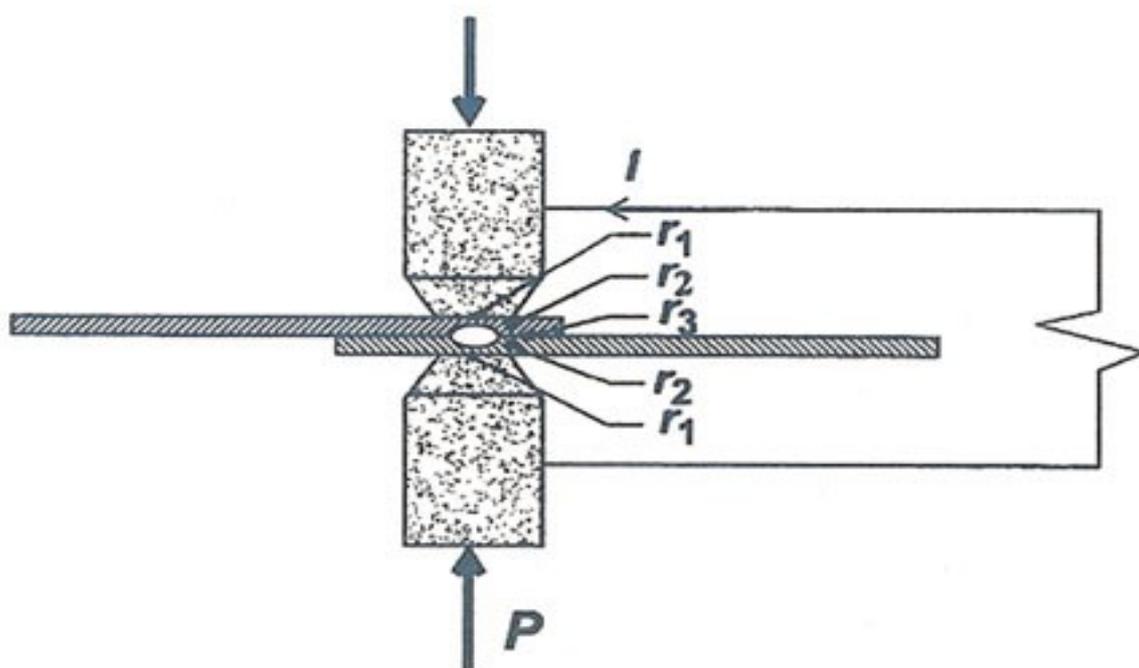


**Università degli Studi di Padova – facoltà
d'Ingegneria- Corso di laurea in Ingegneria
Elettrotecnica**

LA SALDATURA A RESISTENZA



**• Relatore: Sergio Lupi - Dipartimento di Ingegneria
Elettrica**

• Laureando: Adami Roberto

• Anno Accademico: 2009/2010

INDICE

SOMMARIO	5
INTRODUZIONE	5

CAPITOLO 1

ASPETTI GENERALI DELLA SALDATURA

1.1 Formazione dei legami.....	6
1.2 Vantaggi e svantaggi della saldatura.....	7
1.3 Il ruolo della temperatura e della pressione.....	8
1.4 L'equazione generale del flusso di calore.....	8
1.41 Esempio: soluzione semplificata di Rosenthal.....	9
1.5 Classificazione.....	11

CAPITOLO 2

PRINCIPI FONDAMENTALI DELLA SALDATURA A RESISTENZA

2.1 Campi d'applicazione.....	13
2.1.1 Saldatura a sovrapposizione.....	13
2.1.2 Saldatura di testa.....	14
2.2 Caratteristiche principali.....	14
2.2.1 Caratteristiche elettriche.....	15
2.2.1.1 Resistenze delle lamiere.....	16
2.2.1.2 Resistenza di contatto.....	17
2.2.1.3 Resistenza totale.....	20
2.2.1.4 Resistenze di contatto di alcuni materiali.....	21
2.2.1.5 Circuito equivalente.....	22
2.2.1.6 Compensazione della potenza reattiva.....	24
2.2.1.7 Formazione della zona di saldatura.....	25
2.2.2 Caratteristiche termiche.....	25

2.2.2.1 Perdite di calore.....	27
2.2.3 Bilancio termico.....	28
2.2.3.1 La legge della similitudine termica.....	28
2.2.3.2 Bilancio termico.....	28
2.2.4 Durata di vita degli elettrodi.....	32
2.2.5 Distorsioni indotte termicamente e tensioni residue.....	33
2.2.5.1 Origine delle tensioni termiche.....	33
2.2.5.2 Cause che portano alla formazione delle tensioni residue.....	33
2.2.5.3 Cause della distorsione.....	35
2.2.5.4 Effetti della distorsione.....	36
2.2.5.5 Effetti delle tensioni residue.....	36
2.3 Parametri.....	37
2.3.1 Finestre di saldabilità.....	37
2.3.2 Pressione.....	39
2.3.3 Temperatura.....	39
2.3.4 Corrente.....	40
2.3.5 Tempo di saldatura.....	41
2.3.5.1 Cicli di pressione e corrente.....	42
2.3.6 Stato degli elettrodi.....	43
2.3.7 Posizionamento dei punti.....	44
2.3.8 Stato e condizioni dei materiali.....	45
2.3.9 Elemento umano.....	45
2.3.10 Tipologie delle macchine.....	46

CAPITOLO 3

SALDATRICE A RESISTENZA

3.1 Trasformatore.....	47
3.1.2 Trasformatore monofase in corrente alternata.....	47
3.1.3 Trasformatore monofase con batteria di condensatori.....	48
3.1.4 Trasformatore trifase.....	49
3.1.5 Trasformatori a media e ad alta frequenza (inverter).....	50

3.2 Attuatori.....	51
3.3 Elettrodi.....	54
3.4 Sistema di controllo.....	55
3.4.1 Acquisizione dei dati.....	56
3.4.2 Monitoraggio del processo.....	57
3.4.2.1 Segnali.....	57
3.4.2.2 Tensione.....	58
3.4.2.3 Corrente elettrica.....	59
3.4.2.4 Esempio: metodo di misura della corrente a 60 Hz.....	59
3.4.2.5 Resistenza dinamica.....	60
3.4.2.6 Spostamento degli elettrodi.....	60
3.4.2.7 Forza agli elettrodi.....	61
3.4.3 Controllo del processo.....	62
3.4.3.1 Esempio: controllo di potenza in tempo reale.....	64
3.4.3.2 Esempio: controllo adattivo in tempo reale.....	68
3.4.4 Controlli in corrente trifase per media frequenza (inverter).....	76
3.4.4.1 Corrente costante sul secondario.....	77
3.4.4.2 Corrente costante sul primario.....	77
3.4.4.3 Energia costante.....	77
3.4.4.4 Limite di picco sul primario.....	77
3.4.4.5 Parzializzazione in percentuale della potenza massima.....	77

CAPITOLO 4

SALDATURA A PUNTI

4.1 Principi generali.....	79
4.2 Applicazione e influenza dei materiali.....	81

CAPITOLO 5

SIMULAZIONE NUMERICA

5.1 Confronto tra il metodo degli elementi finiti e quello delle differenze finite.....	84
5.1.1 Discretizzazione.....	84
5.1.2 Geometria.....	84
5.1.3 Formulazione.....	85
5.1.4 Precisione.....	85

5.2 Simulazioni delle proprietà e dell'area di contatto.....	86
5.3 Esempio: Modello per l'analisi dello sviluppo del nocciolo nelle leghe d'alluminio.....	87

CAPITOLO 6

SIMULAZIONE CON FLUX 3D

6.1 Modello.....	93
6.2 Analisi.....	93
6.3 Dati iniziali.....	94
6.4 Risultati.....	94
6.4.1 A 50 Hz.....	94
6.4.2 A 500 Hz.....	95
6.4.3 A 1000 Hz.....	95
6.4.4 A 3000 Hz.....	96
6.4.5 A 5000 Hz.....	97
6.4.6 Grafici.....	97
CONCLUSIONI.....	100
APPENDICE 1.....	101
BIBLIOGRAFIA.....	102

SOMMARIO

La tesi rappresenta una ricerca bibliografica sulla saldatura a resistenza, sviluppata per capire e affrontare le problematiche del processo, dal punto di vista elettrico, termico e meccanico. Inoltre, viene integrata con una simulazione al computer con il programma Flux 3D.

INTRODUZIONE

La saldatura a resistenza si è sviluppata fin dall'antichità ed è diventato uno dei processi maggiormente utilizzati nella saldatura. La tesi ha lo scopo di raccogliere le informazioni generali del processo, che poi sono completate ed elaborate dalla simulazione. È suddivisa in sei capitoli: il primo riguarda gli aspetti generali della saldatura, il secondo i principi e le applicazioni generali della saldatura a resistenza, il terzo la descrizione della saldatrice, il quarto la descrizione e le applicazioni della saldatura a punti, il quinto la descrizione teorica della simulazione numerica, e il sesto la simulazione con Flux 3D. Inoltre, gli argomenti sono arricchiti da esempi pratici, che aiutano a comprendere il problema.

CAPITOLO 1

ASPETTI GENERALI DELLA SALDATURA

La saldatura è la tecnica di giunzione con la quale si realizza la continuità del materiale metallico tra due pezzi da saldare. Il risultato dell'operazione è il cosiddetto "giunto saldato", chiamato più semplicemente "saldatura". La continuità può essere ottenuta essenzialmente in due modi:

- per contatto e connessione liquido-liquido, cioè portando a fusione i due materiali del giunto;
- per contatto solido-solido, cioè senza fusione: in questo caso la connessione si ottiene per mutua diffusione fra i materiali, che rimangono sempre allo stato solido.

Le modalità di comportamento dei vari materiali, nelle operazioni di saldatura, vengono definite dalla loro "saldabilità", che ne esprime l'attitudine ad essere saldati. Si distinguono:

- la "saldabilità operativa" riguarda la possibilità di realizzare, con una certa tecnologia operativa, una connessione di saldatura fra due pezzi metallici;
- la "saldabilità locale" si riferisce alle modifiche microstrutturali nel giunto e nella zona adiacente, che possono essere provocate durante saldatura;
- la "saldabilità globale" si riferisce alla possibilità che il giunto saldato possa correttamente entrare in una struttura o in una costruzione reale, cioè sia in grado di fornire la necessaria resistenza nelle condizioni di esercizio; è valutata attraverso prove meccaniche specifiche.

1.1 FORMAZIONE DEI LEGAMI

Quando due o più atomi sono posti in contatto, nasce una forza elettrostatica di attrazione tra nuclei di segno opposto, che aumenta al diminuire della distanza tra gli atomi. La corrispondente energia potenziale, invece, diminuisce al diminuire della distanza tra gli atomi, ed è legata alla forza dalla relazione $F = - dU/dx$ dove: F è la forza di attrazione o repulsione, U il potenziale e x la distanza. Per convenzione, la forza di attrazione è negativa e quella di repulsione è positiva. Questa relazione, lo possiamo visualizzare mediante i due grafici della figura 1:

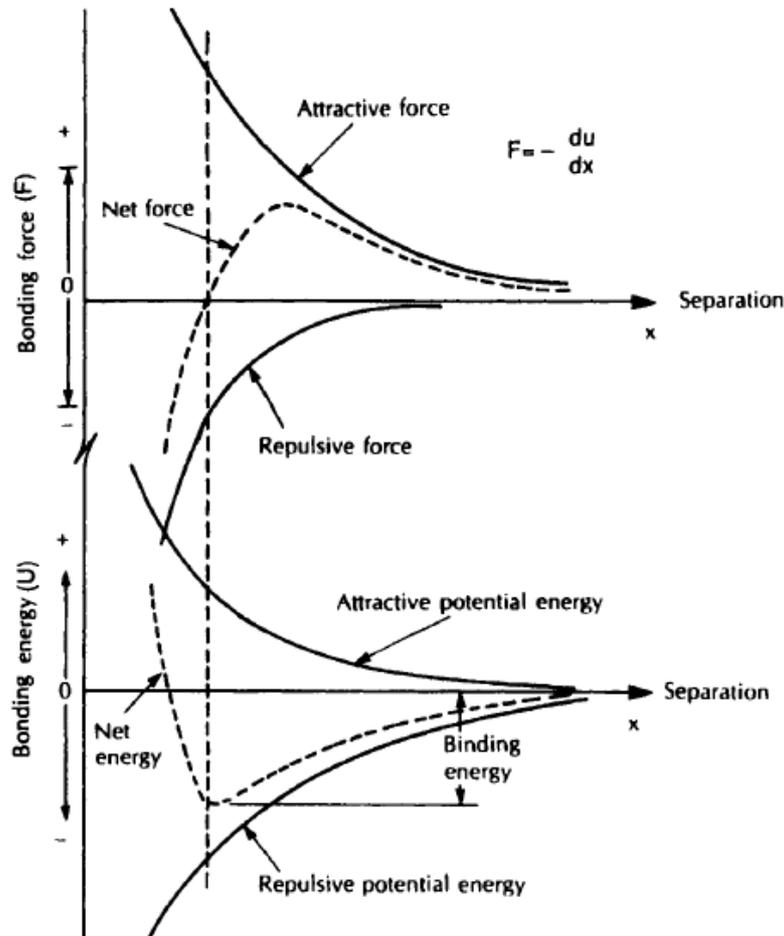


Figura 1 - Forza ed energia potenziale coinvolti nella formazione dei legami nella saldatura [3]

Dal grafico notiamo che la forza di repulsione aumenta più rapidamente di quella d'attrazione, e danno luogo a una forza risultante, la quale si annulla quando le due forze si bilanciano, raggiungendo l'equilibrio. Pertanto, quando l'energia potenziale è minima, il legame è stabile. L'attitudine degli atomi nell'essere legati è la base fondamentale della saldatura, perché devono raggiungere l'equilibrio interatomico, dando origine all'aggregato che formerà il giunto. Per i materiali metallici e ceramici, l'aggregato è la struttura cristallina, dove gli atomi sono posti in posizioni regolari, dando origine a una struttura tridimensionale. Come risultato, si ha la creazione di una continuità, necessaria per la saldatura.

1.2 VANTAGGI E SVANTAGGI DELLA SALDATURA

Il principale vantaggio della saldatura, è quello di fornire una struttura eccezionalmente integra, con un'alta efficienza. Inoltre, è utilizzata in un ampio campo di processi, e permette di saldare una grande varietà di materiali: quasi tutti i metalli e le loro leghe, molti polimeri termoplastici e alcuni materiali ceramici, con o senza riempitivi.

Altri vantaggi sono:

- I processi possono essere manuali, semiautomatici o automatici;
- Alcuni processi sono utilizzati nella produzione, nella riparazione e nel mantenimento di grandi strutture;
- Possibilità di eseguire saldature continue;

- La saldatura può essere realizzata in ambienti pericolosi, come ad esempio in aree soggette a radiazioni, usando robot;
- I costi sono contenuti per molte applicazioni.

I due grandi svantaggi sono, invece, che i pezzi saldati non possono più essere separati, e molti processi richiedono grandi quantità di calore, che possono degradare o distruggere le proprietà dei materiali. Inoltre, un'eccessiva produzione di calore, può portare a distorsioni o all'introduzione di tensioni residue, che possono essere problematiche. Infine, la saldatura richiede una grande abilità dell'operatore, e sofisticati sistemi di controllo.

1.3 IL RUOLO DELLA TEMPERATURA E DELLA PRESSIONE

Il calore e l'elevate temperature aiutano a ottenere la continuità materiale e, in tal modo, favoriscono la formazione della saldatura. Nello stato solido, il riscaldamento aiuta a eliminare strati di gas, l'umidità o contaminanti organici, fattori che permettono una ricristallizzazione del materiale. Di conseguenza, si ha il riordinamento atomico e si ristabilisce una comune orientazione degli atomi nella configurazione originale. Inoltre, si rimuovono gli effetti della lavorazione a freddo e si ripristinano le proprietà base del materiale. Pertanto, si distinguono i processi di saldatura a freddo e a caldo.

Il secondo meccanismo per ottenere la continuità è la diffusione, ossia il trasporto di masse da un luogo all'altro, grazie a movimenti atomici. Questi processi di saldatura vengono chiamati processi di saldatura a diffusione. Quest'ultima, può avvenire interamente nella fase solida o in presenza di un liquido. Nel primo caso, gli atomi si muovono in tutte le direzioni sulla struttura, sotto l'effetto della temperatura e della pressione. Nel secondo caso, invece, gli atomi del liquido entrano nella struttura cristallina del solido, creando un sottile strato di lega. Viceversa, gli atomi del solido possono entrare nel liquido e vengono diluiti, causando una modifica nella composizione chimica. In questi casi, il calore accelera la velocità di diffusione degli atomi e scioglie il substrato del materiale; di conseguenza, gli atomi passano allo stato liquido e raggiungono l'equilibrio.

La pressione aiuta a eliminare gli strati di gas e l'umidità, grazie a macro o micro deformazioni, elimina l'ossidazione del materiale, e deforma plasticamente le asperità del materiale aumentando così il numero di atomi che possono entrare in contatto.

1.4 L'EQUAZIONE GENERALE DEL FLUSSO DI CALORE

Il trasferimento di calore è espresso dall'equazione generale del flusso di calore:

$$c\gamma(T) \frac{dT}{dt} = \frac{d}{dx} \left[\lambda(T) \frac{dT}{dx} \right] + \frac{d}{dy} \left[\lambda(T) \frac{dT}{dy} \right] + \frac{d}{dz} \left[\lambda(T) \frac{dT}{dz} \right] - c\gamma(T) \left(V_x \frac{dT}{dx} + V_y \frac{dT}{dy} + V_z \frac{dT}{dz} \right) + w \quad (1.1)$$

Dove:

- x è la coordinata nella direzione di saldatura [mm];
- y è la coordinata trasversale alla direzione di saldatura [mm];
- z è la coordinata normale alla superficie di saldatura [mm];
- T è la temperatura di saldatura [K];
- $\lambda(T)$ è conducibilità termica del materiale in funzione della temperatura [$J \text{ mm}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-1}$];
- $\gamma(T)$ è la densità del materiale in funzione della temperatura [g/mm^3];

Infine vengono assunte altre due ipotesi: 1) le proprietà termiche del materiale (la conducibilità termica λ e il prodotto del calore specifico per la densità $c\gamma$) sono considerate costanti; 2) il sistema di coordinate da fisso diventa mobile. La prima assunzione è molto debole, perché queste proprietà variano fortemente con la temperatura, specialmente durante la fase di fusione. La seconda, invece, è ragionevole e sostituisce la coordinata x con la coordinata ξ , dove ξ è la distanza tra la fonte di calore (puntiforme) e i punti lungo l'asse delle x , dipendenti dalla velocità v , che presenta una sola componente lungo x :

$$\xi = x - vt \quad (1.2)$$

dove t è il tempo.

A questo punto differenziando l'equazione generale (1.1) rispetto a ξ si ottiene:

$$\frac{d^2T}{d\xi^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} = -\frac{c\gamma}{\lambda}v \frac{dT}{d\xi} + \frac{c\gamma}{\lambda} \frac{dT}{dt} \quad (1.3)$$

Questa equazione può essere ulteriormente semplificata, se consideriamo l'ipotesi che la distribuzione di temperatura sia quasi-stazionaria. Di conseguenza, la distribuzione della temperatura attorno al punto, che si muove a velocità costante, è costante; quindi $dT/dt = 0$ e $w/v =$ a costante. Pertanto:

$$\frac{d^2T}{d\xi^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} = -\frac{c\gamma}{\lambda}v \frac{dT}{d\xi} \quad (1.4)$$

Rosenthal risolse questa equazione per lastre di piccolo e grande spessore, dove il flusso di calore è rispettivamente in due e tre dimensioni.

La distribuzione di temperatura per piccoli spessori è:

$$T - T_0 = \frac{w}{2\pi\lambda} e^{-\frac{v\xi}{2k}} K_0 \frac{vR}{2k} \quad (1.5)$$

dove $k = \lambda/c\gamma$ è la diffusività termica [m^2/s], K_0 una funzione di Bessel del primo tipo, di ordine zero e $R = (\xi^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$.

La soluzione per grandi spessori è:

$$T - T_0 = \frac{w}{2\pi\lambda d} e^{-\frac{v\xi}{2k}} \frac{e^{-\frac{vR}{2k}}}{R} \quad (1.6)$$

dove d è la profondità della saldatura (per saldature simmetriche la profondità è metà dello spessore di saldatura $s = 2d$).

Queste ultime equazioni possono essere riscritte in una forma più semplice, considerando che la posizione di un punto dal centro di saldatura è individuata da una distanza radiale r , dove $r^2 = z^2 + y^2$. Per il primo caso:

$$T - T_0 = \frac{w}{v d \sqrt{4\pi \lambda c \gamma t}} e^{-\frac{r^2}{4kt}} \quad (1.7)$$

e per il secondo caso:

$$T - T_0 = \left(\frac{w}{2\pi \lambda v t} \right) e^{-\frac{r^2}{4kt}} \quad (1.8)$$

I grafici alle distribuzioni della temperatura corrispondenti a queste equazioni sono riportati nella figura 4:

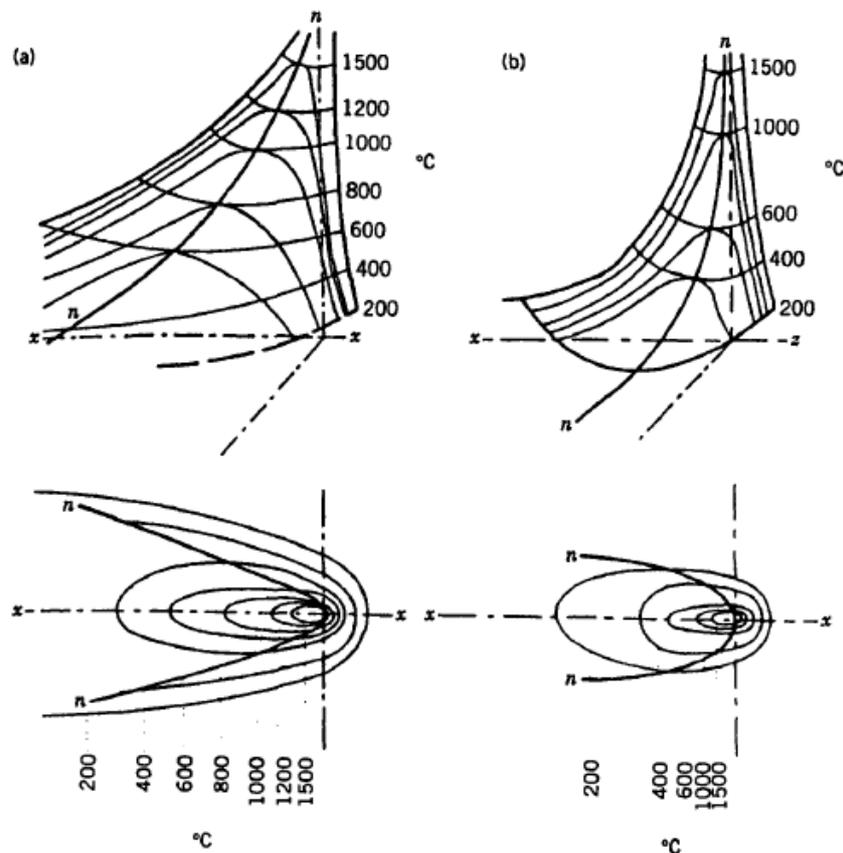


Figura 4 - Distribuzione di temperatura semplificata 2-D e 3D per piccoli (a) e grandi (b) spessori [3]

1.5 CLASSIFICAZIONE

Le tecnologie di saldatura disponibili sono molto numerose. Un importante criterio di classificazione è il cosiddetto "apporto termico", cioè la quantità di calore fornita dalla sorgente termica alla zona del giunto. Esso determina non solo il transitorio termico che subisce il materiale, ma anche le modalità di fusione e solidificazione del giunto, le variazioni strutturali conseguenti, ecc.. In definitiva ha una notevole influenza sulla struttura e quindi sulle caratteristiche tecnologiche finali del giunto. Le principali tecnologie di saldatura, suddivise in base al sistema di riscaldamento sono:

- Processi all'arco elettrico con elettrodi non fusibili (TIG), con elettrodi fusibili (MIG, MAG), con elettrodi rivestiti, ad arco sommerso;
- Processi a resistenza, a scintillio o con riscaldamento a induzione;
- Processi con laser, fascio elettronico, plasma.

Queste tecnologie utilizzano sistemi di protezione del giunto per evitare o limitare al massimo ogni interazione con l'ambiente circostante e in particolare con i gas dell'aria. Ad esempio, un'esigenza primaria per la saldatura di qualunque tipo di materiale è quella di evitare la formazione di film di ossido sulle superfici da saldare, che viene favorita proprio dal riscaldamento, oltre la temperatura di fusione. Questa esigenza è ancor più importante nel caso degli acciai inossidabili che, contenendo notevoli percentuali di cromo, presentano un'elevata velocità di ossidazione alle alte temperature con formazione di film di ossidi di cromo.

CAPITOLO 2

PRINCIPI FONDAMENTALI DELLA SALDATURA A RESISTENZA

2.1 CAMPI D'APPLICAZIONE

Mediante la saldatura elettrica a resistenza si possono realizzare sia giunti a sovrapposizione, nei quali la saldatura è limitata a piccole porzioni delle superfici sovrapposte, sia giunti di testa, nei quali la saldatura si estende a tutta la superficie di contatto dei pezzi.

2.1.1 SALDATURA A SOVRAPPOSIZIONE

La saldatura elettrica a resistenza su giunti sovrapposti si esegue applicando alle superfici di contatto una pressione fornita dagli elettrodi, che servono anche a portare la corrente ai pezzi da saldare. E' realizzata per fusione e per pressione nella zona di contatto: se quest'area è limitata attorno ad un punto viene chiamata *punto si saldatura*.

In particolare, la saldatura a sovrapposizione può essere:

- *A punti*: quando è realizzata con formazione di uno o più punti di saldatura, la cui forma e estensione sono funzione della forma e delle dimensioni degli elettrodi (figura 10-a).
- *A rulli*: quando è realizzata per mezzo di una linea di punti, ottenuta con elettrodi a disco detti rulli, rotanti lungo la linea di giunto (figura 10-b).

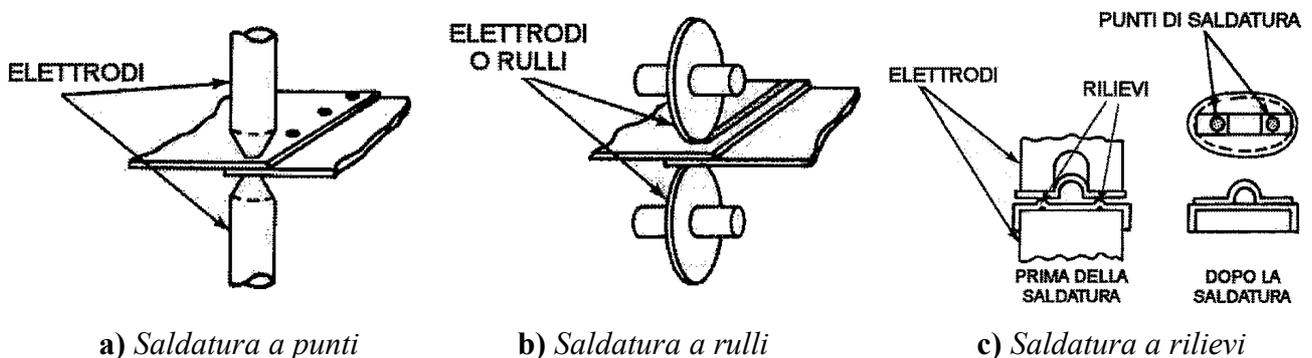


Figura 10 – Modalità di saldatura a sovrapposizione [2]

- *A rilievi o a proiezioni*: quando la forma e l'estensione della zona saldata sono determinate dalla forma e dalle dimensioni di opportuni rilievi preventivamente ricavati sulle superfici da saldare (figura 10-c).

Il processo di saldatura a sovrapposizione è utilizzato nella fabbricazione di carpenterie metalliche leggere, di componenti per il settore dei trasporti (automobilistico, ferro-tranviario), di recipienti semplici, di componenti per il settore elettronico e altri oggetti metallici (ad esempio reti elettrosaldate).

2.1.2 SALDATURA DI TESTA

La saldatura elettrica a resistenza su giunti di testa è eseguita:

- *A resistenza pura*: quando le superfici da saldare, portate allo stato plastico dal calore sviluppato, sono saldate mediante l'applicazione di una pressione che è mantenuta durante tutto il periodo di saldatura (figura 11-a);
- *A scintillio*: quando il calore necessario è ottenuto attraverso la produzione di una serie di piccoli archi elettrici fra le superfici da unire, e la saldatura si realizza mediante una brusca applicazione della pressione (figura 11-b).

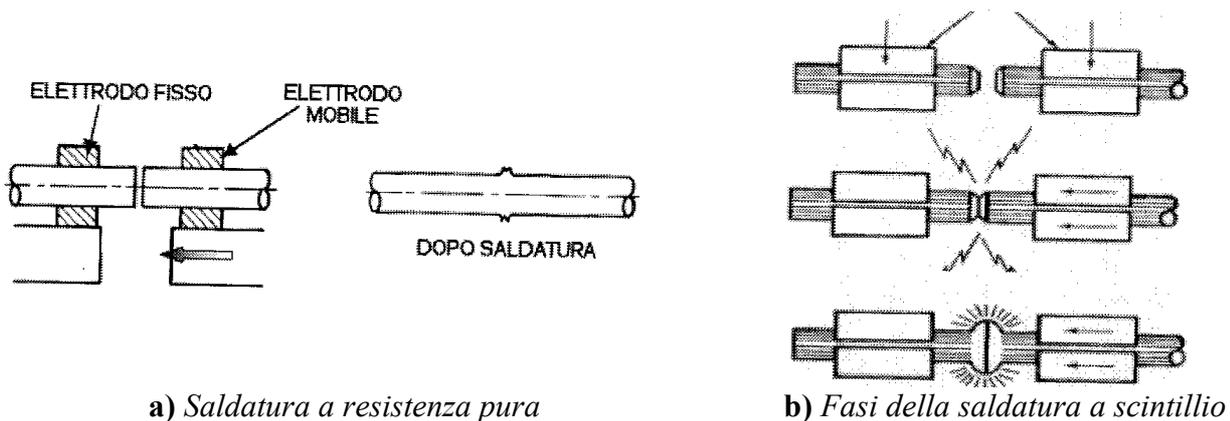


Figura 11 - Saldature di testa [2]

Le applicazioni di questo tipo di saldatura sono più limitate e viene utilizzata per saldare componenti di piccola sezione frontale, come cerchioni in acciaio per il settore automobilistico, gli anelli delle catene metalliche e le billette in acciaieria.

2.2 CARATTERISTICHE PRINCIPALI

La saldatura a resistenza è un procedimento di saldatura autogena per pressione, nel quale il calore necessario per portare le superfici da saldare alla temperatura di fusione è fornito per effetto Joule, attraverso la resistenza elettrica della zona da unire. La formazione della giunzione di saldatura dipende fortemente dalle proprietà elettriche, termiche e dal rivestimento dei materiali.

Per sviluppare forti quantità di energia in brevissimo tempo (quindi grandi potenze), sono necessarie alte correnti e alte resistenze, queste ultime concentrate nella sezione da saldare. Si ottiene così la massima velocizzazione del processo per accelerare i tempi di lavoro, ridurre il riscaldamento generale dei pezzi limitando i consumi di energia elettrica, evitare la formazione d'impronte, evitare la diminuzione di calore nei punti di saldatura, evitare il deterioramento delle punte degli elettrodi. I progettisti prevedono un allacciamento alla linea elettrica di rete, in genere trifase, e quindi la trasformazione dell'energia elettrica in bassa tensione, per ottenere, a parità di potenza, elevate correnti, e la realizzazione di una struttura capace di garantire l'accostamento dei pezzi con tempi e forze perfettamente determinabili e controllabili. La tensione di rete viene ridotta, tramite un trasformatore, a valori di qualche Volt, ed eventualmente trasformata in tensione continua tramite un raddrizzatore di potenza a ponte di diodi. Il circuito elettrico viene chiuso attraverso gli elettrodi e le parti da saldare.

2.2.1 CARATTERISTICHE ELETTRICHE

Consideriamo il caso della saldatura a punti e schematizziamo, come in figura 12, due lamiera sovrapposte fra due elettrodi di rame, collegati al circuito secondario di un trasformatore:

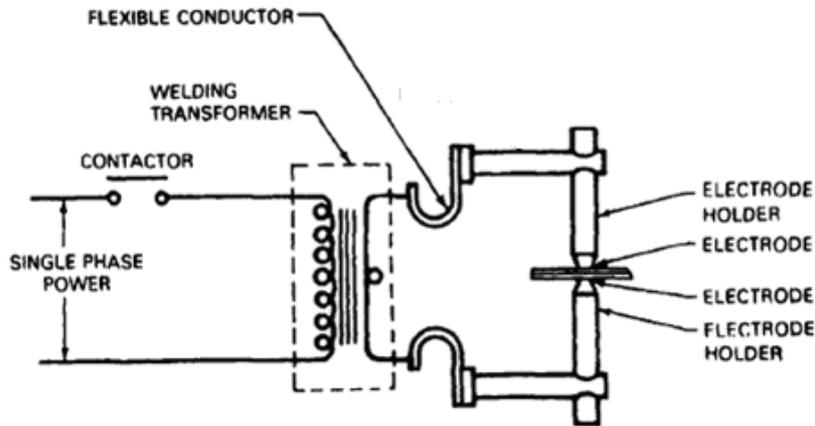


Figura 12 - Schema tipico del circuito di saldatura [3]

Se si chiude il circuito primario, la corrente che passa nel circuito secondario sviluppa un calore tanto più elevato quanto più elevata è la resistenza incontrata nelle sezioni di contatto, in base alla legge:

$$Q = k R i^2 t \quad (2.1)$$

dove:

- Q è la quantità di calore sviluppata [J];
- R è la resistenza elettrica del circuito secondario [Ω], dipendente dai collegamenti, dagli elettrodi, dal materiale e dalla pressione con cui sono premute le parti da saldare;
- i è l'intensità di corrente [A];
- t è il tempo di saldatura [s];
- k è un coefficiente correttivo che tiene conto delle perdite di calore per irraggiamento, conduzione e convezione.

Nella saldatura a resistenza, il calore generato è molto importante perché il riscaldamento non è uniforme in tutti i punti e la velocità di riscaldamento determina la microstruttura del materiale saldato.

La resistenza elettrica della zona di contatto può essere calcolata come somma di cinque resistenze poste in serie (vedi figura 13):

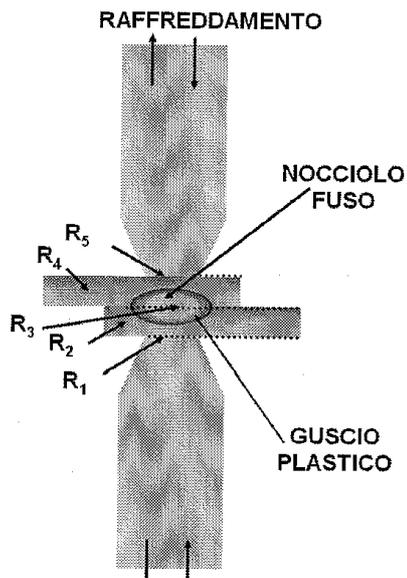


Figura 13 - Resistenza della zona di contatto [2]

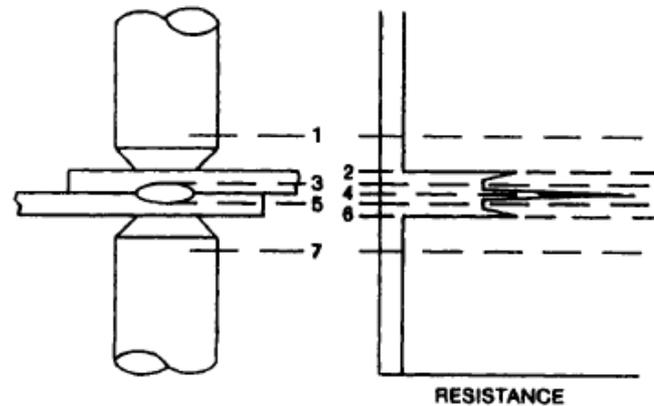


Figura 14 – Distribuzione della resistenza nella zona di contatto [3]

- R_0 : resistenza del circuito secondario fra le punte degli elettrodi. In generale è trascurabile, considerato che gli elettrodi sono in rame (ottimo conduttore elettrico) e anche raffreddati con circolazione interna d'acqua;
- R_1 : resistenza di contatto fra elettrodo inferiore (rame) e lamiera inferiore (acciaio). E' la resistenza di contatto fra un metallo molto conduttore (rame), con buona finitura superficiale, e uno meno conduttore, con grado di rugosità variabile a seconda dei casi;
- R_2 : resistenza della lamiera inferiore. E' minore della resistenza di contatto e aumenta al crescere della temperatura;
- R_3 : resistenza di contatto fra le due lamiere. E' la massima che si riscontra nel circuito secondario, dovuta alla ridotta sezione reale di passaggio della corrente;
- R_4 : resistenza della lamiera superiore. Valgono le stesse considerazioni fatte per R_2 ;
- R_5 : resistenza di contatto fra lamiera superiore ed elettrodo superiore. Valgono le stesse considerazioni fatte per R_1 .

Queste quantità generalmente non sono costanti perché le resistenze di contatto dipendono fortemente dalla temperatura e dalla pressione, mentre le resistenze delle lamiere solo dalla temperatura.

La distribuzione della resistenza nella zona di contatto è del tipo schematizzato in figura 14.

2.2.1.1 Resistenze delle lamiere

Com'è noto, la resistività della lamiera in funzione della temperatura, per i metalli comunemente usati nella saldatura resistenza, varia come rappresentato in figura 15.

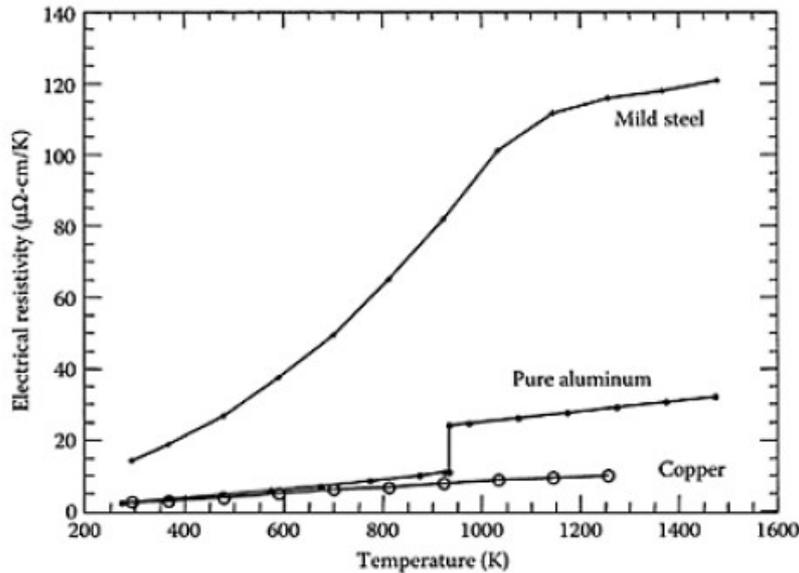


Figura 15 - Resistività della lamiera in funzione della temperatura per il rame, l'alluminio e l'acciaio dolce [4]

Dal grafico notiamo che le resistività aumentano con la temperatura, ma in modi differenti. Infatti, quella dell'acciaio è molto sensibile alla temperatura, e il suo valore è molto più grande rispetto a quello del rame. Pertanto, a parità di corrente elettrica applicata, si ha una maggiore generazione di calore nella zona di contatto tra le lamiera rispetto agli elettrodi.

Comparata con l'acciaio, la resistività dell'alluminio è molto bassa, ed è vicina a quella del rame prima della fusione. Di conseguenza, è difficile saldare alluminio puro utilizzando elettrodi in rame, ma questo è raramente richiesto nelle saldature. Infatti, si saldano generalmente leghe di alluminio perché presentano una resistività più alta rispetto a quella dell'alluminio puro.

