Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale



Analisi e ottimizzazione di testata per macchine reggiatrici automatiche.

Relatori: Candidato:

Prof. Daniela Maffiodo Federico Ollino

Prof. Raffaella Sesana

Anno Accademico 2017/18

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica
Un ringraziamento speciale a mia madre e mio padre:
è grazie al loro sostegno e al loro incoraggiamento se oggi sono riuscito a raggiungere questo traguardo.

Sommario

In questa tesi ci si occupa del rinnovamento di una testata di reggiatura per macchine reggiatrici automatiche.

La reggiatura consiste nello stabilizzare un prodotto ai fini del trasporto.

Le testate di reggiatura prodotte dalla CMR (TOSA GROUP) utilizzano la tecnologia di saldatura a lama calda (hot welding); il progetto di rinnovamento è incentrato nell'introduzione della tecnologia di saldatura a ultrasuoni che consente di ottenere un processo maggiormente ripetibile, di qualità elevata e sicuro nei confronti dell'ambiente e degli operatori che potrebbero sostare nelle vicinanze delle macchine, soprattutto se semiautomatiche. Ciò implica lo studio di un sonotrodo specifico e la progettazione di un sistema di movimentazione che si possa integrare con le testate attualmente in produzione.

Inoltre, la fase di tensionamento viene regolata empiricamente da un "tempo" preimpostato che determina la tensione raggiunta dalla reggia. Questo tempo è impostato dall'operatore in base ad esperienza pregressa e a prove sul prodotto specifico. Per rendere maggiormente ripetibile e facilmente regolabile il processo si introduce il controllo elettronico, tramite cella di carico, della tensione applicata alla reggia.

Summary

In this thesis we deal with the renewal of a strapping head for automatic strapping machines. The strapping consists in stabilizing a product for transport purposes.

The strapping heads produced by CMR (TOSA GROUP) use a hot-blade welding technology; the renovation project focuses on the introduction of ultrasonic welding technology, which allows to obtain a more repeatable, high quality, cleaner and safer process for the environment and for operators who could stay near the machines, especially if they are semi-automatic. This involves the study of a specific sonotrode and the design of a handling system that can be integrated with the machines produced by the company.

Furthermore, the tensioning phase is adjusted empirically by a preset time which determines the tension reached by the strap. This time is set by the operator based on previous experience and tests on the specific product. To make the process more repeatable and easily adjustable, the electronic control, by means of a load cell, of the voltage applied to the strap is introduced.

Indice

1	Azi	enda
	1.1	Macchine avvolgitrici
	1.2	Macchine fardellatrici
	1.3	Macchine reggiatrici
	1.4	Sistemi di movimentazione
2	Pac	ckaging
	2.1	I tipi di imballaggio
	2.2	Pallet
3	Laı	reggia
	3.1	Polietilene tereftalato PET
	3.2	Polipropilene PP
	3.3	Produzione delle reggie
4	Pro	ocesso di reggiatura
	4.1	Portabobina
	4.2	Testata di reggiatura
		4.2.1 Gruppo di lancio e recupero reggia
		4.2.2 Gruppo pressori e lama calda
		4.2.3 Albero a camme
		4.2.4 Contrasto pressori con guida reggia
5	Salo	datura ad ultrasuoni
	5.1	La tecnologia di saldatura ad ultrasuoni
		5.1.1 Storia
		5.1.2 Applicazioni della tecnologia ad ultrasuoni
		5.1.3 Caratteristiche della saldatura ad ultrasuoni
		5.1.4 Componenti principali del gruppo saldante
		5.1.5 Ricerca nella saldatura ad ultrasuoni
	5.2	Stato dell'arte
	5.3	Analisi FEM di sonotrodi per saldatura ad ultrasuoni
	5.4	Saldatura inclinata
	5.5	Saldatura non in asse
	5.6	Saldatura tradizionale
	5.7	Ottimizzazione del sonotrodo tradizionale
	5.8	Sistema di movimentazione
		5.8.1 Progettazione sistema di clamping e del coltello
		5.8.2 Scelta dell'attuatore e delle valvole pneumatiche
		5.8.3 Dimensionamento della guida a ricircolo di sfere

	5.9	Montaggio del sistema ad ultrasuoni e integrazione nel processo di reggiatura	76
6	Ana	alisi dei risultati	77
	6.1	Analisi variazione del tempo di saldatura	80
	6.2	Analisi variazione della pressione	83
	6.3	Analisi variazione dell'ampiezza d'onda	84
	6.4	Analisi variazione affondamento sonotrodo	85
	6.5	Confronto fra saldatura a lama calda e ad ultrasuoni	86
	6.6	Analisi energetica e di sicurezza	89
7	Fase	e di tensionamento a controllo elettronico	92
	7.1	Progettazione del sistema di misura	95
	7.2	Calcoli trigonometrici	100
	7.3	Dimensionamento perno/distanziale	102
	7.4	Cella di carico	105
8	Pro	ve sperimentali	107
	8.1		110
9	Cor	nclusioni	116

