Anche questo grafico a dispersione conferma i risultati precedentemente osservati, si può notare un cambio di trend del segnale in prossimità del membro numero 45, cosa osservata anche in precedenza. I valori dell'indice di asimmetria, presentano tutti dei valori maggiori di zero, valori che sono più elevati per i membri riferiti alle prime saldature, per poi andare via via diminuendo con il passare del tempo. Ricordiamo che l'aumentare del membro considerato, è sinonimo di un aumento del tempo, in quanto corrisponde ad un punto di saldatura realizzato con elettrodo che si sta usurando, proprio per via del maggior tempo in cui esso è impiegato. Tornando all'andamento della curva, dopo il primo tratto fortemente discendente, con valori che passano dal 1.5 per i primi membri allo 0.7 per i membri rappresentativi dell'intorno numero 45, si osserva una rapida variazione della tendenza, con i valori degli indicatori che oscillano in un intervallo che risulta essere mediamente costante dal membro 45 al finale, quindi range di variazione dell'indicatore molto più contenuto, se paragonati al primo tratto.

N.B. Si possono alcuni notare valori, che si discostano dal trend generale trovato, questo può essere causato da possibili disturbi verificati nel momento dell'acquisizione dati.

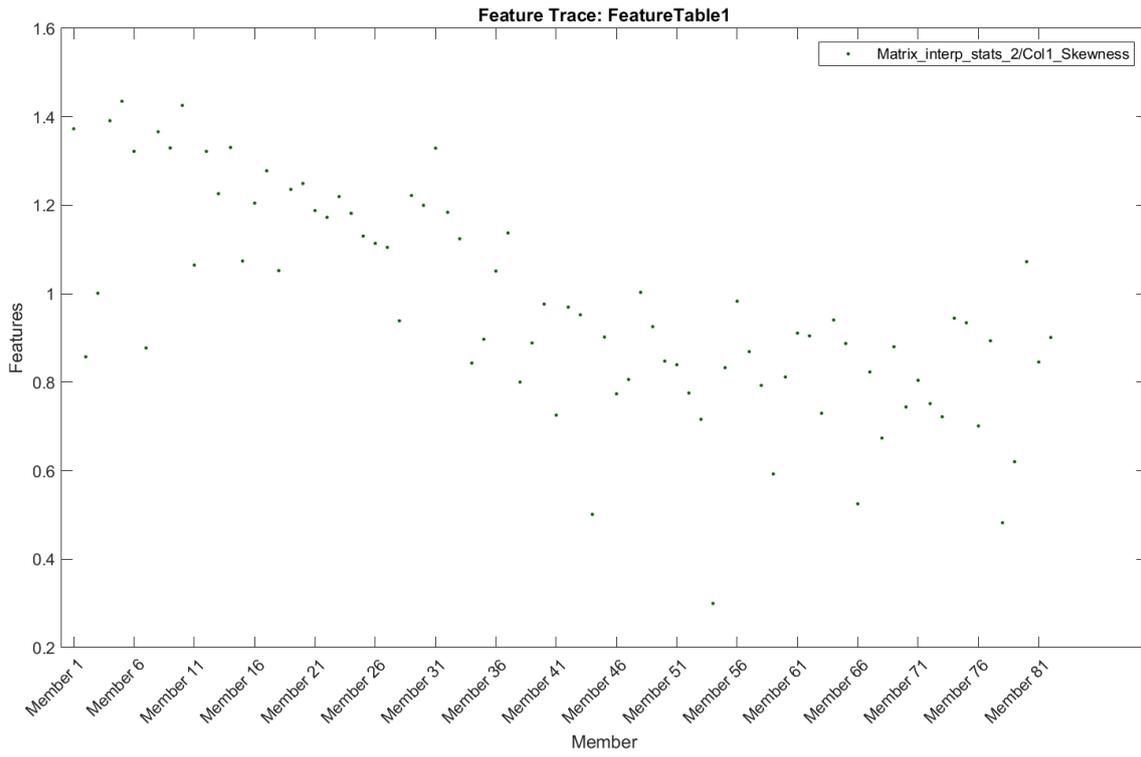


Figura 5.3.6 – Indice di asimmetria per gli 80 membri

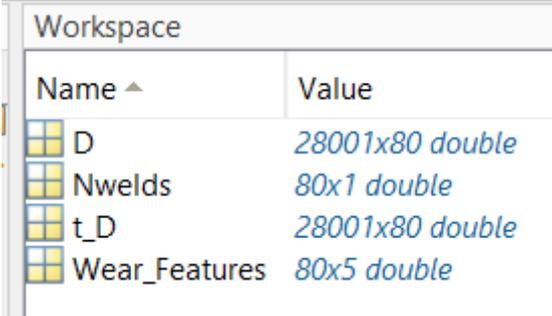
5.4 Estrazione caratteristiche dal segnale “spostamento elettrodo” con Matlab.

L'estrazione delle caratteristiche dal segnale “spostamento elettrodo”, mediante l'app DFD, per ricercare possibili indicatori utilizzabili nel monitoraggio dell'usura elettrodo è stato solo uno degli step del nostro lavoro di tesi. L'uso dell'app ci è servito per fare una prima “scrematura” sul segnale relativo allo spostamento dell'elettrodo; abbiamo diagrammato le curve dello spostamento dell'elettrodo relative agli 80 punti di salatura analizzati, siamo riusciti a tracciare la curva riguardante lo spostamento massimo, come quella relativa al minimo, con tutte le considerazioni del caso esaminate nel paragrafo precedente. Per confermare quanto trovato si è passati alla scrittura di script Matlab, per estrapolare ulteriori caratteristiche dal segnale “spostamento elettrodo” per confermare quanto trovato con l'app DFD.

N.B. script allegati al fondo tesi (vedi appendice).

5.4.1 Plot segnale spostamento elettrodo

Le analisi che da qui in poi mostreremo, verranno eseguite su una frazione della curva spostamento elettrodo precedentemente analizzata con l'app (DFD). In particolare, considereremo solo l'intervallo temporale in cui vi è il passaggio della corrente elettrica (0.5 s), allungato come vedremo di un tempo di 0.2 s per avere un andamento più chiaro delle curve diagrammate. Per procedere con queste analisi, mi sono stati forniti i dati relativi alle curve dello spostamento dell'elettrodo in formato (.mat) opportunamente processati tramite la funzione *Smoothdata*¹¹ di Matlab, quest'ultima uniforma i dati utilizzando un filtro a media mobile. Dati che contengono le seguenti informazioni:



Workspace	
Name ▲	Value
D	28001x80 double
Nwelds	80x1 double
t_D	28001x80 double
Wear_Features	80x5 double

Figura 5.4.1.1 – Dati Matlab

¹¹ Vedi funzione *Smooth* in MathWorks [23].

- **D:** racchiude i dati dello spostamento dell'elettrodo per gli 80 punti di saldatura analizzati; per ogni punto i sensori mi restituiscono 28001 misurazioni. Il tempo di acquisizione totale è di 700 ms.
- **t_D:** tempo corrispondente per il segnale di spostamento dell'elettrodo.
- **Nwelds:** rappresenta un vettore contenente il numero di saldatura corrispondente per cui è stata eseguita l'ispezione.
- **Wear_Features:** sono i parametri di usura ricavati mediante il processamento delle impronte dell'elettrodo. Nella prima colonna si ha l'acquisizione dell'area di contatto nelle saldature ispezionate, nella seconda e terza colonna si ha rispettivamente l'acquisizione della massima/minima lunghezza di contatto nelle saldature ispezionate, nella quarta colonna l'acquisizione del diametro equivalente di contatto e nella quinta l'acquisizione del perimetro di contatto nelle saldature ispezionate.

Plottando tramite Matlab i dati riferiti alle curve spostamento dell'elettrodo (D) in funzione del tempo corrispondente (t_D) otteniamo il grafico mostrato in figura 5.4.1.2. Si è ristretto l'intervallo temporale in cui analizzare la curva spostamento elettrodo a 0.7 s, proprio perché siamo interessati ad osservare la variazione di queste curve nella zona dove effettivamente si ha la formazione del "nocciolo di saldatura". Del grafico (figura 5.4.1.2) è possibile notare come ci siano dei fronti di salita delle curve, quest'ultime arrivate al valore massimo presentano una fase di discesa, la quale può essere più o meno ripida in funzione del membro che stiamo considerando. Come vedremo nelle pagine successive, l'analisi della pendenza delle curve, in particolare nel tratto discendente ci fornirà un'altra caratteristica del segnale utilizzata per monitorare l'usura dell'elettrodo. Per quanto riguarda la spiegazione dell'andamento della curva nell'intervallo temporale considerato, è da ricercarsi nei fenomeni termici (contrazioni e dilatazioni), che si verificano al passaggio della corrente elettrica. Una dilatazione porta ad un aumento dello spostamento dell'elettrodo, rispettivamente una contrazione, che avviene nella fase di raffreddamento del nocciolo, ad una diminuzione dello spostamento.