2.2.1.2 Resistenza di contatto

Sebbene la resistenza delle lamiera sia indipendente dalla pressione, la resistenza di contatto è molto sensibile alla distribuzione della pressione e alle condizioni della superficie di contatto, in quanto caratterizzata da asperità e rugosità. Durante la fase di saldatura, una pressione adeguata elimina le irregolarità, e diminuisce la resistenza di contatto; mentre una pressione troppo piccola può non essere in grado di creare un sufficiente contatto elettrico, e può produrre riscaldamenti localizzati, o anche l'evaporazione di materiale.

Inoltre, le superfici delle lamiera possono essere caratterizzate dalla presenza di olio, di polveri, di ossidi, di vernici e altri materiali. In aggiunta, gli strati utilizzati per la protezione dalla corrosione e da altri fenomeni, influenzano la resistenza di contatto; per esempio, le lamiera d'acciaio zincato richiedono un'elevata corrente, per compensare la riduzione della resistenza di contatto dovuta alla presenza dello strato di zinco.

Un altro esempio è relativo alle lamiera di alluminio, nelle quali lo strato di ossido di alluminio influenza la resistenza di contatto sia tra gli elettrodi – lamiera, sia tra lamiera – lamiera; questo strato può essere non uniforme o può rompersi sotto la forza degli elettrodi; inoltre l'ossido di alluminio è un materiale altamente isolante, con un alto punto di fusione; la sua rottura o la non – uniformità può essere anche dovuta a un'irregolare distribuzione della corrente elettrica, con un elevato valore di densità di corrente su basse resistenze localizzate, che producono significativi riscaldamenti o fusioni localizzate.

Un processo stabile e uniforme di saldatura, può essere ottenuto con valori della resistenza di contatto lamiera – lamiera di 20÷50 μΩ. Ad esempio la resistenza di contatto per la saldatura

dell'alluminio può essere misurata utilizzando una saldatrice a punti e un ohmetro digitale, come schematizzato nella figura 16:

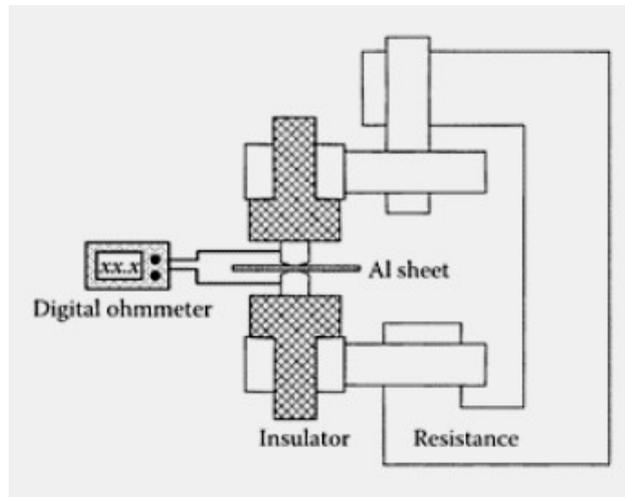


Figura 16 - Schema per la misura della resistenza di contatto [4]

Si eseguono venti misure casuali, per quattro tipi di condizioni delle superfici, e gli elettrodi sono puliti dopo ogni misura.

I metodi di pulitura sono:

- *Sgrassatura*: le lamiere di alluminio vengono immerse in un bagno d'acqua per cinque minuti, asciugate con il cotone, e poi risciacquate con acqua. In seguito sono lasciate ad asciugare in aria;
- *Trattamento chimico*: le lamiere sono prima sgrassate, e poi sono immerse in una soluzione d'acqua al 5% di NaOH, a 60°C per quattro minuti. In seguito sono risciacquate con acqua per tre volte, e poi immerse in una soluzione al 30% di HNO₃ per due minuti a temperatura ambiente; dopo di che sono risciacquate ed essiccate;
- *Pulizia ad arco elettrico*: le lamiere sono pulite usando un arco elettrico. Per evitare la fusione della superficie di alluminio, la corrente elettrica deve essere mantenuta a un certo valore per un piccolo intervallo di tempo.

I valori delle resistenze di contatto così misurate vengono riportate in un grafico, come in figura 17:

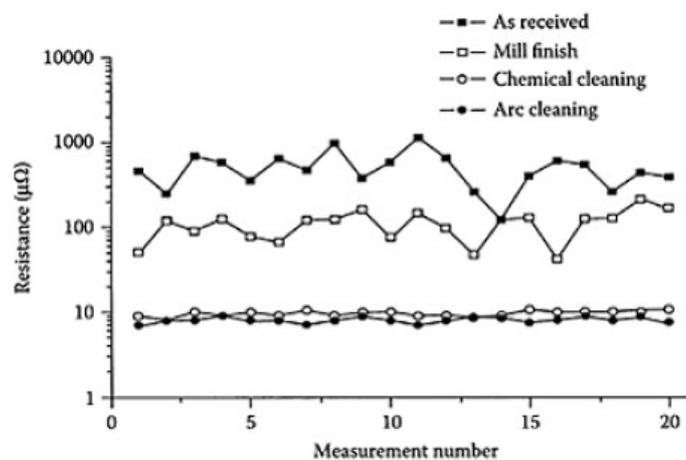


Figura 17 - Misure della resistenza di contatto in varie condizioni delle superfici [4]

Dal grafico notiamo che può esserci una significativa differenza nelle resistenze di contatto delle varie superfici. La pulizia ad arco elettrico comporta la resistenza di contatto più bassa perché gli strati di ossidi e grassi sulla superficie sono eliminati grazie all'intenso calore prodotto dall'arco. La resistenza dovuta al trattamento chimico è più o meno uniforme, con un valore leggermente più alto di quello della pulizia ad arco. Le superfici sgrassate hanno un'elevata resistenza di contatto, che è significativamente più bassa rispetto a quelle non trattate. Inoltre, la distribuzione delle resistenze in questi due casi non è uniforme, a differenza delle altre superfici.

In definitiva, la resistenza di contatto può essere considerata come effetto delle irregolarità delle superfici, che si toccano soltanto in alcuni punti dando luogo ad una ridotta sezione di passaggio della corrente (vedi figura 18):

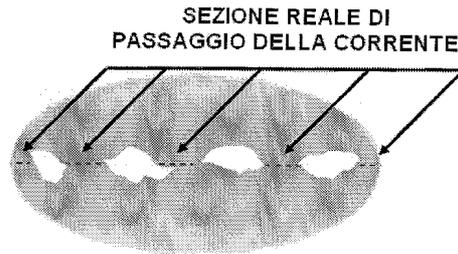


Figura 18 – *Superficie che determina la resistenza di contatto [2]*

Conseguentemente, considerando il calore prodotto durante il passaggio della corrente in ogni punto, i punti più caldi sono proprio la zona di contatto tra le lamiere (dove la resistenza è maggiore) e quella di contatto tra le lamiere da saldare e gli elettrodi; pertanto questi ultimi devono avere un efficace sistema di raffreddamento.

Considerando in dettaglio il circuito secondario nella zona di contatto, possiamo porre in relazione il calore sviluppato con le temperature raggiunte, secondo lo schema della figura 19:

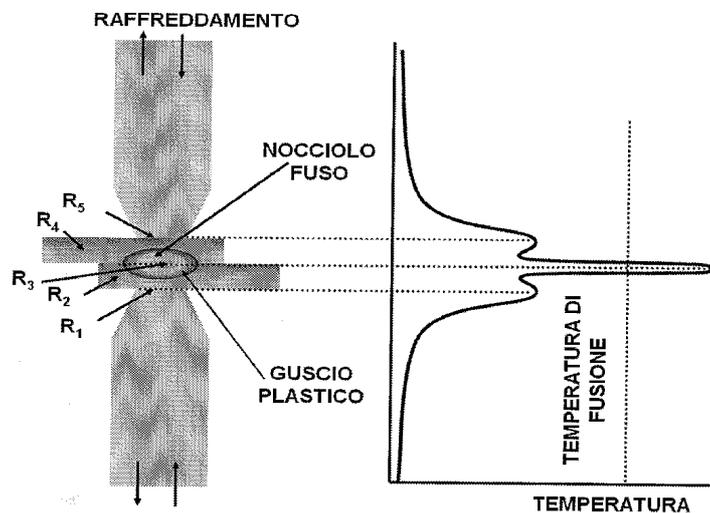


Figura 19 - *Distribuzione della temperatura nella zona di contatto [2]*

Tale situazione comporta che, dopo un opportuno intervallo di tempo, si sia generato sufficiente calore per portare a fusione un certo quantitativo di materiale, che risulta in uno stato di compressione a causa della pressione esercitata dagli elettrodi. Esso costituisce la zona fusa che, a causa della sua geometria, viene detta *nocciolo di saldatura*. Tale porzione del giunto, terminato il passaggio della corrente, solidifica velocemente perché il calore viene dissipato attraverso il circuito di raffreddamento degli elettrodi.

2.2.1.3 Resistenza totale

Nella saldatura a resistenza, il calore complessivo sviluppato nella zona di contatto è determinato dalla resistenza elettrica totale, che è la somma delle singole resistenze (di contatto e delle lamiere). Di conseguenza, una variazione del valore della resistenza totale si riflette nei valori delle singole resistenze. Ad esempio possiamo considerare nella figura 20 un confronto tra le variazioni della resistenza totale durante la saldatura per un acciaio e per una lega d'alluminio:

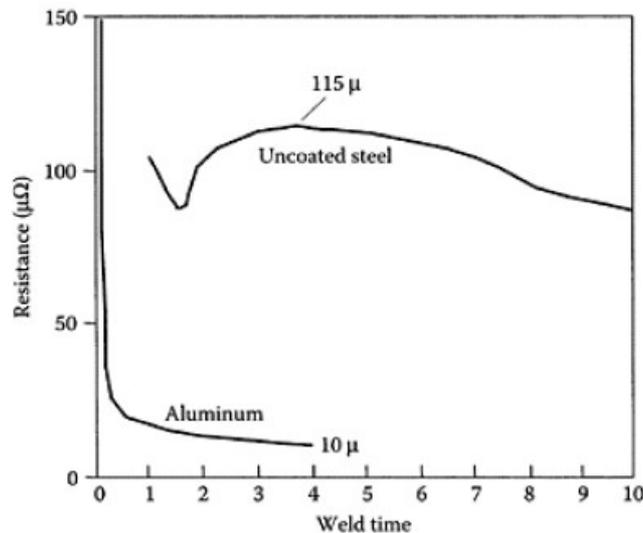


Figura 20 - Resistenza totale durante la saldatura di lamiere di acciaio e di lega d'alluminio [4]

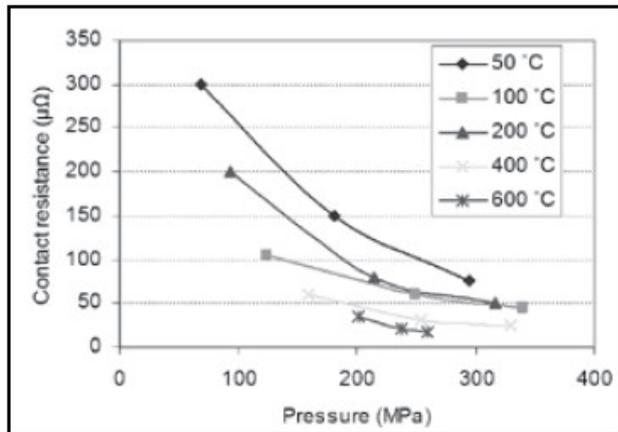
Dalla figura notiamo che, per l'alluminio, la presenza dell'ossido sulla superficie determina un'elevata resistenza di contatto negli stadi iniziali; poi c'è una grande diminuzione, dovuta all'eliminazione dello strato d'ossido grazie al calore prodotto dal passaggio della corrente. In seguito la diminuzione procede più lentamente perché prevale la resistenza propria della lamiera. Tuttavia, la resistività dell'alluminio aumenta all'aumentare della temperatura, e la resistenza totale dovrebbe aumentare. Però, durante la fusione, l'area di contatto aumenta mentre diminuisce lo spessore delle lamiere. Perciò, la resistenza totale diminuisce lentamente, perché la diminuzione della resistenza dovuta all'aumento dell'area, supera l'incremento della resistività dovuta al riscaldamento.

Rispetto all'alluminio, la resistenza totale nel caso dell'acciaio ha un andamento diverso. Anche in questo caso c'è una diminuzione della resistenza negli istanti iniziali, ma avviene in maniera più lenta. Questa diminuzione può essere attribuita alla variazione della resistenza di contatto attraverso l'eliminazione degli strati superficiali come il grasso. Poi si ha un incremento, dovuto all'aumento della resistività dell'acciaio, all'aumentare della temperatura. In seguito, a fusione completata, si ha una diminuzione della resistenza. Inoltre, possiamo notare che la resistenza dell'acciaio è molto più alta di quella dell'alluminio, perché le conducibilità elettriche e termiche dell'alluminio sono maggiori. Di conseguenza, per l'alluminio, devono essere usate correnti elettriche alte e tempi di saldatura brevi.

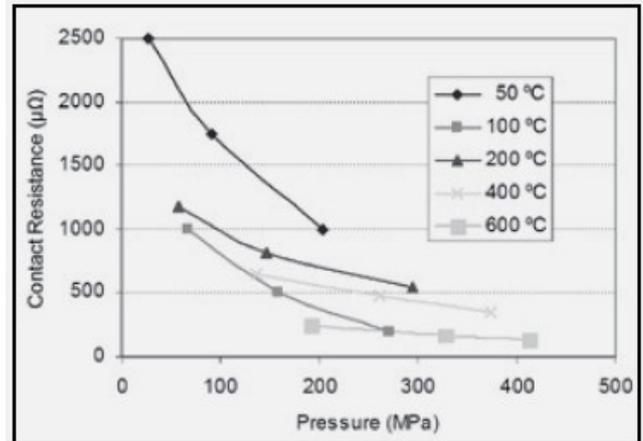
Anche le caratteristiche termiche ed elettriche degli elettrodi influenzano significativamente il processo di saldatura, in particolare la durata di vita degli elettrodi stessi. La presenza d'impurità diminuisce la conducibilità termica ed elettrica del rame e, quest'ultima, diminuisce all'aumentare delle impurità. Pertanto, quando si scelgono i materiali per gli elettrodi, questi aspetti devono essere considerati per una migliore qualità della saldatura e per una migliore durata di vita degli elettrodi stessi.

2.2.1.4 Resistenze di contatto di alcuni materiali

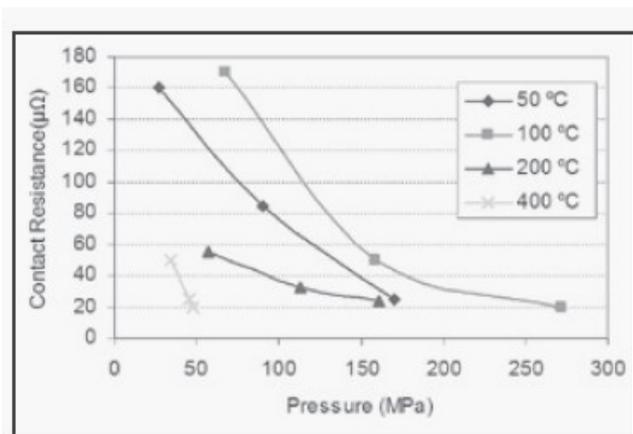
La resistenza di contatto varia di molto durante la saldatura, e rappresenta una parte importante della resistenza totale. Pertanto possiamo analizzare l'influenza della temperatura e della pressione sulla resistenza di contatto. Ad esempio, possiamo visualizzare nella figura 21 gli andamenti della resistenza di contatto in funzione della pressione e della temperatura, per lamiere di acciaio dolce, di acciaio inossidabile e di alluminio:



a) lamiere di acciaio dolce



b) lamiere di acciaio inossidabile



c) lamiere di alluminio

Figura 21 – Valori della resistenza di contatto di lamiere di diversi materiali, a diverse temperature, in funzione della pressione [6]

Dai grafici si può notare che la pressione influenza notevolmente la resistenza di contatto, la quale diminuisce all'aumentare della pressione.

Per l'acciaio dolce a 50 °C, la resistenza diminuisce da un valore di 300 $\mu\Omega$ a 75 $\mu\Omega$, quando la pressione aumenta da 70 MPa a 295 MPa. La velocità di diminuzione è minore per pressioni elevate e maggiore per pressioni basse. Inoltre, la resistenza di contatto, presenta il valore più alto a 50 °C, diminuisce a 100 °C, aumenta a 200 °C, e diminuisce nuovamente dopo i 200 °C. Questo è dovuto alla rottura dei film superficiali alle elevate temperature. Un'altra osservazione è che la variazione della resistenza con la temperatura è minore di quella con la pressione, perché l'aumento della pressione porta alla deformazione dell'area di contatto e alla rottura dei film superficiali.

Per l'acciaio inossidabile, notiamo che la resistenza di contatto è più alta di quella dell'acciaio dolce, avendo il primo una resistività maggiore. La resistenza di contatto massima si ha a 200 °C. Per l'alluminio, notiamo che presenta valori di resistenza di contatto minori di quelle degli acciai, per la sua minore resistività elettrica.

In tutti i casi, la pressione aumenta l'area di contatto e facilita la rottura di film superficiali, che diminuiscono la resistenza di contatto. Pertanto, la resistenza di contatto totale diminuisce

all'aumentare della pressione; in particolare, alle alte pressioni, questa diminuzione è minore perché i film superficiali sono completamente eliminati.

La temperatura influenza la resistenza di contatto in diversi modi. Le proprietà meccaniche e quelle elettriche, come la resistività, variano con la temperatura. L'area di contatto aumenta alle elevate temperature, e implica una bassa resistenza di contatto. Tuttavia, la resistività aumenta all'aumentare della temperatura, che provoca un aumento della resistenza di contatto stessa.

Anche i film superficiali sono influenzati dalla temperatura. Per esempio, il vapore acqueo e l'olio, alle elevate temperature evaporano, causando una diminuzione della resistenza di contatto; ma contemporaneamente, possono nascere strati di ossidazione (sempre alle alte temperature), che aumentano la resistenza di contatto stessa.

2.2.1.5 Circuito equivalente

Il circuito elettrico equivalente consiste in una tensione di alimentazione (nel caso considerato a 480 V) con la sua impedenza interna, il trasformatore di saldatura, e il circuito secondario di saldatura, che include i materiali da saldare e gli elettrodi. Tale circuito può essere schematizzato con una serie di resistenze e induttanze, come indicato in figura 22:

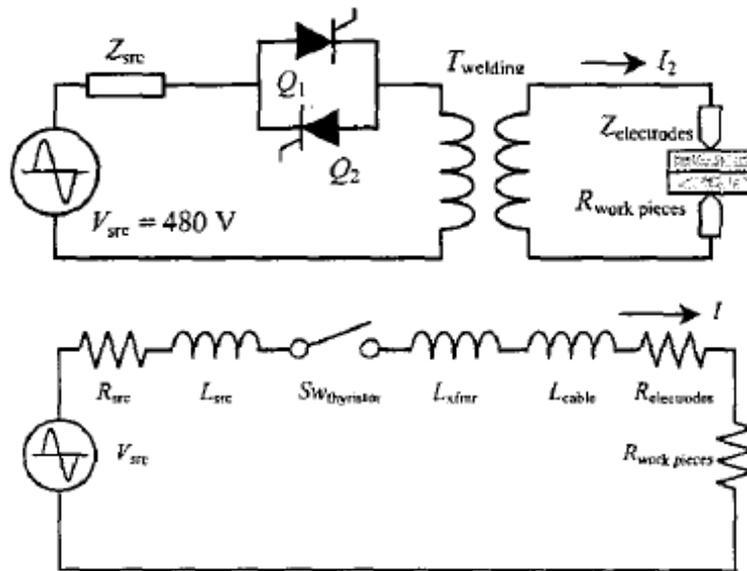


Figura 22 - Circuito equivalente [11]

La reattanza totale è costituita prevalentemente da quella del trasformatore, mentre gli elettrodi e il materiale rappresentano la maggior parte della resistenza. I tiristori sono considerati interruttori ideali che conducono nell'istante compreso tra l'angolo di accensione α e il passaggio per lo zero della corrente. Durante la saldatura soltanto uno dei tiristori conduce; se conduce Q1, allora la corrente istantanea di saldatura è:

$$i_2(t) = \frac{\sqrt{2}V_{source}}{Z} \left[\sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha - \phi) e^{\frac{R(\alpha - t)}{L(\omega - t)}} \right] \quad (2.2)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (2.3)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} \quad (2.4)$$

La corrente richiesta è compresa tra 2kA (saldatura a punti, di precisione) e 100kA (saldatura a proiezione, saldatura di testa), in valore efficace.

Il valore efficace della tensione secondaria è determinato dal valore efficace della tensione di alimentazione e dall'angolo di accensione α :

$$V_2 = V_{\text{source}} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\gamma + \frac{1}{2} \sin(2\alpha) - \frac{1}{2} \sin[2(\alpha + \gamma)] \right]} \quad (2.5)$$

dove γ è l'angolo di conduzione della corrente di saldatura.

La tensione del circuito secondario varia generalmente tra 2 e 25 V, e si ha una tensione tra 0,25 e 2 V tra gli elettrodi, a seconda del tipo di impiego. Tensioni superiori a 25 V causano effetti indesiderati come la formazione di archi e di spruzzi. L'angolo di conduzione per un qualsiasi angolo di accensione α e un qualsiasi fattore di potenza (individuato dall'angolo di sfasamento ϕ) soddisfa questa relazione:

$$\sin(\gamma + \alpha - \phi) = \sin(\alpha - \phi) e^{-\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\gamma}{\omega}\right)} \quad (2.6)$$

Una serie di curve di conduzione basate su questa equazione sono riportate in figura 23:

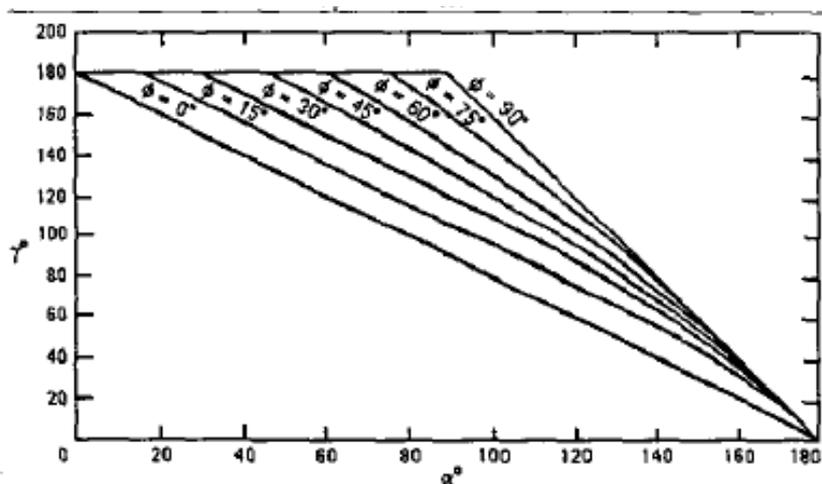


Figura 23 - Angolo di conduzione γ della corrente di saldatura in funzione di ϕ e α [11]

L'impedenza interna dell'alimentazione, la reattanza di dispersione del trasformatore, e l'induttanza dei collegamenti elettrici sono combinati in un'unica induttanza equivalente. Le resistenze degli elettrodi e quelle delle lamiere sono tenute in conto con un'unica resistenza equivalente. Il calore generato per effetto Joule, attraverso la resistenza elettrica durante il tempo t è:

$$Q = \int_0^t i(\tau)^2 R_{\text{workpieces}}(\tau) d\tau \quad (2.7)$$

dove la resistenza è una funzione del tempo, dei materiali e della temperatura.

2.2.1.6 Compensazione della potenza reattiva

Flicker: Le operazioni intermittenti nella saldatura impongono grandi e rapide variazioni della potenza reattiva, che causano fluttuazioni della tensione di alimentazione. Queste variazioni creano, a loro volta, disturbi nella rete di alimentazione (flicker) che devono essere evitati. Pertanto si devono utilizzare dei compensatori di potenza reattiva.

Le saldatrici a resistenza sono cause di fluttuazioni di tensione, di disturbi nella rete, di armoniche, e sono caratterizzate da un basso fattore di potenza. L'elevata reattanza del trasformatore limita la corrente di saldatura, erogando una buona parte di corrente reattiva, che è la causa del basso fattore di potenza. Quest'ultimo può creare significanti cadute di tensione e condizioni di carico sbilanciate, se non è presente un sistema di compensazione.

Compensatori statici (Static Var Compensators – SVC): i compensatori statici sono costituiti da banchi di condensatori caratterizzati da una risposta veloce, da un'alta affidabilità e flessibilità, nonché da bassi costi. Con i controlli convenzionali, il tempo di risposta è compreso tra due e tre cicli, che rendono gli SVC adatti per i controlli veloci della potenza reattiva. I tipi più comuni e utilizzati di SVC sono i reattori controllati a tiristori e banchi di condensatori (TSC): sono costituiti da banchi di condensatori di differente capacità, controllati da gruppi di tiristori posti in anti – parallelo, che permettono di variare la capacità totale da zero a quella massima. Inoltre, assolvono la funzione di filtro e consentono il controllo del fattore di potenza e degli squilibri del carico reattivo. Lo schema di un semplice sistema di potenza, comprendente un carico variabile di saldatura e, un SVC applicato al lato bassa tensione (480 V) è quello della figura 24:

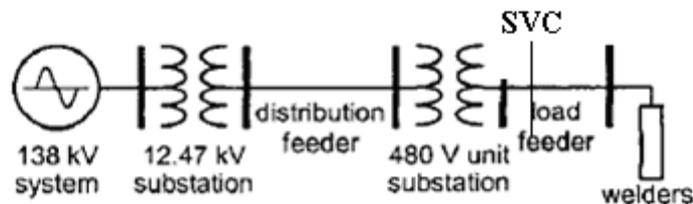


Figura 24 - Schema di un sistema di potenza [11]

Il diagramma della potenza fornita dal trasformatore per un sistema non – compensato è mostrato in figura 25-a), dove la potenza si riduce del 15 %, a causa delle armoniche prodotte dalla saldatrice. Inoltre, è rappresentato un tipico carico con fattore di potenza di 0.6, a cui corrisponde una potenza attiva minore del 40% rispetto a quella massima.

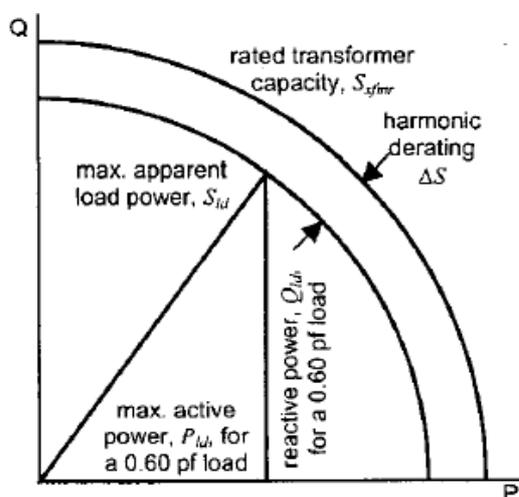


Figura 25-a) - Diagramma della potenza per il sistema non – compensato [11]

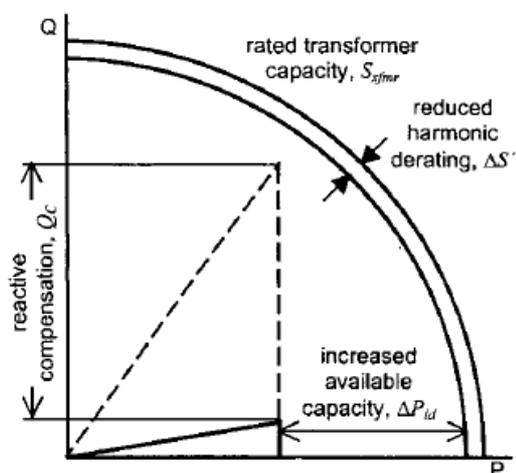


Figura 25-b) - Diagramma della potenza per il sistema compensato [11]

Il diagramma di potenza modificato grazie all'introduzione dell'SVC è mostrato in figura 25b): dal grafico notiamo che la potenza reattiva e la maggior parte delle armoniche sono state eliminate, con conseguente incremento della potenza attiva.

2.2.1.7 Formazione della zona di saldatura

Consideriamo un esame macrografico di un giunto saldato a punti, di due lamiere di spessore uguale:

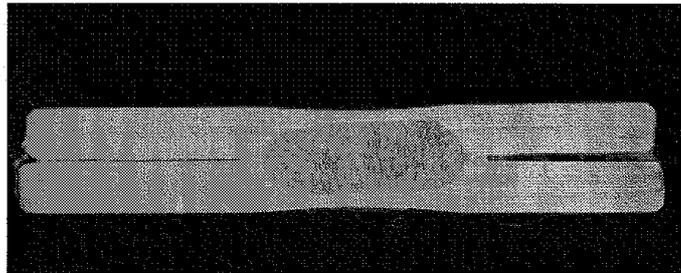


Figura 26 - Macrografia di un punto saldato a resistenza [2]

Nella figura possiamo notare:

- la zona fusa: costituita da una struttura cristallina di tipo dendritico – colonnare, con grani orientati principalmente verso le superfici (in direzione degli elettrodi, via di smaltimento del calore);
- la zona termicamente alterata, che contorna la zona fusa, caratterizzata dalla presenza di un'area ricristallizzata, prossima alla linea di fusione, e da altre zone con struttura metallurgica alterata.

Durante la saldatura, il calore viene generato in corrispondenza dell'area di contatto lamiera - lamiera, dove la resistenza elettrica è maggiore. Di conseguenza nascono delle forze in seno al materiale, orientate dall'interno verso l'esterno e dovute alla dilatazione termica dei materiali; tali forze sono contrastate dalla pressione esercitata dagli elettrodi. Questa situazione influisce particolarmente sullo strato di materiale avente temperatura inferiore a quella di fusione ma superiore a quella di ricristallizzazione, che, per effetto dello stato tensionale, ricristallizza e genera una struttura metallica continua che si definisce *saldatura allo stato solido*. Si genera pertanto il *guscio plastico*, che precede l'espansione del nocciolo fuso, eliminando impurità e gas: per questo motivo si ha la possibilità di saldare metalli anche molto reattivi (ad esempio acciai legati, leghe di alluminio, leghe di titanio) senza l'ausilio di una protezione esterna, oppure di saldare lamiere ricoperte o non particolarmente pulite.

Nel caso della saldatura a rulli, il giunto si presenta come una serie di punti parzialmente sovrapposti; per la saldatura a rilievi, i rilievi stessi generano singoli punti di saldatura; nella saldatura di testa, si verifica una leggera espansione del guscio verso l'esterno, che non può rompersi per evitare l'espulsione del nocciolo fuso. La saldatura a scintillio rappresenta un caso particolare in cui la saldatura avviene con la completa espulsione della zona fusa (da cui le scintille), e la giunzione è solamente affidata alla giunzione allo stato solido tra i due elementi da unire.

2.2.2 CARATTERISTICHE TERMICHE

La dissipazione di calore attraverso gli elettrodi avviene in ogni istante per conduzione; di conseguenza, si deve mantenere una temperatura bassa negli elettrodi, per ottenere un'ottima qualità della saldatura e un'ottima durata di vita degli elettrodi stessi. Consideriamo, nella figura 27, la conducibilità termica del rame, dell'alluminio e dell'acciaio dolce:

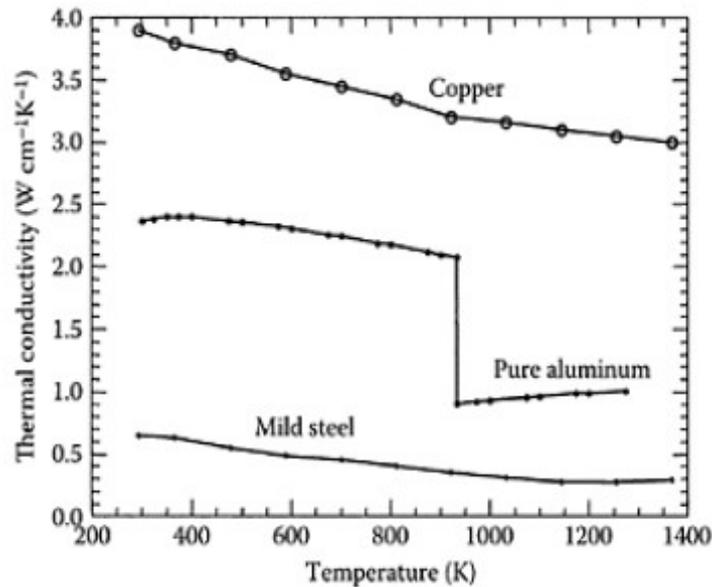


Figura 27 - Conducibilità termica di alcuni materiali [4]

Notiamo che la conducibilità termica del rame è più alta di quella dell'acciaio dolce e dell'alluminio; quindi il calore trasferito per conduzione agli elettrodi, può essere rapidamente dissipato se gli elettrodi sono adeguatamente raffreddati. In confronto con l'acciaio, l'alluminio ha una più alta conducibilità termica, e il calore trasferito per conduzione nelle lamiere di alluminio è dissipato rapidamente. Di conseguenza, è necessario generare maggior calore (nella forma di un'elevata corrente per un piccolo periodo di tempo), per evitare eccessive perdite di calore. Inoltre, siccome l'alluminio ha una grande affinità con il rame a formare leghe con più basse conducibilità elettrica e termica, il calore sugli elettrodi promuove la formazione del bronzo.

L'espansione termica dovuta al riscaldamento è differente per ogni materiale, sia nella fase solida sia in quella liquida. Ad esempio possiamo esaminare in figura 28 i coefficienti di espansione termica per l'alluminio puro, rame e acciaio dolce:

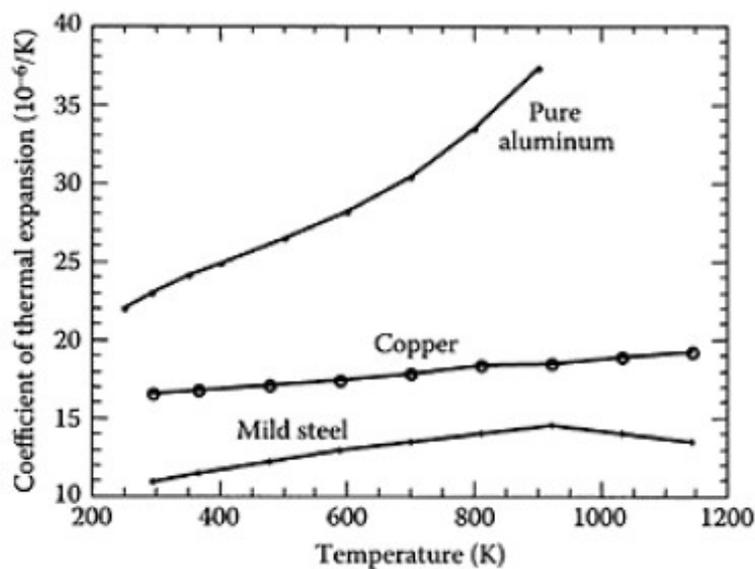


Figura 28 - Coefficiente di espansione termica di alcuni materiali [4]

Durante la saldatura, le lamiere non sono lasciate espandere liberamente, ma sono strette dagli elettrodi, per mantenere il contatto elettrico e termico e per evitare l'espulsione di metallo fuso. I calcoli mostrano che la pressione nel nocciolo dell'alluminio liquido è doppia rispetto a quella

dell'acciaio. Siccome l'alluminio ha un coefficiente di espansione termica maggiore del rame o dell'acciaio, è necessaria una maggiore forza agli elettrodi nella saldatura dell'alluminio; di conseguenza sono utilizzati trasformatori di potenza elevati, braccia porta – elettrodi più rigide e cilindri pneumatici di maggiori dimensioni. Inoltre, in questo caso, le tensioni termiche possono essere elevate, e possono portare alla rottura e alla formazione di porosità.

Il processo termico della saldatura influenza lo spostamento degli elettrodi. Infatti, un incremento netto del calore, quando quello prodotto per effetto Joule supera quello perso per conduzione, tende ad allontanare gli elettrodi. Al contrario, quando c'è un calore netto perso, gli elettrodi tendono a restringersi. Ad esempio possiamo considerare il grafico di figura 29 che mostra lo spostamento dell'elettrodo durante la saldatura di acciaio, con la relativa corrente elettrica:

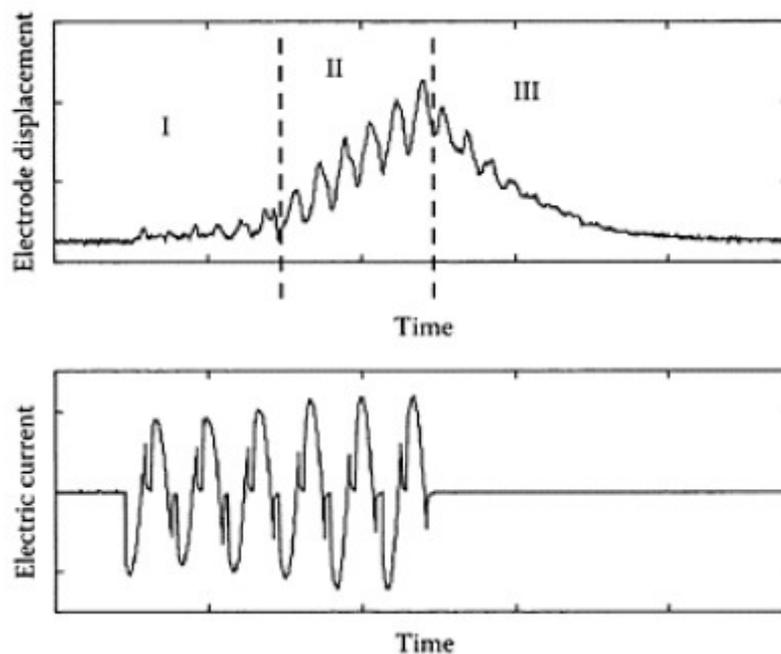


Figura 29 - Spostamento degli elettrodi [4]

Dopo che la corrente elettrica è applicata, il materiale è riscaldato, come mostra la regione I. Dopo circa tre cicli di riscaldamento, lo spostamento dell'elettrodo subisce un incremento rapido. Questo aumento è causato dall'incremento di volume dovuto alla fusione, che è molto più alto rispetto a quello del materiale ancora solido. Dopo che la corrente è cessata, le lamiere si raffreddano e si contraggono, come mostrato nella regione III. Siccome è applicata una corrente alternata, il calore generato aumenta nel primo quarto di periodo, e diminuisce nel secondo quarto. Assumendo che la velocità di raffreddamento non cambi molto, lo spostamento dell'elettrodo segue il ciclo di riscaldamento/raffreddamento creato dalla corrente alternata. Siccome il calore generato non è sensibile alla polarità elettrica, il segnale dello spostamento dell'elettrodo ha una frequenza doppia rispetto a quella della corrente.

2.2.2.1 Perdite di calore

Le perdite di calore sono costituite dalle perdite per irraggiamento nelle forme d'infrarossi, visibile, e ultravioletto; dalle perdite per convezione nell'aria o nei gas protettivi; dalle perdite per conduzione attraverso gli elettrodi, i collegamenti elettrici aggiuntivi e le masse di materiale attorno alla regione di fusione. Ci sono, inoltre, perdite dovute all'evaporazione e a schizzi di materiale fuso.

2.2.3 BILANCIO TERMICO

2.2.3.1 Legge di similitudine termica

La legge della similitudine termica è basata sull'analisi del flusso di calore, che tenta di mantenere simili le distribuzioni della temperatura nei vari spessori dei materiali da saldare. Essa mette in relazione le dimensioni geometriche e il tempo, e afferma che si ottengono distribuzioni di temperatura simili se il tempo di saldatura è proporzionale al quadrato dello spessore delle lamiere, ossia:

$$t \propto h^2 \quad (2.8)$$

In generale, quando lo spessore delle lamiere e il diametro degli elettrodi incrementa n volte, allora il tempo di saldatura deve aumentare n^2 volte e la densità di corrente deve diminuire di n volte, per avere una nuova distribuzione di temperatura simile alla precedente.