Elenco delle figure

1.1	Logo	S
1.2	Avvolgitrici ad anello rotante	10
1.3	Fardellatrici Norket.	11
1.4	Reggiatrice verticale con testata laterale	12
1.5	Reggiatrice verticale con testata superiore	12
1.6	Linea automatica.	
1.7	Linea automatica.	13
1.8	Linea automatica.	13
2.1	Pallet	15
2.2	Pallet EPAL	16
3.1	Molecola PET (1)	18
3.2	Molecola PET (2)	18
3.3	Reggia PET	
3.4	Molecola PP	
3.5	Catena PP	20
3.6	Reggia Pp	21
3.7	Linea estrusione reggie.	22
3.8	Sistema di trasporto a vuoto	
3.9	Vite senza fine	
3.10	Rulli di laminazione	24
3.11	Linea completa	24
4.1	Reggiatrice semiautomatica	
4.2	Reggiatrice automatica	
4.3	Portabobina motorizzato e a leva	
4.4	Arco flessibile e magazzino	
4.5	Testata di reggiatura.	
4.6	Gruppo di lancio	
4.7	Gruppo di lancio - puleggia inferiore	
4.8	Gruppo di lancio - ingranaggi e attuatori.	
4.9	Gruppo pressori.	
	Gruppo pressori.	
	Lama calda	
	Albero a camme.	
4.13	Contrasto pressori con guida reggia	35
5.1	Scala frequenza onde sonore.	
5.2	Applicazioni ultrasuoni (sterilizzazione e saldatura).	
5.3	Grado di cristallinità.	39

5.4	Generatore Sirius Electric	40
5.5	Convertitore	40
5.6	Booster	41
5.7	Sonotrodi	41
5.8	Schema gruppo saldante	42
5.9	Saldatura metalli	42
5.10	Brevetto SIGNODE	43
5.11	Brevetto OMS	44
5.12	Brevetto MOSCA	45
5.13	Modi propri - sonotrodo cilindrico	47
5.14	Elemento - SOLID45	50
	Elemento - SOLID45	50
	Esempio di analisi modale [Sirius Electric]. [21]	52
	Saldatura inclinata	53
	Testata - Saldatura inclinata	54
	Testata - Saldatura inclinata (vista frontale)	55
	Saldatura non in asse	56
	Testata - Saldatura non in asse	57
	Importazione sonotrodo a base rettangolare	58
	Mesh sonotrodo a base rettangolare	58
	Modo 5 sonotrodo a base rettangolare	59
	Gruppo saldante definitivo.	60
	Testata - Saldatura tradizionale.	61
	Importazione sonotrodo tradizionale	61
	Mesh sonotrodo tradizionale	62
	Modo 1 sonotrodo tradizionale	63
	Modo 4 sonotrodo tradizionale	64
	Modo 5 sonotrodo tradizionale	64
	Sonotrodo a superficie circolare	65
	•	66
	Saldatura circolare	66
	Sonotrodo a base rettangolare.	
	Saldatura rettangolare	67
	Gruppo completo di saldatura.	68
	Collare commerciale	70
	Clamping	70
	Clamping - vista dal basso	71
	Coltello	71
	Cilindro FESTO ADN	72
	Circuito pneumatico	73
	Direzioni del carico.	74
5.44	Gruppo per saldatura ad ultrasuoni installato	76
6.1	INSTRON 8801	78
6.2		79
	Afferraggio.	
6.3	Afferraggio.	79
6.4	Saldatura con parametri base	80
6.5	Variazione della forza di trazione in funzione del tempo di saldatura	81
6.6	Rottura di reggia saldata con parametri base	82
6.7	Variazione della forza di trazione in funzione della pressione	83

6.8	Variazione della forza di trazione in funzione dell'ampiezza d'onda	84
6.9	Variazione della forza di trazione in funzione dell'affondamento del sonotrodo	85
6.10	Test saldatura ultrasuoni	86
6.11	Test saldatura lama calda	87
6.12	Confronto saldatura lama calda e ultrasuoni.	88
6.13	Consumo giornaliero	89
6.14	Consumo quinquennale	90
7.1	Effetto della velocità di deformazione. [3]	92
7.2	Allungamento fibre. [3]	93
7.3	Tensionamento a "tempo"	94
7.4	Cella di carico per pulegge.	95
7.5	Cella di carico per pulegge.	96
7.6	Testata con cella di carico e puleggia.	96
7.7	Guida reggia con asole	97
7.8	Confronto sistemi di misura	97
7.9	Soluzione definitiva.	98
7.10	Soluzione definitiva.	99
7.11	Scomposizione delle forze	100
		101
7.13	Disegno perno/distanziale	102
7.14	Trave	103
7.15	Andamento momento flettente	103
7.16	Coefficinete di intensificazione degli sforzi	104
7.17	Caratteristiche tecniche cella di carico	105
7.18	Dimensioni cella di carico	106
7.19	Cella di carico.	106
8.1	Struttura tubolare	107
8.2	TENSITRON STX-1000	108
8.3	File Excell - INSERIMENTO DATI	109
8.4	File Excell - COMPILA TABELLA	109
8.5		110
8.6		111
8.7		112
8.8	Test - Tensionamento controllato	115

Elenco delle tabelle

	Reggie in PET [3]. 18 Reggie in PP [3]. 21
5.1	Proprietà fisiche alluminio
5.2	Frequenze naturali sonotrodo a base rettangolare
5.3	Frequenze naturali sonotrodo tradizionale
5.4	Caratteristiche carrello KWVE15-B-KT
6.1	Set parametri base
6.2	Set parametri definitivi
8.1	Analisi test tensionamento
8.2	Risultati test tensionamento
8.2	Risultati test tensionamento

Capitolo 1

Azienda

La storia del gruppo TOSA, che affonda le radici nel 1974 come azienda costruttrice di macchine enologiche, è legata alla famiglia Tosa.