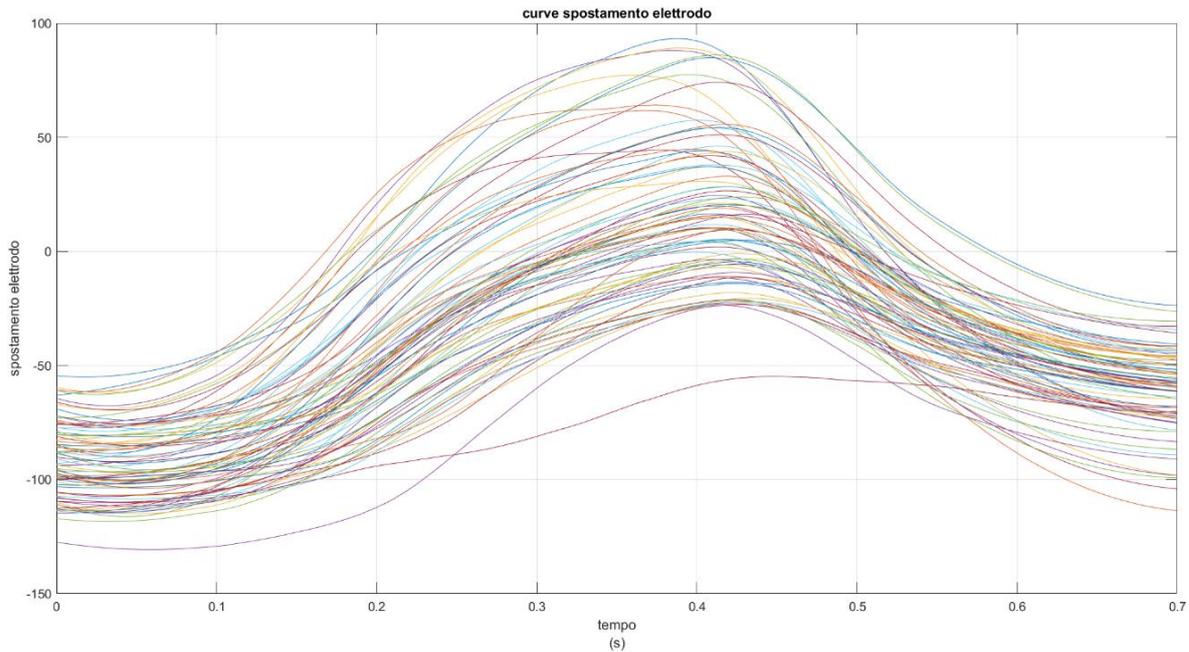


Figura 5.4.1.2 – Curve spostamento dell’elettrodo

Osservando la figura 5.4.1.2, è possibile notare, come tra le varie curve rappresentanti lo spostamento elettrodo, ci sia un cambiamento in base ai punti di saldatura analizzati. Viste così è difficile estrarre informazioni di tipo quantitativo, utilizzate per estrapolare caratteristiche atte ad avere un collegamento con l’usura dell’elettrodo. Nei prossimi paragrafi mostreremo le caratteristiche ricavate dai dati relativi allo spostamento dell’elettrodo che danno informazioni utili alla predizione dell’usura dell’elettrodo.

5.4.2 Indice di Deviazione Standard

In questo paragrafo mostreremo il grafico a dispersione relativo all’indicatore deviazione standard calcolato per ogni punto di saldatura attraverso script Matlab. Tramite la funzione (std), si è calcolato la deviazione standard per ogni colonna della matrice D, relativa allo spostamento dell’elettrodo. Ricordando che le 80 colonne rappresentano i campioni delle 80 saldature analizzate. Una volta calcolato ciò, si è plottato l’indice statistico estratto con il numero di saldature, ottenendo il grafico mostrato in figura 5.4.2.1.

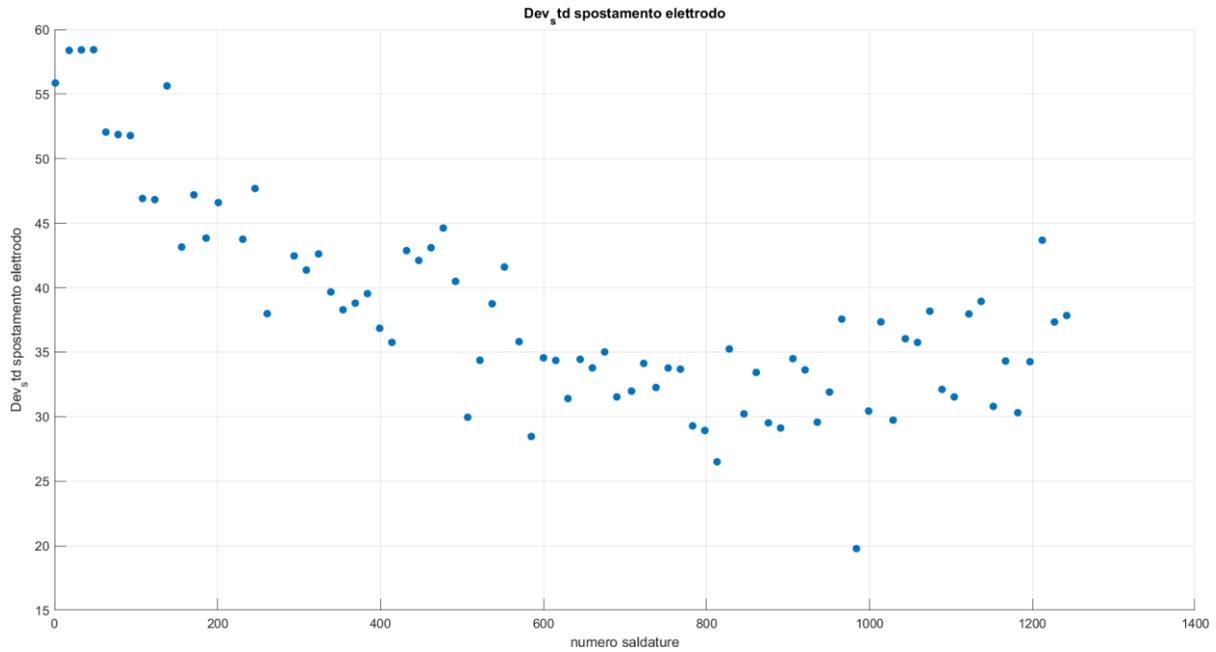


Figura 5.4.2.1 – Indice di deviazione standard

Come abbiamo più volte detto, le 80 saldature analizzate sono un campione opportunamente scelto tra i 1242 punti di saldatura effettuati con un singolo elettrodo, proprio per valutare l'usura di quest'ultimo. Osservando più nel dettaglio il grafico, è possibile notare come i valori massimi di questo indicatore statistico, coincidono proprio con i primi punti di saldatura analizzati, valori che con il passare del tempo, o più precisamente del numero di saldatura ispezionata, presentano una tendenza che risulta essere mediamente discendente nel primo set di dati, ovvero dalla saldatura 1 fino alla "numero 700". Ricordiamo che quando parliamo di numero di saldatura dobbiamo sempre andare a considerare i membri equivalenti relativi all'intervallo rappresentativo di quella saldatura, vedi tabella in figura 5.1. Tornando all'andamento del grafico a dispersione, dopo il primo tratto discendente è possibile notare come i valori dalla saldatura 700 circa, fino alle ultime presentino valori che mediamente si mantengono costanti. Da notare che l'andamento di questo diagramma, seppur riferito ad un intervallo temporale di 0.7 s, presenta una tendenza analoga a quella relativa al grafico deviazione standard calcolato con l'app DFD. Tutto ciò, giustifica la tesi precedentemente osservata, ovvero che l'indicatore estratto può darci informazioni relative all'usura dell'elettrodo. La variazione del trend dei risultati rappresentata nella figura 5.4.2.1 si è riscontrata all'incirca dopo lo stesso numero di saldature ispezionate.

5.4.3 Spostamento massimo

La caratteristica estratta in questo paragrafo è riferita agli spostamenti massimi che si hanno tra le varie curve dello spostamento dell'elettrodo. Attraverso la funzione (max) implementata in Matlab, si è ricercato il valore massimo presente in ogni colonna della matrice (D), riferita agli 80 punti di saldatura da noi ispezionati. Matlab ci restituisce un vettore contenente gli spostamenti massimi relativi alle suddette saldature, e plottando questi valori contro il numero di saldature (rappresentate dal vettore Nwelds) otteniamo il grafico mostrato in figura 5.4.3.1.

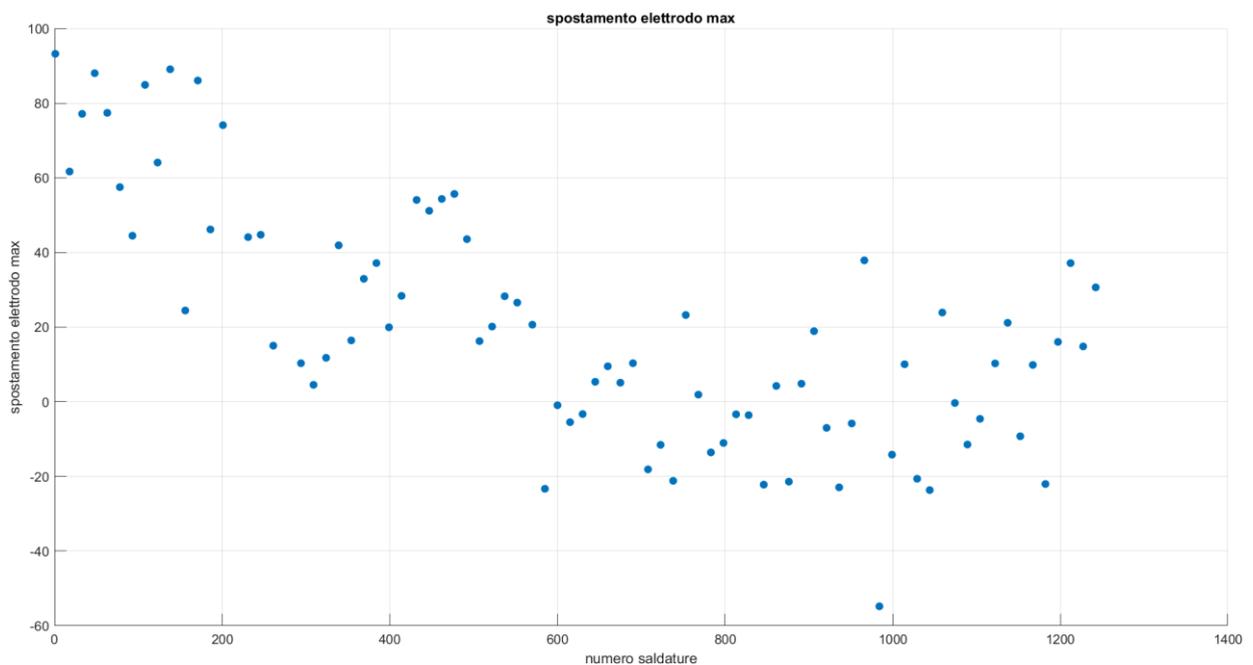


Figura 5.4.3.1 - Spostamento Massimo.