Se indichiamo rispettivamente con h_1 (h_2), de_1 (de_2), δ_1 (δ_2), e t_1 (t_2), lo spessore delle lamiere, il diametro degli elettrodi, la densità di corrente e il tempo di saldatura di un primo sistema lamiera – lamiera; allora le distribuzioni della temperatura di un secondo sistema lamiera – lamiera sono simili se:

$$h_2 = n \cdot h_1 \quad (2.9)$$

$$de_2 = n \cdot de_1 \quad (2.10)$$

$$\delta_2 = \frac{\delta_1}{n} \quad (2.11)$$

$$t_2 = n^2 \cdot t_1 \quad (2.12)$$

Sebbene queste leggi rendano teoricamente simili le distribuzioni, il loro uso è generalmente limitato, ed esse servono solamente come mezzi per una migliore comprensione del processo di saldatura.

2.2.3.2 Bilancio termico

Nella saldatura a resistenza, il bilancio termico può essere definito come la condizione per la quale le zone di fusione di entrambi i pezzi sono caratterizzati dallo stesso valore di temperatura e di pressione. Esso è influenzato dalla conducibilità termica ed elettrica dei materiali, dalla geometria della saldatura, e dalla geometria degli elettrodi. Infatti, se ad esempio consideriamo due materiali da saldare e uno ha una resistività elettrica maggiore dell'altro, quest'ultimo si scalda più rapidamente, e si ha così una saldatura non – uniforme.

L'idea base della teoria del bilancio termico è quella che il calore totale prodotto nella saldatura è suddiviso in quello necessario per la zona di fusione, in quello per la zona termicamente alterata (Heat Affected Zone – HAZ – vedi paragrafo 2.2.1.7) e in quello per la zona dei bordi. Questa divisione è necessaria, ad esempio, quando i materiali hanno differente spessore e proprietà. Invece di considerare lo spessore totale delle lamiere, si considera il calore in ingresso in ognuna di queste tre zone. Pertanto, per due lamiere unite, ci sono due zone di fusione, circondate dalle relative zone termicamente alterate e dai bordi (vedi figura 30):

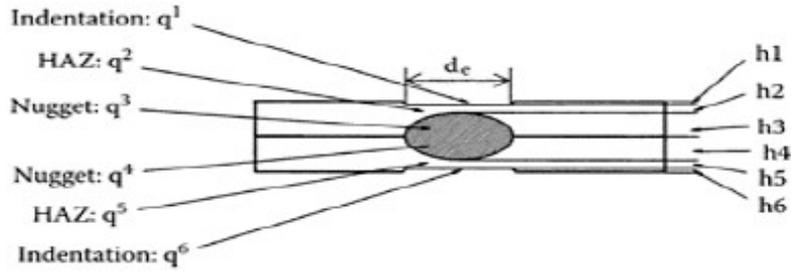


Figura 30 - *Suddivisione in zone della saldatura per il calcolo delle quantità di calore (q è il calore e h lo spessore di ciascuna zona) [4]*

In generale, il calore necessario per scaldare un solido o un liquido è dato dalla relazione:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2.13)$$

dove m è la massa, c_p è il calore specifico del materiale, e ΔT è il salto di temperatura. Pertanto il calore può essere calcolato appena si conoscono la massa, le proprietà termiche, e la temperatura massima.

Ogni zona è idealizzata, per semplicità, come un piccolo cilindro. Assumendo che la zona termicamente alterata (HAZ) ha lo stesso diametro dell'elettrodo, la massa della zona può essere espressa come:

$$m = \frac{\pi}{4} \cdot d_e^2 \cdot h \cdot \gamma \quad (2.14)$$

dove d_e è il diametro dell'elettrodo, h è l'altezza della zona, e γ è la densità della lamiera. In seguito, il calore di questa zona può essere calcolato con l'espressione 2.13.

Per il bordo, si assume che il cilindro si scaldi dalla temperatura ambiente alla temperatura di fusione; le quantità di calore di entrambi i bordi sono:

$$q1 = \frac{\pi}{4} d_{e1}^2 \gamma_1 c_{p1} h_1 \Delta T_1 \quad (2.15)$$

$$q6 = \frac{\pi}{4} d_{e2}^2 \gamma_2 c_{p2} h_6 \Delta T_6 \quad (2.16)$$

Dove $\Delta T_1 = \Delta T_6 = T_{melt} - T_{amb}$ è la differenza tra la temperatura di fusione e la temperatura ambiente, d_{e1} e d_{e2} sono i diametri dei due elettrodi, c_{p1} e c_{p2} sono i calori specifici dei rispettivi materiali, e h_1 e h_6 sono le profondità dei bordi, rispettivamente per la lamiera superiore e quella inferiore.

In analogia, per la zona termicamente alterata (HAZ), i calori in ingresso in entrambe le parti sono;

$$q2 = \frac{\pi}{4} d_{e1}^2 \gamma_1 c_{p1} h_2 \Delta T_2 \quad (2.17)$$

$$q5 = \frac{\pi}{4} d_{e2}^2 \gamma_2 c_{p2} h_5 \Delta T_5 \quad (2.18)$$

dove $\Delta T_2 = \Delta T_5 = T_{melt} - T_{amb}$.

La fusione si ha nel nocciolo, dove il calore necessario comprende quello per scaldare il materiale dalla temperatura ambiente a quella di fusione, quello latente di fusione, e quello per elevare la temperatura oltre al punto di fusione. Pertanto, i calori in ingresso in entrambe le parti sono:

$$q_3 = \frac{\pi}{4} d_{e_1}^2 h_3 \left[\gamma_1 c_{p_1} (T_{melt} - T_{amb}) + \gamma_1' L_{f_1} + \gamma_1'' c_{p_1}' (T_{max} - T_{melt}) \right] \quad (2.19)$$

$$q_4 = \frac{\pi}{4} d_{e_2}^2 h_4 \left[\gamma_2 c_{p_2} (T_{melt} - T_{amb}) + \gamma_2' L_{f_2} + \gamma_2'' c_{p_2}' (T_{max} - T_{melt}) \right] \quad (2.20)$$

dove h_3 e h_4 sono le altezze della zona di fusione, γ_1' e γ_2' sono le densità del liquido alla temperatura di fusione, γ_1'' e γ_2'' sono le densità medie, c_{p_1}' e c_{p_2}' sono i calori specifici medi del liquido tra la temperatura T_{max} e T_{melt} , e L_{f_1} e L_{f_2} sono i calore latenti di fusione.

Il calore totale necessario alla saldatura è:

$$\begin{aligned} q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = & \frac{\pi}{4} d_{e_1}^2 \gamma_1 c_{p_1} h_1 \Delta T_1 + \frac{\pi}{4} d_{e_1}^2 \gamma_1 c_{p_1} h_2 \Delta T_2 + \\ & + \frac{\pi}{4} d_{e_1}^2 h_3 \left[\gamma_1 c_{p_1} (T_{melt} - T_{amb}) + \gamma_1' L_{f_1} + \gamma_1'' c_{p_1}' (T_{max} - T_{melt}) \right] + \\ & + \frac{\pi}{4} d_{e_2}^2 h_4 \left[\gamma_2 c_{p_2} (T_{melt} - T_{amb}) + \gamma_2' L_{f_2} + \gamma_2'' c_{p_2}' (T_{max} - T_{melt}) \right] + \frac{\pi}{4} d_{e_2}^2 \gamma_2 c_{p_2} h_5 \Delta T_5 \\ & + \frac{\pi}{4} d_{e_2}^2 \gamma_2 c_{p_2} h_6 \Delta T_6 \end{aligned} \quad (2.21)$$

Grazie alle quantità di calore così calcolate, la dimensione caratteristica H è definita come:

$$H = h_1 \frac{q_1}{q} + h_2 \frac{q_2}{q} + h_3 \frac{q_3}{q} + h_4 \frac{q_4}{q} + h_5 \frac{q_5}{q} + h_6 \frac{q_6}{q} \quad (2.22)$$

Questa dimensione caratteristica è usata per definire gli spessori dell'intero sistema, perché è data dai contributi di tutte le regioni. Sebbene le regioni dipendano dal processo di saldatura, i valori di h_i ($i=1\dots6$) sono definiti indipendentemente dal processo e possono essere indipendentemente modificati per ottenere le caratteristiche di saldatura desiderate.

Per i sistemi di saldatura a spessori regolari, il tempo, la corrente, la forza e i diametri degli elettrodi, possono essere scelti da tabelle predefinite come quelle del Welding Handbook. Per i sistemi a spessori irregolari, i parametri possono essere scelti a partire da quelli regolari. Ad esempio, una serie di spessori caratteristici (Sheet Thickness - H) per la saldatura di lamiera d'acciaio con basso tenore di carbonio sono mostrate nella tabella 1.

Sheet Thickness (mm)	Welding Current (A)	Weld Time (msec/cycle)	Electrode Force (kg/lb)	Electrode Diameter (mm)
0.508	8500	117/7	181/400	4.78
0.635	9500	133/8	204/450	4.78
0.762	10,500	150/9	227/500	6.35
0.889	11,500	150/9	272/600	6.35
1.016	12,500	167/10	317/700	6.35
1.143	13,000	183/11	340/750	6.35
1.270	13,500	200/12	363/800	7.92
1.397	14,000	217/13	408/900	7.92
1.524	15,000	233/14	454/1000	7.92
1.778	16,000	267/16	544/1200	7.92
2.032	17,000	300/18	635/1400	7.92
2.286	18,000	333/20	726/1600	9.53
2.667	19,500	383/23	816/1800	9.53
3.048	21,000	467/28	952/2100	9.53

Tabella 1 - Parametri di saldatura per lamiera d'acciaio con basso tenore di carbonio [4]

Come detto in precedenza, per un sistema lamiera – lamiera, la quantità di calore necessaria per la saldatura è proporzionale al quadrato della corrente, al tempo, e alla resistenza dei materiali:

$$q \propto I^2 \cdot R \cdot \tau \quad (2.23)$$

La resistenza può essere assunta proporzionale alla dimensione caratteristica del sistema, e inversamente proporzionale al quadrato del diametro del nocciolo:

$$R \propto \frac{H}{d_e^2} \quad (2.24)$$

Quindi:

$$q \propto I^2 \cdot \frac{R}{d_e^2} \cdot \tau \quad (2.25)$$

In realtà, queste equazioni non tengono conto del calore perso attraverso gli elettrodi e le lamiere; di conseguenza, il calore calcolato non è quello totale. Pertanto esse vengono usate soltanto per determinare le dimensioni dei materiali da saldare.

Ad esempio, indichiamo rispettivamente con $H_1, I_1, \tau_1, d_{e1}, F_1$ la dimensione caratteristica, la corrente, il tempo, il diametro del nocciolo e la forza degli elettrodi per una lamiera, e $H_2, I_2, \tau_2, d_{e2}, F_2$ i parametri della seconda lamiera. Se facciamo l'ipotesi che il calore necessario per formare spessori irregolari sia dato dalla somma di quello per piccoli spessori regolari e da quello per grandi spessori regolari, allora i parametri per la saldatura di spessori irregolari possono essere approssimati in questo modo:

$$H_3 = \frac{\frac{I_1^2 \cdot H_1 \cdot \tau_1}{d_{e1}^2} + \frac{I_2^2 \cdot H_2 \cdot \tau_2}{d_{e2}^2}}{\frac{I_1^2 \cdot \tau_1}{d_{e1}^2} + \frac{I_2^2 \cdot \tau_2}{d_{e2}^2}} \quad (2.26)$$

$$\tau_3 = \frac{\frac{I_1^2 \cdot H_1 \cdot \tau_1}{d_{e_1}^2} + \frac{I_2^2 \cdot H_2 \cdot \tau_2}{d_{e_2}^2}}{H_3 \cdot \left(\frac{I_1^2}{d_{e_1}^2} + \frac{I_2^2}{d_{e_2}^2} \right)} \quad (2.27)$$

$$I_3^2 = \frac{\frac{I_1^2 \cdot H_1 \cdot \tau_1}{d_{e_1}^2} + \frac{I_2^2 \cdot H_2 \cdot \tau_2}{d_{e_2}^2}}{H_3 \cdot \tau_3 \cdot \left(\frac{1}{d_{e_1}^2} + \frac{1}{d_{e_2}^2} \right)} \quad (2.28)$$

La forza degli elettrodi è assunta proporzionale al quadrato del diametro degli elettrodi, per mantenere costante la pressione:

$$F \propto d_e^2 \quad (2.29)$$

Perciò:

$$F_3^2 = \frac{\frac{F_1}{d_{e_1}^2} + \frac{F_2}{d_{e_2}^2}}{\frac{1}{d_{e_1}^2} + \frac{1}{d_{e_2}^2}} \quad (2.30)$$

La temperatura è assunta proporzionale al calore generato, e inversamente proporzionale allo spessore caratteristico e al quadrato del diametro degli elettrodi:

$$T \propto \frac{q}{H \cdot d_e^2} \quad (2.31)$$

Siccome le zone della saldatura sono assunte simili alle loro equivalenti zone per spessori regolari, l'equazione precedente può essere usata per approssimare la temperatura di saldatura.

Se indichiamo con q_1 e q_2 le quantità di calore delle due lamiere per spessori regolari, il calore cercato q_3 è:

$$q_3 = \frac{\frac{q_1}{H_1 \cdot d_{e_1}^2} + \frac{q_2}{H_2 \cdot d_{e_2}^2}}{\frac{1}{H_3} \cdot \left(\frac{1}{d_{e_1}^2} + \frac{1}{d_{e_2}^2} \right)} \quad (2.32)$$

2.2.4 DURATA DI VITA DEGLI ELETTRIDI

I processi elettrici e termici determinano l'usura degli elettrodi e, di conseguenza, la vita degli elettrodi stessi. La resistenza di contatto dipende dalla condizione della superficie, e determina il calore generato e le reazioni metallurgiche nella zona di contatto fra elettrodo e lamiera. Ad

esempio, nel caso della saldatura di lamiera d'acciaio, lo strato di zinco influenza l'usura degli elettrodi perché si lega con il rame e aumenta la resistività di contatto. In questo modo, la temperatura dell'elettrodo aumenta a sua volta, incrementandone l'usura. Nel caso dell'alluminio, il rapido deterioramento dell'elettrodo è dovuto alle alte pressioni e temperature, e alla rapidità del processo nel formare leghe. Infatti, il deterioramento dovuto alla formazione della lega Cu – Al, è influenzato notevolmente dalla resistenza di contatto elettrodo – lamiera.

2.2.5 DISTORSIONI INDOTTE TERMICAMENTE E TENSIONI RESIDUE

2.2.5.1 Origine delle tensioni termiche

Le principali tensioni, che si hanno nel materiale o nella struttura, sono di origine termica e dipendono dal gradiente di temperatura. Esse sono di tre tipi:

- Tensioni indotte da variazioni volumetriche, come l'espansione o la compressione, associati a cambiamenti di fase nel materiale;
- Tensioni dovute a differenti coefficienti di dilatazione termica dei materiali da saldare;
- Tensioni indotte dai gradienti di temperatura, dovuti alle differenti velocità di espansione nel riscaldamento e compressione nel raffreddamento.

Di conseguenza, i materiali variano in dimensioni, prima localmente e poi coinvolgendo l'intera struttura, e così nascono le distorsioni.

2.2.5.2 Cause che portano alla formazione delle tensioni residue

Le tensioni residue si originano nel materiale o nella struttura dopo che tutti i carichi esterni sono rimossi. Ad esempio, possono nascere da deformazioni plastiche non uniformi, specialmente durante lavorazioni a freddo, da trattamenti termici e trasformazioni di fase localizzati.

Nelle strutture, esse hanno origine da differenze strutturali e da distribuzioni non uniformi di sforzi anelastici, dovuti a sorgenti termiche o meccaniche.

Un semplice *esempio di tensioni residue* dovute a differenze strutturali, è quello della connessione forzata di tre barre di differente lunghezza (vedi figura 31):

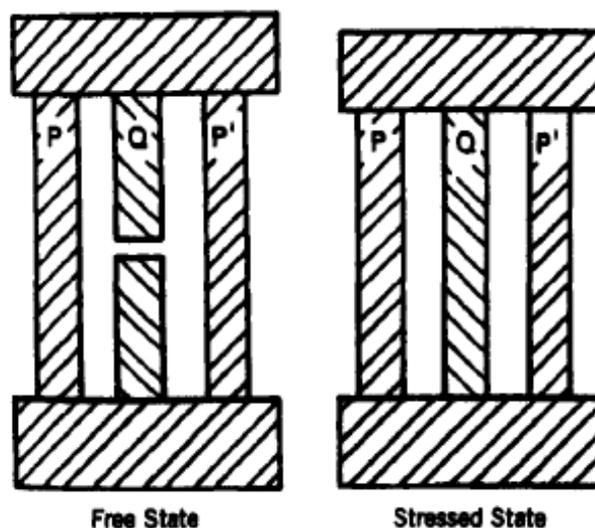


Figura 31 - Tensioni residue prodotte dalla connessione di tre barre di lunghezza diversa [3]

Sforzi di trazione si hanno nella barra più corta Q, e quelli di compressione nelle barre più lunghe P e P'. Le tensioni nascono per bilanciare questi sforzi, in modo da ottenere l'equilibrio meccanico.

Tensioni residue da sforzi non uniformi e anelastici si hanno, ad esempio, quando un metallo è riscaldato non uniformemente, e quindi si espande in modo non uniformemente dando luogo a tensioni termiche e sforzi meccanici, determinabili mediante le relazioni che seguono.

- Gli sforzi sono costituiti da componenti plastiche e elastiche date da:

$$\varepsilon_x = \varepsilon'_x + \varepsilon''_x \quad (2.33)$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon'_y + \varepsilon''_y \quad (2.34)$$

$$\gamma_{xy} = \gamma'_{xy} + \gamma''_{xy} \quad (2.35)$$

dove $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ sono le componenti dello sforzo totale; $\varepsilon'_x, \varepsilon'_y, \gamma'_{xy}$ sono le componenti elastiche; $\varepsilon''_x, \varepsilon''_y, \gamma''_{xy}$ sono le componenti plastiche;

- Le componenti elastiche seguono le leggi di Hooke:

$$\varepsilon'_x = \frac{1}{E(\sigma_x - \nu \sigma_y)} \quad (2.36)$$

$$\varepsilon'_y = \frac{1}{E(\sigma_y - \nu \sigma_x)} \quad (2.37)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G\tau_{xy}} \quad (2.38)$$

dove E è il modulo di Young, $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ sono le tensioni, ν è il coefficiente di Poisson e G il modulo di taglio.

- Le tensioni sono in equilibrio secondo queste relazioni:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{d\tau_{xy}}{dy} = 0 \quad (2.39)$$

$$\frac{d\tau_{xy}}{dx} + \frac{d\sigma_y}{dy} = 0 \quad (2.40)$$

- Gli sforzi totali soddisfano la relazione:

$$\left(\frac{d^2\varepsilon'_x}{dy^2} + \frac{d^2\varepsilon'_y}{dx^2} - \frac{d^2\gamma'_{xy}}{dxdy} \right) + \left(\frac{d^2\varepsilon''_x}{dy^2} + \frac{d^2\varepsilon''_y}{dx^2} - \frac{d^2\gamma''_{xy}}{dxdy} \right) = 0 \quad (2.41)$$

Queste ultime tre equazioni mostrano che le tensioni residue esistono quando il valore di R:

$$R = - \frac{d^2\varepsilon''_x}{dy^2} + \frac{d^2\varepsilon''_y}{dx^2} - \frac{d^2\gamma''_{xy}}{dxdy} \quad (2.42)$$

chiamato *incompatibilità*, non è nullo.

In altre parole, R può essere considerato come la causa delle tensioni residue.

2.2.5.3 Cause della distorsione

Le distorsioni nascono quando le tensioni indotte termicamente non sono controllate e le più importanti sono: restringimenti trasversali perpendicolari alla linea di saldatura, restringimenti longitudinali paralleli alla linea di saldatura, e rotazioni attorno alla linea di saldatura, come nell'esempio della figura 32:

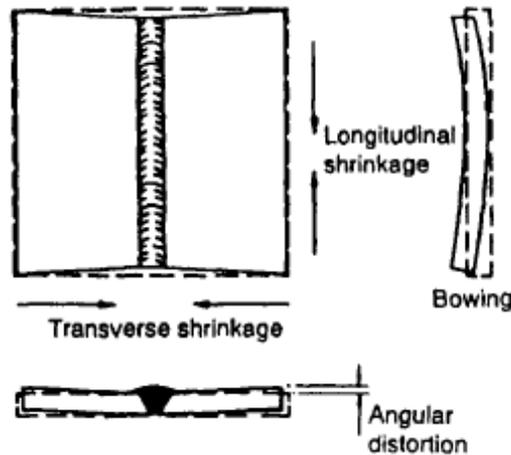


Figura 32 - *Distorsioni dimensionali durante la saldatura* [3]

L'ammontare e la direzione del restringimento dipendono dal tipo di saldatura, dalla presenza di altre saldature con le loro tensioni, dalla profondità della saldatura, dal calore in ingresso, dalla composizione strutturale dei materiali, e dalla sequenza di esecuzione della saldatura.

Il restringimento trasversale è uniforme lungo la linea di saldatura, ed è influenzato dal volume e dalla profondità della saldatura, dal calore in ingresso, e dalla configurazione del giunto. Inoltre, è più grande nel centro della saldatura che vicino ai bordi. Il restringimento longitudinale è solitamente molto più piccolo di quello trasversale, tipicamente 1/1000 della lunghezza della saldatura. La distorsione angolare è dovuta alla non – uniformità del restringimento trasversale attraverso lo spessore, e dipende dalla configurazione del giunto e dalla forma della sezione trasversale.

Esempio di una distribuzione tipica di tensioni residue longitudinali e trasversali per una saldatura testa a testa:

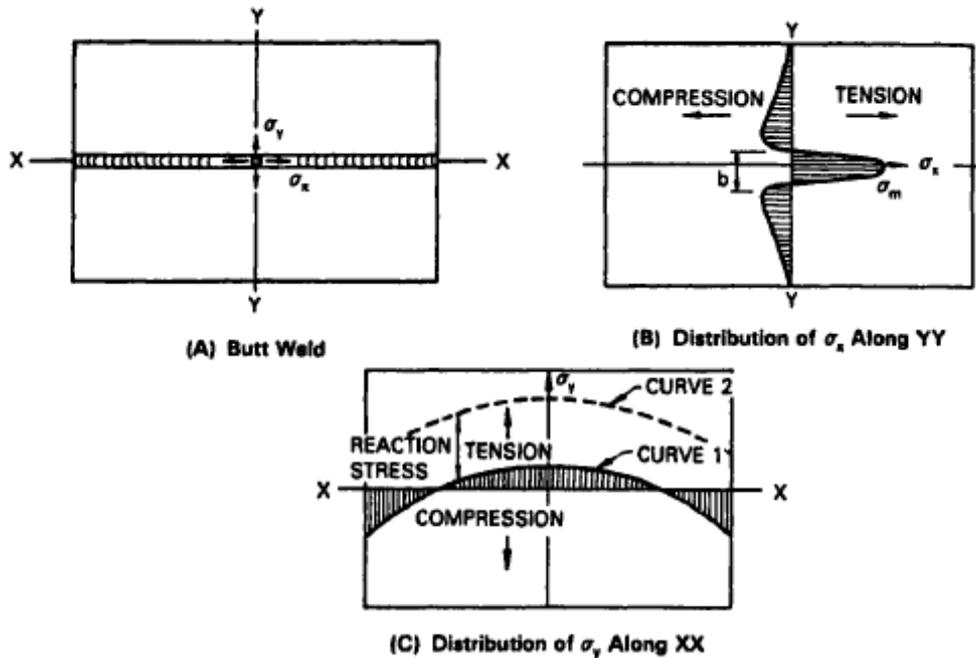


Figura 33 - Distribuzioni tipiche delle tensioni residue longitudinali (b) e trasversali (c) nella saldatura testa a testa (a) [3]

In accordo con Masubuchi e Martin, la distribuzione della tensione residua longitudinale (σ_x) può essere approssimata come:

$$\sigma_x(y) = \sigma_m \left[1 - \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right] e^{-1/2(y/b)^2} \quad (2.43)$$

dove σ_m è la tensione residua massima, e b è la profondità della zona dove agisce σ_x .

2.2.5.4 Effetti della distorsione

Gli effetti della distorsione sono:

- Dimensioni ridotte della struttura saldata;
- Disallineamento degli elementi strutturali;
- Difficoltà a usare gli strumenti necessari a mantenere al proprio posto gli elementi della struttura.

2.2.5.5 Effetti delle tensioni residue

Gli effetti di carichi esterni non uniformi sulla distribuzione delle tensioni residue in una saldatura di testa possono essere schematizzati come in figura 34:

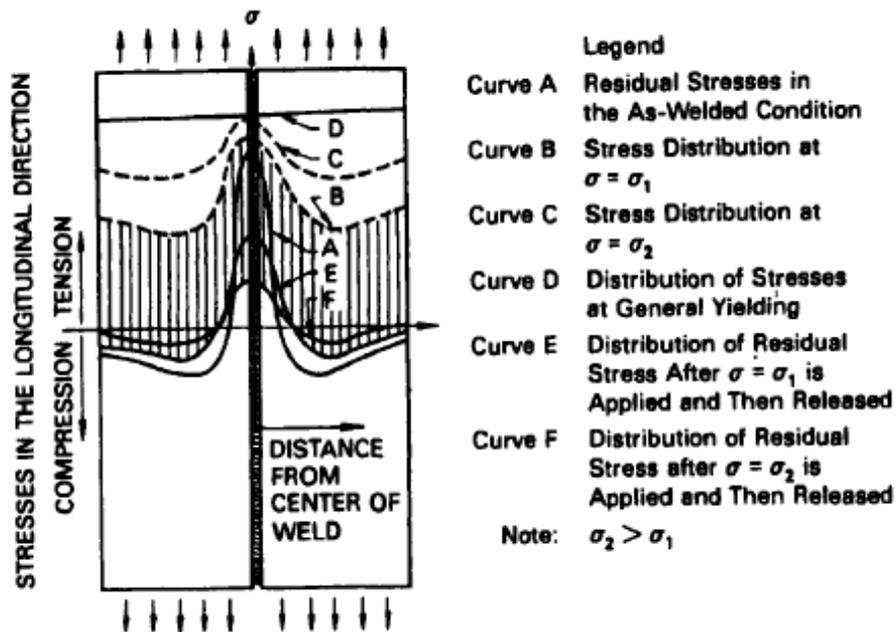


Figura 34 - Effetti di carichi esterni non uniformi sulla distribuzione di temperatura [3]

Le tensioni residue influenzano il processo di saldatura in diversi modi: riducono il carico di rottura dei materiali creando fratture, causano piegamenti che possono portare alla rottura completa della struttura. Inoltre possono aggravare la fragilità e la resistenza al taglio, causare increspature, incrementare la rugosità e aumentare la sensibilità alla corrosione.

2.3 PARAMETRI

Nella saldatura a resistenza, i principali parametri di saldatura (corrente, pressione, tempo) devono essere considerati contemporaneamente, in quanto direttamente correlati tra loro e vengono studiati considerando la cosiddetta “finestra di saldabilità”. Inoltre sono in relazione al risultato desiderato e, in particolar modo, alla dimensione della saldatura (diametro del nocciolo per la saldatura a punti, larghezza della saldatura per quella a rulli, ecc). Tuttavia è opportuno considerare una serie di fattori secondari che possono modificare il risultato ottenuto, quali: il posizionamento dei punti, lo stato degli elettrodi, l'elemento umano, la tipologia e le condizioni della macchina utilizzata, le condizioni del materiale da saldare.

2.3.1 Finestre di saldabilità

Le finestre di saldabilità sono rappresentazioni grafiche che esprimono i parametri ottimali per la realizzazione di un'ottima saldatura. Un diagramma schematico è indicato nella figura 35:

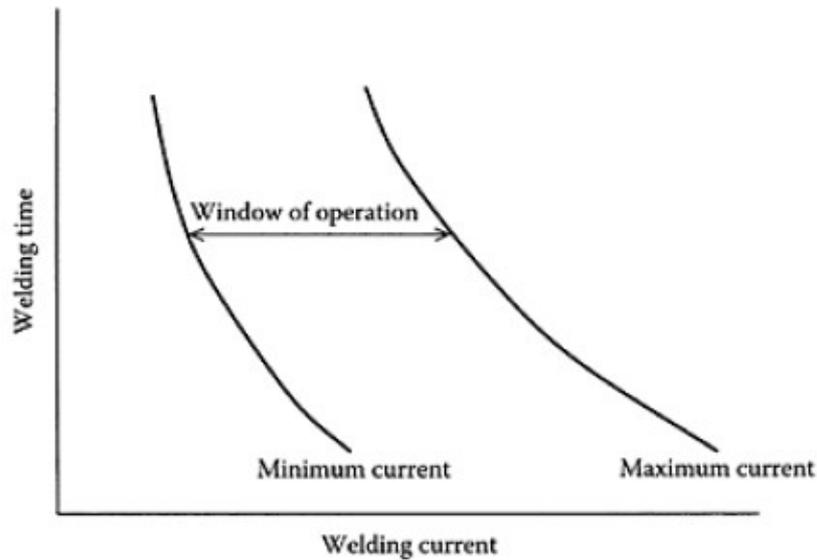


Figura 35 - *Diagramma schematico di una finestra di saldabilità [4]*

Il diagramma è costituito da due linee: la linea di minima corrente, che corrisponde alla corrente con cui si ottengono i requisiti minimi richiesti, in termini di dimensioni di saldatura, e quella di massima corrente, oltre alla quale si hanno spruzzi di metallo fuso. La differenza tra massima e minima corrente viene chiamato “finestra di saldabilità o di operazione”. Un ampio intervallo di saldabilità è importante perché, se si verifica una variazione di corrente, questa variazione non deve modificare di molto la qualità della saldatura.

Ad esempio abbiamo i diagrammi a pressione costante e tempo di saldatura costante, del tipo riportato in figura 36:

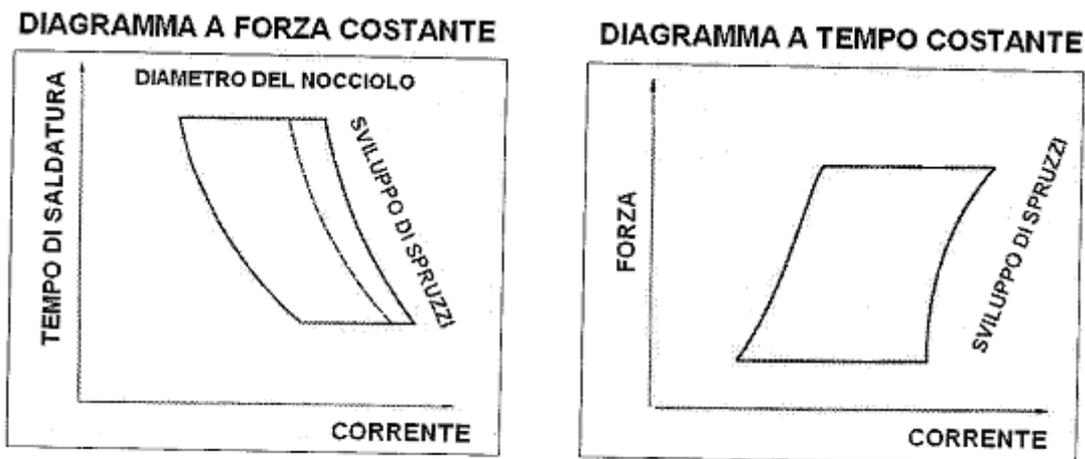


Figura 36 – *Diagrammi a pressione costante e a tempo di saldatura costante [2]*

I diagrammi sono redatti in conformità alla norma internazionale EN ISO 14327:2000 “procedura per la determinazione della finestra di saldabilità per la saldatura a resistenza a punti, proiezione e rulli”.

2.3.2 PRESSIONE

La pressione determina l'entità delle forze agenti sulle superfici, influenzando la resistenza di contatto perché determina la compenetrazione più o meno spinta delle superfici stesse, e la capacità di smaltimento del calore attraverso il circuito di raffreddamento:

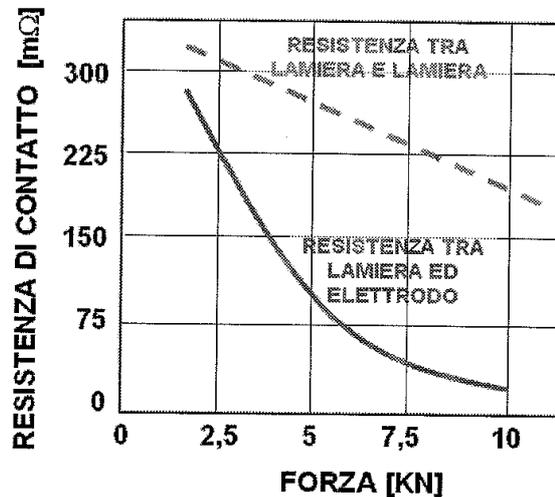


Figura 37 - Effetto della pressione sulla resistenza di contatto [2]

Dal grafico della figura 37 notiamo che aumentando la pressione si mettono in contatto più punti e, di conseguenza, aumenta la sezione riducendo la resistenza.

Valori di pressione eccessivi possono quindi provocare apporti termici bassi, con lo sviluppo di punti di saldatura di dimensioni troppo piccole, mentre valori troppo bassi sviluppano maggiore calore, con il rischio di esplosione del nocciolo e conseguentemente sviluppo di spruzzi. In particolare, per pressioni basse si possono verificare i seguenti fenomeni:

- surriscaldamento della zona di contatto tra elettrodo e pezzo, seguito dallo sviluppo di un eccessivo calore sull'elettrodo stesso;
- eccessivo riscaldamento delle lamiere, che tendono a deformarsi e quindi ad aprirsi;
- ingrossamento troppo rapido del nocciolo fuso, con il rischio che il guscio plastico si rompa.

Conseguentemente, il valore di pressione ottimale deve essere stabilito in relazione alle caratteristiche del materiale, dell'elettrodo (diametro e geometria) e dello spessore e numero delle lamiere. Valori tipici sono compresi tra 60 e 250 MPa.

2.3.3 TEMPERATURA

L'influenza della temperatura dipende dai materiali e, all'aumentare della temperatura, la resistenza di contatto diminuisce. In particolare, un aumento anche piccolo della temperatura provoca una diminuzione molto sensibile della resistenza di contatto (vedi figura 38):

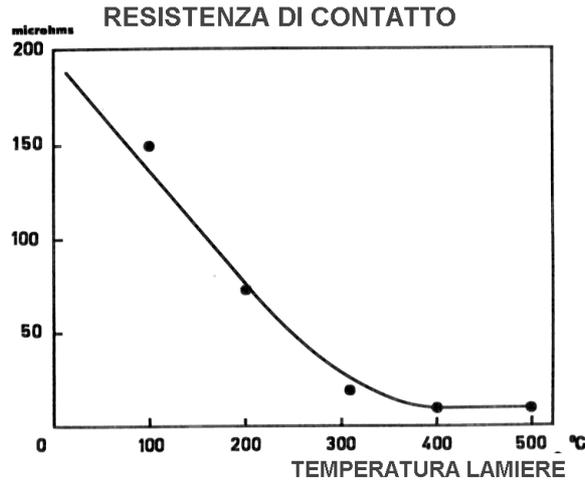


Figura 38 – Resistenza di contatto in funzione della temperatura [1]

Questa diminuzione è dovuta al miglioramento della superficie di contatto, provocato dall'eliminazione delle irregolarità di superficie, dovuto all'aumento di temperatura.

2.3.4 CORRENTE

La corrente è il parametro principale su cui agire, ed è riferita a una data sezione del punto, in quanto valori di corrente troppo bassi possono portare alla realizzazione di giunti troppo piccoli, mentre valori elevati possono provocare l'eccessivo ingrossamento, e conseguente sviluppo di spruzzi. Pertanto, essendo la corrente relazionata alla sezione del punto, si può parlare in termini di densità di corrente.

I valori della densità di corrente richiesta dipendono principalmente dalla tipologia del materiale, e in particolare:

- dalla conducibilità elettrica: la corrente necessaria per sviluppare una certa quantità di calore per effetto Joule aumenta all'aumentare della conducibilità;
- dalla conducibilità termica: la corrente necessaria per compensare il calore dissipato per conduzione, aumenta all'aumentare della conducibilità termica;
- dal coefficiente di dilatazione termica: sono necessari valori di corrente più elevati e tempi di saldatura più brevi, per evitare l'espulsione del nocciolo fuso e per garantire un sufficiente sviluppo di calore.

Quando i valori di corrente sono molto elevati, si utilizzano rampe di salita e discesa detti "up slope" e "down slope", come schematizzato in figura 40, per evitare riscaldamenti e raffreddamenti troppo rapidi, che possano influire negativamente sulla formazione del nocciolo:

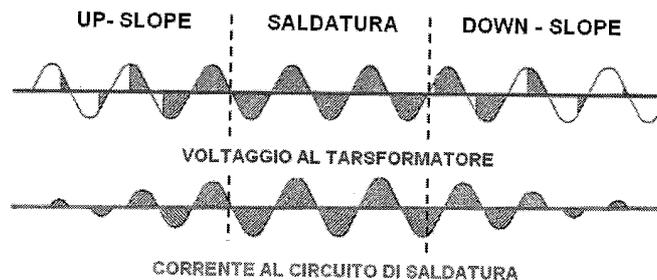


Figura 40 – Regolazione up slope e down slope all'inizio e al termine della saldatura [2]

Questa regolazione si ottiene controllando il punto di accensione degli SCR (vedi paragrafo 3.4), e può essere molto utile durante la saldatura di acciai ad alto tenore di carbonio, quando si voglia evitare l'espulsione di materiale fuso o l'inclusione di ossidi nell'interno del nocciolo. Inoltre, può essere molto importante nel trattare lamiere zincate o durante la saldatura a rulli per evitare la formazione di bruciature sui primi punti effettuati.

L'intensità di corrente, durante la saldatura, può assumere vari andamenti in funzione delle esigenze. Essa può essere costante, oppure pulsante, per aumentare lo spessore limitando le dispersioni di calore e aumentando le caratteristiche meccaniche. È pure possibile, per facilitare l'accostamento dei pezzi, operare una fase di pre-riscaldamento con corrente a debole intensità, e una fase di post-riscaldamento sempre con corrente a bassa intensità riducendo la velocità di raffreddamento, per limitare l'effetto di tempra su materiali particolarmente sensibili.

2.3.5 TEMPO DI SALDATURA

In relazione all'intensità della corrente e al valore della pressione si definisce il tempo di saldatura. Per determinare la relazione tra corrente di saldatura, diametro del punto, materiale e tempo, sono state sviluppate relazioni empiriche tra cui la più importante è la seguente:

$$I = \frac{K \cdot s}{\sqrt{t}} \quad (2.44)$$

nella quale:

- I è la corrente di saldatura [A];
- s è l'area del punto di saldatura [mm²];
- t è il tempo di saldatura [in numero di cicli a 50 Hz];
- K è un opportuno coefficiente che tiene conto delle proprietà del materiale.

Valori indicativi di K sono riportati nella seguente tabella:

Materiale	K [A/mm ²]
Acciaio bassolegato	1250
Acciaio inossidabile austenitico	800 ÷ 1000
Leghe leggere	3000 ÷ 4000
Alluminio puro (ricotto)	4000 ÷ 5000

Valori indicativi di K [2]

Dalla relazione precedente notiamo la necessità di avere saldatrici in grado di erogare valori di corrente particolarmente elevati, permettendo l'uso di tempi di saldatura brevi, con conseguenti vantaggi in termini di qualità. Inoltre, all'equazione 2.4 corrisponde il grafico della figura 41:

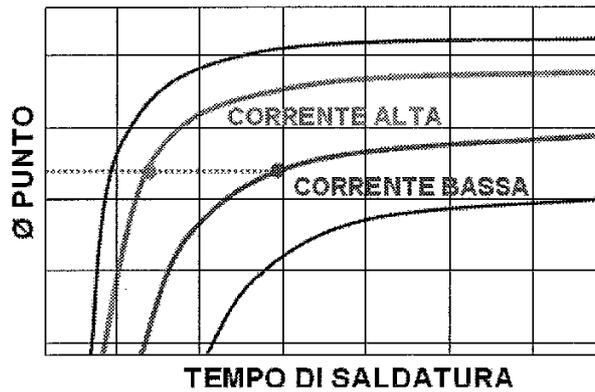


Figura 41 - Relazione tra corrente, tempo e diametro del punto di saldatura [2]

Dal grafico notiamo che valori di corrente eccessivi possono comportare una sensibilità elevata al tempo di saldatura, per cui variazioni anche modeste di quest'ultimo (ad esempio dovute ad un ritardo nella fase di accostaggio delle lamiere) possono provocare variazioni significative del diametro del nocciolo.