Il fondatore, Giuseppe Tosa, ben presto decide di diversificare la produzione e di entrare nel settore dell'imballaggio, in particolare quello per l'avvolgimento di pallet con film estensibile. Per offrire soluzioni ancora più complete e flessibili al cliente, nel 1998, viene acquisita la CMR, storica realtà del pavese, produttrice di macchine reggiatrici di elevata affidabilità e fra le prime aziende a brevettare la testata di reggiatura.

Nel 2001 viene acquisita la MIMI per poter ampliare la produzione introducendo anche macchine fardellatrici con film termoretraibile.

MISSION aziendale: "Costruire macchine affidabili e longeve, figlie dell'innovazione, capaci di farsi carico con la massima efficienza della stabilizzazione e protezione di qualsiasi carico pallettizzato." [1]



Figura 1.1: Logo.

1.1 Macchine avvolgitrici

Le macchine avvolgitrici occupano una grande parte della produzione aziendale, l'ampia gamma di modelli e accessori disponibili consente di garantire tutti i tipi di richieste di stabilizzazione e di sicurezza del cliente.

Le tre macro categorie in cui vengono suddivise le macchine avvolgitrici su base della produzione indicata come pallet/ora sono:

- A piattaforma rotante, capacità produttiva fino a 40 p/h
- A braccio rotante, capacità produttiva fino a 80 p/h
- Ad anello rotante, capacità produttiva fino a 160 p/h



Figura 1.2: Avvolgitrici ad anello rotante.

Nell'immagine è presente una macchina ad anello rotante, si tratta dell'avvolgitrice più prestazionale in produzione. In questa macchina il pallet resta fermo mentre la bobina di film ruota e al contempo trasla verticalmente per completare l'avvolgimento.

1.2 Macchine fardellatrici

Le macchine fardellatrici sono composte da una serie di trasporti su cui vengono installati i sistemi che depositano il film retraibile sul fardello e da un forno in cui il calore agisce sul film che va a bloccare i prodotti.

Vengono prodotte macchine di tutte le dimensioni ma l'eccellenza del marchio MIMI sono le macchine della serie NORKET in grado di imballare prodotti fino a 3000mm di larghezza.



Figura 1.3: Fardellatrici Norket.

Fardellatrice NORKET, configurazione multiblocco, barra saldante a funzionamento motorizzato da $2200\ a\ 3000\ mm$. Possibilità di imballo con protezione antipolvere.

1.3 Macchine reggiatrici

Il brand CMR è specializzato nella produzione di reggiatrici per ogni tipologia di prodotto, di grandi e piccole dimensioni, e con cicli orizzontali o verticali.

Inoltre queste macchine possono essere abbinate al meglio con le altre tipologie di macchine TOSA al fine di garantire un fine linea completo ed integrato.



Figura 1.4: Reggiatrice verticale con testata laterale.

Capacità produttiva fino a 60 p/h, possibilità di utilizzare reggie in poliestere (PET) o polipropilene (PP).



Figura 1.5: Reggiatrice verticale con testata superiore.

Capacità produttiva fino a 120 p/h, possibilità di utilizzare reggie in poliestere (PET) o polipropilene (PP).

Il cuore della macchina reggiatrice è la testata di reggiatura esposta nei prossimi capitoli.

1.4 Sistemi di movimentazione

Per collegare e automatizzare al meglio il fine linea vengono prodotti internamente anche sistemi di movimentazione quali trasporti a rulli, a catene, manipolatori e altri ancora.



Figura 1.6: Linea automatica.

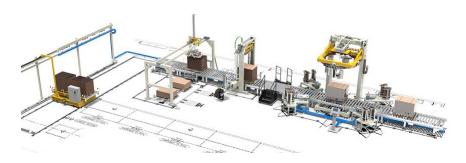


Figura 1.7: Linea automatica.

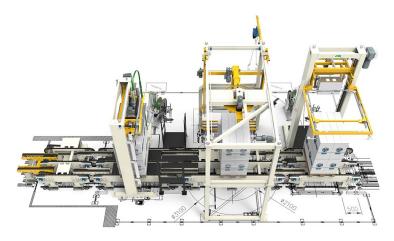


Figura 1.8: Linea automatica.

Capitolo 2

Packaging

Il packaging non è semplicemente riferito al materiale di imballo ma indica anche lo studio di marketing commerciale che studia l'immagine del prodotto e della sua confezione per facilitarne la vendita; è un settore sempre più importante per un prodotto in quanto ne rappresenta l'immagine commerciale e ne consente un trasporto sicuro, il termine Italiano *imballaggio*, invece, si riferisce solamente all'aspetto materiale dell'imballo.