Osservando il grafico è possibile notare l'analogia con il precedente, riferito all'indice di deviazione standard. Anche in questo caso i valori massimi si sono riscontrati nei primi punti di saldatura analizzati, valori che all'avanzare delle saldature ispezionate hanno un andamento che tende mediamente a discendere fino alla "saldatura 700", superato questo è possibile notare come i valori dei picchi massimi oscillino in un range che potremmo definire "mediamente costante". Il cambiamento della tendenza del grafico a dispersione qui analizzato, si verifica allo stesso numero di saldature del precedente, sottolineando ancora una volta come questa potrebbe essere un'utile informazione per il monitoraggio dell'usura dell'elettrodo. Infatti, è proprio dove si riscontra questa variazione che ci si aspetta un cambiamento dello stato di salute dell'elettrodo.

5.4.4 Spostamento medio

Discorso analogo a quello affrontato nel paragrafo precedente può essere esteso osservando il grafico in figura 5.4.4.1. Tramite la funzione (mean) di Matlab sono stati calcolati i valori medi riferiti ai dati “spostamento elettrodo” delle 80 saldature analizzate e plottando quest’ultimi con il numero di saldature otteniamo lo stesso andamento riscontrato per gli spostamenti massimi. È opportuno evidenziare come i valori, in questo caso, oscillino in un range molto più ampio, cosa che potrebbe indicare una minor correlazione di questa caratteristica con il numero di saldature, e quindi portare ad una stima meno precisa dell’usura elettrodo.

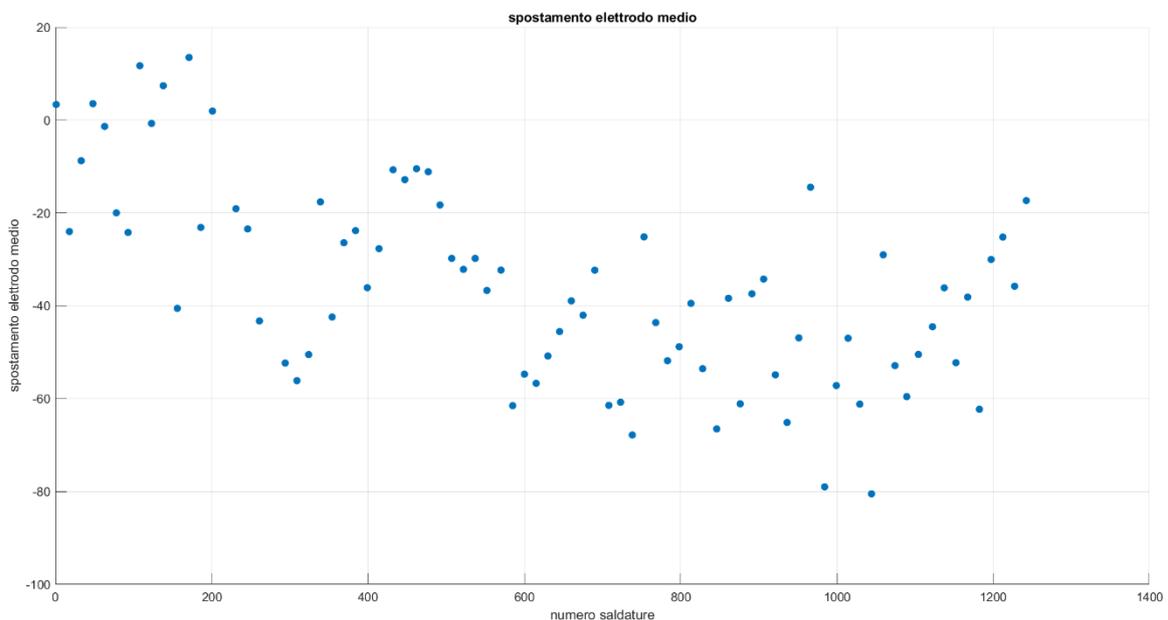


Figura 5.4.4.1 – Spostamento medio.

5.4.5 Indice di Curtosi

Per confermare quanto estratto con l’app DFD, si è calcolato tramite script Matlab l’indice di Curtosi per le 80 saldature ispezionate tramite la funzione (Kurtosi), vedi appendice. Inserendo come argomento della funzione i dati relativi allo spostamento dell’elettrodo (D), e plottando questi valori contro il numero di saldature, otteniamo il grafico (figura 5.4.5.1). Il significato di questo indicatore è stato spiegato nel paragrafo 5.3. qui vogliamo soffermarci sull’andamento che questi valori presentano in funzione

delle saldature ispezionate. Cosa interessante da osservare, è che a circa 700 saldature abbiamo, anche in questo caso, una variazione della tendenza mostrata dal grafico a dispersione. Nonostante gli indici di Curtosi hanno tutti un valore maggiore di zero (distribuzione leptocurtica per i dati relativi alle saldature analizzate), questi presentano i valori minori per le prime saldature analizzate per poi crescere mediamente, fino alla saldatura numero 700 circa, successivamente si osservano valori oscillanti in un range molto più contenuto, "circa costante". È doveroso sottolineare il fatto che, anche questo indicatore, come gli altri precedentemente analizzati, presenta una variazione del suo andamento riscontrata, dopo lo stesso numero di saldature ispezionate.

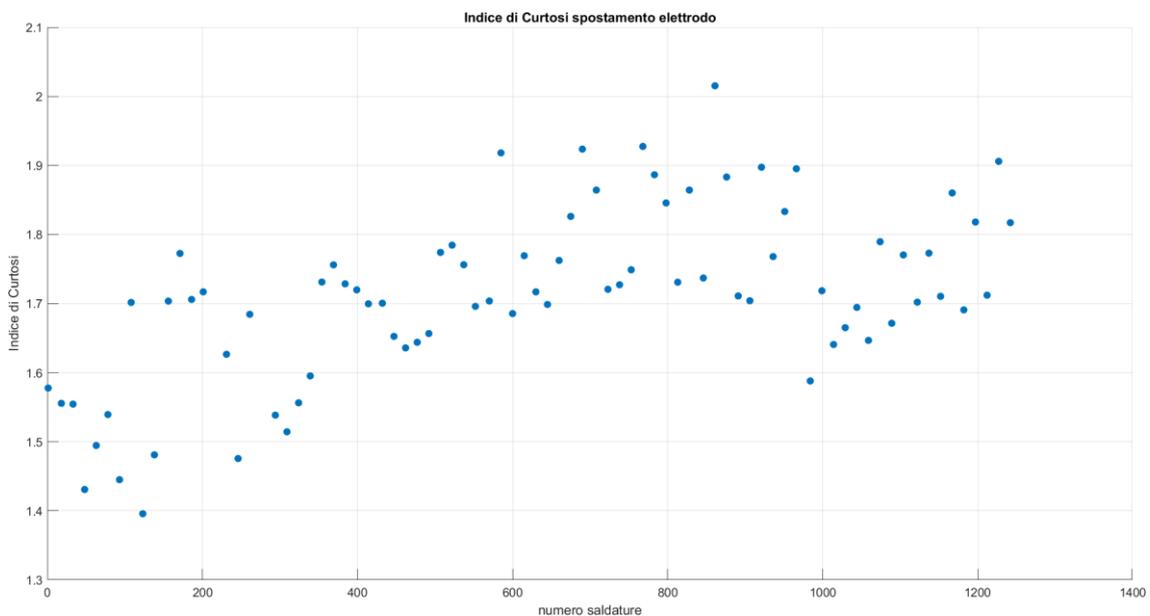


Figura 5.4.6.1 – Indice di Curtosi.

5.4.6 Indice di asimmetria

Come fatto con l'indicatore di Curtosi, attraverso script Matlab si è analizzato l'indice di asimmetria relativo ai set di dati delle 80 saldature ispezione, tramite il comando Matlab (skewness), vedi appendice. Ogni punto di saldatura, ricordiamo, ha un dataset di 28000 informazioni e per ogni punto si è calcolato il relativo indice. Il significato di questo indicatore statistico è stato spiegato nel paragrafo 5.3, l'unica differenza è che, in quest'ultime analisi i set di dati sono considerati in un intervallo temporale minore rispetto a quello analizzato con l'app DFD, quindi con un minore quantitativo di dati. Ma ciò che importa osservare in questa trattazione, è se la variazione delle curve

“spostamento elettrodo”, aldilà dell’intervallo temporale considerato, possa essere rappresentata attraverso caratteristiche estratte dal segnale. Plottando su un grafico a dispersione il valore dell’indicatore di asimmetria calcolato, contro il numero di saldature (Nwelds) otteniamo l’andamento mostrato in figura 5.4.5.1. Osservando quest’ultima, possiamo sottolineare quanto estratto con l’app DFD, ovvero che dalla saldatura numero 700 (coincidente all’incirca con il membro 45 dell’insieme di dati analizzato con *Diagnostic Feature Designer*) si apprezza una variazione della distribuzione di questo indicatore. Più nello specifico, nelle prime saldature è possibile notare come l’indice di asimmetria presenti valori mediamente maggiori di zero; questo implica che la distribuzione dei dati è leggermente spostata verso la parte destra, rispetto ad una distribuzione normale. La tendenza precedentemente mostrata prosegue fino alla saldatura numero 650, superata la quale è possibile notare come l’indicatore oscilla su valori mediamente negativi, (distribuzione dei dati per gli ultimi punti di saldatura spostati verso sinistra, rispetto ad una distribuzione normale di risultati). Tuttavia, è da evidenziare come l’indicatore, per le ultime saldature analizzate oscilla in un range molto più ampio rispetto al primo tratto. Per i dati riferiti alle prime saldature abbiamo un range di variazione dell’indicatore di circa 0.2 rispetto allo 0.4 osservabile dalla saldatura presente nell’intorno di 650 fino la fine. Queste due considerazioni fatte, ovvero lo spostamento dell’indicatore di asimmetria da valori mediamente positivi per il primo tratto del grafico a mediamente negativi per la restante parte, unito al fatto di avere un range di oscillazione dell’indice statistico quasi doppio nel secondo tratto, ci fanno dedurre che anche la variazione di questo indicatore può fornirci informazioni relative allo stato d’usura dell’elettrodo.