Quando non si ha a disposizione un generatore sufficientemente potente, non si devono utilizzare tempi di saldatura troppo lunghi per evitare il surriscaldamento del giunto. Per risolvere questo problema si ricorre alla tecnica ad impulsi, in cui si hanno ripetutamente tempi in cui si fa passare la corrente (tempi caldi) e tempi in cui si fa raffreddare il giunto (tempi freddi) sfruttando l'aumento di resistenza associata alla diminuzione di temperatura.

2.3.5.1 Cicli di pressione e corrente

La programmazione di una saldatrice a resistenza viene svolta considerando l'andamento della pressione e della corrente in funzione del tempo, in termini di cicli di saldatura detti cicli di pressione e di corrente. Il ciclo di saldatura base è costituito da una fase di accostaggio per portare le lamiere a contatto, da una fase di saldatura con passaggio della corrente, e da una fase di raffreddamento:

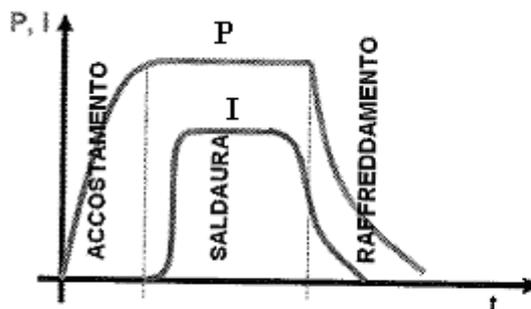


Figura 43 - Ciclo di saldatura a resistenza [2]

Tuttavia il ciclo di saldatura completo è costituito da diverse fasi, messe in evidenza in figura 44:

- *Accostaggio o squeeze*: è il tempo necessario per portare gli elettrodi a chiudersi sul giunto. E' suddiviso in due fasi per garantire che l'accostamento finale sia più accurato; e quindi per permettere al cilindro di entrare in pressione e sviluppare costantemente la forza sviluppata;
- *Preriscaldamento o preheat*: è il primo tempo caldo che si ha disposizione per iniziare il riscaldamento del materiale, necessario per provocare un leggero cedimento delle lamiere, che migliori l'accoppiamento delle superfici da saldare. Può essere seguito da

una fase di attesa (*intervallo o preheat interval*), necessaria a riportare il giunto alla temperatura iniziale;

- *Rampa di salita o upslope*: in questa fase si ha l'incremento della corrente in maniera graduale e in un tempo predeterminato, ottenendo il riscaldamento dolce del materiale;
- *Saldatura o welding*: è la fase di saldatura vera e propria, in cui il passaggio di corrente permette la formazione del nocciolo di saldatura. Può essere eseguita con un impulso singolo o con il susseguirsi di più impulsi ripetuti, costituiti da un insieme di tempi caldi (*weld time*) e tempi freddi (*cool time*);
- *Rampa di discesa o downslope*: è la conclusione della fase di saldatura, con un raffreddamento progressivo del punto, grazie alla diminuzione della corrente in modo graduale e predeterminato;
- *Intervallo di tempra o quench time*: è un tempo freddo, in cui è possibile incrementare la forza esercitata dagli elettrodi (*forge force*) e può essere applicata in qualsiasi fase del ciclo. Svolge la funzione di incrementare la velocità di raffreddamento sfruttando la dispersione termica attraverso gli elettrodi;
- *Rinvenimento o temper*: svolge la funzione di fornire ulteriore calore al pezzo, per eseguire un trattamento termico come il rinvenimento e l'invecchiamento;
- *Intervallo di mantenimento o hold time*: è la fase finale prima del rilascio del punto, necessaria per garantire il completo raffreddamento del punto sotto pressione, in modo da far compenetrare le molecole tra loro.

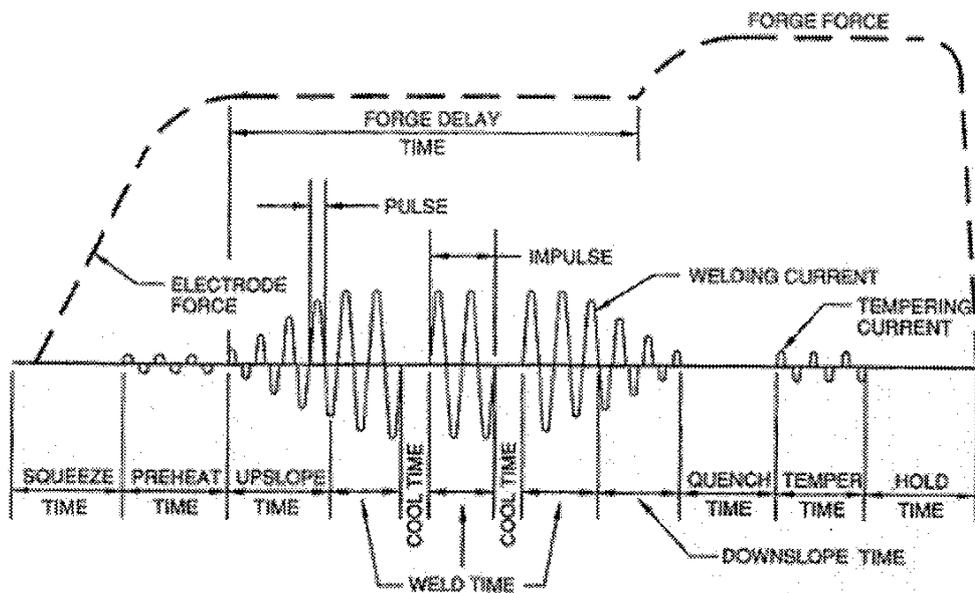


Figura 44 - Ciclo pressione - corrente per la saldatura a punti [2]

Il ciclo considerato vale solo per la saldatura a punti ma può essere applicato, con leggere modifiche, anche agli altri processi di saldatura a resistenza.

2.3.6 STATO DEGLI ELETTRODI

Il diametro e la tipologia degli elettrodi influenzano i valori di pressione che devono essere forniti agli attuatori (vedi paragrafo 3.2), e indirettamente, i valori della corrente e del tempo. Vengono valutati in relazione al diametro del nocciolo, a sua volta legato alla classe di resistenza prevista per il giunto e allo spessore dei materiali. In generale il diametro dell'elettrodo risulta pari ad almeno il doppio dello spessore della lamiera su cui agisce. Nel caso in cui dobbiamo scegliere il diametro tra

due materiali di spessore differente, si deve porre l'elettrodo di diametro maggiore sull'elemento di spessore maggiore e quello di diametro minore sull'elemento più sottile (vedi esempio in figura 45):

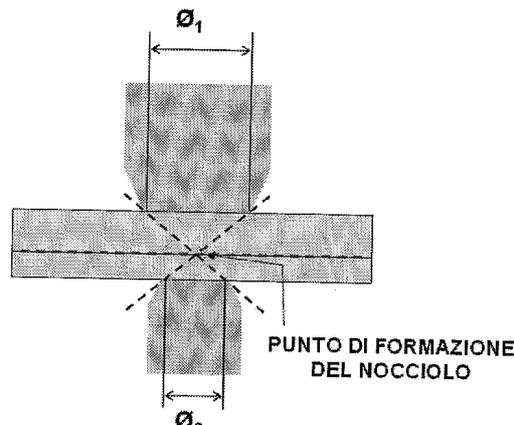


Figura 45 - Saldatura a punti di elementi aventi spessore differente [2]

Inoltre la relazione tra la resistenza di contatto e la pressione esercitata in funzione della tipologia di elettrodo impiegata (sferica o tronco-conica) è fornita da curve del tipo riportato in figura 46:

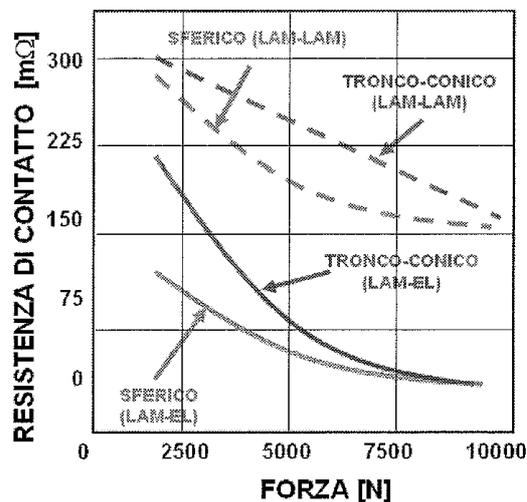


Figura 46 - Influenza della geometria dell'elettrodo sulla resistenza di contatto [2]

Lo strato superficiale degli elettrodi si modifica nel tempo a causa dell'azione ripetuta di riscaldamento e pressione; ciò determina un allargamento dell'area di contatto e un peggioramento delle caratteristiche superficiali (effetto di "fangatura" o mushrooming). Quest'ultime, a loro volta, provocano una variazione dell'intensità di corrente e una diminuzione della dimensione del nocciolo. Per risolvere il problema s'inserisce nel programma di controllo uno "stepper", ossia un dispositivo che fornisce un aumento di corrente a ogni punto di saldatura eseguito; superato un certo numero di punti è necessario ricorrere all'operazione di rinvivatura o alla sostituzione degli elettrodi.

2.3.7 POSIZIONAMENTO DEI PUNTI

Consideriamo il caso di un punto di saldatura posto nelle vicinanze di un punto già eseguito: si ha un percorso alternativo della corrente attraverso il punto eseguito, che causa la riduzione dell'intensità della corrente (effetto shunt, vedi figura 47), determinando lo sviluppo di un punto di minori dimensioni.

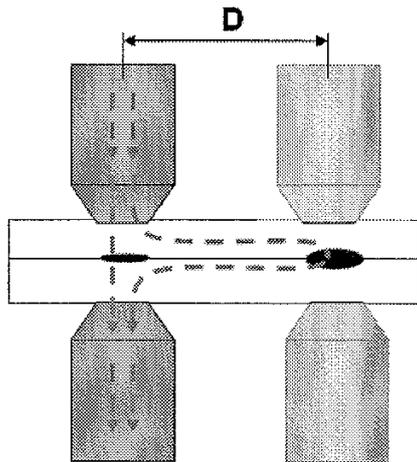


Figura 47 - Effetto Shunt [2]

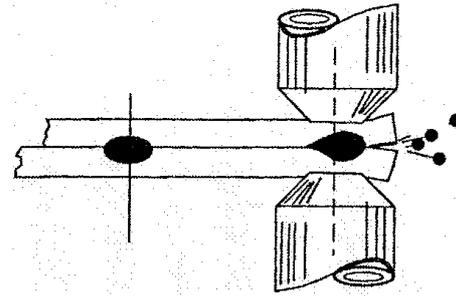


Figura 48 - Effetto di bordo [2]

Tale fenomeno scompare all'aumentare della distanza tra i punti, poiché aumenta la resistenza elettrica del percorso di shunt. E' quindi possibile definire una distanza limite oltre la quale il fenomeno diventa trascurabile, che aumenta all'aumentare dello spessore e della resistività del materiale. Nel caso di acciai basso-legati, ad esempio, tale distanza può essere valutata sulla base della relazione:

$$D = 10 s + 10 \text{ [mm]}; \quad (2.45)$$

dove s è lo spessore del giunto.

Per eliminare l'effetto shunt si può quindi incrementare la distanza tra i punti, ma questo è possibile solo per pezzi poco sollecitati, che richiedono un basso numero di punti. Pertanto, negli altri casi, si ricorre a opportuni incrementi di corrente, ottenuti grazie a sistemi di controllo adattivi.

Inoltre la distanza di un punto dal bordo di una lamiera può alterare la geometria del punto; infatti al diminuire della distanza si modifica la distribuzione della temperatura, in quanto si surriscalda la parte del punto prossima al bordo stesso, venendo a diminuire la capacità di smaltimento del calore; per valori troppo ridotti si può verificare la formazione di spruzzi o espulsione di materiale (effetto di bordo, vedi figura 48). Anche in questo caso è possibile definire, in funzione delle caratteristiche del giunto, una distanza di sicurezza al di sotto della quale non si deve eseguire la saldatura.

2.3.8 STATO E CONDIZIONI DEL MATERIALE

La saldatura a resistenza consente la saldatura di lamiere aventi strati superficiali molto diversi. Ad esempio, è possibile saldare lamiere zincate, ossidate, talvolta ricoperti con primer e oli antiossidanti. Tuttavia, tali condizioni devono essere adeguatamente controllate perché la scelta dei parametri di saldatura e dei materiali (in particolare gli elettrodi) deve essere fatta tenendo in considerazione questi fattori, così come una variazione di questi può compromettere il risultato finale. La sensibilità a questi fattori è inoltre legata alle caratteristiche del sistema di controllo, in quanto quelli a corrente costante garantiscono una buona regolarità dei risultati e le unità più avanzate (controlli adattivi su generatori a media e alta frequenza) sono in grado di compensare, con opportune variazioni dei parametri, la presenza di situazioni superficiali molto differenti.

2.3.9 ELEMENTO UMANO

L'elemento umano è una variabile importante perché può influenzare il risultato finale. Le caratteristiche necessarie per un operatore sono:

- Attitudine;
- Velocità;
- Accuratezza;
- Capacità tecnica;
- Competenza;
- Manualità.

Inoltre risultano di grande importanza la cura con cui l'operatore prepara la macchina, la manutenzione, la periodicità nella rinvivatura degli elettrodi.

2.3.10 TIPOLOGIE DELLE MACCHINE

Nella scelta della macchina occorre tenere presente:

- Il fattore di potenza;
- L'impedenza del circuito secondario;
- La posizione del trasformatore;
- Le sezioni e la forma del circuito del secondario;
- Il tipo e la potenza del circuito di pressione;
- Gli utensili da utilizzare;
- La forma e le dimensioni degli elettrodi.

CAPITOLO 3

SALDATRICE A RESISTENZA

Le macchine per la saldatura a resistenza si distinguono in due tipologie principali. Le prime, destinate a un uso di tipo artigianale, sono caratterizzate da azionamenti manuali con controllo attivo da parte dell'operatore, il quale decide sforzi di compressione e tempi di saldatura; le seconde, destinate per impieghi industriali, con alte prestazioni e costanza di risultati e produttività, sono dotate di attuatori e sistemi di controllo automatizzati. All'operatore è affidato solo il compito di scegliere i parametri di saldatura e dare inizio al ciclo. Le tipiche configurazioni possono essere di tipo pensile, stazionaria, da banco o per applicazioni robotizzate. In generale, la saldatrice a resistenza, è costituita da un trasformatore, dagli attuatori e dagli elettrodi; a questi si aggiunge il sistema di controllo dei parametri, ossia il dispositivo che permette la gestione dei principali parametri di saldatura durante ogni ciclo.

3.1 TRASFORMATORE

Il trasformatore ha lo scopo di fornire correnti molto elevate dell'ordine delle migliaia di ampere (5 – 200 kA), in tempi di saldatura molto brevi. Esso presenta il primario connesso alla rete di alimentazione (monofase o trifase), ed è costituito da un numero elevato di spire; il secondario da un numero ridotto di spire, ed è connesso agli elettrodi. Per ottenere un efficace funzionamento, gli elettrodi sono costituiti da sezioni tubolari cave all'interno delle quali circola acqua di raffreddamento. Per le macchine più potenti il circuito secondario è separato da quello di raffreddamento degli elettrodi. A seconda delle modalità di funzionamento, si distinguono differenti tipologie.

3.1.2 TRASFORMATORE MONOFASE IN CORRENTE ALTERNATA

Il trasformatore monofase è la tipologia di macchina più comune per motivi di semplicità ed economicità. E' alimentato in monofase e al secondario si ottiene una corrente quasi sinusoidale con due semionde di segno opposto:

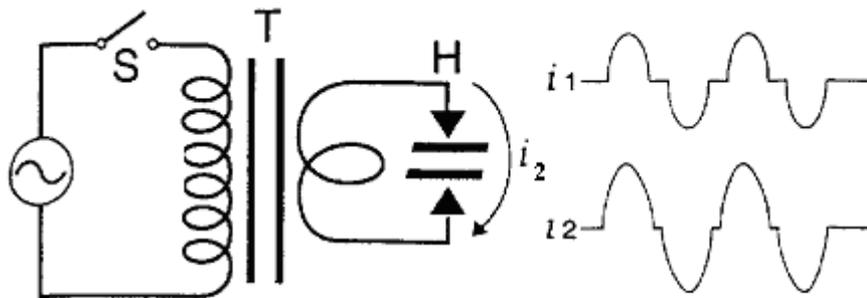


Figura 50 - Schema di un trasformatore monofase in c.a. [2]

I vantaggi di questo metodo sono:

- Si possono utilizzare macchine di potenza elevata, compatibilmente con la potenza del circuito elettrico a disposizione;
- La possibilità di avere un buon "duty cycle" utilizzando trasformatori raffreddati;

- Per il controllo si possono ottenere tempi e intensità di corrente regolabili secondo cicli analoghi a quello della figura 44.

Gli *svantaggi* sono:

- Elevati assorbimenti sulla linea e basso fattore di potenza dell'impianto. Pertanto si devono utilizzare rifasatori;
- Elevate cadute di tensione in rete e sulla linea con conseguente influenza nelle regolazioni. Queste cadute possono essere causate anche dalla contemporaneità di funzionamento di più macchine.

3.1.3 TRASFORMATORE MONOFASE CON BATTERIA DI CONDENSATORI

La macchina è costituita da un banco di condensatori (C in figura 51), caricati in modo da immagazzinare una certa quantità di energia. Durante la saldatura, l'energia si scarica attraverso un trasformatore con caratteristiche particolari, in un tempo ridottissimo (pochi millisecondi) durante il quale non è possibile effettuare compensazioni. La corrente che si ottiene è di tipo impulsivo con una sola semionda, di un solo segno. Pertanto è adatta alla saldatura a rilievi di prigionieri, viti, bulloni e per la brasatura di piccolissimi componenti (microsaldatura).

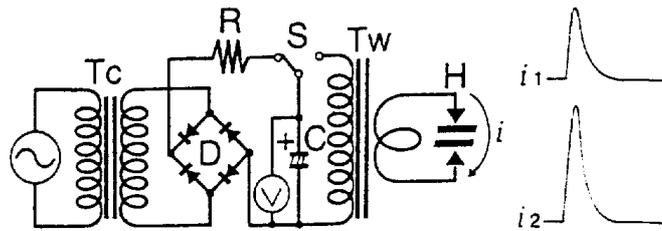


Figura 51 - Schema di un trasformatore con batteria di condensatori [2]

I *vantaggi* di questo metodo sono:

- Pochissimo assorbimento in linea, considerato che i condensatori si caricano con una corrente di bassa intensità (immagazzinano energia proporzionale al quadrato della tensione con cui sono caricati);
- Sono in grado di erogare una corrente particolarmente elevata, immagazzinata in tempi lunghi;
- I condensatori sono scaricati con un solo impulso;
- Tempi di saldatura brevissimi (5 ÷ 10 ms).

Gli *svantaggi* sono:

- Nelle applicazioni che necessitano una precisione particolarmente spinta, i costi possono risultare elevati, data la necessità di utilizzare controlli sofisticati per la rilevazione della tensione di carica dei condensatori e di utilizzare sistemi a transistor per la gestione della corrente di saldatura;
- Fattore d'uso ("duty cycle") generalmente basso, in quanto legato al tempo necessario per la ricarica dei condensatori.

3.1.4 TRASFORMATORE TRIFASE

Come schematizzato in figura 52, la macchina è costituita da tre trasformatori monofasi, separati, connessi a triangolo o a stella, a seconda del rendimento che si vuole ottenere. Sono alimentati, ognuno, con 2 delle 3 fasi disponibili e la corrente al secondario viene raddrizzata da tre gruppi di tiristori di alta potenza.

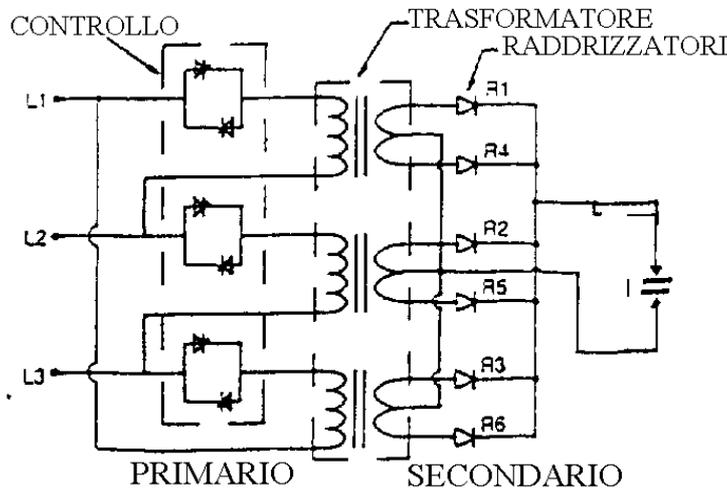


Figura 52 - Schema di un trasformatore trifase [2]

Pertanto la corrente di saldatura è prossima alla corrente continua, in quanto formata in ogni periodo da sei semionde dello stesso segno, rimanendo tuttavia una corrente "pulsata" (vedi figura 53).



Figura 53 - Corrente di saldatura [2]

I vantaggi di questo metodo sono:

- Assorbimento bilanciato sulle tre fasi e potenze molto elevate. Pertanto queste macchine sono usate per la saldatura delle leghe leggere nel campo aeronautico e ferroviario;
- Rendimento migliore rispetto al trasformatore monofase;
- Tempi e intensità di corrente regolabili secondo cicli analoghi a quello della figura 44.

Gli svantaggi sono:

- Il peso e l'ingombro della batteria dei tre trasformatori e dei tre gruppi di raddrizzamento, che rende possibile l'impiego solo su macchine fisse;
- Costo molto elevato.

Tali svantaggi hanno portato allo sviluppo di tecnologie alternative, rese possibili grazie allo sviluppo dell'elettronica di potenza.

3.1.5 TRASFORMATORI A MEDIA E AD ALTA FREQUENZA (INVERTER)

Queste macchine sfruttano la presenza di un interruttore di potenza ad alta frequenza per convertire la frequenza di alimentazione di 50 Hz (in corrente alternata trifase o monofase) a valori delle migliaia di Hz. In uscita si ottiene una corrente continua ad alta frequenza. Di conseguenza, non solo si ha un rendimento migliore rispetto a una corrente d'uscita alternata, ma anche la possibilità di ridurre enormemente le dimensioni dei trasformatori, e quindi di ottenere macchine molto più compatte, anche mobili e montate su robot o pinze pensili.

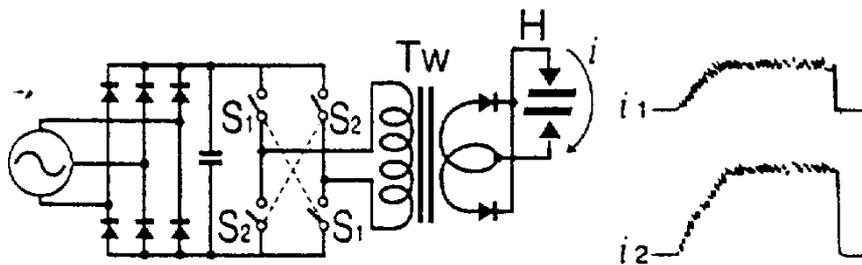


Figura 54 - Trasformatore con inverter trifase [2]

Inoltre, poiché il controllo di saldatura può regolare la corrente a elevata frequenza, si ottengono tempi di regolazione molto brevi (come mostrato in figura 55) con la possibilità di interfacciare il controllo con sistemi di misura in tempo reale dei parametri, garantendo, quindi un controllo più efficace del processo. La relazione tra il tempo di saldatura e la tipologia della macchina è mostrata in figura 55.

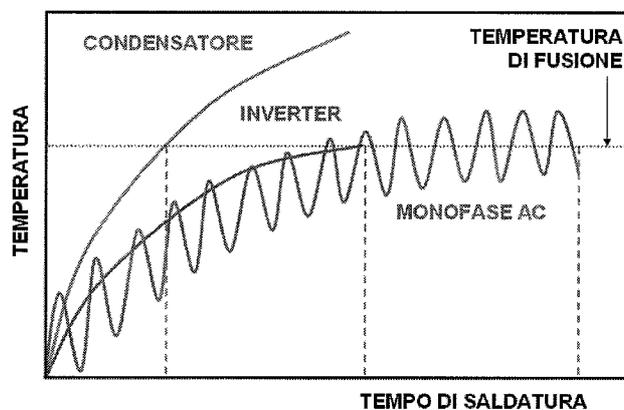


Figura 55 - Relazione tra tempo di saldatura e tipologia di macchina [2]

In aggiunta si hanno questi vantaggi:

- Utilizzando la corrente continua non si devono caricare condensatori (tempi di carica soppressi), si può variare sia il tempo di saldatura sia la potenza erogata, si vengono a eliminare le semionde positive e negative, e il sistema lavora con poche perdite;
- La possibilità di controllare la forma d'onda in maniera rapida e con ottima precisione;
- Elevato rendimento perché l'uso della corrente continua, permette il riscaldamento continuo del materiale durante tutto il tempo di saldatura;
- L'inserzione della corrente è molto veloce e regolabile; di conseguenza è adattabile alla pressione al fine di limitare al massimo spruzzi di materiale fuso;
- La riduzione del consumo degli elettrodi, grazie all'ottimo controllo della potenza;
- Una minore impedenza al secondario e quindi minor usura del circuito porta-corrente;

- Una minore sensibilità alle variazioni di pressione; di conseguenza si può operare con pressioni inferiori allo standard.

3.2 ATTUATORI

Durante la fase di saldatura (vedi paragrafo 2.3.5.1), la forza agli elettrodi gioca i seguenti ruoli importanti:

Accostaggio: all'inizio del ciclo di lavoro, la forza ha il compito di avvicinare il più possibile le lamiere tra di loro, nel punto dove avverrà la fusione di saldatura. Durante questa fase è determinante solo la forza applicata agli elettrodi.

Saldatura: durante la prima fase di erogazione della corrente, la forza definisce la resistenza elettrica del giunto, e più alta è la forza applicata, minore sarà la resistenza fra le lamiere e viceversa. Alla fine della prima fase, la forza contrasta gli sforzi di espansione termica del nocciolo fuso, per evitare la fuoriuscita di materiale incandescente e l'esplosione. Infatti, il nocciolo sale alla sua temperatura massima e la forza ha lo scopo di mantenere il contatto creato nella fase precedente, impedendo la distruzione del guscio plastico.

Mantenimento: durante questo periodo avviene il raffreddamento del punto di saldatura e la conseguente cristallizzazione del nocciolo saldato. La corretta pressione in questa fase, affina il grano del metallo aumentandone la resistenza meccanica.

Durante le ultime due fasi descritte, il risultato è proporzionale alla forza per unità di superficie di contatto tra gli elettrodi e i materiali e, di conseguenza, la forza generata dagli attuatori deve essere proporzionale al diametro degli elettrodi.

Possiamo citare alcune regole pratiche:

- Ad eccezione di saldature su metalli non ferrosi o metalli ferrosi a doppio decapaggio, conviene utilizzare, durante l'accostaggio, una forte pressione;
- La forza deve essere aumentata sulle lamiere sporche, ossidate o che hanno difficoltà ad accostarsi;
- La forza deve essere aumentata proporzionalmente all'aumento della corrente di saldatura;
- Un aumento della forza alla fine della saldatura affina il grano del metallo, e aumenta la resistenza meccanica del punto.

Il cilindro che stabilisce la forza applicata agli elettrodi deve avere queste caratteristiche:

- Minima inerzia per seguire, in tempi rapidissimi, l'avvicinamento dell'elettrodo sul materiale, ed evitare l'espulsione di materiale;
- Una corsa di avvicinamento rapida e dolce per evitare colpi d'ariete sul materiale, che potrebbero deformare la superficie, e sugli elettrodi, con deterioramento del profilo e allargamento della superficie di contatto;
- Una conformazione compatta al fine di ridurre lo spazio necessario al montaggio.

Lo strumento più utilizzato per l'applicazione della forza sugli elettrodi, è il *cilindro di movimentazione*, che è alimentato ad aria compressa (*sistema pneumatico*) o a fluido (*sistema idraulico*).

Pertanto i sistemi impiegati sono:

- *Sistemi pneumatici*: funzionano con cilindri ad aria compressa e sono caratterizzati da ingombro piuttosto elevato, da un'elevata velocità di risposta e da una certa irregolarità di applicazione della forza;
- *Sistemi oleopneumatici*: sono funzionanti a olio o, più raramente ad acqua, e sono utilizzati quando sono richiesti valori superiori di forza. Permettono di ridurre l'ingombro ma, l'utilizzo dei fluidi, rende necessario un aumento della pressione d'esercizio e, di conseguenza, il costo dell'applicazione aumenta;

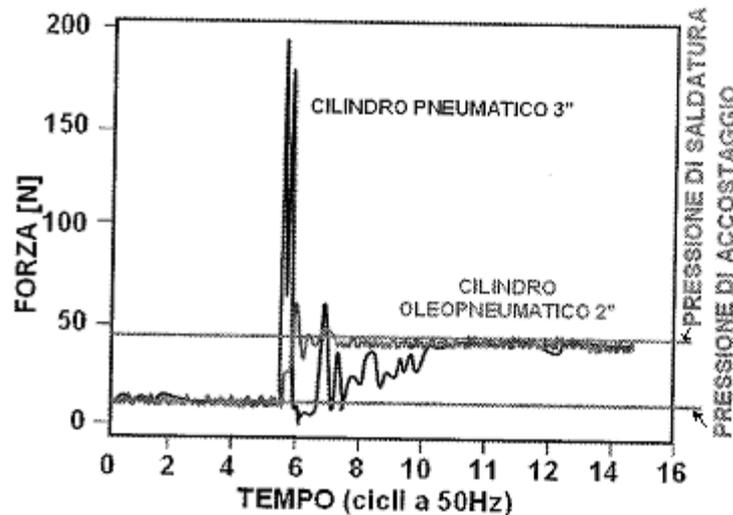


Figura 56 - Risposta di un cilindro pneumatico e di uno oleopneumatico [2]

- *Sistemi misti*: nei sistemi misti il cilindro è costituito da una sezione funzionante ad aria compressa, e da una funzionante a olio, ottenendo ottimi risultati a spese di una certa complicazione costruttiva. Inoltre, permettono di aumentare la velocità del sistema, ridurre le dimensioni, e di avere una risposta molto veloce, per la regolazione della forza applicata agli elettrodi;
- *Sistemi a elettroattuatore*: sono costituiti da un motore brushless che agisce su una vite, che permette di ottenere sia valori di forza elevati, sia dà la possibilità di controllo di posizione oltre che di forza, con eventuale retroazione.

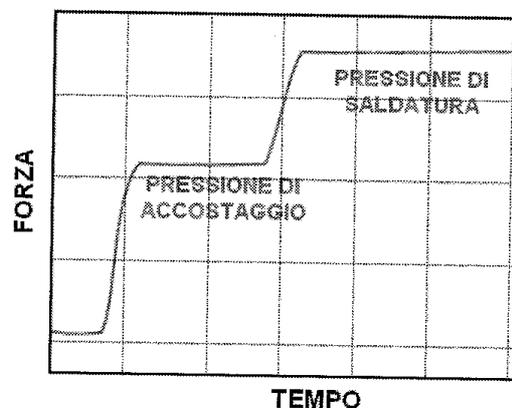


Figura 57 - Risposta di un elettroattuatore [2]

L'applicazione di sistemi misti o elettroattuatori permette, in maniera migliore, di soddisfare le esigenze di compattezza, controllabilità e ripetibilità richieste al sistema di attuazione, a discapito di un maggior costo.

Ad esempio, dopo prove pratiche di funzionamento, sono stati tracciati alcuni grafici relativi alla reazione di tre cilindri: due sono alimentati con il sistema ad aria compressa e uno con il sistema misto. Nell'esame dei grafici, bisogna tenere presente che il passaggio di corrente *deve sempre avvenire quando la forza applicata sugli elettrodi si è stabilizzata*.

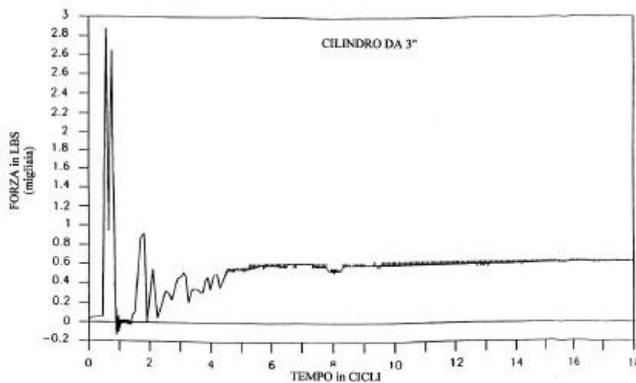


Figura 58-a) - Forza sviluppata da un cilindro pneumatico di diametro 80 mm e forza richiesta 270 kg [2]

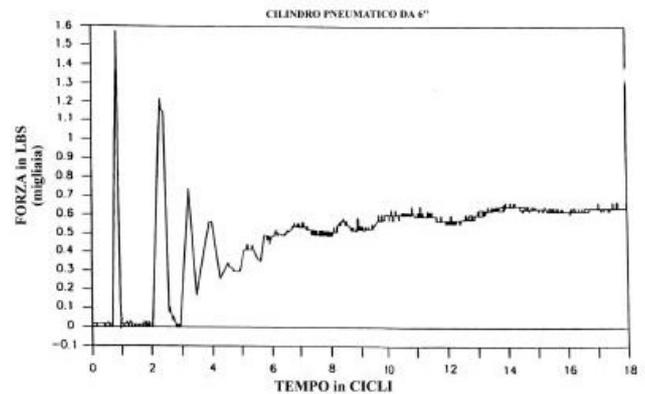


Figura 58-b) - Forza sviluppata da un cilindro pneumatico di diametro 150 mm e forza richiesta 270 kg [2]

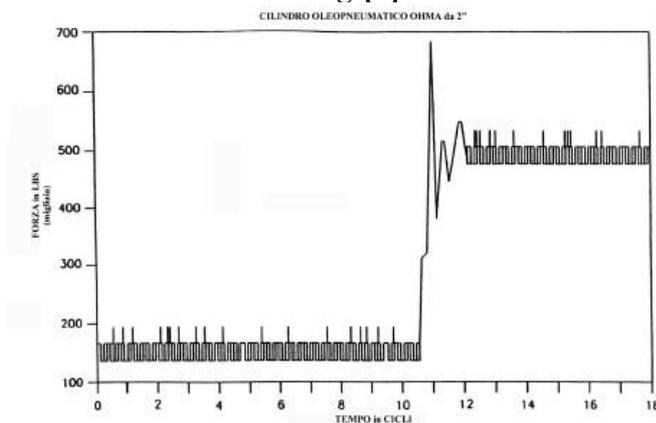


Figura 58-c) - Forza sviluppata da un cilindro a sistema misto di diametro 50 mm e forza richiesta 230 kg [2]

Dal grafico della figura 58-a) notiamo che si ha subito il colpo d'ariete; infatti, nel primo periodo, viene applicata una forza di 2800 lbs (1270 kg) e, solo dopo 5 – 6 cicli, il cilindro si stabilizza sulla forza richiesta di 270 Kg.

Dal grafico della figura 58-b) notiamo una reazione diversa da quella del cilindro di diametro minore, perché il maggior diametro aumenta la massa d'aria richiesta e, di conseguenza, si riduce il colpo d'ariete, che scende a 1200 lbs (725 kg), mentre il tempo necessario per la stabilizzazione della forza è di quattordici cicli.

Dal grafico di figura 58-c) notiamo che non è presente il colpo d'ariete e, di conseguenza, il cilindro si avvicina al pezzo da saldare con una bassa forza di 150 lbs (65 –70 kg), che non rovina la superficie. In seguito, la forza sale con un breve picco di 700 lbs (317 kg), (ma gli elettrodi sono già chiusi in posizione di saldatura), per poi stabilizzarsi perfettamente ai 230 Kg richiesti.

In ogni caso, il cilindro necessita, per un buon funzionamento, di alcuni organi di comando e controllo:

- Filtri e lubrificatori per l'aria di alimentazione;
- Regolatori di flusso;
- Valvole ed elettrovalvole per la gestione delle varie fasi dell'operazione;
- Distributori di flusso e canalizzazioni varie.

Cause d'irregolarità riscontrate sulla forza applicata:

- Un problematico funzionamento degli organi del circuito di distribuzione;
- Stato degli organi di pressione (giochi sulle guarnizioni di tenuta del cilindro), o degli organi di distribuzione (perdite di aria o cadute di pressione sulla linea d'alimentazione fluidi ecc.).

E' quindi necessario effettuare controlli periodici sulla forza, mediante l'utilizzo di dinamometri. Ne esistono di diversi tipi:

- *Dinamometri idraulici analogici*: dove la visualizzazione della forza si ha grazie a un ago indicatore su un quadrante, ma permettono misure approssimate; pertanto non sono apparecchi di precisione e non hanno la possibilità di taratura;
- *Dinamometri idraulici digitali*: dove la lettura della forza applicata è molto più precisa e hanno la possibilità di taratura;
- *Dinamometri elettronici digitali*: sono apparecchi d'alta precisione, non solo con possibilità di taratura, ma anche con la possibilità di inviare i dati rilevati, a sistemi di memorizzazione e stampa.

3.3 ELETTRODI

Gli elettrodi sono supportati da porta-elettrodi o candele, generalmente in rame elettrolitico per ottenere una buona conducibilità o, in alternativa, in ottone o bronzo; devono essere progettati in modo da essere i più corti possibili, per diminuire l'impedenza del secondario.

Essi devono svolgere le seguenti funzioni:

- *Funzione elettrica*: devono garantire il passaggio di corrente alla zona di saldatura;
- *Funzione meccanica*: trasmettono la pressione necessaria alla saldatura e, durante la saldatura stessa, sono soggetti a sollecitazioni elevate, a causa delle elevate temperature in gioco;
- *Funzione termica*: attraverso gli elettrodi viene dissipato quasi tutto il calore sviluppato durante la saldatura, e sono quindi dotati di un sistema di raffreddamento.

Il sistema di raffreddamento permette sia di mantenere a temperature basse gli elettrodi, per evitare contaminazione da parte del materiale e deformazione della punta, sia di evitare variazioni dell'intensità di corrente ed eccessiva usura.

Inoltre, gli elettrodi sono costruiti in leghe di rame, dove gli elementi di lega (cromo, zinco, cobalto, berillio) sono aggiunti allo scopo di incrementarne la durezza. In applicazioni particolari, come la saldatura a proiezione di reti, dadi o saldature testa a testa, sono utilizzati anche sinterizzati di polveri di rame e tungsteno, oppure tungsteno e molibdeno puri.

La geometria degli elettrodi può essere differente, a seconda delle esigenze di saldatura. L'elettrodo è connesso alla macchina attraverso il porta-elettrodo, ed è cavo, per permettere il passaggio del liquido di raffreddamento. La portata del liquido deve essere di qualche litro al minuto e varia con la densità di corrente. L'innesto può essere di tipo a maschio detto TIP, generalmente più utilizzato, oppure a femmina detto CAP, che risulta conveniente quando si utilizzano valori di tensione più alti (vedi figura 59).

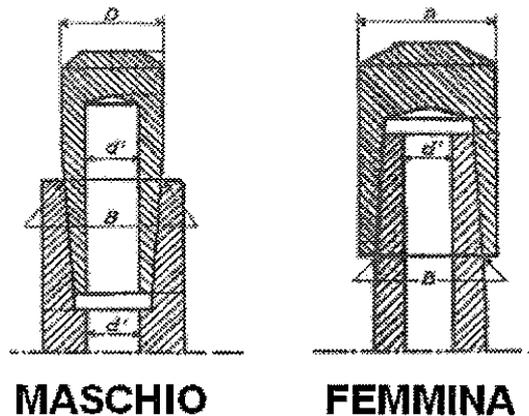


Figura 59 - Tipi d'innesto per elettrodi [2]

Gli elettrodi possono avere sezione tronco-conica o sferica. Nel primo caso si ha una minore usura, una maggiore sensibilità a eventuali problemi di accostaggio e, di conseguenza, minore ripetibilità dei risultati. Nel secondo caso sono necessarie frequenti operazioni di ripristino della punta, chiamati rattivature. La rattivatura è eseguita grazie un'apparecchiatura specifica che lavora per asportazione di truciolo, e che può essere dotata, nel caso di elettrodo tronco-conico, di un sensore per verificare e garantire la planarità delle superfici. Inoltre, può essere eseguita in modalità automatica o manuale, su tutti e due gli elettrodi contemporaneamente. La punta degli elettrodi deve avere alta conducibilità elettrica, durezza ed elevata temperatura di ricottura, in modo da evitare l'insorgere di alte resistenze localizzate e di limitare l'usura.