L'imballaggio (o imballo), per la normativa legale e regolamentare italiana, è il prodotto, composto di materiali di qualsiasi natura, adibito a contenere e a proteggere determinate merci, dalle materie prime ai prodotti finiti, a consentire la loro manipolazione e la loro consegna dal produttore al consumatore o all'utilizzatore, e ad assicurare la loro presentazione, nonché gli articoli a perdere usati allo stesso scopo (art. 35, lett. a), ex decreto legislativo 22/97, ora art. 218 del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152 recante Norme in materia ambientale.

Per garantire tutte queste caratteristiche, sempre secondo la normativa Italiana, il packaging è diviso in tre categorie: primario (vendita), secondario (multiplo) e terziario (trasporto).

In questo modo si cerca di proteggere la merce e evitare furti cercando di mantenere un equilibrio fra tempi e costi del materiale e tempo di imballaggio.

2.1 I tipi di imballaggio

Il packaging primario consiste nel costruire una singola unità di vendita che consente al consumatore finale di avere accesso diretto al materiale. Ad esempio le bombolette spray, i pacchetti di sigarette, le lattine per bibite, gli involucri per dolci e moltissimi altri ancora. Queste singole unità vengono raggruppate in un certo numero al fine di facilitare il trasporto su scaffali o l'acquisto di più prodotti da parte del consumatore; questo è il packaging secondario. Alcuni esempi possono essere le stecche di sigarette, le casse di lattine e i pacchi di brioches.

Il packaging terziario consente invece di trasportare più unità singole o imballi multipli e deve evitare danni durante il trasporto o furti (i container sono esclusi), ad esempio un pallet o uno scatolone sono imballo terziario e, tendenzialmente, non arriva all'utente finale.

2.2 Pallet

Il pallet nacque per uso militare durante la seconda guerra mondiale. Fu inventato dai soldati americani, i quali scoprirono che, appoggiando le merci da trasportare su apposite strutture in legno, il trasporto veniva notevolmente facilitato; il successivo passaggio da settore militare a civile fu una conseguenza naturale data l'utilità dell'invenzione.

Il pallet, conosciuto anche con il nome di bancale, ha rivoluzionato i trasporti commerciali consentendo di ottimizzare al meglio lo spazio necessario per lo stoccaggio dei prodotti, inoltre, avendo gli appositi piedini per essere *inforcato* mantiene il carico sollevato da terra proteggendolo da umidità e urti. [2]



Figura 2.1: Pallet.

Oggi vengono prodotti pallet in materiali diversi quali ferro, plastica e truciolato. Il ferro consente il trasporto di oggetti particolarmente pesanti, la plastica ha la funzione opposta mentre il truciolato riduce i costi di pallet che non vengono riutilizzati.

Inizialmente le dimensioni del pallet erano a discrezione del singolo utilizzatore ma successivamente, data la diffusione sempre maggiore, si è deciso di avviare un processo di standardizzazione del pallet; processo tutt'ora non terminato.

In Europa, nel corso degli anni si sono diffuse due misure classiche, da $800 \times 1200 \ [mm]$ definita subito come pallet "EUR" e da $1000 \times 1200 \ [mm]$ gergalmente conosciuta come pallet "Philips". Entrambe hanno in comune il dato relativo all'altezza da terra e la conformazione della base con la presenza di 9 piedini, uniti inferiormente tra loro in gruppi di tre attraverso liste di legno dallo spessore di $22 \ [mm]$ poste nel senso della misura maggiore. Questo tipo di pallet può essere così inforcato da ogni lato e viene definito a quattro vie. Il legno è un potenziale veicolo di organismi nocivi, per questo motivo, dal 5 maggio $2000 \ la$ Comunità Europea ha reso obbligatorio un trattamento preventivo, definito come "fumigazione", mediante l'utilizzo di prodotti chimici a base di bromuro di metile.

In alternativa il trattamento HT (heat treatment), consiste in un trattamento termico in cui il legno viene trattato in apposite celle dette essiccatoi; i due sistemi sono equivalenti ed entrambi riconosciuti validi. Tali trattamenti sono confermati dalla presenza di apposita marchiatura.

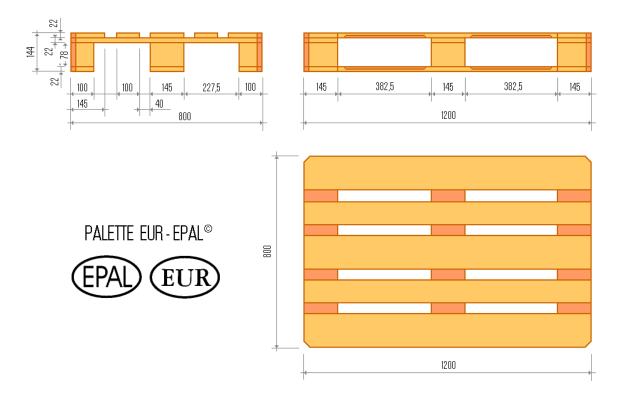


Figura 2.2: Pallet EPAL.