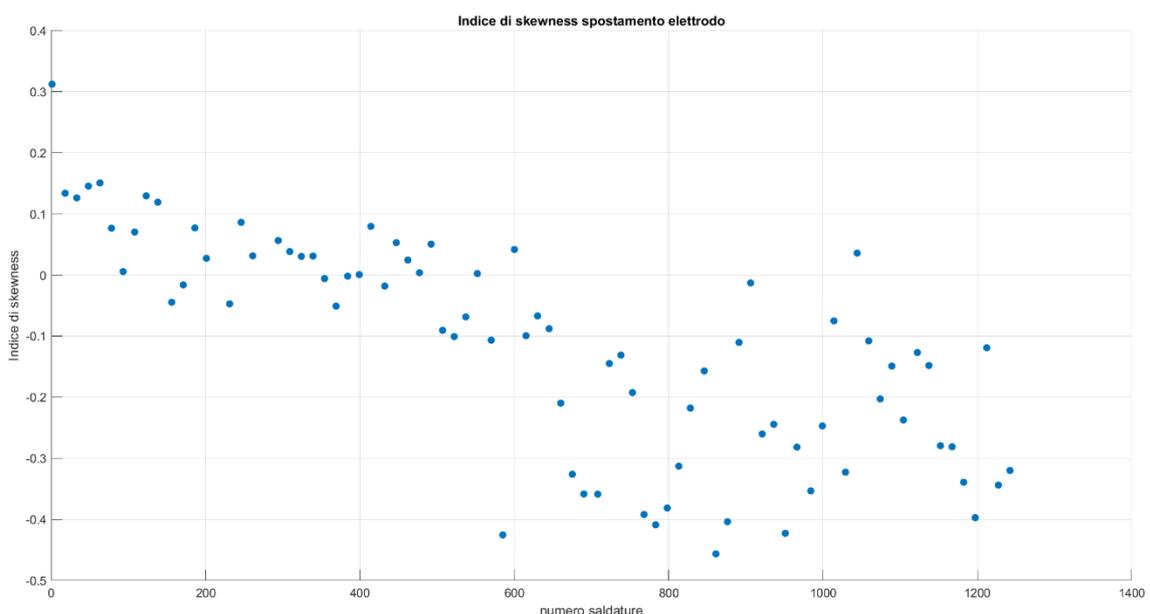


Figura 5.4.5.1 – Indice di asimmetria.

5.4.7 Coefficiente angolare delle curve “spostamento elettrodo”

I paragrafi precedenti hanno mostrato l'esistenza di alcuni indicatori statistici, estratti dalle curve dello spostamento dell'elettrodo. Indicatori che mostrano tutti una variazione della loro tendenza al sopraggiungere di un determinato numero di saldature ispezionate. Nello specifico, si è evidenziato che, arrivati a circa 700 saldature gli indicatori presentano una variazione del loro trend rispetto a quello mostrato nelle prime saldature ispezionate. A tal proposito, si sono ricercate ulteriori caratteristiche dal segnale “spostamento elettrodo”, per ampliare il numero di indicatori a disposizione, al fine di ottenere un monitoraggio dello stato di salute dell'elettrodo il più preciso possibile. Premesso ciò, osservando la figura 5.4.7.1, relativa alle 80 curve dello spostamento dell'elettrodo, si è pensato di analizzare il coefficiente angolare di quest'ultime al variare dell'istante temporale considerato. Visto che l'intervallo temporale complessivo in cui le curve vengono diagrammate è di 0.7 s, ricordando che la corrente circola solo per i primi 0.5 s seguendo l'andamento mostrato nello schema semplificato di figura 5.4.7.2, che evidenzia un fronte di salita della durata di 0.1 s (t_1), seguito da un tratto a regime di 0.3 s (t_2), per poi discendere nell'ultimo tratto (t_3). Si è diviso l'intervallo totale in sette “sottointervalli” della durata di 0.1 s, per cercare una relazione tra la pendenza delle curve e la corrente elettrica, relazione da poter estendere alle curve di “spostamento dell'elettrodo” al fine di ottenere informazioni utili per il monitoraggio dell'elettrodo.

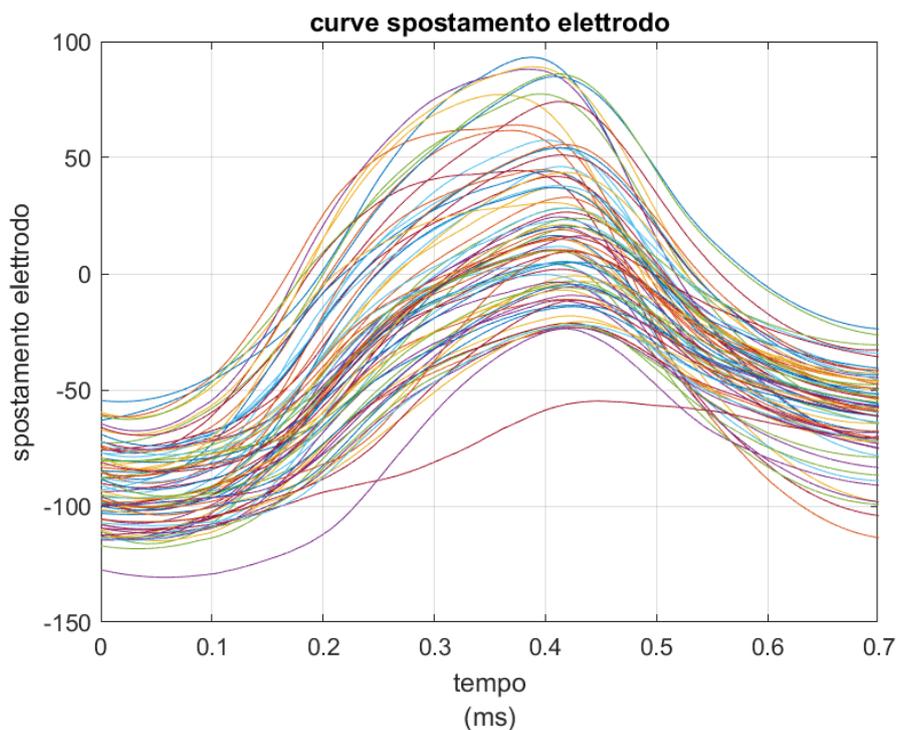


Figura 5.4.7.1 – Curve spostamento elettrodo.

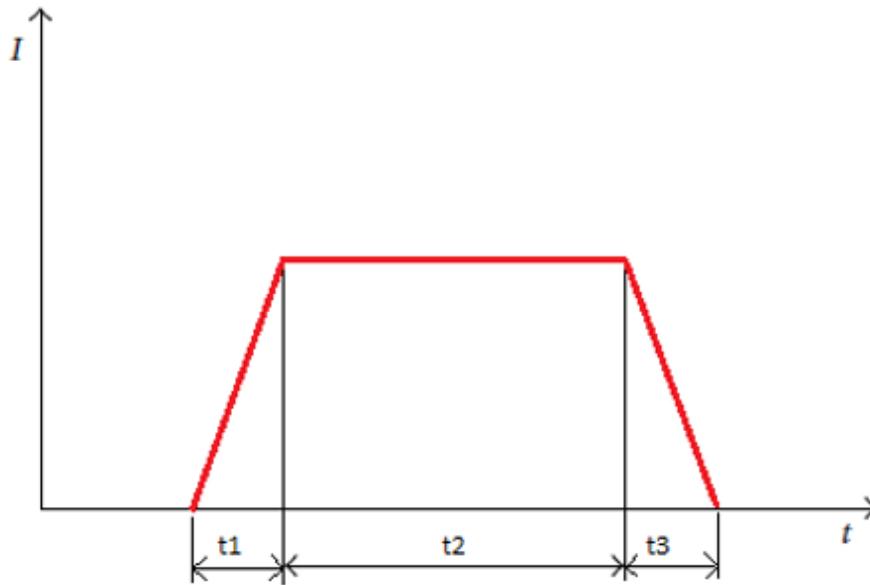


Figura 5.4.7.2 – Schema semplificato corrente elettrica.