3.4 SISTEMA DI CONTROLLO

Il controllo del processo di saldatura permette d'ottenere un'ottima qualità della saldatura stessa. I parametri monitorati sono la corrente, la tensione, la forza, lo spostamento degli elettrodi, e la resistenza dinamica. Gli obiettivi del sistema di controllo sono:

- *Stima della dimensione di saldatura*: la dimensione della saldatura, in termini di larghezza o diametro del nocciolo, è il principale indice di qualità;
- *Individuazione dell'eventuale momento dell'espulsione*: l'espulsione causa molti problemi indesiderati e diminuisce la qualità della saldatura;
- *Individuazione di difetti durante la saldatura*: ad esempio discontinuità, noccioli troppo piccoli, materiali indesiderati;
- *Controllo del processo*: devono essere sviluppati algoritmi che permettano di controllare il processo e ottenere tutte le informazioni necessarie.

L'obiettivo ultimo del sistema di controllo è quello di sviluppare un ottimo sistema di monitoraggio e sistemi diagnostici, per assicurare un'ottima qualità di saldatura e ridurne i costi.

In generale il sistema di controllo è costituito da tre parti: un sistema di saldatura, un'unità di monitoraggio e un'unità di controllo.

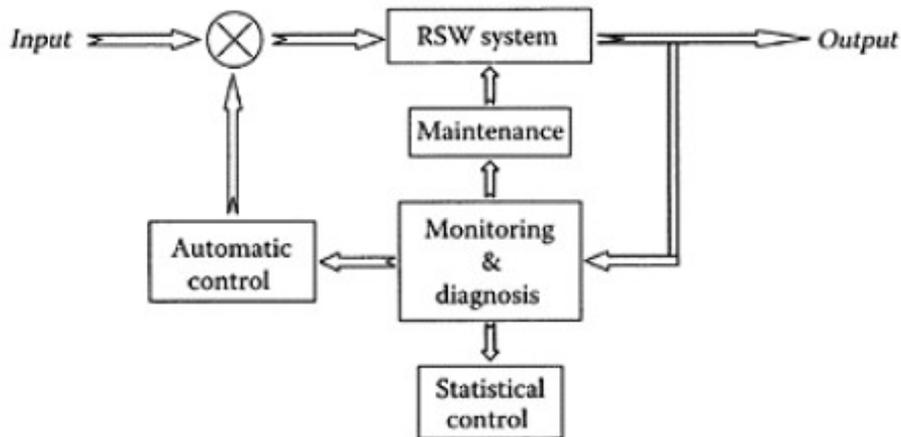


Figura 60 - Tipico sistema di controllo per la saldatura [4]

Il sistema rileva in ingresso un determinato valore di corrente (o di tensione o di temperatura, a seconda del tipo di controllore), di tempo e di forza degli elettrodi. L'uscita viene inviata all'unità di monitoraggio, che riconosce l'acquisizione dei dati e ne elabora i segnali. In seguito, le informazioni elaborate, passano al sistema di controllo e, nel caso in cui i parametri siano errati, vengono modificati e reinviati al sistema di monitoraggio. Inoltre, i risultati del sistema di monitoraggio possono anche essere usati per il controllo statistico della qualità e la manutenzione del processo.

3.4.1 ACQUISIZIONE DEI DATI

La raccolta delle informazioni del processo è il primo passo nel monitoraggio e il controllo. Un sistema di acquisizione dati misura la tensione massima, la corrente di saldatura, la forza degli elettrodi, e lo spostamento degli elettrodi:

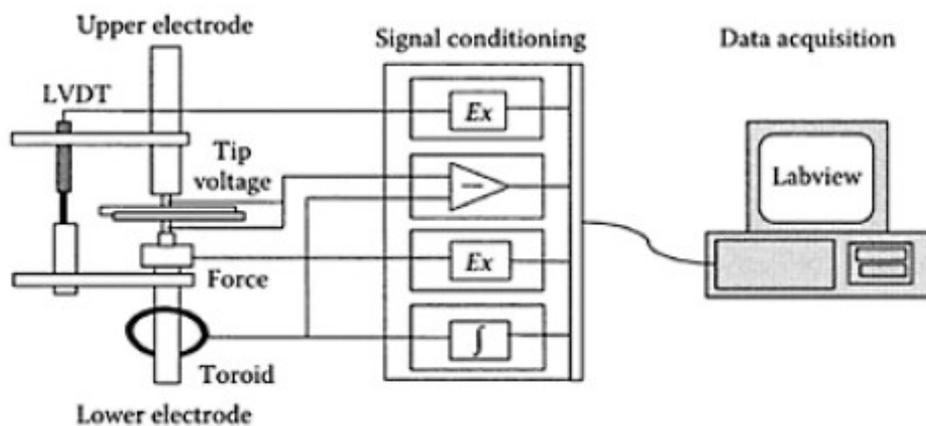


Figura 61 - Sistema d'acquisizione dati [4]

I sensori sono installati nei punti più vicini possibili alle estremità degli elettrodi, per ottenere segnali direttamente correlati con il processo di saldatura. L'unità di condizionamento del segnale riduce la tensione a un livello accettabile per il convertitore analogico – digitale, integrato nell'unità stessa, e così è possibile eseguire l'acquisizione dei dati.

Inoltre, sono stati sviluppati un gran numero di controlli adattivi per erogare un determinato valore corrente, a un determinato livello di tensione.

La corrente di saldatura è un'altra variabile importante per il monitoraggio; infatti alcuni sensori misurano solo la corrente e segnalano un eventuale errore se il valore misurato non rientra nei limiti prestabiliti.

Per determinare il calore in ingresso, bisogna misurare sia la tensione sia la corrente, e questo controllo rappresenta il cosiddetto controllo a potenza costante. Tuttavia, siccome una parte dell'energia viene persa, questo tipo di controllo non garantisce un'ottima qualità della saldatura. Sia lo spostamento, sia la forza degli elettrodi influenzano il processo di formazione del nocciolo. Infatti, la forza influenza le modalità di espansione termica, di fusione e di espulsione; pertanto sono state sviluppate molte strategie di controllo per monitorarne lo spostamento.

3.4.2 MONITORAGGIO DEL PROCESSO

3.4.2.1 Segnali

I segnali monitorati (figura 62) sono la tensione, la corrente, la forza e lo spostamento degli elettrodi:

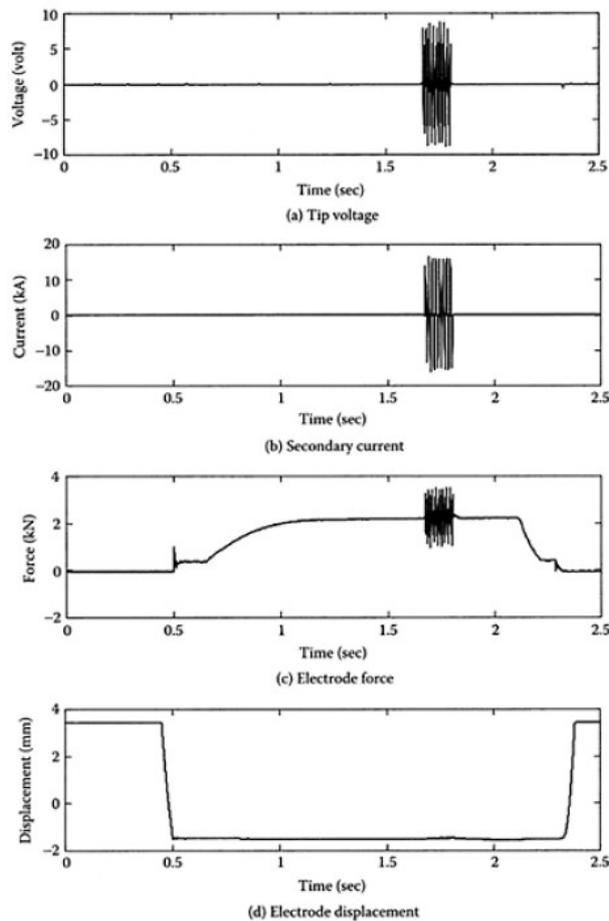


Figura 62 - Tipici segnali di controllo della saldatura [4]

Questi segnali sono influenzati fortemente dai campi elettrici e magnetici prodotti durante la saldatura e, in particolare, dalla configurazione del trasformatore di saldatura. Come visto precedentemente, il trasformatore può essere rappresentato come schematizzato in figura 63:

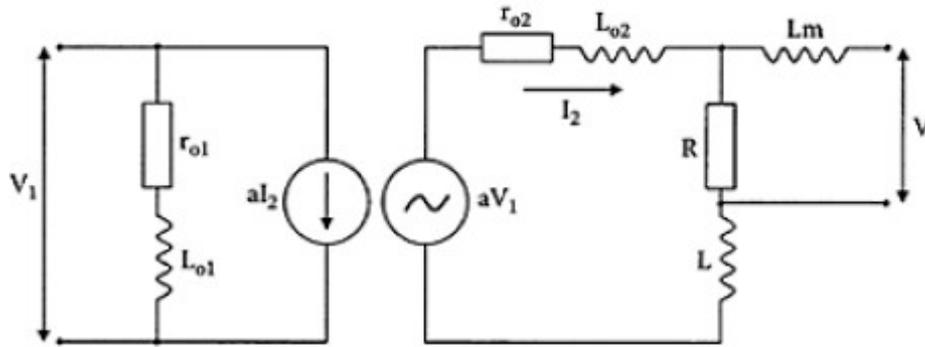


Figura 63 - Schema del trasformatore di saldatura [4]

dove r_{01} e L_{01} rappresentano rispettivamente la resistenza e l'induttanza primaria, r_{02} e L_{02} la resistenza e l'induttanza secondaria, L l'induttanza della restante parte della macchina comprendente i collegamenti, R la resistenza della saldatura, V_1 la tensione primaria, I_2 la corrente secondaria, e a è il rapporto di trasformazione. La tensione massima agli elettrodi è misurata ai capi della resistenza R ; il circuito di misura è influenzato anche dal campo magnetico creato dalla corrente che percorre gli elettrodi, rappresentato con l'induttanza L_m . La corrente e la tensione secondarie sono:

$$I_2 = \frac{aV_1}{(R + r_{02}) + j\omega(L + L_{02})} \quad (3.1)$$

$$V = I_2 R + L_m \frac{dI_2}{dt} \quad (3.2)$$

La tensione primaria V_1 è controllata da un tiristore (SCR), il quale fa passare la corrente quando viene dato il segnale di comando. Solitamente, se il carico è resistivo il tiristore viene acceso quando la corrente transita per lo zero, mentre, se il carico è induttivo, quando la corrente diventa nulla. Grazie allo sfasamento tra tensione e corrente nel caso di carico induttivo, la tensione primaria ha l'andamento della figura 64:

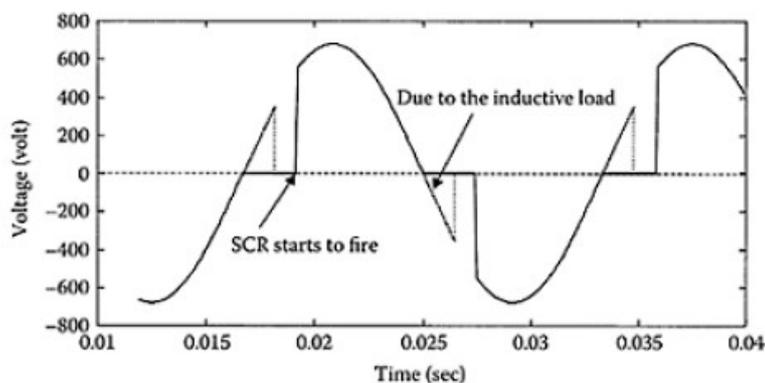


Figura 64 - Tensione primaria del trasformatore [4]

3.4.2.2 Tensione

La tensione può essere misurata con due conduttori elettrici collegati alle punte degli elettrodi e, se questa tensione è mantenuta a un livello basso, può essere misurata direttamente con gli strumenti tradizionali. Tuttavia, il segnale di tensione può essere disturbato dall'influenza del campo magnetico sui conduttori di collegamento allo strumento di misura.

3.4.2.3 Corrente elettrica

La corrente elettrica è più difficile da misurare perché il suo valore al secondario è molto elevato, e viene perciò misurata indirettamente, o con un sensore ad effetto Hall, o con un anello di Rogowski o con un resistore di Shunt. Inoltre, ha durata breve, è non sinusoidale e il secondario è sottoposto a un elevato campo magnetico. Infatti, un'elevata corrente alternata induce una forte variazione nel tempo di campo magnetico, la cui tensione indotta è data dalla legge:

$$V = \frac{di}{dt} A \cos\theta \quad (3.3)$$

dove V è la tensione indotta, i la corrente, di/dt la velocità di variazione della corrente, A è l'ampiezza, e θ è l'angolo formato tra la corrente e il campo magnetico. Pertanto, questa legge, è la base per la misura della corrente usando l'anello di Rogowski. Infatti, l'anello è circondato dal campo magnetico, il cui flusso crea la tensione indotta nella bobina, che è proporzionale alla variazione del flusso magnetico. Il segnale di corrente è ottenuto come integrazione del campo magnetico, essendo direttamente proporzionale alla corrente stessa.

Nel sensore di Hall, un semiconduttore è sottoposto al campo magnetico indotto, proporzionale alla corrente, che sviluppa una tensione indotta che può essere misurata. Inoltre, è di dimensioni molto piccole ed è sensibile alla variazione di temperatura. Grazie al resistore di Shunt, si misura direttamente la tensione sulla resistenza nota, posta nel secondario lungo il percorso della corrente. Tuttavia, questo metodo, presenta difficoltà nell'introduzione della resistenza, la presenza d'induttanze parassite, la distribuzione non – uniforme della corrente che transita nella resistenza, e variazione della resistenza con la temperatura.

3.4.2.4 Esempio: metodo di misura della corrente a 60 Hz

Questo sistema di misura utilizza una “cella di carico” (vedi appendice 1) applicata alla superficie esterna di un anello d'acciaio. L'anello è collegato al circuito secondario ed è deformato dalle forze elettromagnetiche indotte dall'elevata corrente. Di conseguenza, la corrente di saldatura risulta proporzionale alla deformazione stessa e viene ottenuta per integrazione della curva delle deformazioni.

Ad esempio, un profilo degli sforzi di deformazione misurati in funzione del tempo e il corrispondente andamento della corrente di saldatura sono riportati nelle figure 65-a) e –b).

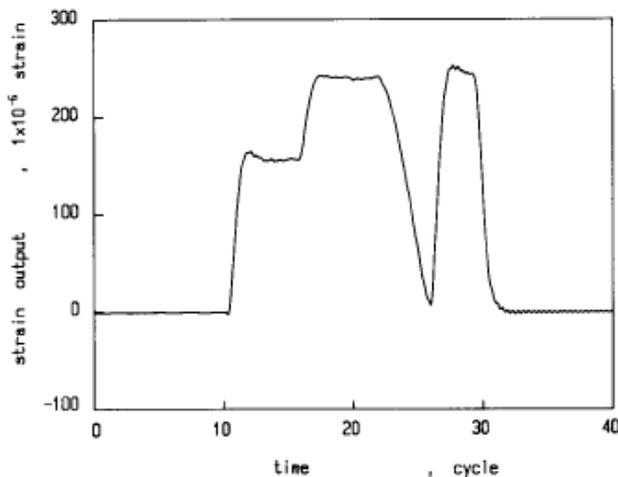


Figura 65-a) - Andamento degli sforzi misurati in funzione nel tempo [5]

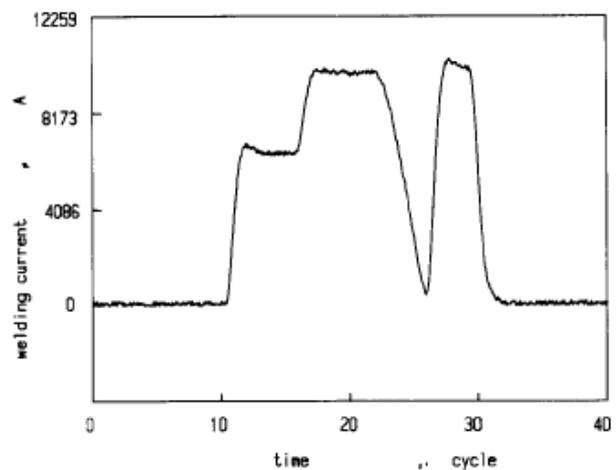


Figura 65-b) - Andamento della corrente di saldatura [5]

3.4.2.5 Resistenza dinamica

La resistenza dinamica è calcolata a partire dalla misura di tensione e di corrente. Tuttavia, la tensione misurata è formata da due contributi: quello della resistenza e quello dell'induttanza, come mostrato nell'equazione 3.2. Siccome l'induttanza L_m dipende da molti fattori, la resistenza R può essere ottenuta dal rapporto V/I_2 , quando $\frac{dI_2}{dt}$ è nullo nell'istante in cui la corrente raggiunge il valore massimo. Pertanto, la curva della resistenza dinamica può essere tracciata per punti, ottenuti in corrispondenza di ogni istante in cui $\frac{dI_2}{dt}=0$, e poi interpolata con una polinomiale.

Ad esempio, una curva di resistenza dinamica per una saldatura di 14 cicli, eseguita su un acciaio di 0.8 mm di spessore, è riportato in figura 66:

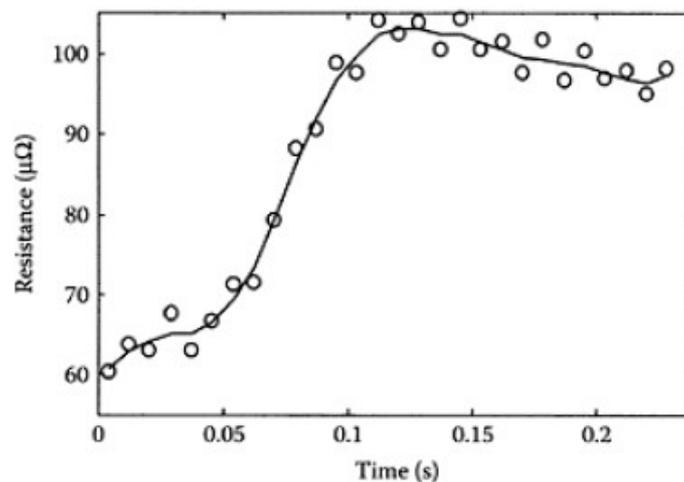


Figura 66 - Tipica curva della resistenza dinamica in funzione del tempo [4]

3.4.2.6 Spostamento degli elettrodi

Lo spostamento degli elettrodi è riferito al movimento delle loro punte, che influiscono direttamente sul processo termico della saldatura. I sensori di spostamento devono essere installati il più possibile vicino agli elettrodi, e quelli più comuni sono:

- *I sensori LVDT (Linear Variable Differential Transformer):* sono i trasduttori di spostamento induttivo, che misurano lo spostamento rispetto a un punto. Sono realizzati mediante un tubo composto da tre avvolgimenti disposti lungo lo stesso asse, con all'interno un nucleo cilindrico ferromagnetico mobile, caratterizzato da un'alta permeabilità magnetica. L'avvolgimento centrale è detto primario, mentre gli altri due secondari; quello primario è collegato a un generatore di tensione, e ai capi dei secondari si misura la tensione d'uscita. Nel caso in cui il nucleo rimane in posizione centrale, le tensioni secondarie sono uguali e quindi la tensione complessiva misurata è zero. Se invece il nucleo si trova in una posizione decentrata, le due tensioni non sono più uguali e, di conseguenza, la tensione misurata è proporzionale allo spostamento del nucleo, che può essere così determinato;
- *I sensori a fibra ottica:* questi sensori utilizzano fasci di fibre ottiche che trasmettono e ricevono la luce da e verso una superficie. Il principale vantaggio rispetto a quelli LVDT, è quello che sono molto meno influenzati dal campo magnetico prodotto durante la saldatura,

e possono essere usati su molti materiali. Una curva di spostamento misurata dal sensore a fibre ottiche è data in figura 67:

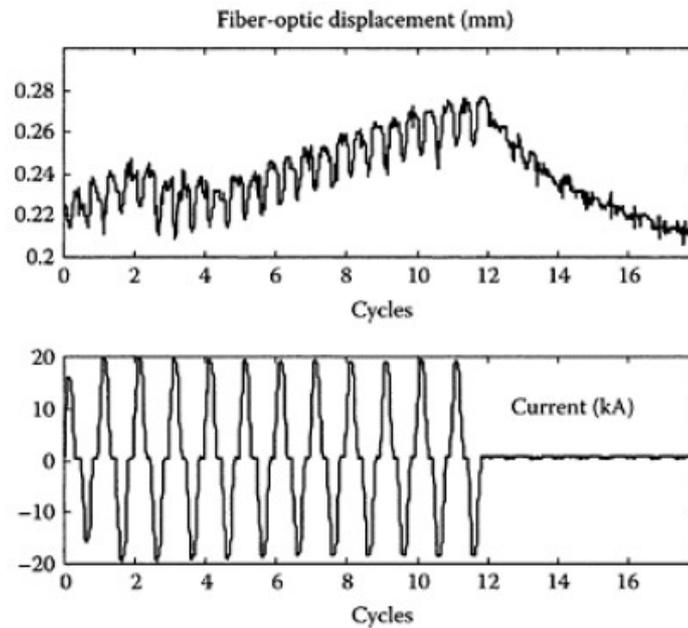


Figura 67 - *Curva di spostamento degli elettrodi misurata con sensori a fibre ottiche [4]*

La figura 67 mostra che lo spessore della saldatura, evidenziato dallo spostamento degli elettrodi, aumenta all'aumentare della corrente, a causa del riscaldamento; la diminuzione attorno al quarto ciclo è dovuta all'indebolimento della struttura dei materiali, a causa dell'inizio della fusione. Inoltre, il numero di picchi, è doppio di quelli della corrente e, pertanto, un ciclo di corrente produce sia riscaldamento corrispondenti a due picchi, sia raffreddamento corrispondenti a due fronti. Dopo che la corrente si è estinta in corrispondenza del dodicesimo ciclo, si ha una regione che corrisponde al raffreddamento e alla contrazione del nocciolo.

3.4.2.7 Forza agli elettrodi

Il segnale della forza agli elettrodi viene misurato attraverso due tipi di sensori: quelli che utilizzano una "cella di carico" e quelli piezoelettrici.

Un tipico segnale di una cella di carico è quello della figura 68 :

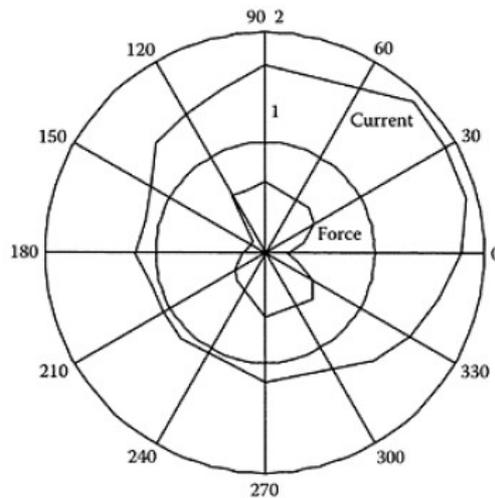


Figura 68 - Tipico segnale di una cella di carico [4]

Questi sensori sono notevolmente influenzati dal campo magnetico indotto e, in particolare, nella loro orientazione. Dalla figura 68 notiamo che la tensione indotta è bassa in corrispondenza ad angoli di 150 e 180 gradi.

Rispetto alle celle di carico, i sensori piezoelettrici sono meno influenzati dal campo magnetico, e la forza agli elettrodi diminuisce durante il ciclo di saldatura, come mostrato in figura 69:

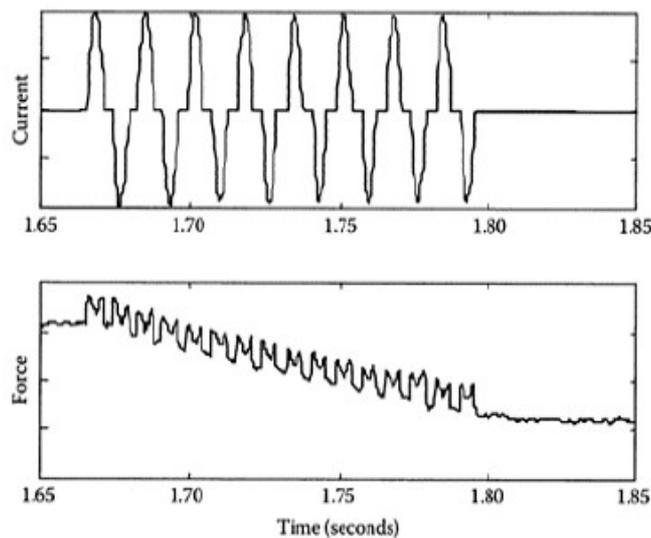
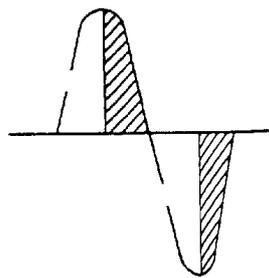
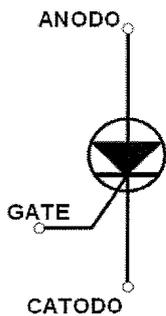


Figura 69 - Tipico segnale di sensore piezoelettrico [4]

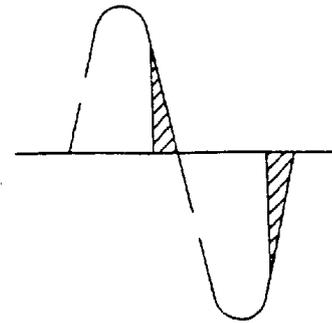
3.4.3 CONTROLLO DEL PROCESSO

Il sistema di controllo gestisce, sulla base di programmi pre-impostati, le varie fasi della saldatura e, in particolare, il susseguirsi dei vari cicli di pressione e corrente. Tra queste funzioni, quella più importante riguarda la gestione della corrente, essendo il parametro principale della saldatura a resistenza.

Tutti i sistemi di controllo utilizzano tiristori (SCR – Silicon Controlled Rectifier) opportunamente disposti sul circuito di saldatura, al primario o al secondario. In questo modo, pilotando il segnale di gate, è possibile parzializzare la semionda raddrizzata da ogni singolo SCR. Ad esempio, come mostrato in figura 70, sfasando il segnale di controllo di 90° rispetto al segnale entrante, si ottiene il passaggio della corrente per solo mezzo ciclo, e conseguentemente il calore generato sul giunto è circa pari alla metà di quello massimo possibile.



Accensione ritardata di 90°



Accensione ritardata di 120°

Figura 70-a) – SCR
[2]

Figura 70-b) – Esempi di accensione degli SCR [2]

I sistemi di controllo si differenziano per le modalità con cui questi elementi sono posti all'interno del circuito di saldatura, per la modalità di gestione dello sfasamento e per la velocità di risposta.

I sistemi più semplici sono quelli per *defasaggio*, in cui si regola l'angolo di sfasamento tra la corrente di alimentazione e quella di comando dell'SCR; ritardando il punto di accensione, si viene a limitare la corrente primaria e, di conseguenza, la corrente secondaria. Inoltre sono i più economici, e vengono utilizzati nelle saldature che non richiedono grandi garanzie di tenuta o di qualità. Tuttavia il controllo è molto impreciso, non retroazionabile e sensibile alle fluttuazioni della tensione di rete, alle cadute di tensione dovute a saldature eseguite in contemporanea da più macchine, allo stato di usura degli elettrodi, alla presenza d'impedenze elevate al circuito secondario.

Tali limiti sono superabili con il controllo per *defasaggio a corrente costante*, dove un anello di Rogowski posto sul primario o sul secondario, misura la corrente primaria o secondaria; la misura viene inviata a un microprocessore elettronico che, comparando tale valore con quello impostato, comanda il passaggio della corrente. Infatti, il risultato del confronto è inviato al comando di gate del gruppo degli SCR, che modificando l'angolo di conduzione, aumentano o diminuiscono l'intensità di corrente. A sequenza avvenuta, i valori ottenuti sono memorizzati e resi leggibili; mentre nel caso in cui il valore impostato non fosse stato raggiunto, un segnale di allarme avverte l'operatore. In questo modo, il sistema garantisce maggiore regolarità di funzionamento e che il valore di corrente sia vicino a quello impostato. Inoltre permette il controllo e la compensazione entro un tempo di 2– 3 cicli con anello di Rogowski sul secondario, e di 3 – 4 cicli anello di Rogowski sul primario.

Pertanto, il controllo a corrente costante è in grado di compensare ed eliminare:

- Cadute di tensioni improvvise sulla rete di alimentazione;
- Saldature eseguite in contemporaneità da più macchine, allacciate su un impianto elettrico di limitata potenza;
- Aumento del volume di materiale fra gli elettrodi;
- Usura dei componenti del circuito secondario.

Tuttavia non è in grado di compensare l'aumento della superficie di contatto degli elettrodi, in quanto non consente il controllo della variazione della resistenza fra le punte, dovuta alla maggiore sezione di passaggio corrente. Per controllare questo problema, si può agire con un programma basato sulla periodicità dell'usura elettrodi, che permette di programmare l'aumento automatico e in

percentuale della corrente fino al raggiungimento di un predeterminato numero di saldature effettuate.

Un ulteriore e più recente affinamento della tecnica precedente è quella del *controllo adattivo* in cui la retroazione è basata non solo sulla corrente, ma anche sui valori di altri parametri di saldatura (ad esempio la tensione, e in alcuni casi la pressione). Esso permette di compensare l'usura degli elettrodi, e il funzionamento si basa sul controllo della resistenza fra le punte durante la saldatura, come mostrato in figura 71.

R_p = resistenza di picco

t_1+t_2 = tempo per raggiungere la fusione

R_E = resistenza del nocciolo formato

1+2+3 = tempo di ottimizzazione del punto

ΔR = variazione della resistenza = $R_p - R_E$

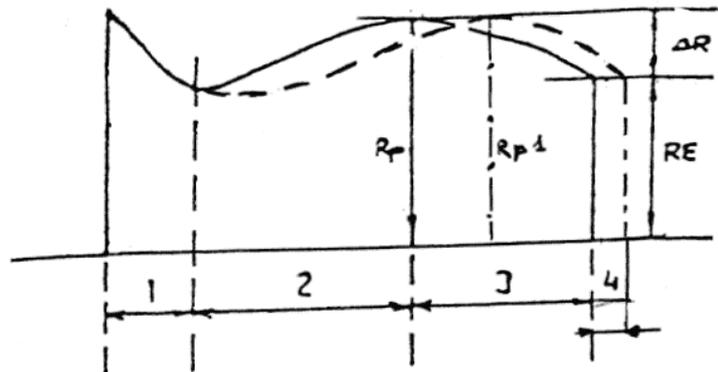


Figura 71 – Controllo adattivo [2]

Dal grafico della figura 71 possiamo osservare che:

- All'inizio della saldatura la resistenza di contatto è ancora molto alta e decresce per l'applicazione della pressione nell'intervallo di tempo 1;
- Dopo pochi periodi, il passaggio di corrente accresce la resistenza arrivando al suo massimo quando il nocciolo di fusione è completato (intervallo 2);
- La resistenza si riduce durante il completamento della fusione del nocciolo, per scendere al suo minimo a saldatura terminata (intervallo 3). Il valore minimo ha lo stesso valore che aveva all'inizio della saldatura.

La variazione di resistenza ΔR viene memorizzata dal controllo e viene paragonata al valore che rileverà sui punti successivi. Supponiamo che, nel punto seguente, la corrente sia soggetta a una diminuzione; di conseguenza, il calore sviluppato risulterà inferiore e quindi il punto di fusione e la resistenza di picco misurati saranno proporzionalmente inferiori. In questo caso, il controllo non ricevendo il segnale di raggiungimento della ΔR , allunga automaticamente il tempo di saldatura per fornire il calore necessario per ottenere lo stesso risultato del punto precedente.

Pertanto, nei controlli adattativi, si deve tenere conto di questa variabilità del tempo di saldatura, e se da un lato ciò è importante per ottenere la buona fusione del nocciolo di saldatura, dall'altro lato può creare problemi su operazioni automatiche, che necessitano di tempi predefiniti e regolari.

3.4.3.1 Esempio: controllo di potenza in tempo reale

Con questo metodo, un sistema di controllo di potenza non-lineare viene linearizzato grazie a una tecnica che si basa sulla teoria delle differenze geometriche. Il diagramma a blocchi del controllo è quello della figura 72:

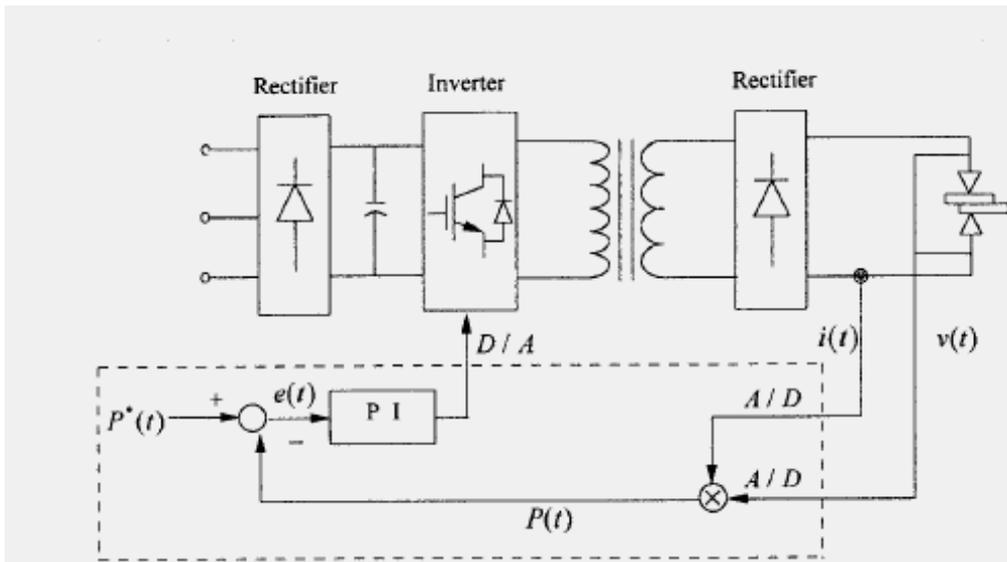


Figura 72 - Diagramma a blocchi del sistema di controllo di potenza [9]

Indichiamo con:

- $P^*(t)$ la potenza di riferimento;
- $P(t)$ la potenza misurata, $P(t) = v(t) i(t)$;
- $e(t)$ l'errore, $e(t) = P^*(t) - P(t)$;
- v_{tr1} la tensione primaria;
- v_{tr2} la tensione secondaria;
- $v(t)$ la tensione agli elettrodi;
- $i(t)$ la corrente secondaria;
- R la resistenza tra gli elettrodi;
- L l'induttanza tra gli elettrodi;
- a il rapporto di trasformazione;
- K il guadagno dell'amplificatore di potenza;
- k_p il guadagno proporzionale;
- k_i il guadagno integrale.

Facciamo l'ipotesi che il trasformatore sia ideale, e il suo schema è:

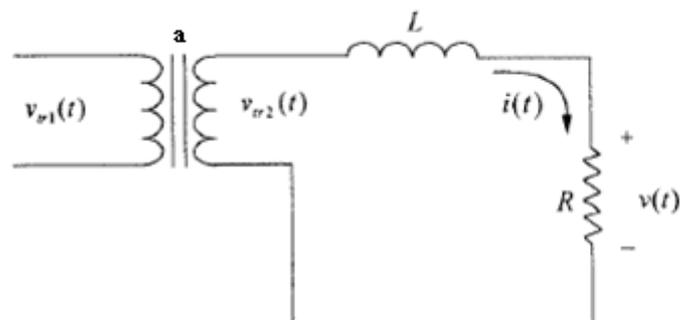


Figura 73 - Circuito equivalente del trasformatore ideale [9]

La tensione secondaria è:

$$v_{tr2}(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) \quad (3.4)$$

La potenza misurata è:

$$P(t) = v(t)i(t) = Ri^2(t) \quad (3.5)$$

Al primario è presente un controllo PI, la cui tensione primaria è:

$$v_{r1}(t) = K \left\{ k_p e(t) + k_i \int e(t) dt \right\} = a v_{r2}(t) \quad (3.6)$$

Sebbene la resistenza varia molto con la temperatura, possiamo assumerla costante per il primo periodo e, pertanto, la funzione di trasferimento è:

$$\frac{I(s)}{V_{r2}(s)} = \frac{1}{Ls + R} \quad (3.7)$$

$$\frac{V(s)}{V_{r2}(s)} = \frac{R}{Ls + R} \quad (3.8)$$

Il corrispondente diagramma a blocchi del sistema di controllo dato dalle precedenti equazioni è:

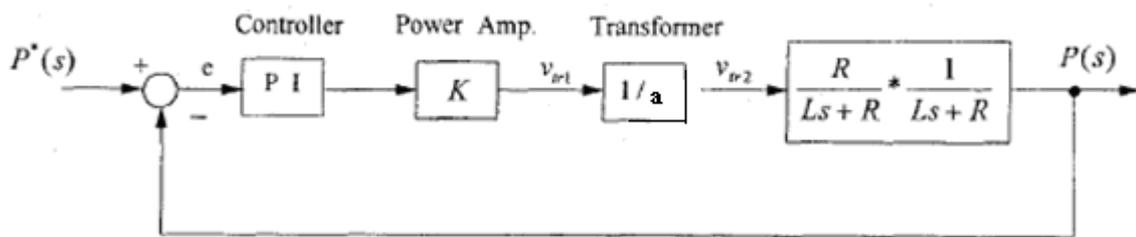


Figura 74 - Diagramma a blocchi del sistema di controllo non – lineare [9]

Siccome è difficile analizzare sistemi non – lineari, allora possiamo linearizzare il sistema di controllo. Derivando il secondo membro della seconda equazione otteniamo:

$$\begin{aligned} \frac{dP(t)}{dt} &= \frac{dv(t)}{dt} i(t) + v(t) \frac{di(t)}{dt} = \left(-\frac{R}{L} v(t) + \frac{R}{L} v_{r2}(t) \right) i(t) + \left(-\frac{R}{L} i(t) + \frac{v_{r2}(t)}{L} \right) v(t) = \\ &= -\frac{2R}{L} i(t)v(t) + \frac{2}{L} v_{r2}(t)v(t) = -\frac{2R}{L} P(t) + \frac{2}{L} v_{r2}(t)v(t) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Indicando con \bar{u} il nuovo ingresso:

$$\bar{u} = \frac{2}{L} v_{r2}(t)v(t) \quad (3.10)$$

L'equazione 3.9 può essere riscritta come:

$$\frac{dP(t)}{dt} = -\frac{2R}{L} P(t) + \bar{u} \quad (3.11)$$

Notiamo che l'equazione 3.11 è lineare, e il nuovo ingresso lo scegliamo come controllore PI:

$$\bar{u}(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt \quad (3.12)$$

Il diagramma a blocchi del sistema linearizzato è mostrato in figura 75:

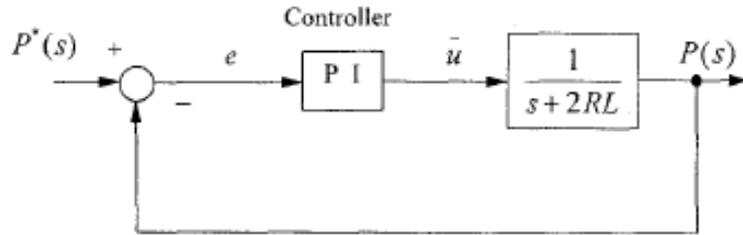


Figura 75 - Diagramma a blocchi del sistema linearizzato [9]

Combinando le precedenti equazioni otteniamo:

$$v_{ir2}(t) = \frac{L}{2v(t)} \left(k_p e(t) + k_i \int e(t) dt \right) \quad (3.13)$$

$$v_{ir1}(t) = \frac{aL}{2v(t)} \left(k_p e(t) + k_i \int e(t) dt \right) \quad (3.14)$$

Se il guadagno totale dell'amplificatore di potenza è K, l'uscita del controllore PI è v_{ir1}/K . La configurazione del sistema di controllo è pertanto quella della figura 76:

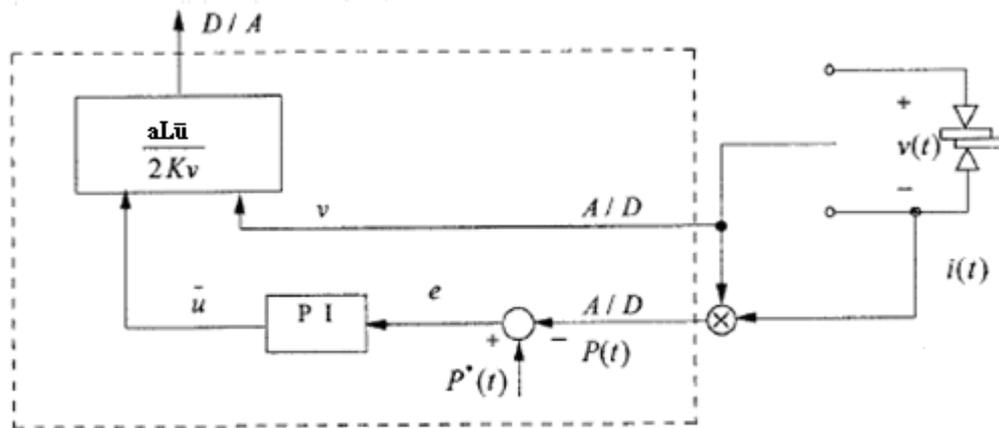
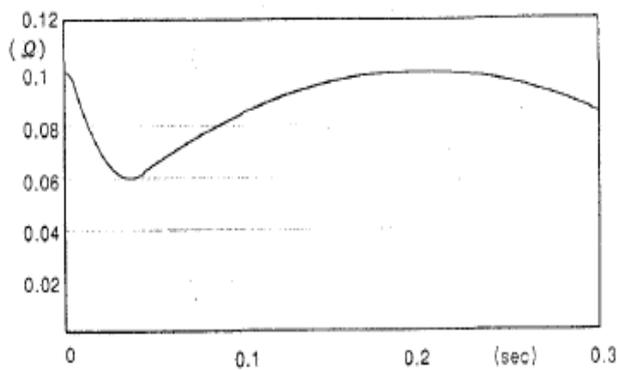
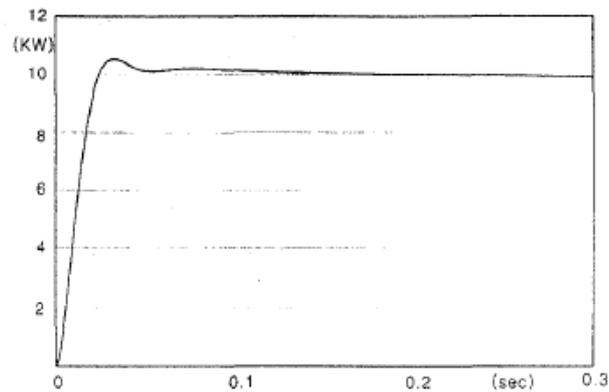


Figura 76 - Configurazione del sistema di controllo [9]

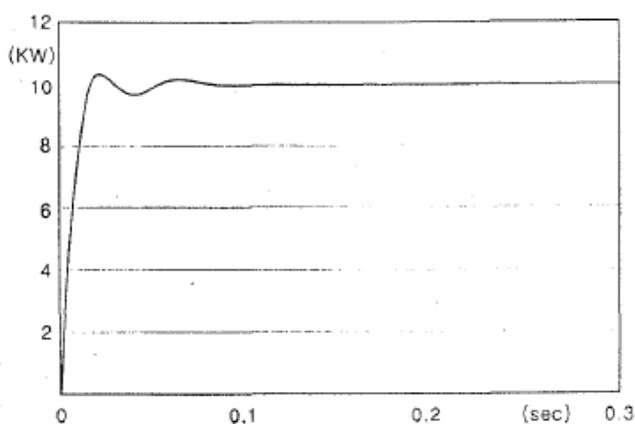
Questo sistema di controllo è stato studiato attraverso simulazioni che considerano valori variabili della resistenza tra gli elettrodi R e potenza installata $P^*(t)$ pari a 10 kW. I risultati di queste simulazioni sono riportati nelle figure 77-a), -b), -c) e -d).