Negli stati uniti la dimensione standard è il 40×48 ["] (equivalente nelle dimensioni circa al 1000×1200 [mm] europeo). In Asia (ad esempio, in Giappone) è utilizzata frequentemente la dimensione 1100×1100 [mm], cioè di pianta quadrata.

Capitolo 3

La reggia

La reggia è una striscia di metallo o plastica resistente usata per fissare un carico o per chiudere un pacco a scopo di tenuta o sicurezza antifurto.

Le reggie plastiche sono state utilizzate a partire dagli anni '70 e, grazie all'evoluzione delle plastiche, riescono a garantire prestazioni sempre migliori al punto che, negli ultimi anni, stanno entrando in competizione con le reggie metalliche.

Principalmente le reggie vengono prodotte in polipropilene e polietilene. Analizzando le vendite effettuate dalla CMR si può osservare un'inversione di tendenza in quanto fino al 2000/2005 le reggie più utilizzate erano quelle in polipropilene mentre negli ultimi anni vanno per la maggiore quelle in polietilene.

I vantaggi principali che si hanno nell'utilizzo di una reggia plastica rispetto ad una metallica sono: maggiore resistenza agli impatti, maggior allungamento (miglior tenuta sul prodotto durante gli spostamenti), assenza di corrosione, elevata flessibilità che consente di non danneggiare gli angoli del prodotto, minori rischi per gli operatori e bobine di peso inferiore.

3.1 Polietilene tereftalato PET

Il polietilene tereftalato, meglio noto come PET, è uno dei polimeri più comunemente utilizzati nell'industria europea del packaging.

Venne sintetizzato per la prima volta nel 1941, dai tecnici della *Dupont*, durante lo sviluppo di fibre tessili con nuovi polimeri. Queste fibre ottennero un notevole successo al punto che già dal 1990 oltre il 50 % delle fibre sintetiche prodotte al mondo era in PET.

Alle fine degli anni '50 venne sviluppato in film, tramite stiramento di fogli sottili estrusi, per realizzare pellicole fotografiche e packaging.

La produzione del PET può avvenire attraverso il seguente processo:

Partendo da acido tereftalico e glicole etilenico, attraverso il processo di esterificazione attivato termicamente, si ottiene il bis-2-idrossietiltereftalato, che è il monomero del polietilentereftalato con eliminazione di acqua. Successivamente, tramite il processo di policondensazione, si ottiene il polimero desiderato con formazione glicole etilenico che viene riutilizzato nel processo.

Figura 3.1: Molecola PET (1).

Figura 3.2: Molecola PET (2).

Il PET è molto resiliente, può sopportare pressioni elevate e ha elevati valori di resistenza a trazione e deformabilità per via della struttura semicristillina; inoltre è adatto al contatto con alimenti. Un ulteriore aspetto da tenere in considerazione è che può essere riciclato al 100~% seguendo due processi differenti:

- Riciclaggio meccanico: i prodotti vengono polverizzati da appositi macchinari; la polvere ottenuta viene filtrata per rimuovere le impurità e poi riscaldata per prodotti non a contatto con alimenti (conveniente per piccole quantità);
- Riciclaggio chimico: anche in questo caso si riducono i prodotti in polvere che viene depolimerizzata rendendo il monomero puro e riutilizzabile anche a contatto con alimenti; in questo modo riacquista tutto il valore iniziale (conveniente per grandi quantità);

Le reggie in poliestere utilizzate dalla TOSA hanno:

Larghezza	Spessore	Caricodirottura	Superficie
$8 \div 16 \ [mm]$	$0.6 \div 0.9 \ [mm]$	$2000 \div 5000 [N]$	Goffrata

Tabella 3.1: Reggie in PET [3].



Figura 3.3: Reggia PET.

3.2 Polipropilene PP

Il polipropilene (PP) è stato inventato da Giulio Natta l'11 marzo del 1954 e, dopo soli 3 anni, è stato commercializzato da Montecatini con il nome di Moplen.

Si tratta di un polimero che presenta diverse tatticità [4]:

- Se tutti i gruppi fenilici sono dalla stessa parte della catena diciamo che il polimero è isotattico.
- Se i gruppi fenilici sono alternativamente da una parte o dall'altra sono della catena, diciamo che il polimero è sindiotattico.
- Se i gruppi fenilici sono su entrambi i lati in modo casuale, diciamo che il polimero è atattico.

Il prodotto più interessante dal punto di vista commerciale è quello isotattico: è un polimero semicristallino caratterizzato da un elevato carico di rottura, una bassa densità, una buona resistenza termica e all'abrasione.

Si ottiene per polimerizzazione del gas propilene, derivante dai processi di Cracking del petrolio, con meccanismo simile a quello dell'etilene.

Figura 3.4: Molecola PP.

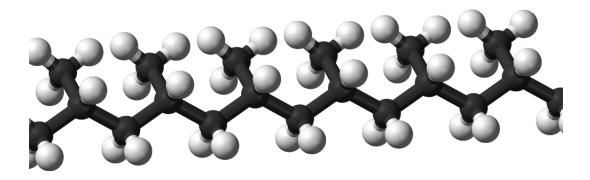


Figura 3.5: Catena PP.