Il coefficiente angolare delle curve “spostamento elettrodo” è stato calcolato con script Matlab, (vedi appendice). Ricordando che i sensori acquisiscono 28000 informazioni (dati numerici) relativi allo spostamento dell’elettrodo, per ogni punto di saldatura ispezionato. Quindi possiamo affermare che, ogni “sottointervallo” considerato contiene un set di 4000 dati (28000/7), il numero sette identifica gli intervalli in cui si è diviso quello totale. A seguito di questo ragionamento, è stato possibile scrivere un codice Matlab, mediante “ciclo for” (vedi appendice), per calcolare la tangente alle curve “spostamento elettrodo” al variare dell’intervallo considerato. Tangente che ci dà informazioni sulla rapidità con cui le curve evolvono nel tempo. I grafici mostrati in figura 5.4.7.3, evidenziano come i valori di pendenza aumentano nei primi due intervalli temporali considerati, per poi stabilirsi su valori più bassi e solo alla fine, raggiunto il picco, discendere più o meno rapidamente in base alla saldatura considerata. Quanto detto è evidenziato anche osservando il grafico di figura 5.4.6.1. La causa di ciò è imputabile ai fenomeni di dilatazione/contrazione termica che si hanno durante la formazione del “nocciole di saldatura” al passaggio della corrente elettrica. Prestare attenzione alle scale presenti sulle ordinate dei vari grafici, valori positivi indicano curve con pendenze crescenti, viceversa i valori negativi stanno a significare pendenze discendenti.

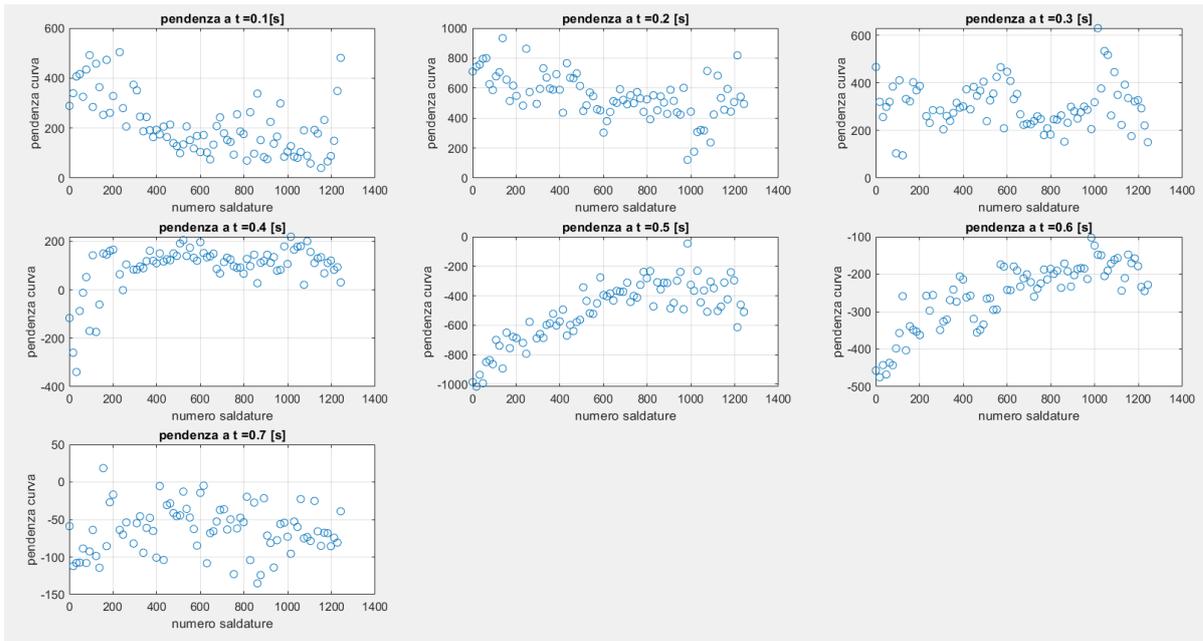


Figura 5.4.7.3 – Pendenza curve “spostamento elettrodo” al variare del tempo.

Tornando al nostro obiettivo, ovvero ricercare caratteristiche dal segnale spostamento dell’elettrodo per il monitoraggio dello stato di usura di quest’ultimo, ed osservando il grafico (figura 5.4.7.3). Risulta evidente come la tendenza più precisa, assunta dai valori presenti sui grafici a dispersione, è ottenuta al tempo $t = 0.5$ s, quando sta per cessare la corrente elettrica. Una semplice osservazione grafica non può bastare ad affermare quanto detto, proprio per questo, si è utilizzata la funzione presente in Matlab “corrcoef”, che ha evidenziato l’esistenza di una buona correlazione tra il numero di saldature analizzate e la pendenza delle curve “spostamento elettrodo” ad esse associate, calcolata nell’ intorno di 0.5 s.

```
>> R_pend = corrcoef(Nwelds,pend)
```

```
R_pend =
```

```
1.0000    0.7818
0.7818    1.0000
```

La funzione *corrcoef* restituisce una matrice, dove i valori presenti sulla diagonale secondaria ci danno l'indicazione sul coefficiente di correlazione che si ha tra le variabili inserite.

L'indice di correlazione di Pearson (anche detto coefficiente di correlazione lineare) tra due variabili statistiche è un indice che esprime un'eventuale relazione di linearità tra esse¹². In particolare, quest'ultimo è compreso tra i valori di +1 e -1, il più uno corrisponde ad una perfetta correlazione lineare positiva, il meno uno ad una corretta correlazione lineare negativa, un coefficiente uguale a zero indica un'assenza di correlazione. Esempi di grafici di dispersione con differenti valori dell'indice di correlazione (ρ) sono mostrati in figura 5.4.7.4.

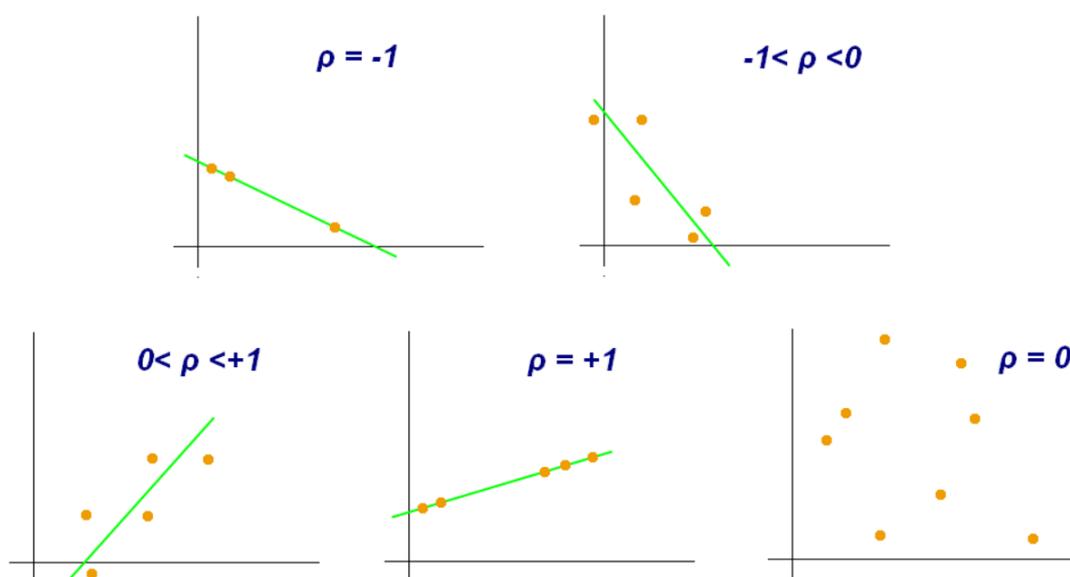


Figura 5.4.7.4 – esempi grafici al variare del coefficiente di correlazione [18].

- **Pendenza curve al tempo $t = 0.5$ s**

Riportando il grafico, relativo alla pendenza delle curve in funzione del numero di saldature (vedi figura 5.4.7.5), calcolato nell'intervallo temporale precedentemente trovato, ovvero nell'intorno dei 0.5 s, dove si è riscontrato un buon coefficiente di correlazione, è possibile fare le seguenti considerazioni. Sulle ordinate del grafico troviamo valori negativi che stanno a identificare un coefficiente angolare negativo delle curve "spostamento elettrodo". Quest'ultime al tempo $t = 0.5$ s, hanno già raggiunto il valore massimo e si trovano nella fase discendente, come mostrato anche dal grafico di figura 5.4.7.1. Più nello specifico, possiamo affermare che le prime saldature analizzate presentano un tratto discendente con pendenza maggiore rispetto alle successive,

¹² Wikipedia – Indice di correlazione di Pearson

pendenza che va diminuendo al variare del tempo, quindi al variare dello stato di usura dell'elettrodo. Infatti, in prossimità della saldatura numero 700 è possibile notare come la variazione del coefficiente angolare delle curve si stabilizza su valori mediamente costanti. Il cambio della tendenza di questo indicatore, così come mostrato per i precedenti, si riscontra dopo lo stesso numero di saldature analizzate, ad ulteriore conferma di una possibile variazione significativa dello stato d'usura dell'elettrodo, che potrebbe verificarsi dopo un determinato numero di saldature effettuate.