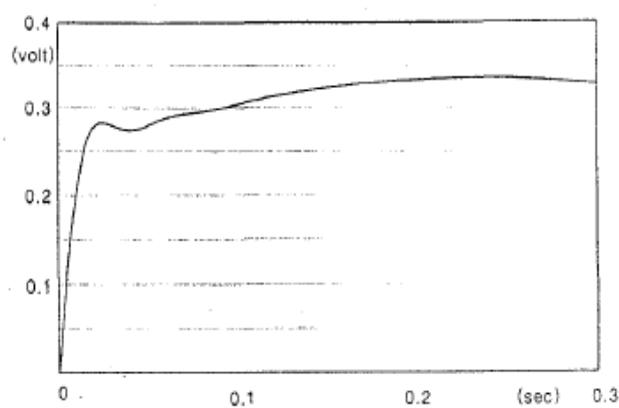
a) - Resistenza tra gli elettrodi



b) - Potenza installata $P^*(t)$



c) - Potenza $P(t)$



d) - Tensione $v(t)$ con filtro passa basso

Figura 77 – Risultati delle simulazioni [9]

Dai grafici di $P^*(t)$ e $P(t)$ notiamo che il sistema di controllo fornisce delle risposte dinamiche molto veloci, rispetto a quelli tradizionali, essendo dinamicamente lineari. In confronto con il sistema di controllo non – lineare, l'uscita del controllore PI è moltiplicata per la costante $aL/2K$, e poi diviso per la tensione agli elettrodi $v(t)$. Questa tensione è piccola all'inizio del controllo ma, di conseguenza, l'uscita del PI è elevata. All'aumentare del tempo la tensione aumenta e l'uscita del PI diminuisce; e questo è il motivo per cui la risposta del sistema di controllo è molto veloce.

3.4.3.2 Esempio: controllo adattivo in tempo reale

Questo controllo adattivo permette di determinare la resistenza dinamica durante il processo di saldatura, attraverso l'uso di un controllore "fuzzy". Infatti, la resistenza è ottenuta come rapporto tra la tensione e la corrente agli elettrodi, misurati con segnali elaborati da un computer (PC – 286VG). Esso presenta un transitorio migliore, che permette di ottenere un nocciolo molto solido, e quindi un'ottima qualità di saldatura. Inoltre si ha la riduzione del consumo d'energia.

Il circuito equivalente e lo schema del sistema di controllo, comprendente la saldatrice RWC21 – P/PT, sono mostrate in figura 78 e 79.

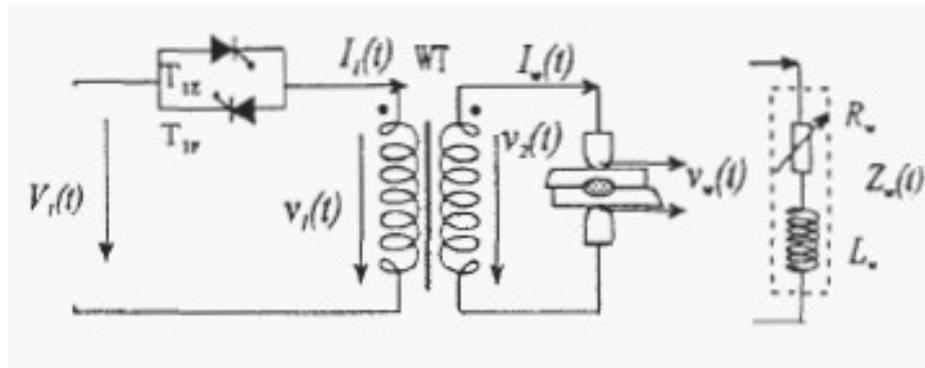


Figura 78 - Circuito equivalente del sistema di controllo [7]

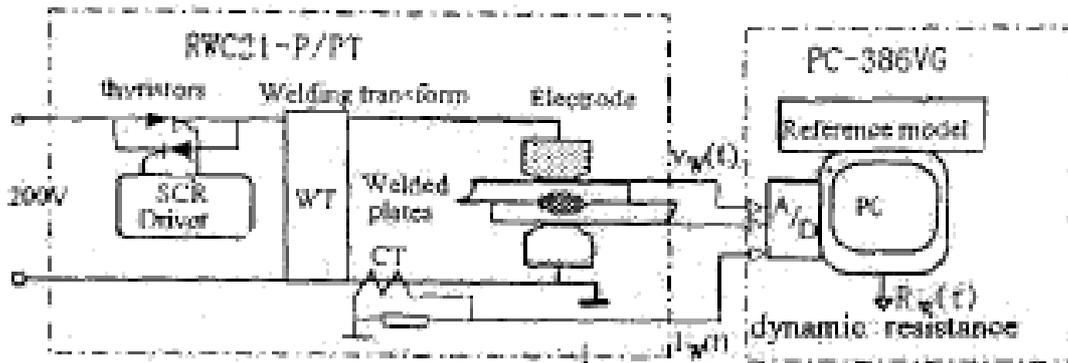


Figura 79 - Sistema di controllo [7]

Gli andamenti delle resistenze dinamiche in funzione del tempo per 2.0 mm, 2.3 mm e 3.2 mm di spessore di lamiera d'acciaio sono riportati in figura 80.

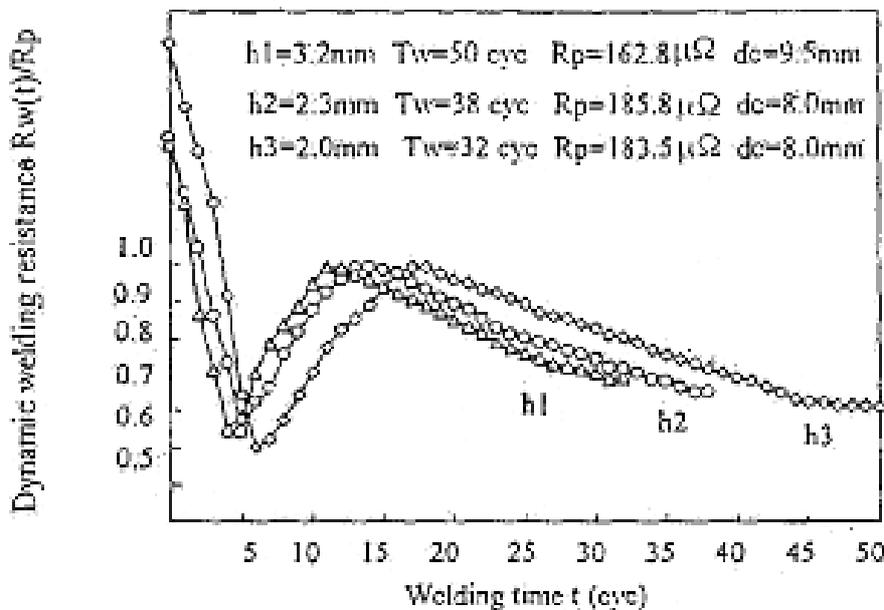


Figura 80 - Resistenze dinamiche per tre spessori diversi delle lamiera (h_1 , h_2 , h_3 – spessori; R_p – resistenza massima; T_w – tempo di saldatura; d_c – diametro degli elettrodi) [7]

Grazie alla misura di queste resistenze dinamiche e alla corrente, si può calcolare il calore in ingresso e, in seguito, mediante simulazione numerica, diametro e la profondità del nocciolo. Per lo

spessore di 3.2 mm, gli andamenti della resistenza dinamica, del diametro d_n e della penetrazione p_n del nocciolo, in funzione del tempo risultano quelli riportati in figura 81:

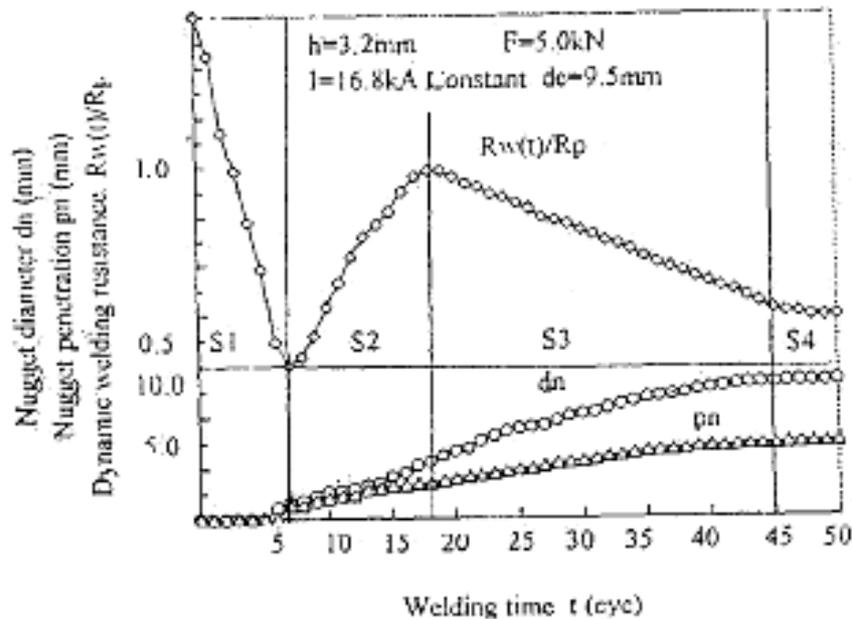


Figura 81 - Caratteristiche del nocciolo e resistenza dinamica per lamiera di spessore 3.2 mm [7]

Dal grafico possiamo individuare quattro fasi che caratterizzano il processo di saldatura: S1, S2, S3, S4. Durante S1 il nocciolo non è ancora formato e la resistenza comprende quella dei materiali e quella di contatto, e diminuisce rapidamente in circa 5÷8 cicli. Durante S2, il nocciolo inizia a formarsi e, grazie all'aumento di temperatura, la resistenza diventa massima e assume il valore R_p . Durante S3 il nocciolo aumenta ulteriormente e la resistenza si riduce a causa dell'aumento di diametro. Nella fase finale S4, la resistenza, il diametro e la profondità rimangono pressoché costanti. Pertanto, le variazioni di resistenza dinamica si riflettono sulle dimensioni del nocciolo, e possono essere usate per stimare il processo di saldatura.

Per ottenere un nocciolo solido e diminuire il consumo d'energia, il processo deve essere controllato in corrente, la quale deve essere adattata a ogni fase. Infatti, in S1 le perdite sono maggiori a causa dell'elevata resistenza e, pertanto, la corrente deve essere più piccola. Tuttavia, in S2 e S3 la potenza in ingresso deve essere più elevata (quindi corrente più elevata), in modo da formare il nocciolo velocemente e ridurre le perdite. Durante la fase S4 di mantenimento, la potenza deve essere minore (corrente minore) e la corrente viene cessata nel momento in cui il nocciolo raggiunge la dimensione richiesta.

Pertanto, grazie al sistema di controllo in corrente, si riesce a regolare il processo di saldatura, e grazie al controllore "fuzzy", il tempo di simulazione risulta ridotto.

Il diagramma a blocchi del sistema di controllo è schematizzato in figura 82:

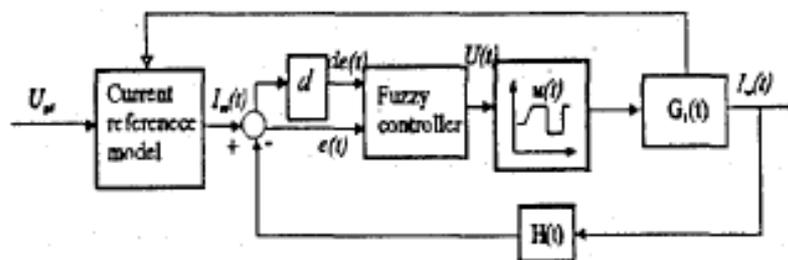


Figura 82 - Diagramma a blocchi del sistema di controllo [7]

Il controllore fuzzy è basato sul controllore PD (Proporzionale k_p e Derivativo k_D):

$$U(nT) = k_p e(nT) + k_D de(nT) \quad (3.15)$$

$$e(nT) = Y_m(nT) - Y(nT) \quad (3.16)$$

$$de(nT) = e(nT) - e[(n-1)T] \quad (3.17)$$

dove $U(nT)$ è il segnale di controllo, $e(nT)$ e $de(nT)$ sono i segnali in ingresso ossia, rispettivamente, l'errore e la derivata dell'errore, Y_m e Y i segnali in uscita.

Un esempio dell'andamento della corrente controllata per lamiere di spessore 3.2 mm è riportato in figura 83:

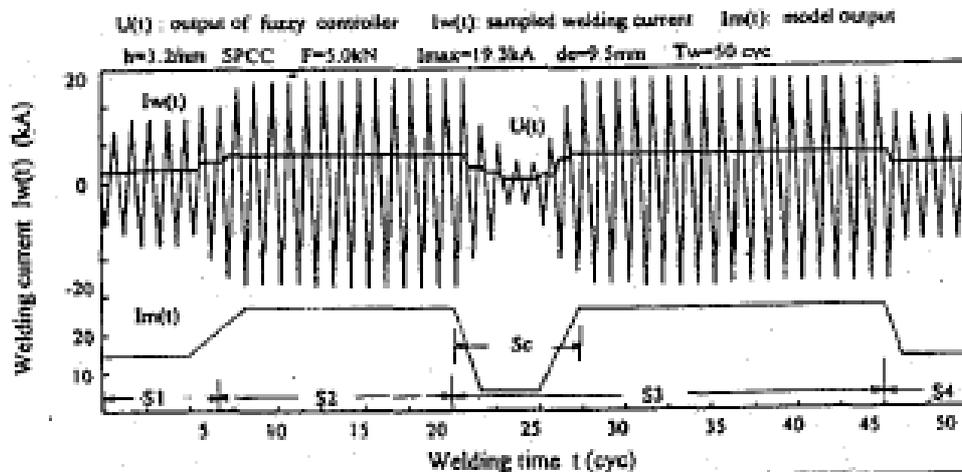


Figura 83 - Andamento della corrente di saldatura con controllore "fuzzy" [7]

Pertanto la corrente di saldatura è controllata secondo i segnali in uscita dal controllore, i quali sono modificati in base ai periodi del processo e alla resistenza dinamica misurata.

In seguito, grazie al controllo di corrente e alla misura della resistenza dinamica, le dimensioni del nocciolo sono calcolate con una simulazione numerica agli elementi finiti. L'andamento delle dimensioni del nocciolo è del tipo riportato in figura 84:

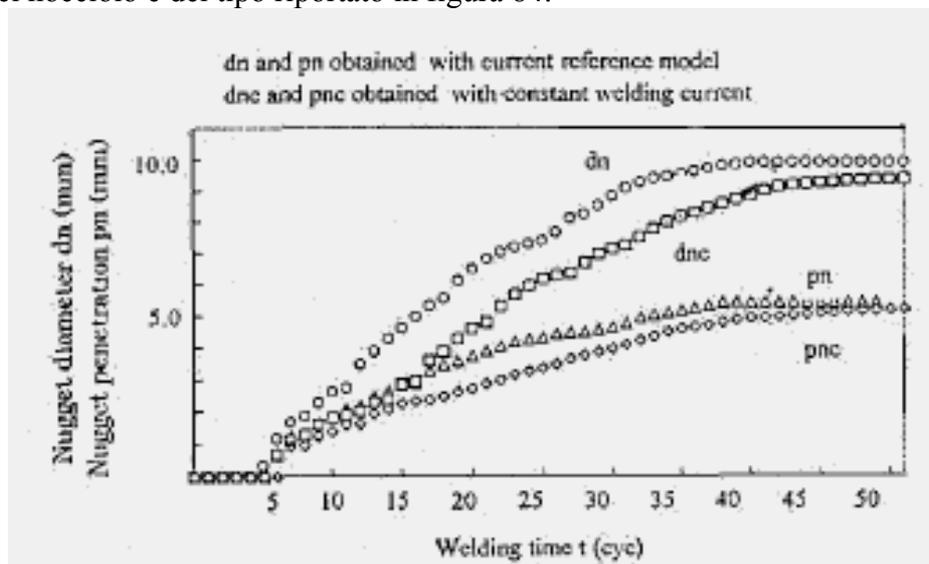


Figura 84 - Andamento delle dimensioni del nocciolo ottenute con corrente di saldatura costante [7]

In aggiunta al controllo di corrente si può sviluppare un modello che controlli la potenza in ingresso. Grazie a questa simulazione, si possono calcolare la resistenza equivalente della saldatura, con la misura della tensione e della corrente, e le dimensioni del nocciolo. Consideriamo lo schema della figura 85:

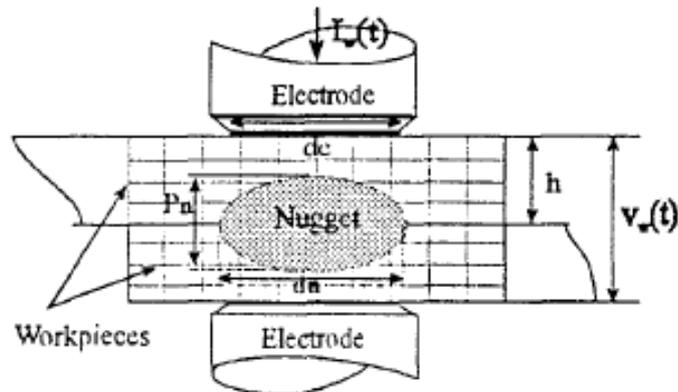


Figura 85 - Calcolo delle dimensioni del nocciolo di saldatura [8]

Nella figura $I_w(t)$ è la corrente di saldatura, $V_w(t)$ è la tensione agli elettrodi, h è lo spessore, d_e è il diametro dell'area di contatto elettrodo-materiale, d_n e p_n sono rispettivamente diametro e profondità del nocciolo. La potenza in ingresso può essere espressa come:

$$P(t) = P_0 e^{-\beta t} \quad (3.18)$$

dove $P(t)$ è la potenza in ingresso [kW], P_0 la potenza nell'istante iniziale [kW], e β il fattore di diminuzione.

La corrispondente energia in ingresso è:

$$W(t) = W_0(t_w)(1 - e^{-\beta t}) \quad (3.19)$$

dove $W(t)$ è l'energia in ingresso [kWs], $W_0(t_w)$ è la totale energia in ingresso nel periodo di saldatura t_w [kWs], t_w è il tempo di saldatura.

In particolare, la determinazione della potenza in ingresso (prima equazione) o dell'energia in ingresso (seconda equazione) permette di definire il metodo di controllo della densità di potenza.

Ad esempio, possiamo confrontare le dimensioni dei noccioli, ottenuti con la simulazione, usando tre metodi di controllo: quello a corrente costante, a potenza costante e a densità di potenza. I parametri sono: tempo di saldatura t_w pari a 600 ms, energia totale per la saldatura $W(t_w)$ pari a 5.8 kWs, spessore h pari a 2 mm, diametro del nocciolo d_n pari a 8 mm, e forza F pari a 470 kgf.

Gli andamenti delle correnti dei tre metodi sono riportati in figura 86:

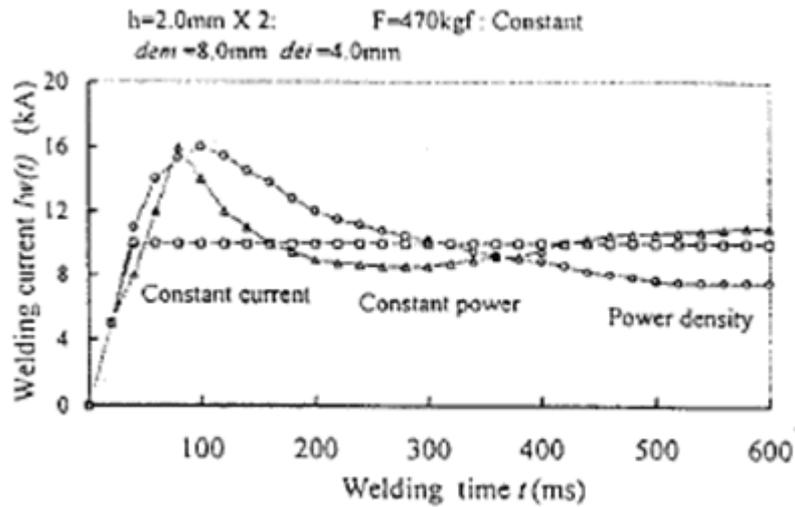


Figura 86 - Andamenti delle correnti con diversi metodi di controllo [8]

Con il metodo della densità di potenza, la corrente è controllata in modo che, durante la fase iniziale e la fase di riscaldamento sia più elevata rispetto alla fase di mantenimento, per ottenere un nocciolo più grande possibile e ridurre il consumo d'energia.

I corrispondenti andamenti delle dimensioni del nocciolo e del tempo necessario alla formazione del nocciolo stesso, in funzione del diametro iniziale di contatto (d_{ei}), per i tre metodi sono quelli della figura 87-a) e -b):

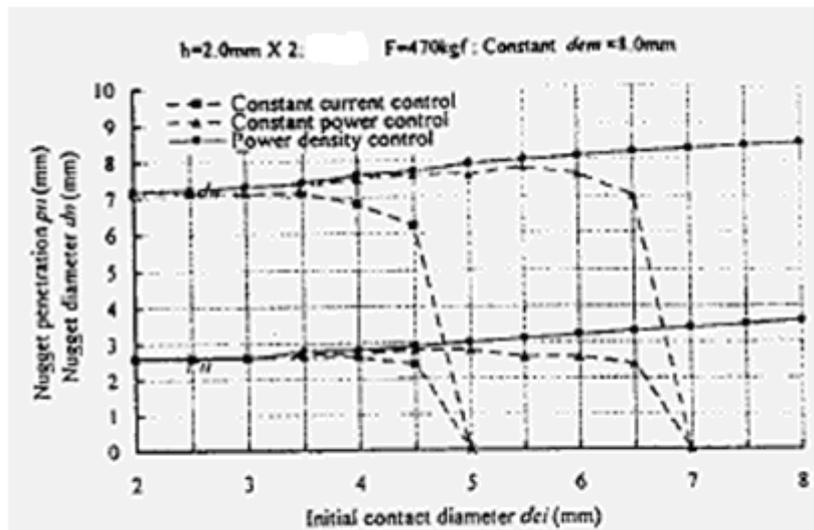


Figura 87-a) - Dimensioni del nocciolo con diversi metodi di controllo [8]

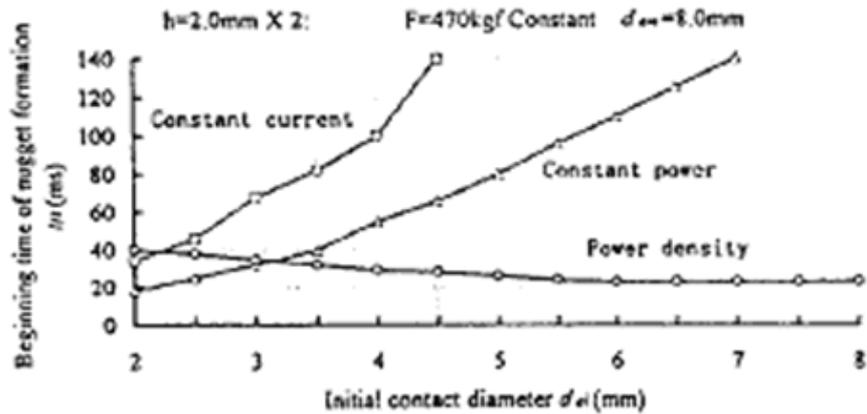


Figura 87-b) - Tempo necessario alla formazione del nocciolo con diversi metodi di controllo [8]

Inoltre, gli andamenti delle dimensioni del nocciolo in funzione del tempo di saldatura, per i tre metodi sono riportati in figura 87-c):

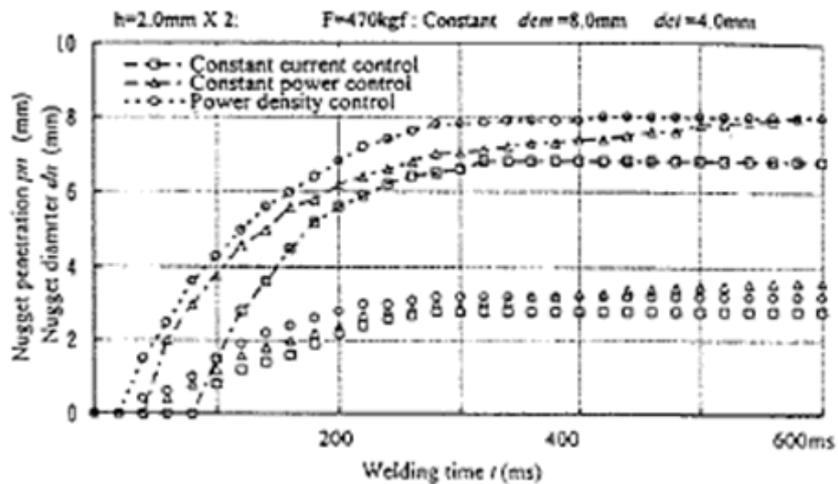


Figura 87-c) - Dimensioni del nocciolo in funzione del tempo con diversi metodi di controllo [8]

Dai grafici notiamo che, con il metodo della densità di potenza, si ottengono noccioli più grandi, con tempi di formazione più piccoli.

Un modello ottimale per l'energia in ingresso per saldatura di acciai teneri è:

$$W(t) = W_0(h) \left(1 - e^{-\alpha(h) \frac{8k}{d^2} t} \right) \quad (3.20)$$

dove d è il diametro del nocciolo, $d = 5 \div 6\sqrt{h}$ [mm], h è lo spessore dei materiali [mm], k è la diffusività termica [mm^2/s], $\alpha(h)$ è il fattore di incremento dello spessore, $\alpha(h) = 2h \pm 0.5$, $W_0(h)$ è l'energia totale in ingresso [kW], che include quella per la formazione del nocciolo e quella persa. Il diagramma a blocchi di un sistema di controllo di questo tipo (chiamato MRAFCS), comprendente il computer PC - 9801 e la saldatrice RWC21 - PC/PT sono quelli riportati nelle figure 88-a) e -b):

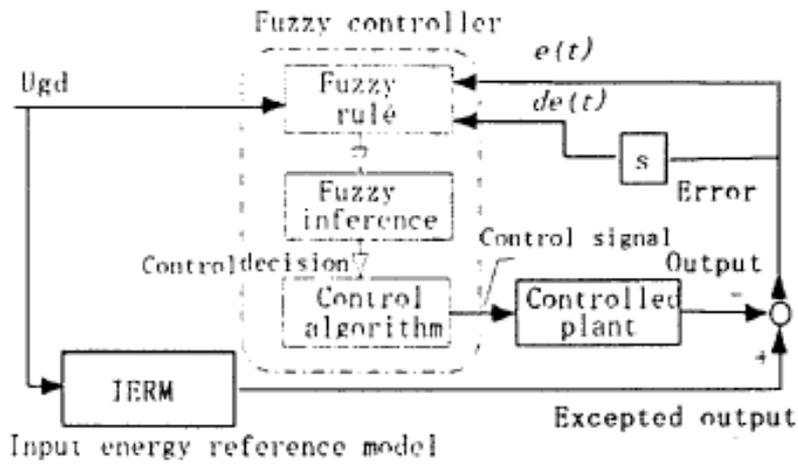


Figura 88-a) - Diagramma a blocchi del sistema di controllo della densità di potenza [8]

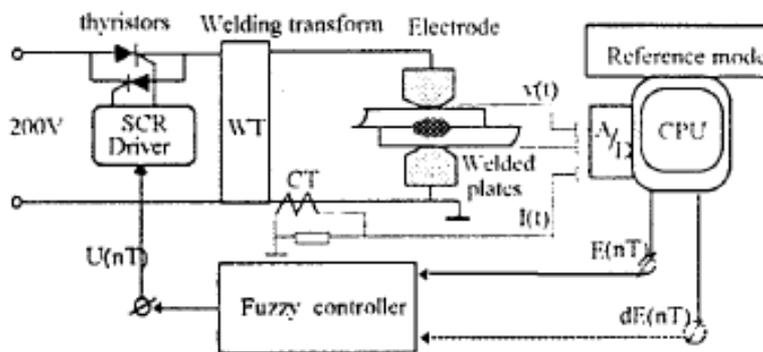


Figura 88-b) - Schema del sistema di controllo [8]

Anche questo sistema di controllo utilizza il controllore “fuzzy”, basato sullo stesso controllore PD. Gli andamenti della corrente di saldatura e dell’energia in ingresso sono riportati nelle figure 89-a) e -b):

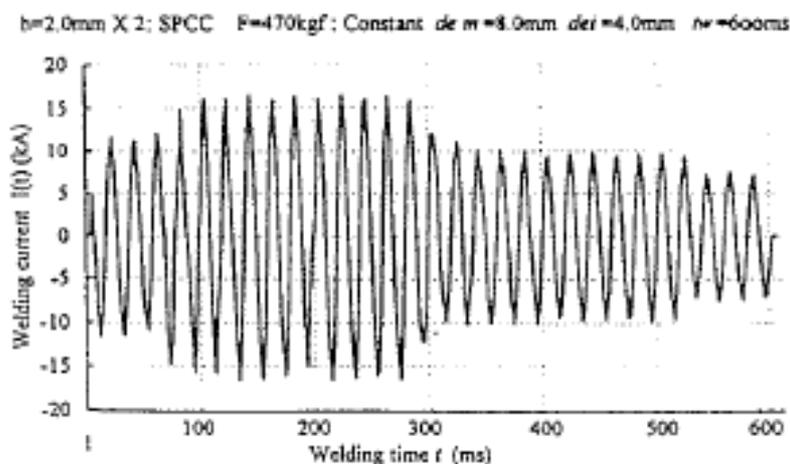


Figura 89-a) - Corrente di saldatura [8]

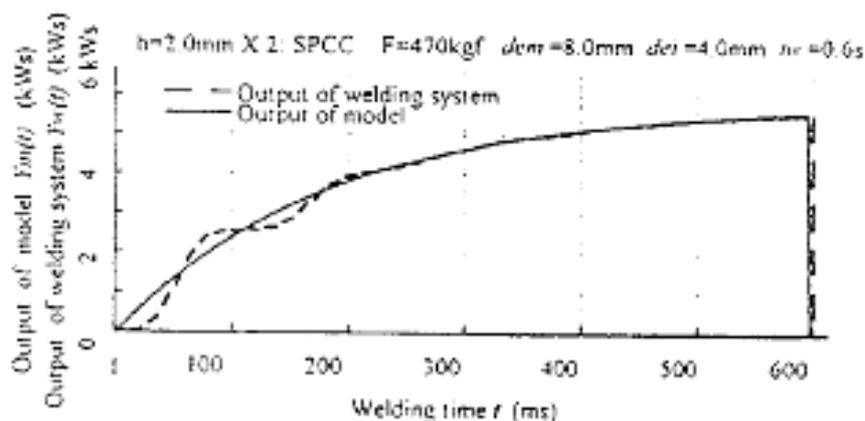


Figura 89-b) - Energia in ingresso [8]

L'energia in ingresso è controllata, mediante tiristori, secondo il segnale in uscita, che può essere modificato variando l'angolo di accensione dei tiristori. L'andamento della corrente di saldatura rispetto a differenti angoli d'accensione degli SCR è del tipo riportato in figura 90:

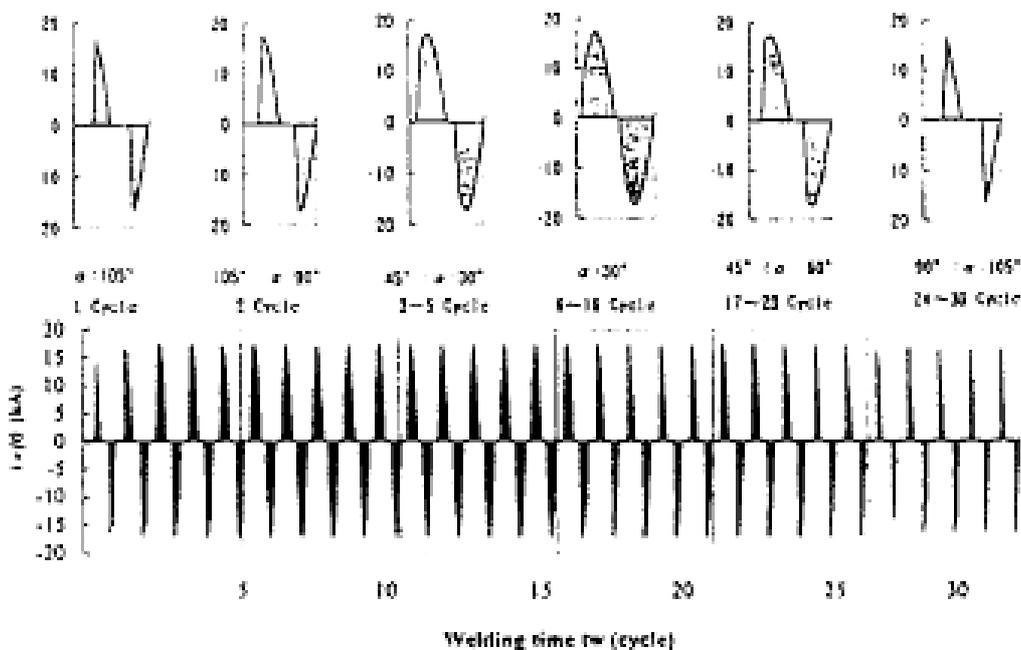


Figura 90 - Corrente di saldatura in funzione dell'angolo di accensione dei tiristori [8]

Grazie al controllo della corrente tramite i tiristori, si ottiene un'ottima precisione e qualità di saldatura.

3.4.4 CONTROLLI IN CORRENTE TRIFASE A MEDIA FREQUENZA (INVERTER)

Vengono usati 5 sistemi di controllo:

- 1) A corrente costante sul secondario;
- 2) A corrente costante sul primario;
- 3) Ad energia costante;
- 4) Con limitazione di picco sul primario;
- 5) Con parzializzazione in percentuale della potenza massima.

Questi sistemi di controllo sono scelti secondo le operazioni di saldatura, e secondo il materiale che si ha a disposizione.

3.4.4.1 Corrente costante sul secondario

E' il sistema di controllo più utilizzato e permette di mantenere costante la corrente richiesta per una determinata saldatura. Il rilevamento viene effettuato per mezzo di un anello di Rogowski, in genere flessibile, posto su un ramo del circuito secondario. L'anello rileva, nel primo mezzo ciclo, la corrente passante tra gli elettrodi, la confronta con quella richiesta, e nel terzo mezzo ciclo inizia la compensazione per renderla costante. Pertanto, nell'arco dei 2 - 3 cicli, la corrente viene portata al valore desiderato e mantenuta costante durante tutta la saldatura.

3.4.4.2 Corrente costante sul primario

Questo controllo viene utilizzato, quando si vuole evitare l'applicazione dell'anello di Rogowski sul circuito secondario, in apparecchiature di saldatura mobili (pinze robot) o su macchine a punti multipli che utilizzano più trasformatori. L'anello di Rogowski primario, è di tipo rigido e viene applicato normalmente sul circuito di alimentazione. Pertanto, il controllo rileva la tensione di alimentazione primaria, dalla quale si rileva anche la corrente, essendo proporzionale alla tensione. Di conseguenza, i tempi di rilevamento e di risposta sono leggermente più lunghi (4 cicli) e la precisione inferiore al metodo precedente.

3.4.4.3 Energia costante

Questo controllo necessita non solo dell'anello di Rogowski, ma anche l'utilizzo di un sensore di tensione, applicato su un elettrodo, il più vicino possibile al punto di contatto con la lamiera. Con esso si viene a mantenere costante il prodotto dell'intensità di corrente (I) con la tensione tra gli elettrodi (V), cioè la potenza: $W = V * I$, e quindi l'energia, a essa proporzionale. In questo caso, al variare della tensione rilevata, il controllo varia proporzionalmente la corrente in modo da mantenere costante la potenza.

Viene usato principalmente nei casi in cui si vuole consentire una certa variazione di resistenza sulla superficie di contatto dei pezzi da saldare, come elettrodi costruiti con materiali con resistenza elettrica variabile (sinterizzati), superfici dei pezzi trattate o ricoperte, ecc. Inoltre, necessita di un tempo di reazione pari al sistema di controllo a corrente costante sul primario e, la precisione è strettamente legata al posizionamento dei sensori, che devono essere il più vicino possibile al punto di saldatura.