Il polipropilene può essere riciclato al 100~% per circa tre volte, successivamente le proprietà meccaniche iniziano a decadere notevolmente. Il processo di riciclaggio è simile a quello meccanico descritto per il PET. Le reggie in polipropilene utilizzate dalla TOSA hanno:

Larghezza	Spessore	Caricodirottura	Superficie
$9 \div 15 \ [mm]$	$0.6 \div 0.95 \ [mm]$	$1500 \div 3500 \ [N]$	Goffrata

Tabella 3.2: Reggie in PP [3].



Figura 3.6: Reggia Pp.

3.3 Produzione delle reggie

La reggia viene prodotta tramite un processo di estrusione seguito da laminazione e stabilizzazione.

Questi tre processi avvengono in sequenza per sfruttare la temperatura del materiale dopo l'estrusione, per questo motivo la linea di produzione può raggiungere lunghezze considerevoli ($\approx 40 \ [m]$).

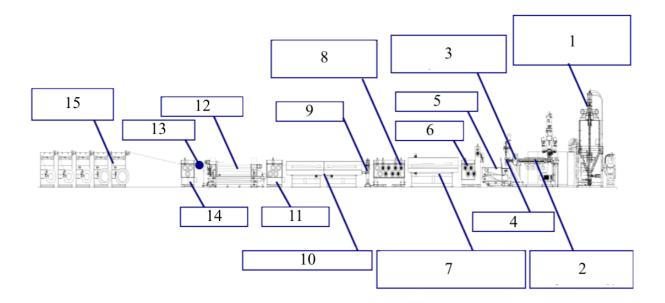


Figura 3.7: Linea estrusione reggie.

L'elemento (1) è una tramoggia molto grande in cui il materiale grezzo viene trasformato in cristalli e essiccato.

Successivamente un sistema di aspirazione automatico preleva questi cristalli e li trasporta sulla tramoggia dell'estrusore (2).



Figura 3.8: Sistema di trasporto a vuoto.

Entrato nell'estrusore, il materiale plastico si fonde grazie all'attrito con la vite senza fine e al calore introdotto dalle apposite resistenze fino a raggiungere la consistenza adeguata, non deve diventare troppo fluido sia per essere immediatamente usato nelle fasi successive, sia per salvaguardare le proprietà meccaniche del prodotto, dato che sono molto sensibili alle temperature elevate.

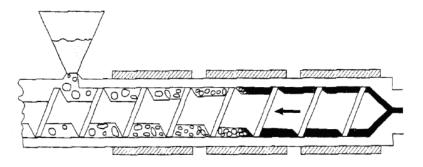


Figura 3.9: Vite senza fine.

A valle dell'estrusore troviamo un dosatore (3-4) che funge da collegamento con la parte della linea atta alla laminazione. Il compito di questo elemento è di mantenere un flusso costante di materiale sopperendo alle eventuali irregolarità dell'estrusore.

Prima di proseguire può essere presente un raffreddatore (5) che porta alla temperatura ideale di laminazione il prodotto.

La laminazione è effettuata in due fasi: la prima fase con soffio di aria calda (6-7), la seconda con rulli che, ruotando a velocità differenti, tendono il prodotto (8). Questo tratto di linea si conclude con l'eventuale rullo per la goffratura (9).

La fase di stabilizzazione è composta da un forno di ricottura (10), stesura della reggia (11) con annesso raffreddamento (12) e il passaggio in un serbatoio di cera (13-14).

A questo punto la reggia viene recuperata da avvolgitori elettrici (15) in numero pari alle regge prodotte in contemporanea (variabili da 3 a 10).



Figura 3.10: Rulli di laminazione.



Figura 3.11: Linea completa.

Capitolo 4

Processo di reggiatura

Il processo di reggiatura può essere suddiviso in 5 fasi principali:

- Lancio della reggia
- Recupero della reggia
- Tensionamento della reggia
- Saldatura e taglio della reggia
- Rilascio dell'anello di reggia sul prodotto

La prima fase consiste nel lancio della reggia attorno al prodotto; la reggia scorre dentro a delle apposite canaline rivestite di polizene per ridurre l'attrito e ritorna alla testata di reggiatura. Successivamente il motore che ha effettuato il lancio inverte la rotazione e recupera tutta la reggia in eccesso. Nella fase di tensionamento si stringe la reggia sul prodotto per stabilizzarlo al meglio. Raggiunta la tensione voluta si taglia la reggia e si saldano i due capi con la lama calda così da formare un anello che viene rilasciato sul prodotto.

Tutti i componenti meccanici che consento di effettuare queste operazioni sono descritti nei capitoli successivi.

Benchè il processo di reggiatura sia il medesimo per tutte le tipologie di reggiatrici è necessario effettuare una distinzione fra le macchine semiautomatiche e automatiche poichè presentano sistemi di canaline e portabobine differenti.

Nelle macchine semiautomatiche il prodotto da reggiare viene posto manualmente sotto l'arco in cui scorre la reggia, successivamente l'operatore preme il pedale che avvia il ciclo di reggiatura e, una volta terminato, rimuove il prodotto dalla macchina che è pronta per una nuova reggiatura.