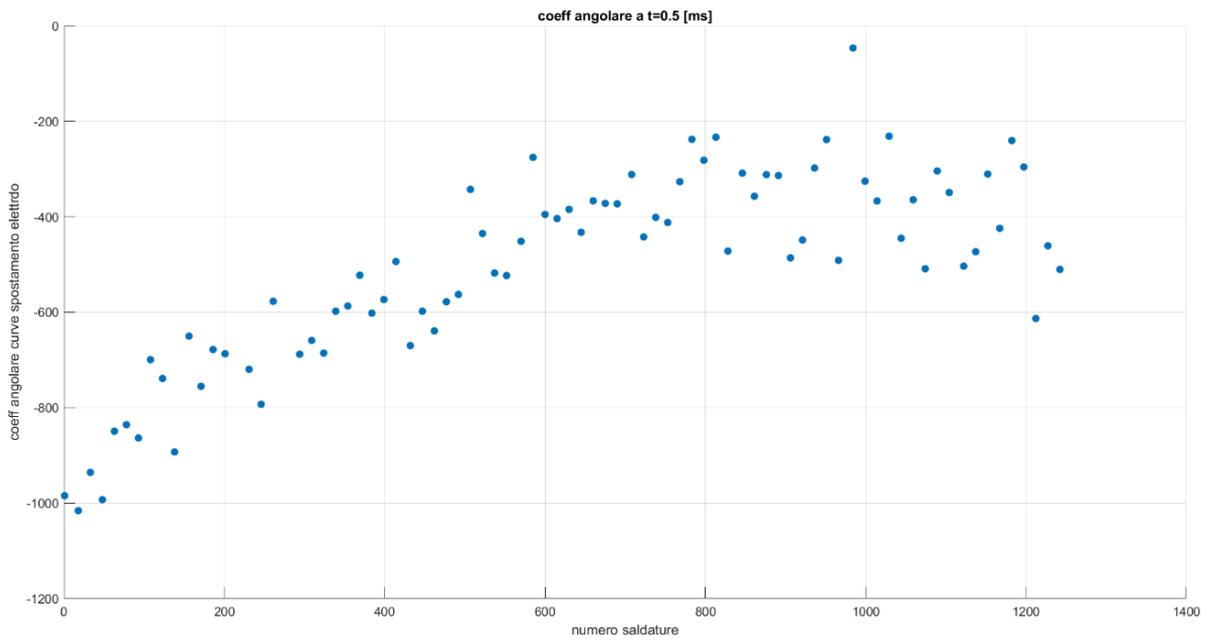


Figura 5.4.7.5 – Coefficiente angolare curve “spostamento elettrodo” a $t = 0.5$ s.

- confronto con DFD sulla pendenza delle curve

Riportiamo di seguito dei grafici (figura 5.4.7.6) estratti con l'app DFD, per sottolineare ulteriormente i risultati ottenuti in questo paragrafo.

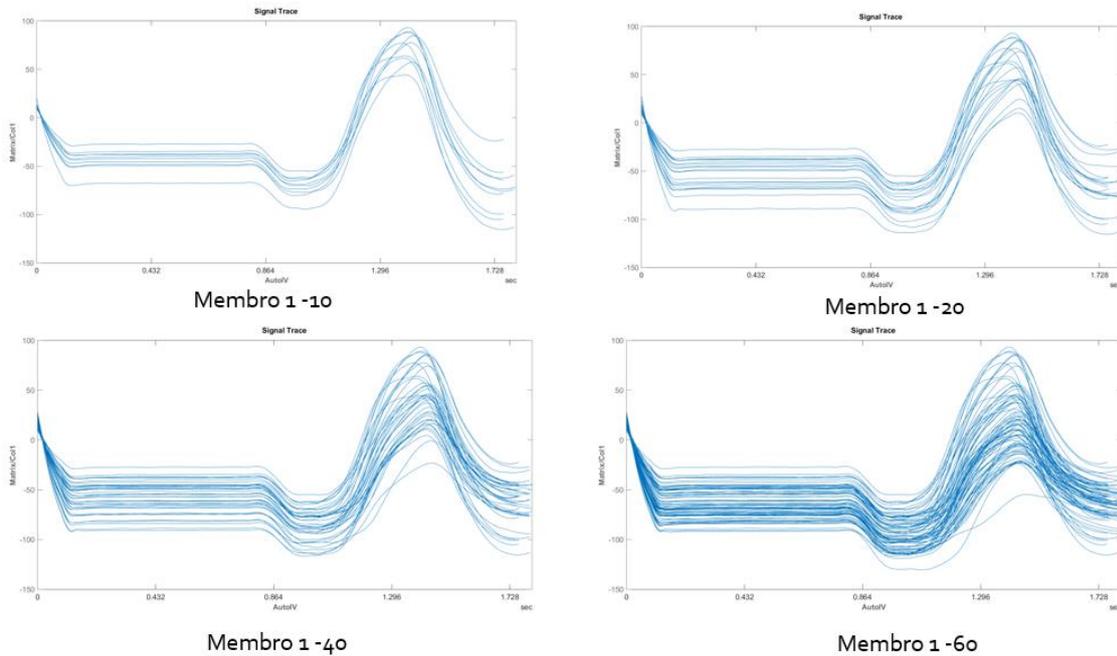


Figura 5.4.6.6 – Curve “spostamento elettrodo” al variare dei membri in DFD.

Quello che si vuole far notare in questo grafico, soffermandoci nella porzione che va da 1 [s] ad 1.5 [s], dove avviene il passaggio della corrente elettrica e si ha la formazione del “nociolo di saldatura”, è proprio lo spostamento dei picchi massimi al variare dei membri analizzati. Picchi che tendono a spostarsi verso il basso all’aumentare della saldatura considerata, per poi oscillare in un range di valori più contenuti dal membro numero 40 circa. Questo conferma la tendenza trovata tramite script Matlab, ovvero i coefficienti angolari nel tratto discendente delle curve sono maggiori per le prime saldature per poi diminuire progressivamente, fino a stabilizzarsi su valori mediamente costanti. A picchi più alti corrispondono curve che discendono con un coefficiente angolare maggiore, perché sono più ripide.

5.5 Caratteristiche non utilizzate

Nel paragrafo 5.4 sono state elencate le caratteristiche, estratte dalle curve di spostamento dell'elettrodo, che presentano andamenti variabili con il tempo, più precisamente con il numero di saldature ispezionate, utilizzabili per monitorare "lo stato di salute" di un elettrodo montato su una macchina saldatrice del tipo a resistenza per punti. Ma essendo in fase di ricerca, non tutte le caratteristiche estratte hanno portato a risultati potenzialmente utili al monitoraggio dell'usura dell'elettrodo. Per completezza riportiamo alcune di esse.

- Spostamento minimo

Tramite la funzione "min" di Matlab (vedi appendice) sono stati calcolati i valori minimi della curva di spostamento dell'elettrodo per le 80 saldature analizzate, valori diagrammati su grafico a dispersione in funzione del numero di saldature. Risulta evidente come i valori oscillano in modo casuale, e quindi non utilizzabili per monitorare lo stato dell'elettrodo.

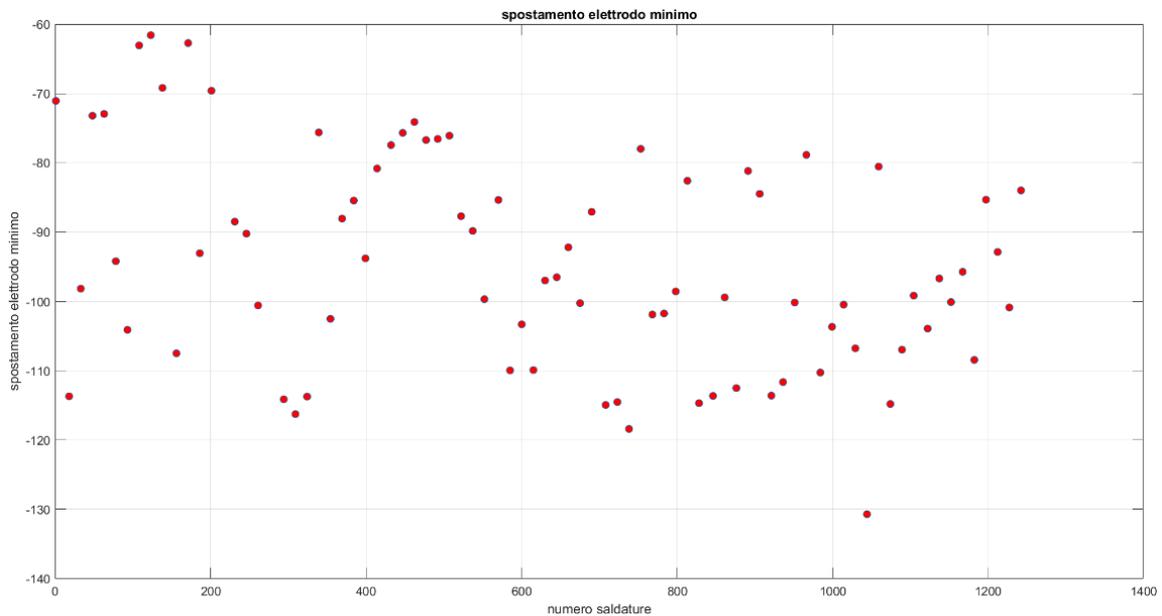


Figura 5.5.1 – Spostamento minimo.

-

- **Valori massimi delle curve spostamento elettrodo in valore assoluto**

Con script Matlab (vedi appendice) si è calcolato il massimo dei valori assoluti delle curve “spostamento elettrodo” per le 80 saldature analizzate e diagrammato questo risultato in funzione del numero di saldature (vedi figura 5.5.2). Anche qui, come nel caso precedente, è possibile osservare un andamento molto variabile dei risultati, a dimostrazione che questa caratteristica non è adatta al monitoraggio dell’usura dell’elettrodo.