3.4.4.4 Limite di picco sul primario

Questo metodo controlla che la corrente di saldatura rimanga entro i limiti di tolleranza, mantenendo costante il valore massimo della corrente primaria, senza tenere conto della variazione di resistenza nel circuito secondario. Viene usato con tempi di saldatura molto brevi e, principalmente, nella saldatura a proiezione.

3.4.4.5 Parzializzazione in percentuale della potenza massima

Con questo metodo non si ha il controllo della corrente di saldatura, ma la regolazione avviene in percentuale sulla potenza massima del trasformatore. Il sistema viene principalmente usato per il controllo del rendimento del circuito secondario al momento dell'installazione del generatore, o per applicazioni speciali. Se si vuole ottenere delle regolazioni molto precise, è possibile utilizzare una speciale funzione chiamata "control gain", che permette di controllare la velocità di variazione della

corrente di saldatura. In generale, il controllo di questa velocità diventa molto utile su macchine che presentano elevate impedenze sul secondario del trasformatore oppure, quando si saldano materiali ad alta conducibilità come rame e alluminio, dove è necessario arrivare alla fusione, riducendo al massimo il tempo di saldatura.

CAPITOLO 4

SALDATURA A PUNTI

4.1 PRINCIPI GENERALI

La saldatura a punti (figura 91) viene eseguita per realizzare una giunzione di saldatura, stringendo due o più lamiere sovrapposte tra gli elettrodi, in modo che il diametro del nocciolo sia proporzionale al diametro della superficie di contatto degli elettrodi stessi. Pertanto, viene applicata una forza, proporzionale allo spessore delle lamiere da saldare, e si fa passare, tramite il circuito secondario, la corrente di saldatura, per un tempo prestabilito e proporzionale allo spessore dei materiali da saldare. In questo modo, si ottiene il calore necessario per la fusione e la saldatura dei due pezzi. Inoltre, è un metodo veloce ed economico, utilizzato in quasi tutte le produzioni di oggetti in metallo, di svariate forme e dimensioni, in moltissimi ambiti come quello automobilistico di piccoli e grandi elettrodomestici, come pure di componenti elettrici ed elettronici.

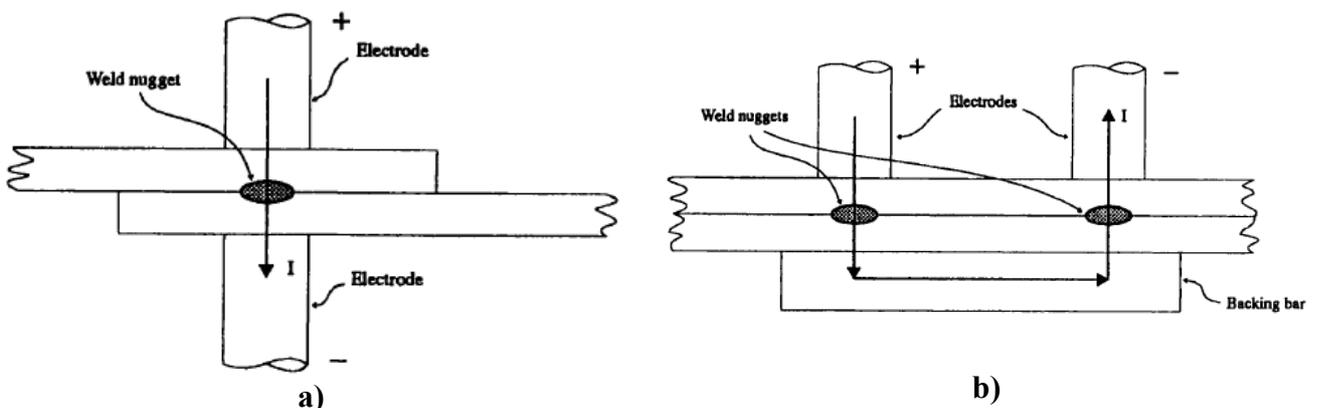


Figura 91 - Schema di saldatura a punti: a) con un solo punto; b) con più punti [3]

Nella sua configurazione più normale, la saldatura è svolta con la tecnica dei *punti diretti*, nella quale gli elettrodi sono posti uno a contatto con la lamiera superiore e uno con quella inferiore. Quando invece si desidera eseguire più punti sullo stesso pezzo, occorre attrezzare la macchina come schematizzato in figura 92:

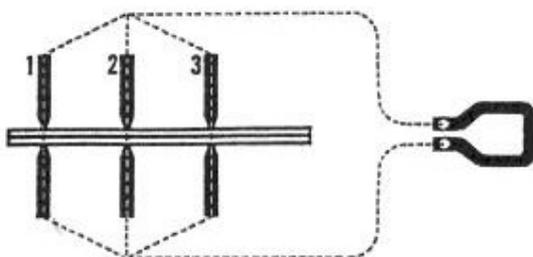


Figura 92 - Saldatura a punti diretti [2]

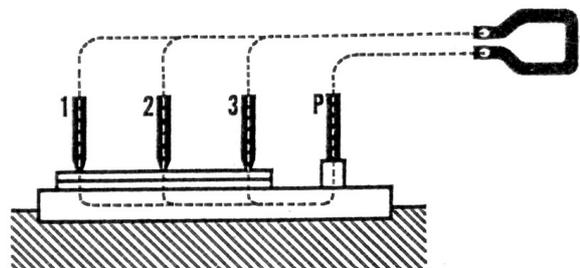


Figura 93 - Saldatura a punti indiretti [2]

Il collegamento delle teste è lo stesso del punto singolo, ma l'operazione avviene in questo modo:

- Con la discesa di tutte le teste saldanti e passaggio contemporaneo della corrente (*saldatura in parallelo*);

- Con la discesa di una testa per volta con saldature in successione (*saldatura in cascata pneumatica*).

Quando invece non c'è la totale accessibilità dell'elettrodo su una delle due lamiere, oppure si desidera evitare la presenza del segno lasciato dagli elettrodi, si ricorre all'esecuzione del *punto indiretto* (figura 93).

In questo caso, le due uscite del secondario del trasformatore sono collegate rispettivamente a uno o più elettrodi superiori e a una piastra porta corrente comune a tutte le saldature. Inoltre, anche in questo caso, la saldatura può essere effettuata con discesa simultanea degli elettrodi o in cascata pneumatica.

Un'alternativa al punto indiretto è il *doppio punto* (figura 94), effettuato connettendo il secondario del trasformatore ai due elettrodi che vengono a trovarsi a contatto della lamiera solo da un lato. In questo caso la lamiera inferiore serve da transitto della corrente di saldatura.

Il *doppio punto classico* viene usato negli assemblaggi dove si vuole preservare il più possibile lo stato della superficie inferiore oppure dove è impossibile applicare l'elettrodo inferiore per mancanza di spazio.

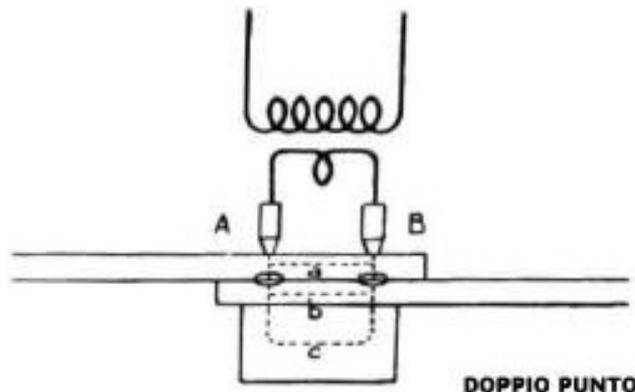


Figura 94 - Doppio punto classico [2]

Al momento del passaggio della corrente si hanno tre percorsi:

- Il percorso A-a-B, in cui transita una corrente che non interviene alla formazione del calore e che viene chiamata corrente di shunt (vedi paragrafo 2.3.7);
- La via A-b-B in cui transita la corrente che permette la liberazione del calore, per la fusione del materiale e per la formazione del nocciolo di saldatura;
- La via A-c-B, nel caso in cui il pezzo da saldare poggia su una base di materiale conduttore (rame), che contribuisce alla formazione di ulteriore calore.

Condizione indispensabile, per ottenere ottimi risultati, è che la forza applicata sulle due punte sia dello stesso valore.

I vantaggi della tecnica a doppio punto classico sono:

- Il fattore di potenza è molto buono;
- Non sono presenti materiali magnetici nelle spire del secondario per cui non si hanno influenze sui parametri di saldatura;
- Non si riscontrano segni d'infossamento degli elettrodi sulla lamiera inferiore; tuttavia si può notare un leggero infossamento dovuto al ritiro della lamiera raffreddata sotto pressione.

Gli svantaggi sono invece:

- La presenza della corrente di shunt richiede un aumento della densità di corrente utilizzata, che è inversamente proporzionale alla distanza dei due elettrodi di saldatura. Per esempio, quando la distanza dei punti passa da 50 a 200 mm., la corrente dovrà essere ridotta del 20%, in quanto più gli elettrodi sono vicini e più vi sarà passaggio di corrente sulla lamiera superiore;
- L'aumento della densità di corrente, porta a un maggior riscaldamento della superficie delle punte, aumentandone fortemente l'usura;
- Il nocciolo di saldatura non è più simmetrico rispetto al punto di giunzione perché tende a spostarsi verso il lato di contatto degli elettrodi, con conseguente riduzione della resistenza del giunto. Si può aumentare la densità di corrente per equilibrare la resistenza del giunto, ma in questo caso si renderà ancora più critica l'usura degli elettrodi;
- I due diametri delle punte devono essere mantenuti di uguale dimensione.

Inoltre ci sono due norme importanti per ottenere un buon risultato:

- La lamiera inferiore deve essere di spessore maggiore di quella superiore;
- La lamiera superiore non deve superare lo spessore di 1,5 mm, per evitare forti infossamenti della lamiera a contatto con la punta degli elettrodi e conseguente usura anomala degli stessi.

Se si desidera invece realizzare un solo punto, oppure ridurre ulteriormente l'entità delle deformazioni lasciate sul pezzo, è possibile utilizzare il *falso doppio punto* (figura 95), con un contatto fisso sulla lamiera chiamato menisco, e un altro che si può spostare, realizzando più saldature.

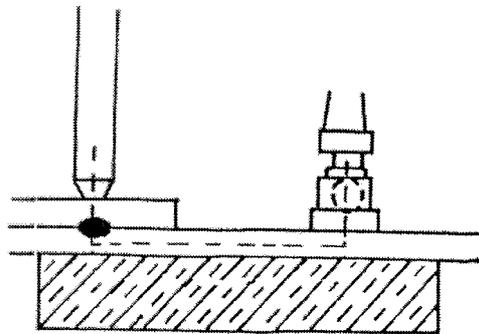


Figura 95 - Saldatura con falso doppio punto [2]

4.2 APPLICAZIONI E INFLUENZA DEI MATERIALI

La facile saldabilità a resistenza degli acciai al carbonio permette di utilizzare il processo per una vasta gamma di applicazioni come il settore automobilistico, del trasporto ferro-tramviario, mobili metallici, elettrodomestici, ecc.

Inoltre, ogni applicazione necessita di una differenziazione di caratteristiche del punto di saldatura, data la diversa utilizzazione del prodotto. Da questo punto di vista, sono classificate cinque classi di qualità da A (la più elevata) a F (utilizzata per punti su pezzi poco sollecitati), per cui sono richiesti diametri dei punti di dimensione decrescenti e criteri di qualità differenti.

Ad esempio nella tabella 3 sono riportati alcuni parametri di saldatura di punti di qualità A e B.

Spessore Lamiera [mm]	Dimensioni elettrodo		PUNTI DI CATEGORIA A				PUNTI DI CATEGORIA B			
			Diametro nocciolo [mm]	Parametri di saldatura			Diametro nocciolo [mm]	Parametri di saldatura		
	\varnothing_{EST}	\varnothing_{INT}		Forza [N]	Corrente [A]	Tempo [cicli]		Forza [N]	Corrente [A]	Tempo [cicli]
0,25	9,5	3,3	3,3	900	900	4	3,2	600	3700	4
0,53	9,5	4,3	4,3	1300	1300	5	4,1	900	5100	8
0,79	9,5	5,3	5,3	1800	1800	6	5,1	1200	6300	12
1	12,7	5,8	5,8	2200	2200	9	5,6	1600	7500	17
1,3	12,7	6,3	6,3	2900	2900	10	5,8	1800	8000	20
1,6	12,7	6,9	6,9	3600	3600	12	6,6	2200	9000	24
2	15,9	7,9	7,9	4900	4900	14	7,6	2900	10400	30
2,5	15,9	8,6	8,6	5800	5800	17	8,4	3500	11400	36
2,8	15,9	9,4	9,4	7100	7100	19	9,1	4300	12200	42
3,2	15,9	10,2	10,2	8000	8000	23	9,9	5100	12900	50
3,5	22,2	11,2	11,2	9100	9100	30	10,1	5500	13600	60
4	22,2	11,9	11,9	10100	10100	38	11,4	6200	14100	70

Tabella 2 - Parametri tipici per la saldatura a punti di acciai al carbonio [2]

Un'applicazione tipica di questo processo è la saldatura di lamiere zincate, vista la possibilità di utilizzare il processo senza eliminare lo strato di copertura sulle lamiere grazie alla presenza del guscio plastico (vedi paragrafo 2.2.1.7). Tuttavia, particolare attenzione deve essere posta alla scelta degli elettrodi, per cui è sconsigliata la geometria sferica ed è necessario considerare tempi di rinvivatura più brevi. Rispetto alla saldatura degli acciai non ricoperti, si verifica inoltre una diminuzione dei campi di valori ammissibili dei parametri (riduzione della finestra di saldabilità), come messo in evidenza in figura 96.

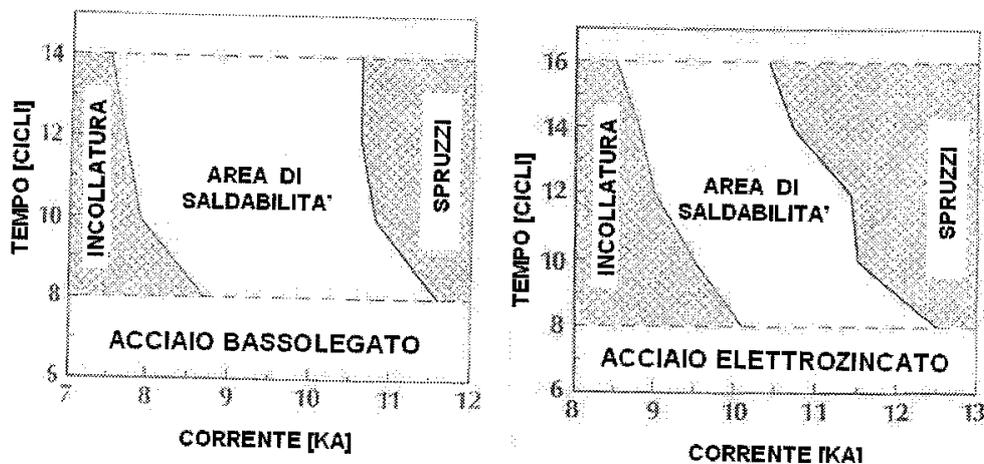


Figura 96 - Confronto tra le finestre di saldabilità per acciai basso legati e zincati. [2]

La saldatura degli acciai inossidabili austenitici può essere eseguita con apparecchiature simili a quelle per gli acciai al carbonio, anche se è richiesta particolare attenzione nella scelta dei parametri, soprattutto per garantire la resistenza alla corrosione del giunto; in particolare:

- Poiché la resistività elettrica degli acciai inossidabili è superiore da 4 a 10 volte di quella dell'acciaio al carbonio, è necessario ridurre i valori di corrente;
- La conducibilità termica è da 1/3 a metà di quella dell'acciaio dolce; di conseguenza il tempo di passaggio della corrente deve essere inferiore a quello utilizzato per l'acciaio dolce;
- La forza applicata sugli elettrodi deve essere più alta di quella applicata per gli acciai dolci, per contenere il nocciolo considerando la maggiore resistenza alle alte temperature e anche il maggiore coefficiente di dilatazione termica.

La saldatura delle leghe di alluminio richiede particolare attenzione per la presenza dell'ossido superficiale di alluminio (l'allumina) che, avendo caratteristiche di saldabilità (conducibilità, resistività e temperatura di fusione) molto differenti rispetto alla lega, deve essere rimosso con metodi meccanici o chimici prima della saldatura. Inoltre, in queste leghe, tendono a formarsi cricche di solidificazione (a caldo), per motivi legati alla composizione chimica, ricca di elementi a basso punto di fusione. Conseguentemente, il ciclo di saldatura (vedi figura 97) assume un altro andamento ed è caratterizzato, rispetto a quello per l'acciaio, dalla presenza di una fase di post-riscaldamento, utile per ottenere il raffreddamento meno brusco del punto.

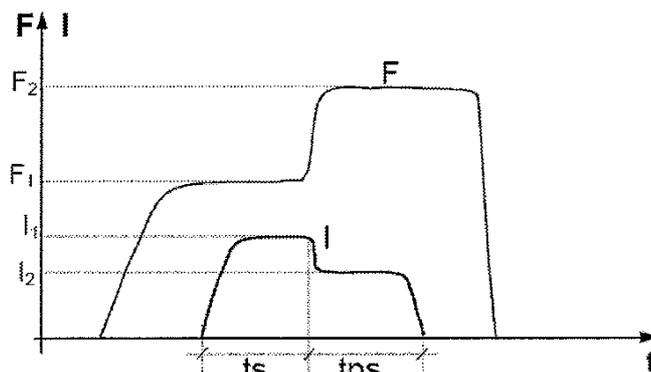


Figura 97 - Ciclo pressione corrente per la saldatura delle leghe leggere [2]

I parametri di saldatura, inoltre, prevedono cicli di saldatura molto brevi, caratterizzati da valori di corrente più elevati rispetto a quelli per gli acciai al carbonio. Un esempio di tali valori è riportato nella tabella 3.

Spessore [mm]	Elettrodo		Saldatura			Post saldatura			Ø nocciolo [mm]
	Diametro [mm]	Raggio [mm]	Tempo t_s [cicli]	Forza F1 [daN]	Corrente I_1 [kA]	Tempo t_{ps} [cicli]	Forza F2 [daN]	Corrente I_2 [kA]	
0,5	16	75	2	200	25	2	400	18	3,5
0,75	16	100	2	300	31	3	600	23	4,5
1,0	16	100	3	400	35	4	800	26	5,0
1,25	20	100	4	500	40	5	1000	30	5,5
1,5	20	100	4	600	45	7	1300	33	6,0
2,0	20	150	6	750	50	9	1800	37	7,5
2,5	20	150	7	1000	55	10	2300	41	8,0
3,0	25	200	8	1300	60	12	3000	45	8,5

Tabella 3 - Parametri tipici per la saldatura di lamiera in lega [2]

CAPITOLO 5

SIMULAZIONE NUMERICA

Le simulazioni numeriche permettono di ricavare informazioni importanti sul processo di saldatura a resistenza, ad esempio sulla formazione del nocciolo. I modelli numerici permettono inoltre di visualizzare profili termici, tensioni meccaniche, distorsioni nonché modificare e analizzare i vari parametri di saldatura. Principalmente, queste simulazioni sono basate sul metodo degli elementi finiti.

5.1 CONFRONTO TRA IL METODO DEGLI ELEMENTI FINITI E QUELLO DELLE DIFFERENZE FINITE

Il metodo degli elementi finiti e quello delle differenze finite sono i principali metodi di simulazione utilizzati nella saldatura a resistenza. Le differenze finite furono usate nelle prime simulazioni, mentre gli elementi finiti sono stati sviluppati in questi ultimi anni. Questi due metodi differiscono soprattutto per la diversa discretizzazione, geometria, formulazione del problema, nonché per la precisione della simulazione.

5.1.1 DISCRETIZZAZIONE

Sebbene entrambi i metodi richiedano la discretizzazione della struttura, dell'oggetto o della regione, il loro metodo di discretizzazione è differente. Questa differenza può essere analizzata considerando un elemento rettangolare in due dimensioni mostrato in figura 98.

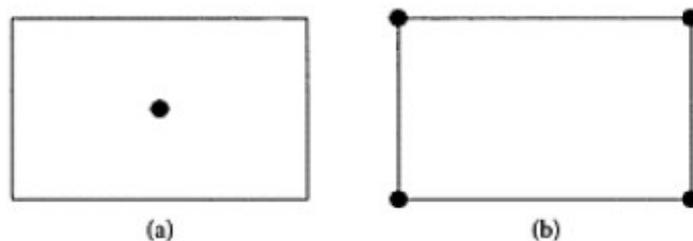


Figura 98 – (a) Un nodo usato nelle differenze finite; (b) Un elemento usato nell'analisi degli elementi finiti [4]

Nell'analisi delle differenze finite, l'oggetto o la regione viene divisa in un numero finito di nodi, ognuno avente un valore costante della variabile considerata. Per esempio, in un'analisi termica, la distribuzione di temperatura è assunta costante nel nodo (nodo isotermico). Come mostrato in figura 98 – a, il nodo non è associato al suo contorno, ma al suo centro geometrico.

Nell'analisi degli elementi finiti, invece, l'oggetto o la regione viene divisa in un numero finito di elementi, in cui i nodi sono associati con i contorni degli elementi stessi (come mostrato in figura 98 – b), e possono avere valori diversi delle variabili considerate.

5.1.2 GEOMETRIA

Nell'analisi delle differenze finite, la discretizzazione assume che i nodi siano spazati uniformemente. Di conseguenza, i nodi ai bordi e quelli agli angoli, sono rispettivamente la metà e un quarto dei nodi interni come mostrato in figura 99 – a.

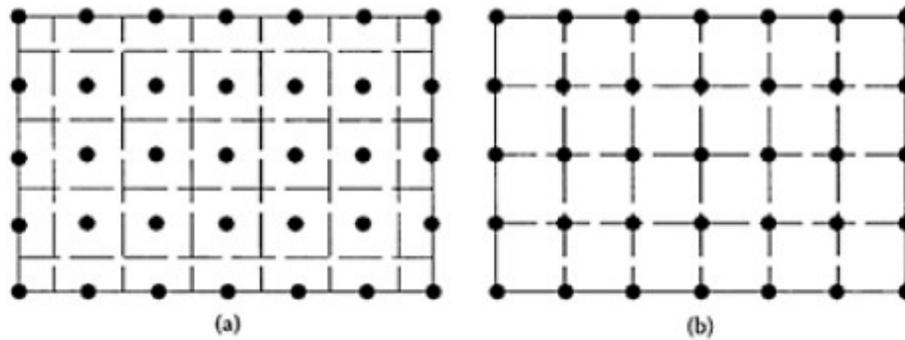


Figura 99- *Discretizzazione di un dominio rettangolare (a) nelle differenze finite; (b) negli elementi finiti [4]*

Nel modello degli elementi finiti, invece, possono essere definiti anche nodi sul contorno come mostrato in figura 99-b.

Per elementi di maggiore complessità geometrica, come le superfici curve, le differenze finite richiedono l'uso di contorni fittizi come mostrato in figura 100-a.

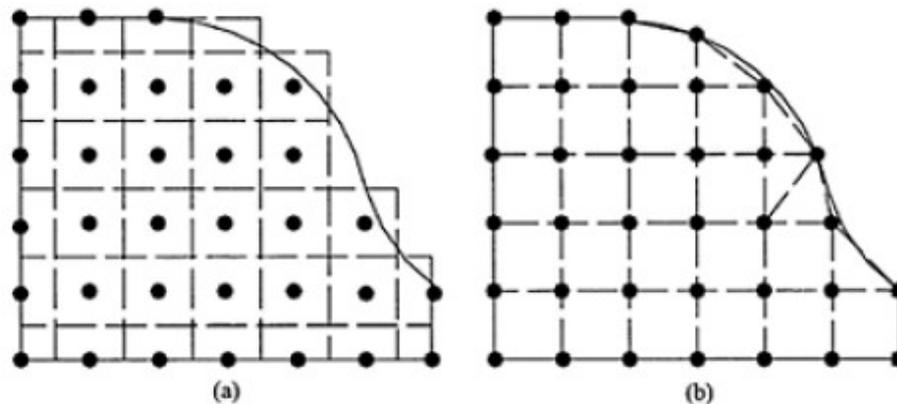


Figura 100 - *Superfici curve discretizzate (a) nelle differenze finite; (b) negli elementi finiti [4]*

Negli elementi finiti, invece, le superfici curve possono essere costruite con una determinata forma, in cui i nodi rimangono esattamente nel contorno, come mostrato in figura 100 - b. Aumentando il numero degli elementi, si ottiene una maggiore precisione nella simulazione, a svantaggio di un maggior tempo di elaborazione.

5.1.3 FORMULAZIONE

Nel metodo delle differenze finite, le equazioni caratteristiche sono scritte per ogni nodo. Per esempio, nei modelli termici, il bilancio energetico è applicato in ogni nodo. Negli elementi finiti, invece, il bilancio termico può essere implementato con diversi metodi come quelli diretti, virtuali, variazionali e pesati.

5.1.4 PRECISIONE

La precisione della simulazione dipende da molti fattori. Ad esempio, il metodo degli elementi finiti sembra essere più preciso quando si hanno contorni curvi. In generale, gli elementi finiti hanno un tempo di esecuzione più lungo, ma le differenze finite richiedono un modello più complesso.

5.2 SIMULAZIONI DELLE PROPRIETA' E DELL'AREA DI CONTATTO

La rappresentazione delle proprietà e dell'area di contatto è la parte più critica delle simulazioni. Ad esempio, le resistenze di contatto possono essere simulate attribuendo valori per tentativi.

Per una migliore trattazione, la resistenza complessiva può essere suddivisa in una resistenza statica e in una dinamica.

La resistenza statica è dovuta al sottile film che si forma sulla superficie, prodotto da diversi materiali come i lubrificanti; la resistenza dinamica è la resistenza che si ha dopo che i film sono stati eliminati per il processo di riscaldamento. Entrambe le resistenze, non dipendono dalle proprietà del materiale puro, ma dipendono dalle condizioni e dai parametri di saldatura. Ad esempio, le relazioni tra la resistenza statica e la forza degli elettrodi, e tra la resistenza dinamica e il tempo sono mostrate nella figura 101.

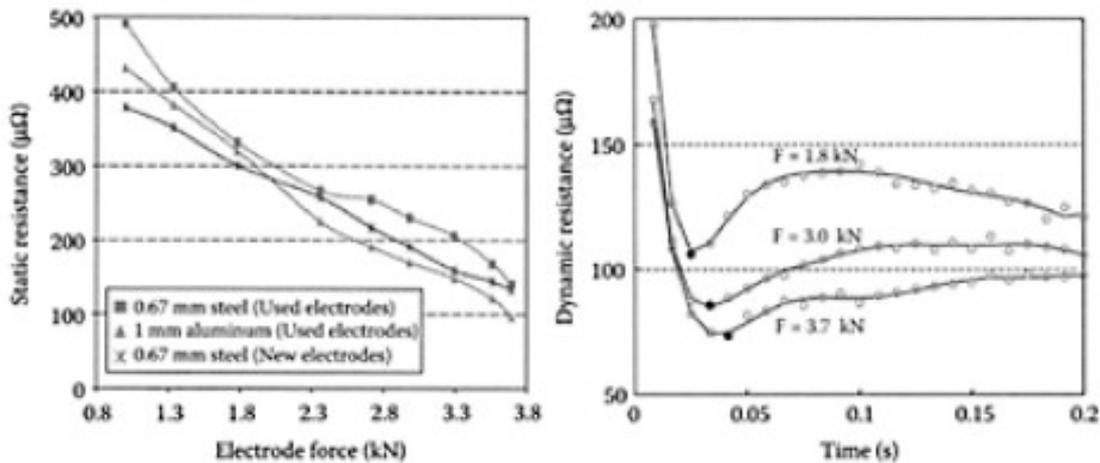


Figura 101 - Resistenze statica (a sinistra) e dinamica (a destra) [4]

Dalla figura 101 notiamo che la resistenza statica diminuisce quasi linearmente con l'aumentare della forza degli elettrodi, e quella dinamica, ottenuta per varie forze applicate, diminuisce all'aumentare della forza.

In ogni caso, la resistenza complessiva misurata sperimentalmente non aiuta molto nella simulazione della saldatura a resistenza, sebbene possa essere usata per confronto. Di conseguenza, sono stati sviluppati numerosi modelli per descrivere la dipendenza della resistività o resistenza di contatto dalla pressione e dalla temperatura.

Ad esempio, la resistività di contatto ρ può essere calcolata utilizzando il modello di Wanheim e di Bay:

$$\rho_{contact} = 3 \left(\frac{\sigma_{soft}}{\sigma_n} \right) \left(\frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \right) + \rho_{contaminant} \quad (5.1)$$

dove σ_{soft} è lo sforzo, σ_n è la pressione di contatto, ρ_1 e ρ_2 le resistività dei due materiali, e $\rho_{contaminant}$ è la resistività dei film superficiali come ossidi, vapore acqueo e grasso.

In analogia, la conducibilità termica di contatto $\lambda_{contact}$ può essere espressa come:

$$\lambda_{contact} = \frac{1}{3} \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_{soft}} \right) \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \right) \quad (5.2)$$

Dove λ_1 e λ_2 sono le conducibilità termiche dei due materiali.
Inoltre, la caduta di tensione sull'area di contatto è:

$$V^2 = 4L(T_s^2 - T_0^2) \quad (5.3)$$

dove V è la caduta di tensione, T_s la temperatura massima nel punto di contatto, T_0 è la temperatura del materiale, e L è la costante di Lorentz pari a $2.4E-8$ [V/K]². La conduttanza di contatto può essere espressa come:

$$\sigma_s = \frac{1}{2\pi r_c^2 \sqrt{L(T_s^2 - T_0^2)}} \quad (5.4)$$

L'equazione 5.4 è basata sull'ipotesi che l'area di contatto è circolare di raggio r_c .
Nel paragrafo successivo viene presentato un esempio di calcolo di un sistema di saldatura, disponibile in letteratura, con il metodo FEM.

5.3 ESEMPIO: MODELLO PER L'ANALISI DELLO SVILUPPO DEL NOCCIOLO, NELLE LEGHE D'ALLUMINIO [10].

Il modello utilizza un'analisi accoppiata termica – elettrica – meccanica, per lo studio dello sviluppo del nocciolo. L'area di contatto e la distribuzione della pressione sono determinati da un modello termo – meccanico. Questa procedura permette di ottenere un'accurata descrizione del processo, e della formazione del nocciolo. Inoltre, il modello permette di analizzare gli effetti dei parametri di saldatura e delle forme degli elettrodi sullo sviluppo del nocciolo.

Le proprietà del materiale e degli elettrodi a 20°C utilizzate nella simulazione sono mostrate nella tabella 4.

Electrodes		Workpieces	
CMW Alloy	99.85Cu-0.15Zr	Al-alloy 5454O	2.7Mg – 0.8Mn – 0.12Cr
R.W.M.A. Alloy Number	1.15000	Thickness (m)	0.0018034
Spherical Radius (m)	0.2032	Solidus Temperature (°C)	602
Major Radius MH (m)	0.0079375	Liquidus Temperature (°C)	646
Tip Distance from Water LF (m)	0.0192051	Latent Heat (kJ/kg)	397
Yield Strength (Mpa)	386	Yield Strength (Mpa)	117
Elastic Modulus (Gpa)	130	Elastic Modulus (Gpa)	69.6
Thermal Conductivity (W/m · K)	367	Thermal Conductivity (W/m · K)	134
Density (kg/m ³)	8890	Density (kg/m ³)	2680
Electrical Resistivity (nΩ · m)	18.6	Electrical Resistivity (nΩ · m)	51
Specific Heat (J/kg · K)	385	Specific Heat (J/kg · K)	900

Tabella 4 - Proprietà del materiale e degli elettrodi [10]

La forza applicata agli elettrodi in funzione del tempo è mostrata in figura 102.

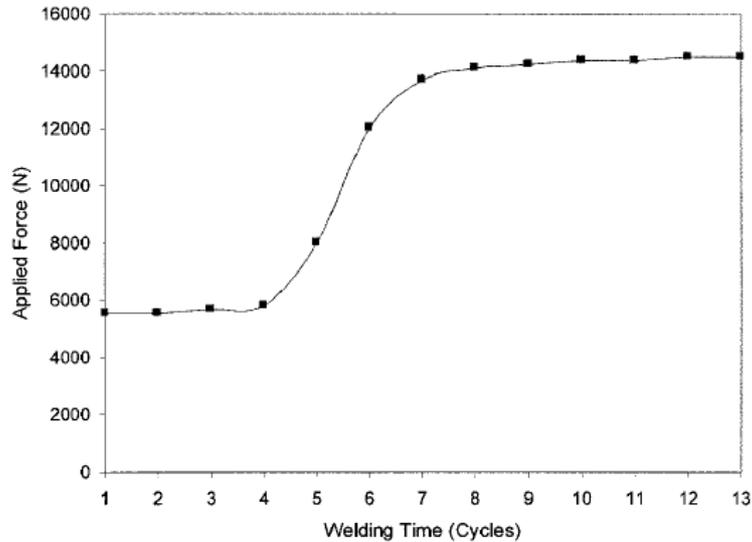


Figura 102 - Forza applicata agli elettrodi [10]

Dalla figura 102 notiamo che la forza applicata varia da circa 5500 N a 14500 N, e viene mantenuta costante a partire da circa l'ottavo ciclo fino a che il nocciolo si è solidificato.

L'andamento della corrente di saldatura in funzione del tempo è mostrata in figura 103.

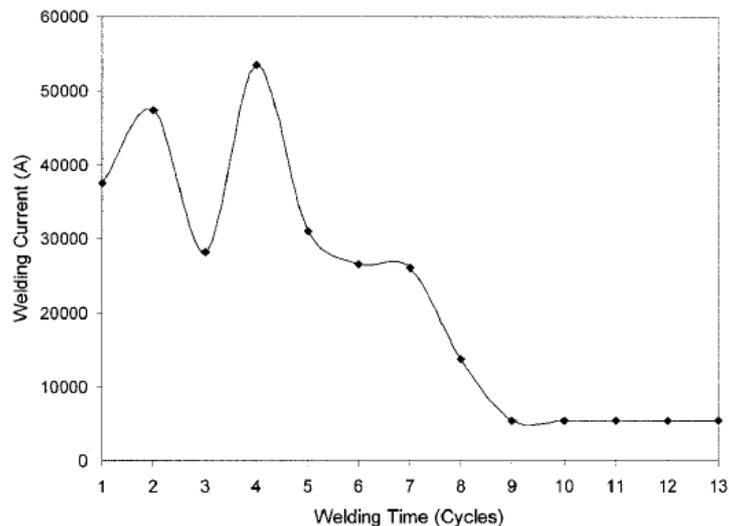


Figura 103 - Corrente di saldatura [10]

Dalla figura 103 notiamo che la corrente massima è di circa 55 kA, in corrispondenza della fusione completa del nocciolo e della forza massima. In seguito, la corrente viene diminuita lentamente per permettere il solidificazione graduale del nocciolo.

Gli andamenti della pressione di contatto in funzione della distanza radiale, per la superficie di contatto dei due materiali e per quella di contatto materiale - elettrodo sono mostrate in figura 104.

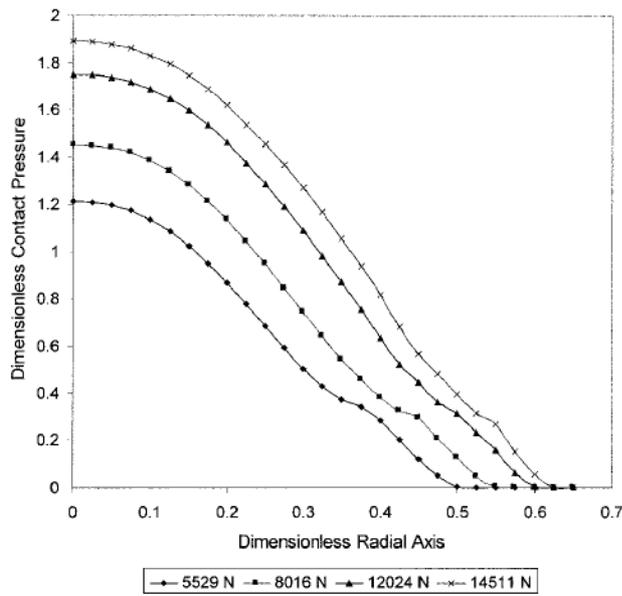


Figura 104 – a) - Pressione di contatto per la superficie materiale – materiale [10]

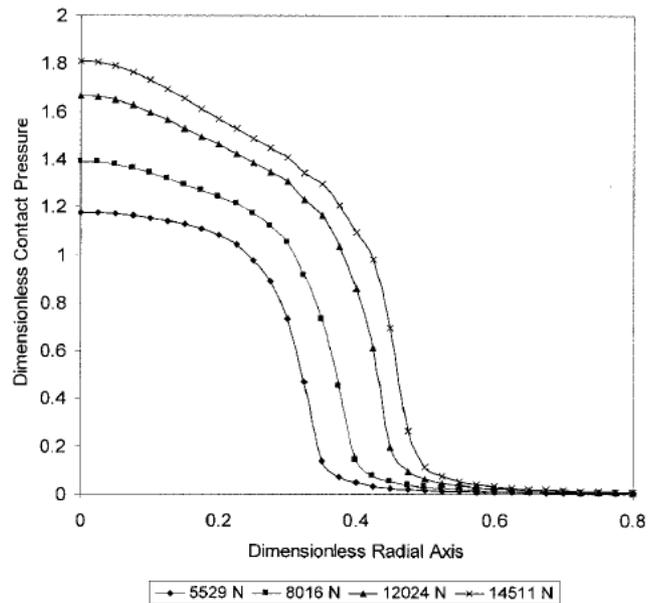


Figura 104 – b) - Pressione di contatto per la superficie elettrodo – materiale [10]

Nella figura 104 le grandezze sono adimensionali, poiché la pressione di contatto è data come rapporto tra lo sforzo e la forza a 20°C e mentre l’ascissa indica il rapporto tra la distanza radiale e il raggio maggiore dell’elettrodo. Possiamo notare che la pressione sulla superficie elettrodo - materiale è più uniforme di quella che si ha nella superficie materiale – materiale e, pertanto, la resistenza di contatto è distribuita non – uniformemente. Tale pressione è usata per calcolare la resistenza di contatto.

Le distribuzioni degli sforzi ottenuti con l’analisi termo – meccanica, per le due superfici sono mostrate in figura 105.

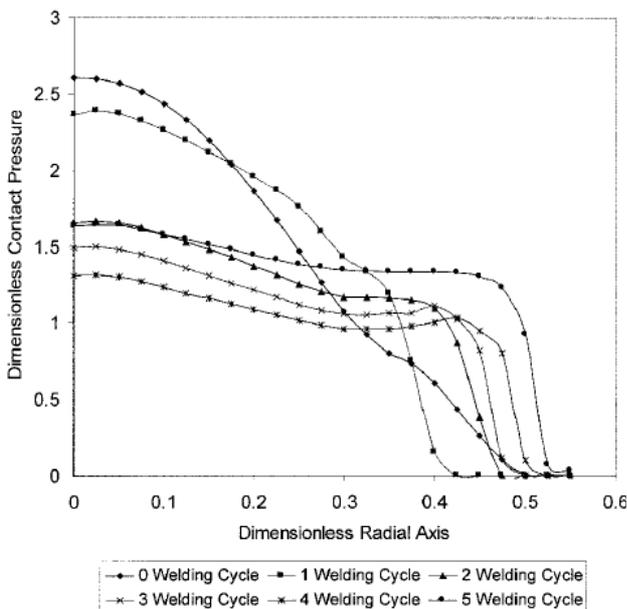


Figura 105 – a) - Distribuzione dello sforzo per la superficie materiale – materiale [10]

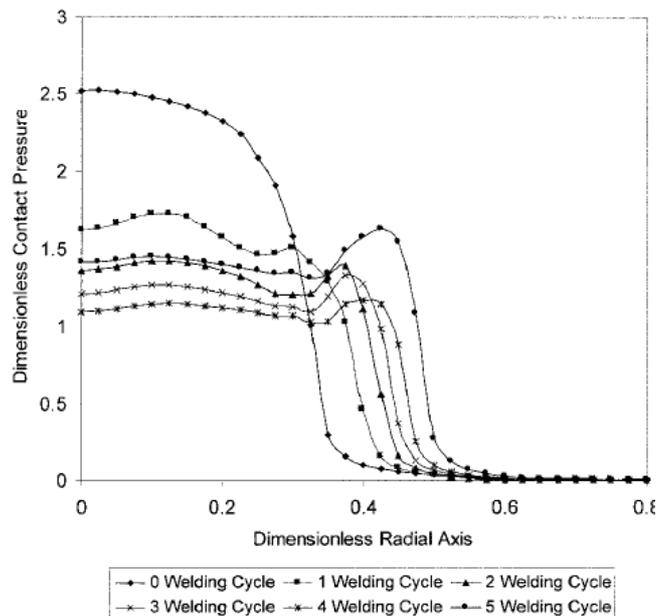


Figura 105 – b) - Distribuzione dello sforzo per la superficie elettrodo – materiale [10]

Dalla figura 105 notiamo che, nel momento in cui il materiale si è scaldato, la distribuzione degli sforzi inizia a diventare costante e, all'aumentare del tempo, la pressione massima diminuisce, sebbene la forza agli elettrodi sia la stessa.