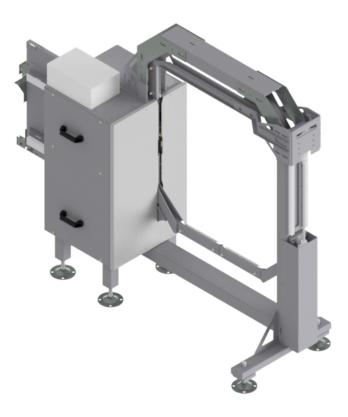


Figura 4.1: Reggiatrice semiautomatica.

Nelle macchine automatiche, invece, il prodotto è posto su pallet che vengono movimentati automaticamente tramite trasporti a rulli o nastro, fotocellule e sensori rilevano l'ingresso del pallet in macchina che, appena giunge nella posizione corretta, viene reggiato. Al termine delle reggiature il pallet riprende il suo percorso lungo la linea di imballaggio e la macchina è pronta a reggiare il successivo.

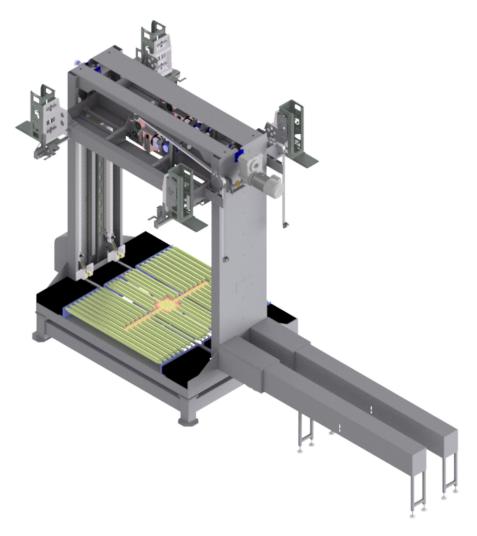


Figura 4.2: Reggiatrice automatica.

4.1 Portabobina

La bobina di reggia viene montata sul portabobina che svolge la funzione di pre-srotolamento della reggia.

Esistono due tipologie di portabobina:

- Motorizzato: viene utilizzato sulle reggiatrici più piccole e semiautomatiche perchè è più compatto (può essere carenato nel corpo macchina) ma non consente di effettuare lanci lunghi dato che non srotola abbastanza velocemente la reggia.
- A leva: dimensionando correttamente il numero di rinvii consente di effettuare lanci lunghi ma occupa più spazio del precedente.



Figura 4.3: Portabobina motorizzato e a leva.

Per passare alla testata la reggia viene guidata da canaline di diversi tipi che si differenziano in base al tipo di macchina, possiamo avere sia l'arco flessibile che un sistema di canaline più un magazzino recupero reggia a bordo macchina.



Figura 4.4: Arco flessibile e magazzino.

4.2 Testata di reggiatura

La testata di reggiatura è il cuore della macchina reggiatrice, si occupa di tutte le fasi di reggiatura, dal lancio al taglio della reggia.

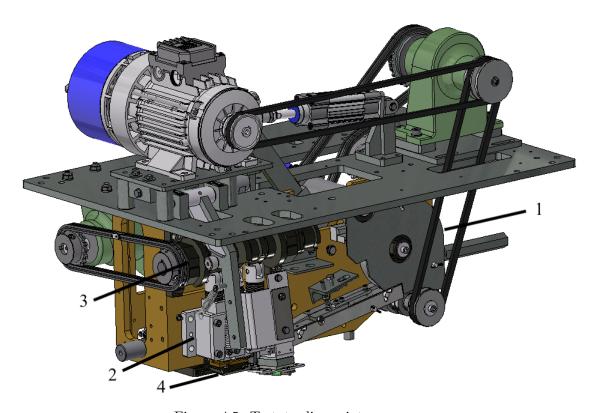


Figura 4.5: Testata di reggiatura.

E' formata dalla struttura principale, che deve resistere ai notevoli sforzi generati in fase di tensionamento e sulla quale sono alloggiati i seguenti gruppi principali:

- Gruppo di lancio e recupero della reggia (1)
- Gruppo pressori (2)
- Albero a camme (3)
- Contrasto pressori con guida reggia (4)

4.2.1 Gruppo di lancio e recupero reggia

Il gruppo di lancio e recupero reggia è costituito da tre pulegge di cui: quella inferiore effettua il lancio della reggia e il recupero, quella centrale e quella superiore il tensionamento.

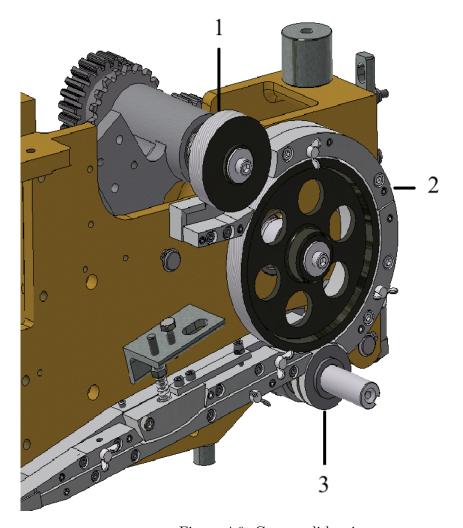


Figura 4.6: Gruppo di lancio.