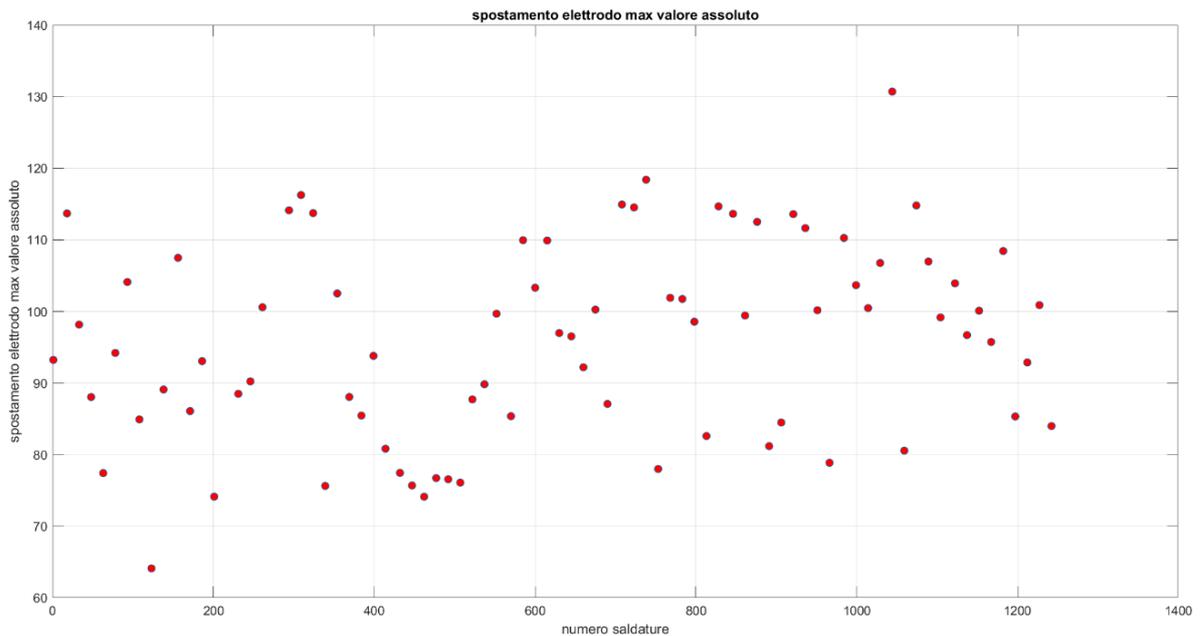


Figura 5.5.2 – Spostamenti massimi in valore assoluto.

Inoltre, ricercando il coefficiente di correlazione di quest’ultime caratteristiche estratte con il numero di saldature, tramite la funzione di Matlab “corrcoef”, spiegata nel paragrafo precedente. È stato possibile evidenziare ulteriormente la bassa correlazione di queste caratteristiche con il numero di saldature analizzate. R_M mostra il coefficiente di correlazione per la caratteristica relativa al massimo valore assoluto delle curve “spostamento elettrodo”, ed R_min è riferita allo spostamento minimo delle varie curve.

R_M =

1.0000	0.2680
0.2680	1.0000

R_min =

1.0000	-0.3729
-0.3729	1.0000

Figura 5.5.3 – Coefficienti di correlazione caratteristiche scartate

6 Conclusioni e sviluppi futuri

Il monitoraggio dello stato di salute di un elettrodo, nel processo di saldatura a resistenza per punti, è un compito tutt'altro che banale, specie se questo vuole eseguirsi "online" su un macchinario in funzione. Riuscire a sostituire un componente della macchina saldatrice, come l'elettrodo, nel momento esatto in cui esso si sta usurando in modo significativo, porterebbe ad enormi benefici in termini economici. In questo studio oltre a descrivere dettagliatamente il processo di saldatura RSW, soffermandoci sull'elettrodo, e riportando degli esempi trovati in letteratura sulle moderne tecnologie presenti in circolazione per la predizione dell'usura quest'ultimo, si sono ricercati degli indicatori che potrebbero essere utilizzati per monitorare lo stato di salute dell'elettrodo, osservando la loro variazione nel tempo. Nel capitolo 5.4 abbiamo riportato e spiegato i vari indicatori estratti dalle curve di spostamento dell'elettrodo, diagrammati su grafici a dispersione in funzione del numero di saldature, evidenziando come in tutti i casi sia possibile osservare una variazione del loro andamento in prossimità di un determinato range di saldature ispezionate. Inoltre, si è ricercato il coefficiente di correlazione per tutte le caratteristiche estratte con il numero di saldature tramite la funzione "corrcoef" di Matlab (vedi appendice) ottenendo i seguenti valori:

```
R_Max =  
    1.0000    -0.6962  
   -0.6962    1.0000  
  
R_Devis =  
    1.0000    -0.7257  
   -0.7257    1.0000  
  
R_pend =  
    1.0000    0.7818  
    0.7818    1.0000  
  
R_k =  
    1.0000    0.5778  
    0.5778    1.0000  
  
R_asl =  
    1.0000    -0.7496  
   -0.7496    1.0000
```

Figura 6.1 – Coefficienti di correlazione per le caratteristiche estratte dalla curva di spostamento dell'elettrodo.

Dove R_{Max} è il coefficiente di correlazione riferito ai valori Massimi trovati per le varie curve di spostamento dell'elettrodo, R_{DeviS} riferito all'indice di deviazione standard estratto, R_{pend} già spiegato in 5.4.6, R_K ed R_{asi} rispettivamente per l'indicatore di curtosi e quello di asimmetria. Risulta subito evidente come i valori dei coefficienti di correlazioni siano, in alcuni casi, abbastanza elevati se confrontati con quelli relativi ai parametri esclusi, vedi 5.5. Questo va a rafforzare ulteriormente i risultati trovati in questo lavoro di tesi. Le apprezzabili variazioni grafiche, osservate nei diagrammi a dispersione tracciati nel capitolo precedente, uniti ai valori dei coefficienti di correlazione qui mostrati, ci fanno dedurre che il monitoraggio dello stato di salute dell'elettrodo, potrebbe essere realizzato utilizzando le caratteristiche estratte dalle curve di spostamento dell'elettrodo. Ovviamente il tutto andrebbe relazionato a sperimentazioni fatte sull'elettrodo per valutare l'effettiva usura di quest'ultimo al variare del tempo.

- **Sviluppi futuri**

Ricercando i parametri che presentano un maggiore coefficiente di correlazione con il numero di saldature, si potrebbe fare un'analisi regressiva per stimare l'usura dell'elettrodo mediante una funzione di regressione lineare, polinomiale o multipla. Come variabili predittive (X), si sceglierebbero quelle che hanno mostrato un coefficiente di correlazione maggiore, per esempio la pendenza in un tratto specifico della curva di spostamento dell'elettrodo, l'indice di asimmetria e la DevS, vedi figura 6.1. Invece, come variabili di risposta (Y) potremmo scegliere l'area di contatto nelle saldature ispezionate, la massima o minima lunghezza di contatto nelle saldature ispezionate e simili informazioni, ottenute mediante il processamento dell'impronta dell'elettrodo, vedi $Wear_Feature$ in figura 5.4.1.1.

Tramite il comando "*Corrplot(X)*" di Matlab, vedi appendice, è stata creata una matrice contenente i grafici che mostrano la correlazione tra le variabili inserite in X. Gli istogrammi delle variabili compaiono lungo la diagonale principale della matrice, mentre i grafici a dispersione delle coppie di variabili vengono visualizzate nelle sovradiagonali e sottodiagonali. Le pendenze delle linee di riferimento mostrate nei grafici a dispersione, calcolate con il metodo dei minimi quadrati, corrispondono ai coefficienti di correlazione visualizzati, vedi figura 6.2. Nella matrice X sono stati inseriti come variabili, oltre al numero di saldature N_{welds} e i vari indicatori di Deviazione standard, asimmetria e quello rappresentante il coefficiente angolare delle curve di spostamento dell'elettrodo valutato nell'intorno di 0.5 s, i valori misurati in laboratorio riferiti all'area di contatto nelle saldature ispezionate ($Area$) e quelli riferiti alla massima e minima lunghezza di contatto nelle saldature ispezionate, Max_l e min_l rispettivamente, vedi grafico 6.2.