L'andamento della densità di corrente nella superficie materiale – materiale è mostrata in figura 106.

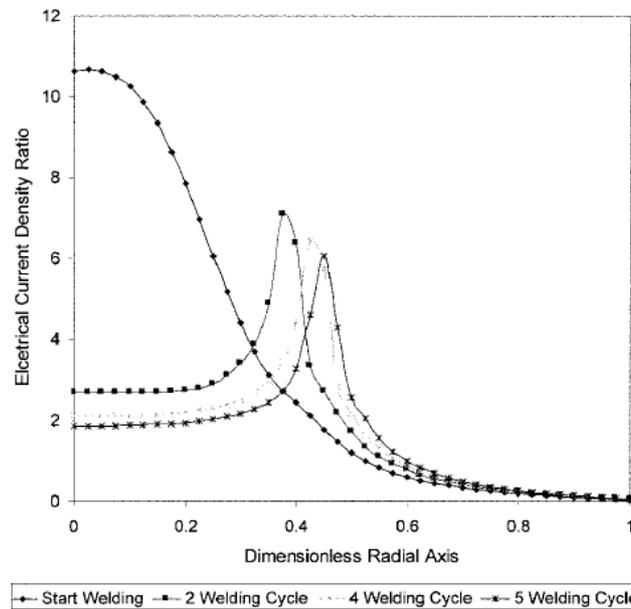


Figura 106 - Densità di corrente per la superficie materiale – materiale [10]

Nella figura 106, la densità di corrente è adimensionale, essendo data come il rapporto tra la densità elettrica nella superficie materiale - materiale e la densità di corrente elettrica nell'elettrodo. Possiamo notare che la distribuzione della densità di corrente non è la stessa durante tutti i cicli, e la densità di corrente massima si allontana dal centro dell'elettrodo nei cicli successivi. Di conseguenza, la formazione del nocciolo avviene con un riscaldamento non – uniforme.

Il modello proposto è stato applicato anche per lo studio degli effetti dell'angolo di smussamento degli elettrodi sullo sviluppo del nocciolo. A tal fine sono stati usati due differenti diametri degli elettrodi (FG nella figura 107 è il relativo raggio): 6.25×10^{-3} m (D1) e 9.525×10^{-3} m (D2). Gli angoli di smussamento (\hat{HGD} nella figura 107) variano da 30° a 40° .

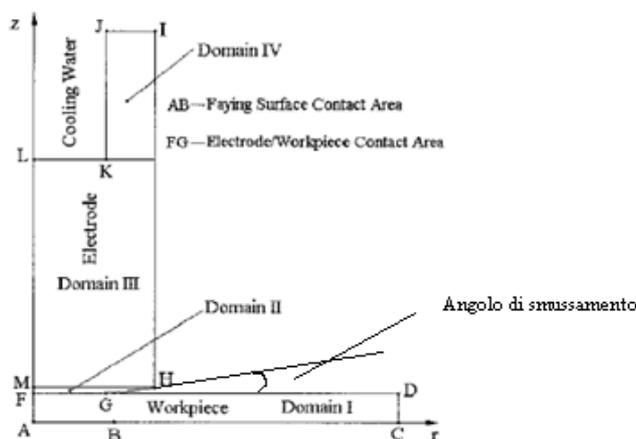
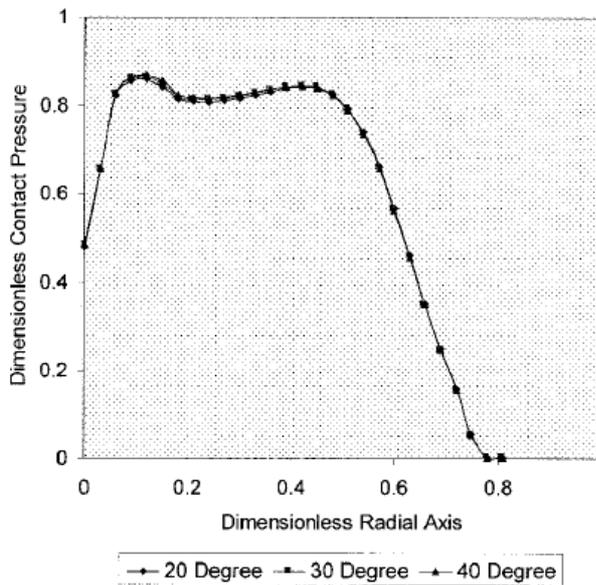


Figura 107 – Elettrodi e relativi angoli di smussamento [10]

La distribuzione della pressione di contatto nella superficie materiale – materiale e le dimensioni del nocciolo in funzione degli angoli di smussamento, a parità di diametro degli elettrodi, sono mostrati in figura 108.



- 1 – 45 kA, Electrode Face Diameter D-2, Face Taper Angle 30°
- 2 – 45 kA, Electrode Face Diameter D-2, Face Taper Angle 35°
- 3 – 45 kA, Electrode Face Diameter D-2, Face Taper Angle 40°

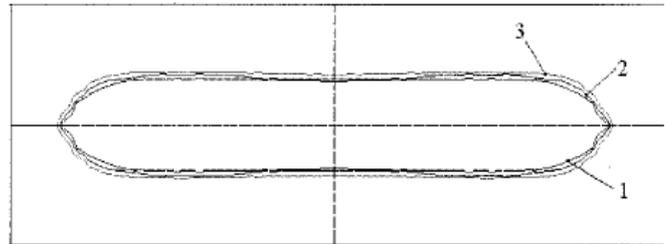
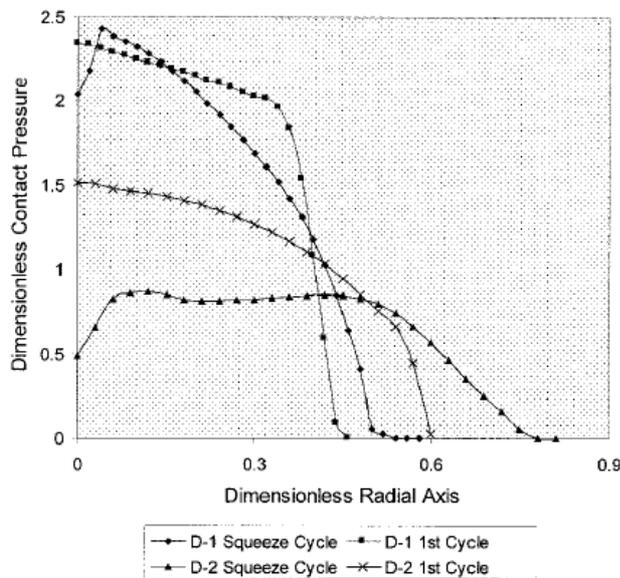


Figura 108 – b) - Dimensioni del nocciolo [10]

Figura 108 – a) - Pressione di contatto nella superficie materiale – materiale [10]

Dalla figura 108 notiamo che l'angolo di smussamento non influenza la pressione e la formazione del nocciolo, e un comportamento simile si ha per la distribuzione della densità di corrente elettrica. Invece, l'andamento della pressione di contatto sulla superficie materiale – materiale e le dimensioni del nocciolo per i due differenti diametri degli elettrodi (D1 e D2), a parità di forza agli elettrodi applicata, sono mostrati in figura 109:



- 1 – 45kA, 5 Cycles, Electrode Face Diameter D-2
- 2 – 30kA, 5 Cycles, Electrode Face Diameter D-1
- 3 – 45kA, 2 Cycles, Electrode Face Diameter D-1

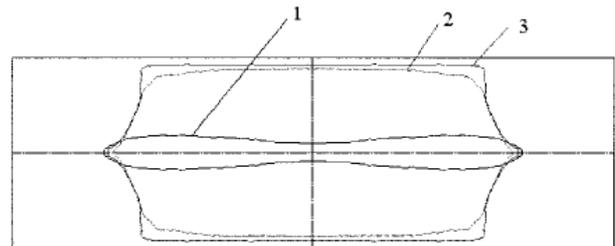


Figura 109 – b) - Dimensioni del nocciolo [10]

Figura 109 – a) - Pressione di contatto nella superficie materiale – materiale [10]

Dalla figura 109 –a) notiamo che l'elettrodo con il diametro maggiore crea una pressione più bassa, e quindi resistenza di contatto più bassa. Analogamente accade per la distribuzione della densità di corrente. Dalla figura 109 – b) notiamo che l'elettrodo con diametro maggiore produce minor calore per unità di superficie e, di conseguenza, lo spessore del nocciolo è più piccolo. Inoltre, per la stessa corrente elettrica (45 kA), l'elettrodo con diametro maggiore (curva 1) produce un nocciolo più

sottile dopo cinque cicli rispetto a quello con diametro minore dopo due cicli (curva 3). Inoltre, per lo stesso ciclo, l'elettrodo con diametro minore a 30 kA (curva 2) produce un nocciolo più grande rispetto a quello dell'elettrodo di diametro maggiore a 45 kA. Pertanto, è necessaria una corrente elettrica più elevata quando si ha una maggiore area di contatto.

CAPITOLO 6

SIMULAZIONE CON FLUX 3D

6.1 MODELLO

Il modello studiato rappresenta la saldatura di una lamiera d'acciaio con un tondino dello stesso materiale, in cui gli elettrodi in rame sono considerati rettangolari. In questa rappresentazione, il campo magnetico presenta la sola componente lungo z (normale al piano del disegno), e la densità di corrente le componenti lungo x e y . Questo modello è schematizzato in figura 110.

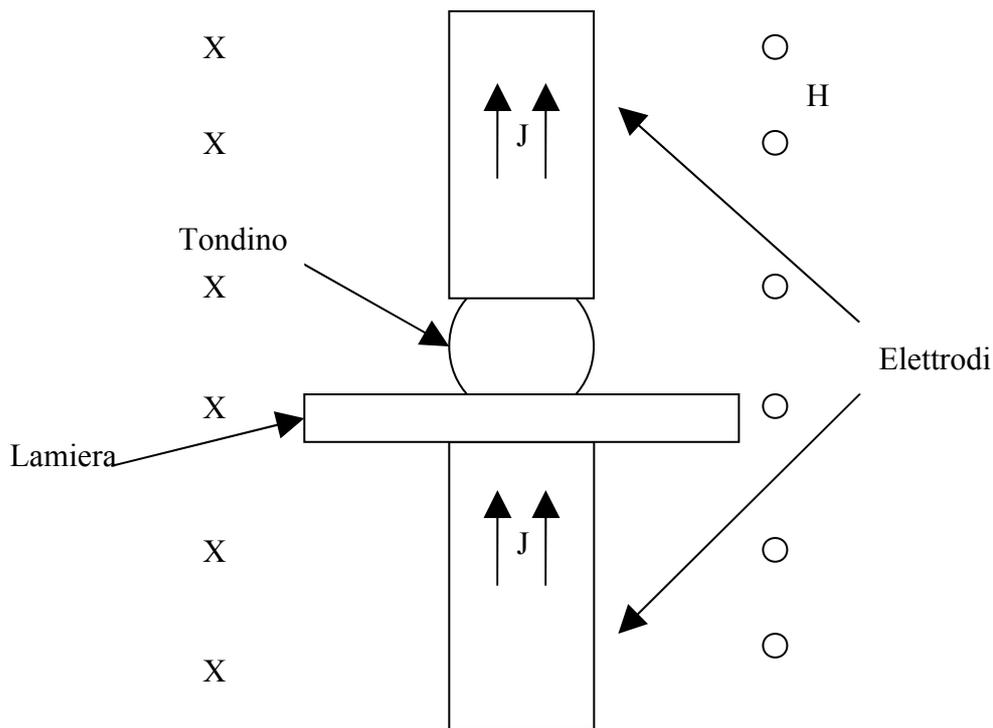


Figura 110 – *Modello della simulazione*

N.B. Il modello è molto semplificato e non rispecchia una saldatura reale, i risultati ottenuti sono comunque interessanti per una preliminare descrizione del processo.

6.2 ANALISI

I risultati sono ottenuti grazie a un'analisi in frequenza del modello, a partire dai 50 Hz fino ai 5 kHz. In particolare, le frequenze considerate sono: 50 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 3 kHz, e 5 kHz. Per ognuna di queste frequenze, si è visualizzata la distribuzione della densità di corrente elettrica, si sono calcolate l'intensità di corrente, e la potenza dissipata nelle zone di contatto lamiera – tondino e tondino – elettrodo. In seguito, si sono determinate le relative resistenze di contatto elettrodo – tondino e lamiera – tondino come rapporto tra la potenza e il quadrato della corrente elettrica. Da queste si sono ricavati due grafici: il primo della corrente al variare della frequenza, il secondo della resistenza di contatto lamiera – tondino sempre per le diverse frequenze.

6.3 DATI INIZIALI

Tensione ai capi degli elettrodi = 10V

Altezza di ogni elettrodo = 30 mm;

Diametro di ogni elettrodo = 16 mm;

Diametro del tondino = spessore lamiera = 2 mm;

Lunghezza lamiera = 40 mm;

Rame: isotropico lineare, resistività = $2e-8 \Omega m$;

Acciaio: isotropico lineare, permeabilità relativa = 20, resistività = $20e-8 \Omega m$;

Profondità “z” del modello = 2 mm.

6.4 RISULTATI

6.4.1 A 50 Hz

La distribuzione della densità di corrente elettrica ottenuta è mostrata in figura 111.

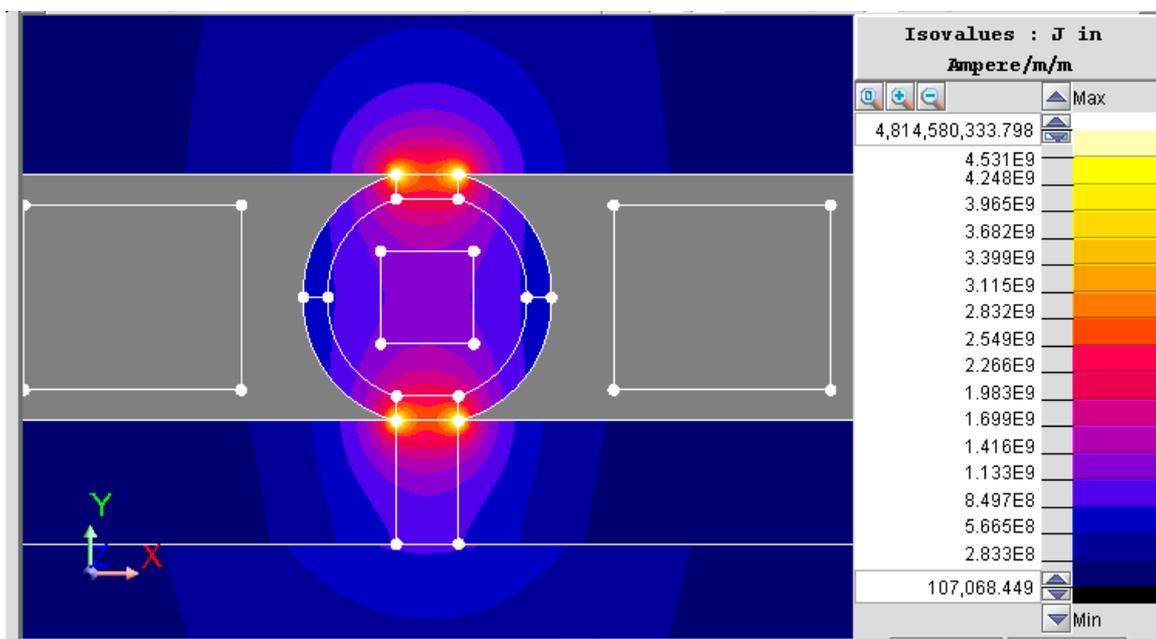


Figura 111 – Distribuzione della densità di corrente elettrica a 50Hz

Dalla figura 111 notiamo che la densità di corrente elettrica si distribuisce non – uniformemente nei materiali da saldare. In particolare, la maggior parte si concentra in corrispondenza dei contatti elettrodo – tondino e tondino – lamiera; di conseguenza, la maggior parte della potenza viene dissipata in queste zone di contatto, che permette di fondere i materiali e creare la saldatura.

La corrente elettrica è pari a 2828,43 A in valore efficace. Le potenze dissipate e le relative resistenze di contatto sono:

Contatto	P[W]	R[$\mu\Omega$]
Tondino - Lamiera	347,60	43,45
Lamiera - Elettrodo	350,42	43,80

6.4.2 A 500 Hz

La distribuzione della densità di corrente elettrica ottenuta è mostrata in figura 112.

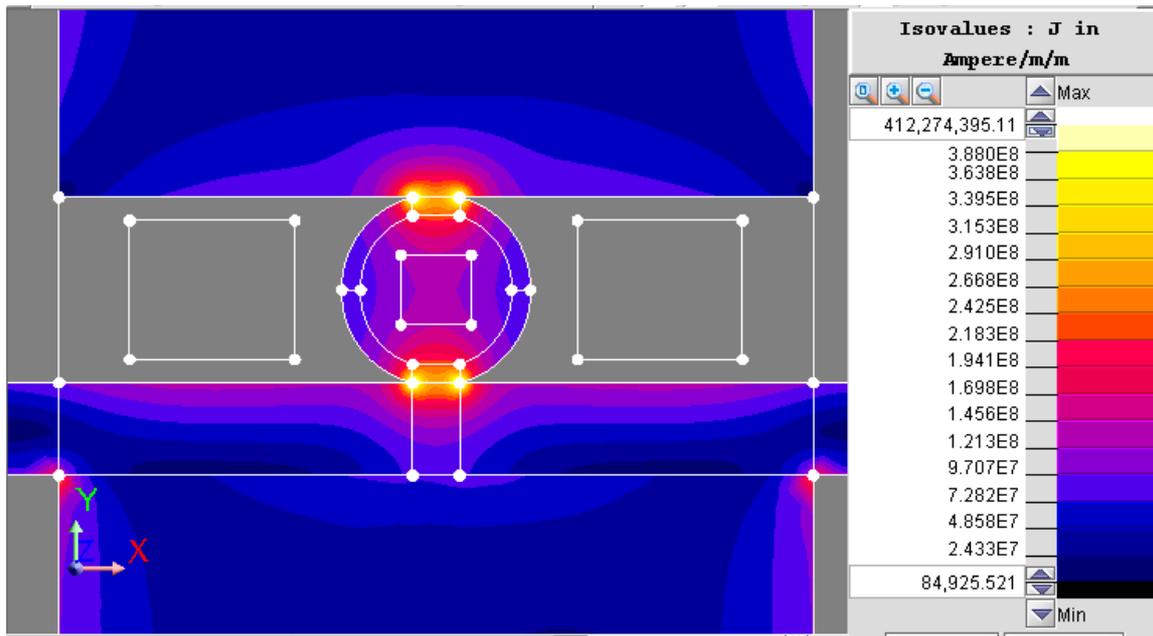


Figura 112 – *Distribuzione della densità di corrente elettrica a 500Hz*

Dalla figura 112 notiamo che la distribuzione della densità di corrente elettrica è simile alla precedente e, pertanto, valgono le stesse considerazioni precedenti; presenta una maggiore concentrazione nel bordo per l'effetto Pelle.

La corrente elettrica è pari a 282,84 A in valore efficace. Le potenze dissipate e le relative resistenze di contatto sono:

Contatto	P[W]	R[$\mu\Omega$]
Tondino - Lamiera	3,64	45,50
Lamiera - Elettrodo	3,64	45,50

6.4.3 A 1000 Hz

La distribuzione della densità di corrente elettrica ottenuta è mostrata in figura 113.

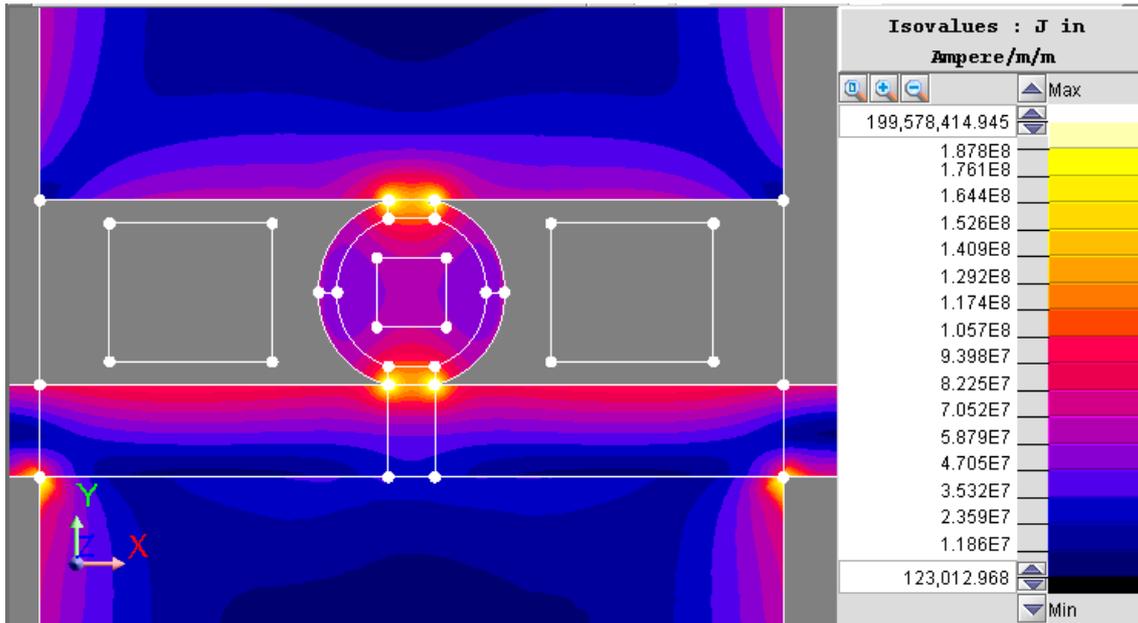


Figura 113 – Distribuzione della densità di corrente elettrica a 1000Hz

Valgono le stesse considerazioni precedenti e la corrente si concentra sempre di più verso il bordo.

La corrente elettrica è pari a 141,42 A in valore efficace. Le potenze dissipate e le relative resistenze di contatto sono:

Contatto	P[W]	R[$\mu\Omega$]
Tondino - Lamiera	0,92	46,00
Lamiera - Elettrodo	0,93	46,50

6.4.4 A 3000 Hz

La distribuzione della densità di corrente elettrica ottenuta è mostrata in figura 114.

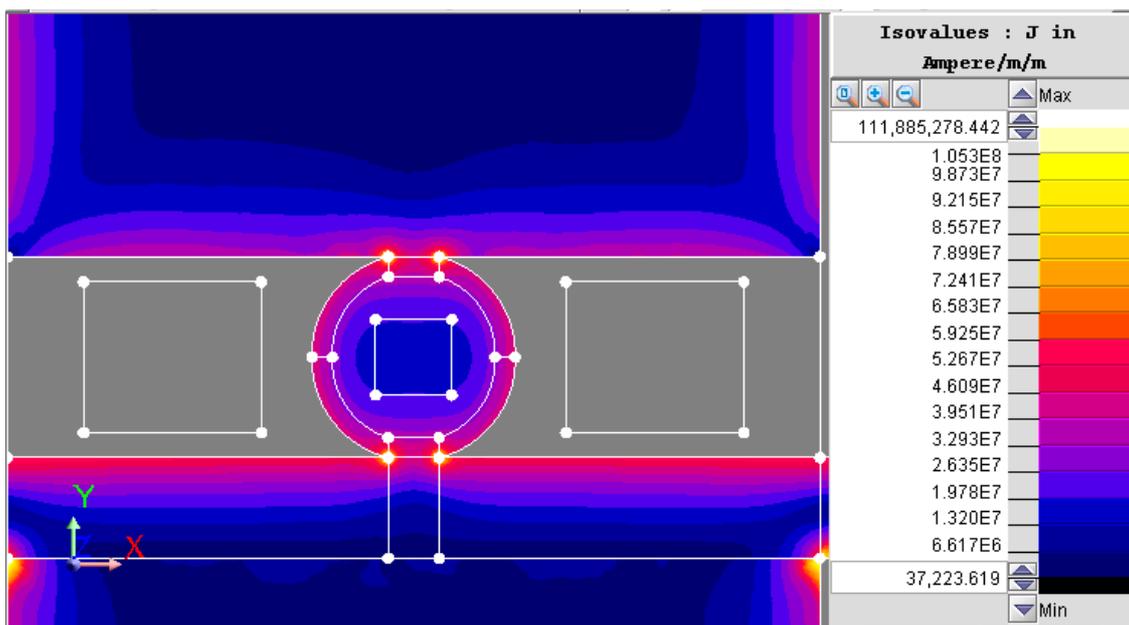


Figura 114 – Distribuzione della densità di corrente elettrica a 3000Hz

Valgono le stesse considerazioni precedenti.

La corrente elettrica è pari a 49,50 A in valore efficace. Le potenze dissipate e le relative resistenze di contatto sono:

Contatto	P[W]	R[$\mu\Omega$]
Tondino - Lamiera	0,10	40,82
Lamiera - Elettrodo	0,10	40,82

6.4.5 A 5000 Hz

La distribuzione della densità di corrente elettrica ottenuta è mostrata in figura 115.

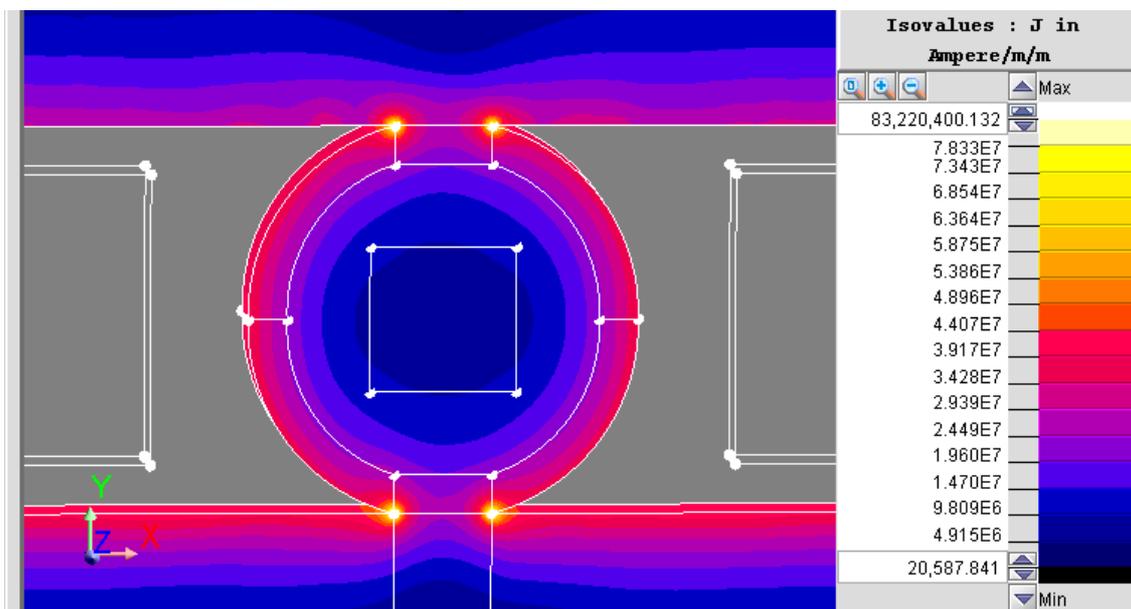


Figura 115 – Distribuzione della densità di corrente elettrica a 5000Hz

Valgono le stesse considerazioni precedenti.

La corrente elettrica è pari a 28,28 A in valore efficace. Le potenze dissipate e le relative resistenze di contatto sono:

Contatto	P[W]	R[$\mu\Omega$]
Tondino - Lamiera	0,04	47,50
Lamiera - Elettrodo	0,04	47,50

6.4.6 Grafici

Si è riportato in due tabelle i valori della frequenza, della resistenza di contatto tondino – lamiera e delle correnti in valore efficace.

f[Hz]	I,rms[A]
50	2828,43
500	282,84
1000	141,42
3000	49,50
5000	28,28

f[Hz]	R contatto [mΩ]
50	0,0435
500	0,0455
1000	0,0460
3000	0,0408
5000	0,0475

I relativi grafici sono riportati nella figura 116.

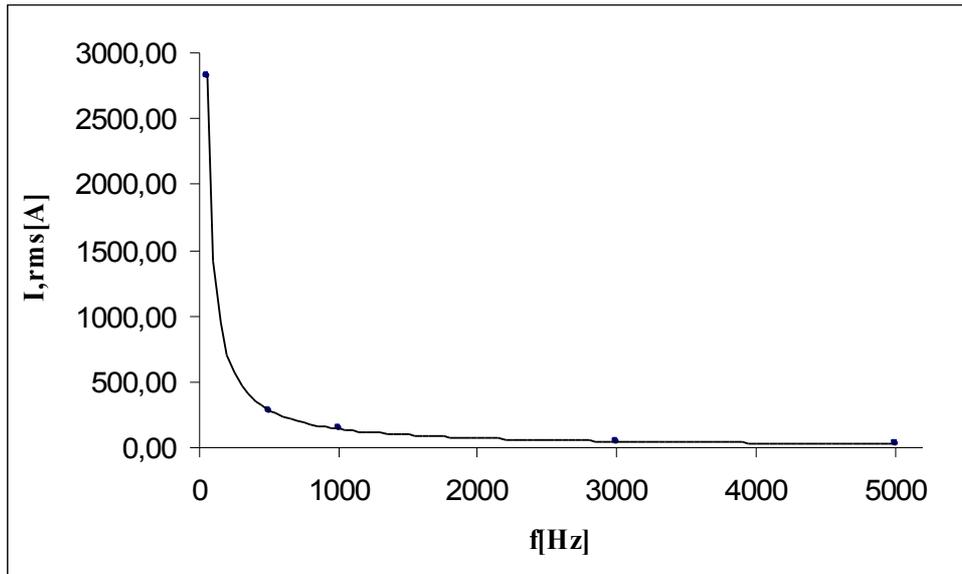


Figura 116 – a) – Corrente elettrica di saldatura in funzione della frequenza

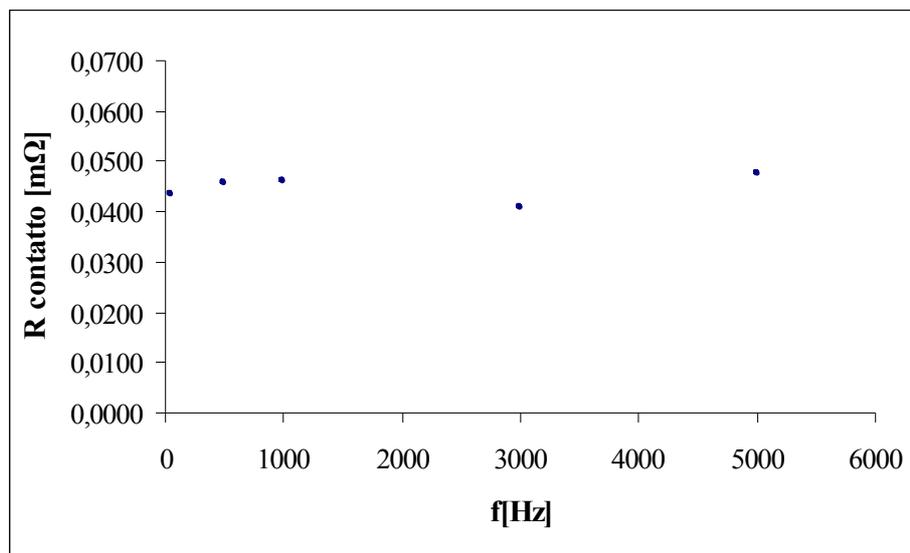


Figura 116 – b) – Resistenza di contatto lamiera - tondino in funzione della frequenza

Dalla figura 116 – a) notiamo che la corrente elettrica diminuisce all'aumentare della frequenza, a causa dell'effetto Pelle. Infatti, all'aumentare della frequenza, la corrente si distribuisce in sezioni sempre più piccole, in relazione allo spessore di penetrazione del materiale.

Dalla figura 116 – b) notiamo che la resistenza di contatto è indipendente dalla frequenza e, pertanto, dipende dalla pressione, dalla temperatura e dallo stato delle superfici, come visto nel paragrafo 2.2.1.2.

CONCLUSIONI

In questa tesi si è realizzata una ricerca bibliografica informativa sulle tematiche più importanti della saldatura. I risultati sono stati ottenuti con la simulazione al computer e confermano quelli esposti teoricamente. Alcuni aspetti della saldatura andrebbero approfonditi come la fase di espulsione, la descrizione delle proprietà dei vari materiali alla saldatura, informazioni sugli altri tipi di saldatura, e vari approfondimenti sulla parte meccanica, sulle discontinuità, sulla qualità.

APPENDICE 1

CELLA DI CARICO

La cella di carico è un trasduttore in grado di convertire un peso o una forza applicata lungo il proprio asse, in un segnale elettrico che risulta proporzionale alla deformazione causata dalla forza sulla parte meccanica dello stesso. E' costituito da un corpo metallico elastico a cui vengono applicati uno o più estensimetri. Gli estensimetri sono costituiti da filamenti di constantana che, collegati in opportune posizioni della struttura della cella, sono in grado di variare la propria resistenza elettrica, a causa delle deformazioni che subiscono. Questa variazione di resistenza viene convertita in un segnale elettrico, grazie alla realizzazione di un Ponte di Wheatstone. Il segnale è dell'ordine di pochi mV; pertanto è necessaria una successiva amplificazione, ottenuta con apposite strumentazioni. La cella di carico, inoltre, può avere infinite applicazioni, dove è necessario misurare o controllare una forza.

BIBLIOGRAFIA

1. Carpaneto & C.S.p.A, Divisione saldatura <http://www.carpaneto.it>
2. Istituto Italiano Saldatura, “*Processi di saldatura a resistenza*”, IIS, 2007.
3. R. Messler, “*Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry and Metallurgy*”, Wiley, 2004.
4. H. Zhang, J. Senkara, “*Resistance Welding: Fundamentals and Applications*”, CRC Press Taylor & Francis, 2006.
5. S. Park, S. Na, “*A new current measurement method in resistance spot welding,*” Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on 39, no. 5 (1990): 767-772.
6. Q. Song, W. Zhang, N. Bay, “*An Experimental Study Determines the Electrical Contact Resistance in Resistance Welding*”, Welding Journal, 2005 .
7. X. Chen, K. Araki, “*Fuzzy adaptive process control of resistance spot welding with a current reference model,*” in Intelligent Processing Systems, 1997. ICIPS '97. 1997 IEEE International Conference on, vol. 1, 1997, 190-194 vol.1.
8. X. Chen, K. Araki, e T. Mizuno, “*Modelling and Fuzzy Control of the Resistance Spot Welding Process,*” in SICE '97. Proceedings of the 36th SICE Annual Conference. International Session Papers, 1997, 989-994.
9. J. Moon, G. Kim., “*Power Control of Resistance Spot Welding System with High Dynamic Performance,*” in Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1997. IECON 97. 23rd International Conference on, vol. 2, 1997, 845-849 vol.2.
10. J. Khan, L. Xu, Y. Chao, K. Broach, “*Numerical Simulation of Resistance Spot Welding Process*”, Taylor & Francis, Part A, 2000, 425-446 Part A.
11. T. Baldwin, T. Hogans, S. Henry, F. Renovich Jr, P. Latkovic, “*Reactive power compensation for voltage control at resistance welders,*” in Industrial and Commercial Power System Technical Conference, 2005 IEEE, 2005, 1-9.
12. S. Lupi, “*Appunti di Elettrotermia*”, 2005
13. Sito internet <http://www.nbc-el.it/celle-di-carico-faq.htm>
14. Q. Song, W. Zhang, N. Bay, “*Contact Modelling in Resistance Spot Welding*”, Engineering Manufacture, 2005.
15. M. Bogomolny, M. P. Bendsøe, J. H. Hattel, “*A shape optimization study for tool design in resistance welding*”, Welding Journal, Industrial Application, 2008.
16. A. Monnier et al., “*A Coupled-Field Simulation of an Electrical Contact during Resistance Welding,*” in Electrical contacts - 2006, proceedings of the fifty-second iee holm conference on, 2006, 95-102.

17. J. Shriver, Huei Peng, S.J. Hu, "*Control of resistance spot welding*," in American Control Conference, 1999. Proceedings of the 1999, vol. 1, 1999, 187-191 vol.1.
18. P. Mair, "*Effects on the Human Body and Assessment Methods of Exposure to Electro – Magnetic – Fields Caused by Spot Welding*", Proceedings of the 4th International Seminar on Advances in Resistance Welding, 2006.
19. R. Herms et al., "*Field Compensation for Resistance Welding*," in Electromagnetic Compatibility, 2007. EMC Zurich 2007. 18th International Zurich Symposium on, 2007, 497-500.
20. F.J. Garza, M. Das, "*Identification of time-varying resistance during welding*," in Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2000. IMTC 2000. Proceedings of the 17th IEEE, vol. 3, 2000, 1534-1539 vol.3.
21. R. Herms et al., "*Influence of Field Compensation on the Effective Inductance of Resistance Welding Machines*," in Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, 2007 7th International Symposium on, 2007, 52-55.
22. Cheng-Chi Yeh et al., "*Micro Assembly by Micro Resistance Welding with Electro-Thermal Actuators*," in Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2007. NEMS '07. 2nd IEEE International Conference on, 2007, 333-336.
23. G. Sibilia, P. Rogeon, P. Paillard, G. Saindrenan, "Simulation Numerique du Soudage Par Points", *Materiaux*, 2002.
24. S. Dhandapani, M. Bridges, E. Kannatey-Asibu, "*Nonlinear electrical modeling for the resistance spot welding process*", in American Control Conference, 1999. Proceedings of the 1999, vol. 1, 1999, 182-186 vol.1.
25. C. Srikunwong, T. Dupuy, Y. Bienvenu, "*Numerical Simulation of Resistance Spot Welding Process Using Fea Technique*", 2003.
26. M. Cagliari, "*Flexibility Effects on Precision for a Steelwire Electrowelding Machine*", *Pittini Impianti Industriali*, 2003.
27. F. Golden, "*Ratings and Applications of Power Thyristors for Resistance Welding*," *Industry Applications*, IEEE Transactions on IA-8, no. 5 (1972): 607-616.
28. N. Scotchmer, K. Chan, "*Saving Time and Money with Resistance Welding Simulation Software*", *Huys Welding Strategies*, 2005.
29. Y. Sun, Y. Zang, Q. Shi, "*Sensitivity Analysis of Some High Efficiency Computational Methods for Welding Process Numerical Simulation*," in Information and Computing Science, 2009. ICIC '09. Second International Conference on, vol. 4, 2009, 92-95.
30. T. Manjunath, S. Janardhanan, N.S. Kubal, "*Simulation, design, implementation and control of a welding process using micro-controller*," in Control Conference, 2004. 5th Asian, vol. 2, 2004, 828-836 Vol.2.

31. A. Marsono, "*Study of Wire Welded Mesh Application in Construction Industry*", Universiti Teknologi Malaysia, 2007.
32. Y.E. Paerand e O.F. Bondarenko, "*The former of special form current pulses for micro resistance welding,*" in *Compatibility and Power Electronics*, 2009. CPE '09., 2009, 396-401.

N.B. Gli articoli dal numero 14 al numero 32 non sono stati utilizzati per scrivere la tesi, ma sono riportati per completezza.