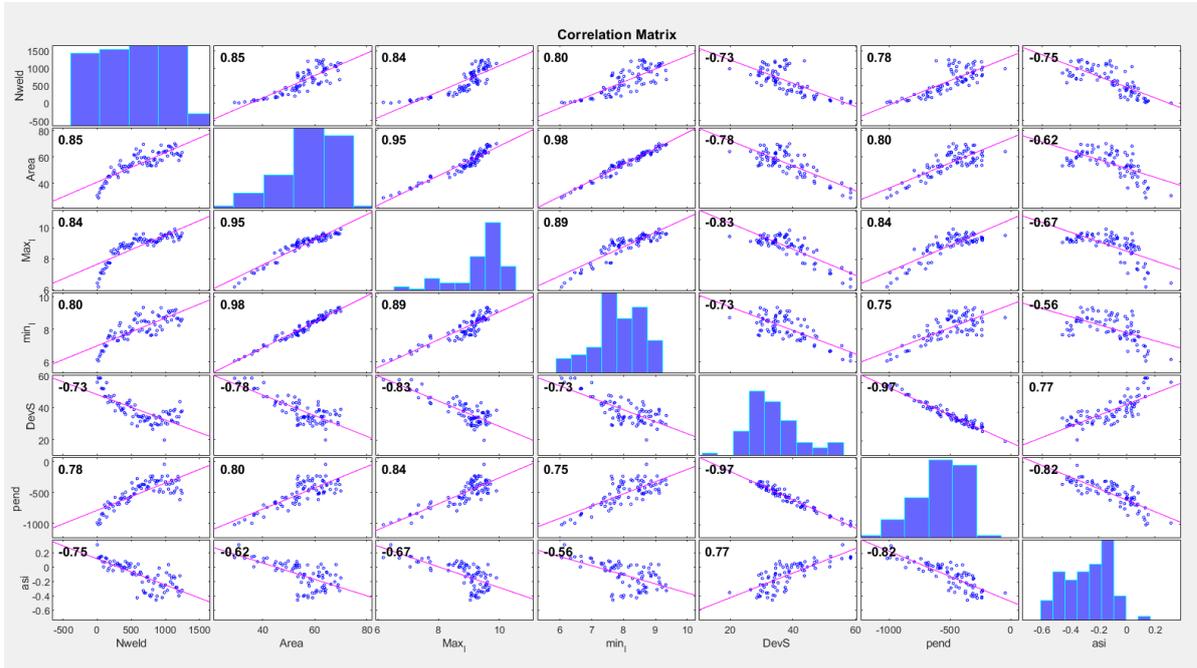


Figura 6.2 – Matrice di Correlazione

Appendice

```
%grafico completo di tutte le curve di spostamento dell'elettrodo
```

```
Nwelds = Nwelds'  
figure  
plot(t_D,D), grid on;  
title('curve spostamento elettrodo')  
xlabel ({ 'tempo' , '(s)' })  
ylabel( 'spostamento elettrodo' )
```

```
% grafici dei valori massimi
```

```
Max = max(D);  
figure  
plot(Nwelds,Max,'o'), grid on;  
title('spostamento elettrodo max')  
xlabel ({ 'numero saldature' })  
ylabel( 'spostamento elettrodo max' )
```

```
%grafici dei valori medi
```

```
media = mean(D);  
figure  
scatter(Nwelds,media,'filled'), grid on;  
title('spostamento elettrodo medio')  
xlabel ({ 'numero saldature' })  
ylabel( 'spostamento elettrodo medio' )
```

```
%grafici valori minimi
```

```
minimo = min(D);  
figure  
plot(Nwelds,minimo,'o','MarkerFaceColor','red'), grid on;  
title('spostamento elettrodo minimo')  
xlabel ({ 'numero saldature' })  
ylabel( 'spostamento elettrodo minimo' )
```

```
%valori assoluti dei picchi massimi
```

```
figure  
M = max(abs(D));  
plot(Nwelds,M,'o','MarkerFaceColor','red'), grid on;  
title('spostamento elettrodo max valore assoluto')  
xlabel ({ 'numero saldature' })  
ylabel( 'spostamento elettrodo max valore assoluto' )
```

```
%deviazione standard
```

```
Devs=std(D);  
figure  
plot(Nwelds,Devs,'o'), grid on;  
title('Dev_std spostamento elettrodo')  
xlabel ({ 'numero saldature' })  
ylabel( 'Dev_std spostamento elettrodo' )
```

```

%Pendenza curve.
%cambiare valori di x1 e x2 per trovare pendenza in zone diverse della curva
x1=19500;
x2=20000;
figure(10)
pend=(D(x2,:)-D(x1,:))/(t_D(x2)-t_D(x1));
plot(Nwelds,pend,'o'), grid on;
figure
scatter(Nwelds,pend,'filled'), grid on
title('coeff angolare a t=0.5 [ms]')
xlabel({ 'numero saldature' })
ylabel( 'coeff angolare curve spostamento elettrdo' )

%pendenza in diversi intervalli di tempo per le 80 saldature
for i=1:7
    xi=3900*i
    xj=(3900*i)+500
    pendenza=(D(xj,:)-D(xi,:))/(t_D(xj)-t_D(xi));
    subplot(3,3,i)
    plot(Nwelds,pendenza,'o'), grid on
    subplot(3,3,1)
    xlabel('numero saldature')
    ylabel('pendenza curva')
    title('pendenza a t =0.1[s]')

    subplot(3,3,2)
    xlabel('numero saldature')
    ylabel('pendenza curva')
    title('pendenza a t =0.2 [s]')

    subplot(3,3,3)
    xlabel('numero saldature')
    ylabel('pendenza curva')
    title('pendenza a t =0.3 [s]')

    subplot(3,3,4)
    xlabel('numero saldature')
    ylabel('pendenza curva')
    title('pendenza a t =0.4 [s]')

    subplot(3,3,5)
    xlabel('numero saldature')
    ylabel('pendenza curva')
    title('pendenza a t =0.5 [s]')

    subplot(3,3,6)
    xlabel('numero saldature')
    ylabel('pendenza curva')
    title('pendenza a t =0.6 [s]')

    subplot(3,3,7)
    xlabel('numero saldature')
    ylabel('pendenza curva')
    title('pendenza a t =0.7 [s]')
end

```

```

% curtosi..per verificare che una distribuzione unimodale mostra una
% distribuzione più piatta o più appuntita rispetto ad una normale
% = 0 normale >0 ipernormale (+appuntita) <0 iponormale (+piatta)

```

```

k = kurtosis(D);
figure
plot(Nwelds,k,'o'), grid on;
title('Indice di Curtosi spostamento elettrodo')
xlabel({ 'numero saldature' })
ylabel( 'Indice di Curtosi' )

```

```

% skewness(Asimmetria)
%positiva se la distribuzione eccede verso destra
%negativa se eccede verso sinistra

```

```

asi = skewness(D);
figure
plot(Nwelds,asi,'o'), grid on;
figure
scatter(Nwelds,asi,'filled'), grid on
title('Indice di skewness spostamento elettrodo')
xlabel({ 'numero saldature' })
ylabel( 'Indice di skewness' )

```

COEFFICIENTI DI CORRELAZIONE

```

R_Max = corrcoef(Nwelds,Max)
R_media = corrcoef(Nwelds,media);
R_M = corrcoef(Nwelds,M);
R_Devis = corrcoef(Nwelds,Devs)
R_pend = corrcoef(Nwelds,pend)
R_k = corrcoef(Nwelds,k)
R_asi = corrcoef(Nwelds,asi)

R_M = corrcoef(Nwelds,M)
R_min = corrcoef(Nwelds,minimo)

X=[Nwelds' wear_Features(:,1:3) Devs' pend' asi']
corrplot(X,'varNames',{'Nwelds','Area
contatto','Max_length','min_length','Devs','pend','asi'})

```

[*Published with MATLAB® R2020b*](#)

Bibliografia

- [1] Prof. Michele Lapresa - ITIS "E. Fermi" PON G1 FSE 2009-301 "MECCANICA APPLICATA", «Saldatura», Francavilla Fontana, 2009.
- [2] M. Riccardo, «Impianti automatici per la saldatura: soluzioni e tendenze,» 2011.
- [3] «125RF,» [Online]. Available: https://fr.123rf.com/photo_13130739_ancien-ans-r%C3%A9sist%C3%A9-grunge-de-gaz-raccords-de-tuyaux-de-raccordement-%C3%A0-brides-isol%C3%A9-closeup-pipeline-jaune.html. [Consultato il giorno 18 Giugno 2021].
- [4] «Wikipedia,» [Online]. Available: https://az.m.wikipedia.org/wiki/Fayl:Tailored_Blank_Hoesch_Museum.jpg. [Consultato il giorno 18 Giugno 2021].
- [5] I. I. S. -. IIS, «Processi di saldatura a resistenza,» 2007. [Online].
- [6] Roberto Adami - Tesi di laurea - Università degli studi di Padova - facoltà di ingegneria, *La saldatura a resistenza*, 2010.
- [7] J. S. H. Zhang, «Resistance Welding: Fundamentals and Applications,» *CRC Press Taylor & Francis*, 2006.
- [8] W. Z. N. B. Q. Song, «An Experimental Study Determines the Electrical Contact Resistance in Resistance Welding,» *Welding Journal*, 2005.
- [9] «CAMPO D'IMPIEGO DELLA SALDATURA A RESISTENZA,» [Online]. Available: <https://www.metasald.com/pdf/C4.pdf>. [Consultato il giorno 18 Giugno 2021].
- [10] A. F. Alessandro Ascari, *Introduzione ai processi di saldatura*, Bologna: società editore Esculapio, 2014.
- [11] D. V. J. R. Christopher Paulraj, «An intelligent Model for Defect Prediction in Spot Welding,» *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, pp. 1018-1027, 2 Novembre 2020.
- [12] Y. S. Zhang, «Monitoring and intelligent control of electrode wear based on a measured electrode displacement curve in resistance spot welding,» *Measurement Science and Technology*, 2007.
- [13] H. W. G. L. X. Q. Z. Y S Zhang, «Monitoring and intelligent control of electrode wear based on a measured electrode displacement curve in resistance spot welding,» *Measurement Science and Technology*, 2007.

- [14 D. L. M. I. Dawei Zhao.Yuanxun Wang, «Performances of regression model and artificial neural network in monitoring welding quality based on power signal,» *Journal of Materials Research and Techology*, 2019.
- [15 TECNA s.p.a., *Advanced Resistance Welding Systems and Balancers*, TECNA.
- [16 T. s.p.a..
- [17 «Algo Project,» [Online]. Available: http://www.algoproject.it/dett_news.asp?id=133.
] [Consultato il giorno 25 Giugno 2021].
- [18 «Wikipedia,» [Online]. Available:
] https://it.wikipedia.org/wiki/Indice_di_correlazione_di_Pearson#/media/File:Correlation_coefficient.png.
- [19 R. Messler, «Principles of Welding Processes, Physics Chemistry and Metallurgy,» *Wiley*,
] 2004.
- [20 «Wikipedia,» [Online]. Available:
] https://az.m.wikipedia.org/wiki/Fayl:Tailored_Blank_Hoesch_Museum.jpg. [Consultato il giorno 18 Giugno 2021].
- [21 K.-Y. K. Fahin Ahmed, «Data-driven Weld Nugget Width Prediction with Decision tree Algorithm,» Ottobre 2017.
- [22 «Algo Project,» [Online]. Available: http://www.algoproject.it/dett_news.asp?id=132.
] [Consultato il giorno 25 Giugno 2021].
- [23 «MathWorks,» [Online]. Available:
] https://it.mathworks.com/help/curvefit/smooth.html#mw_7695cbca-640d-4029-a239-81c9dd8192d0.