Durante la fase di lancio la puleggia superiore (1) resta sollevata e quindi non entra in contatto con la reggia, la puleggia centrale (2) è folle mentre quella inferiore (3), che è collegata ad un motore elettrico tramite cinghia, imprime il moto alla reggia.

Durante la fase di recupero della reggia, il motore elettrico inverte la rotazione e, sempre tramite la puleggia inferiore si recupera tutta la reggia lanciata in eccesso.

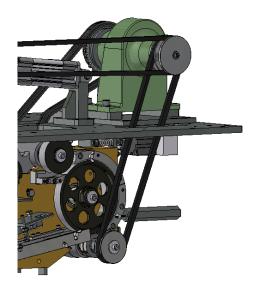


Figura 4.7: Gruppo di lancio - puleggia inferiore.

Quando tutta la reggia non necessaria viene recuperata e quindi giunge a contatto con il prodotto inizia la fase di tensionamento. Durante questa fase un attuatore pneumatico (1) agente su una leva (2) fa si che la puleggia superiore (movimentata dal medesimo motore di quella inferiore) ingrani (3) con la puleggia centrale. In questo modo la reggia viene premuta dalle due pulegge che, avendo anche un rapporto di trasmissione diverso da quella inferiore, trasmettono più coppia a velocità inferiori.

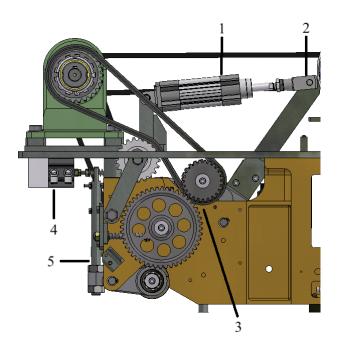


Figura 4.8: Gruppo di lancio - ingranaggi e attuatori.

Contemporaneamente, un secondo attuatore pneumatico (4) agisce su un'altra leva (5) per abbassare la puleggia inferiore in modo che non strisci sulla reggia mentre viene tensionata.

4.2.2 Gruppo pressori e lama calda

Continuando a seguire il percorso della reggia si arriva alla zona di taglio e saldatura. Il gruppo pressori è composto da tre pressori che vengono movimentati dall'albero a camme. I pressori sono tre elementi che scorrono all'interno del gruppo e che vanno ad agire sulla reggia.

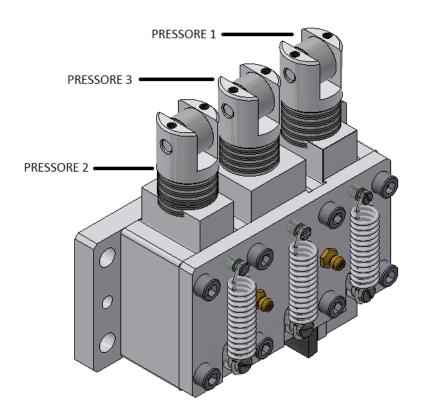


Figura 4.9: Gruppo pressori.

Il pressore 1 è il primo a scendere sul contrasto per andare a tenere il capo iniziale di reggia (che è già stata lanciata), dopo che è sceso avviene recupero e tensionamento.

Solo a questo punto scende il pressore 2 che va a tenere la reggia in tensione sul prodotto. Il pressore 3 è l'ultimo a muoversi e svolge una duplice funzione, controlla il coltello (1) che taglia la reggia e pressa i due capi di reggia precedentemente scaldati dalla lama calda.

Le molle a tazza (2) consentono di controllare la pressione esercitata dai pressori sulla reggia mentre le molle di ritorno (3) fanno si che, quando le camme smettono di comprimere i pressori, essi ritornino nella posizione di riposo.

Anche il movimento della lama calda (1) è controllato dall'albero a camme, essa si interpone fra i due capi di reggia e, dopo averli scaldati al punto giusto, si ritrae nella posizione di riposo.

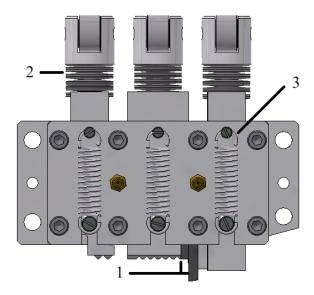


Figura 4.10: Gruppo pressori.

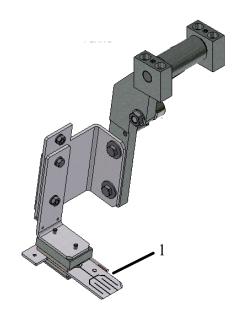


Figura 4.11: Lama calda.

4.2.3 Albero a camme

Sull'albero a camme sono installate le camme che controllano i pressori e lama calda, come già descritto, la camma che controlla il contrasto pressori con guida reggia e due anelli con una scanalatura sotto i quali vengono posti due proximity per registrare la posizione dell'albero.

L'albero a camme è posto in rotazione da un apposito motore elettrico, non dallo stesso motore che movimenta il gruppo di lancio reggia. La rotazione non è costante ma avviene con alternanza di pause e avanzamenti di tempi e gradi diversi.

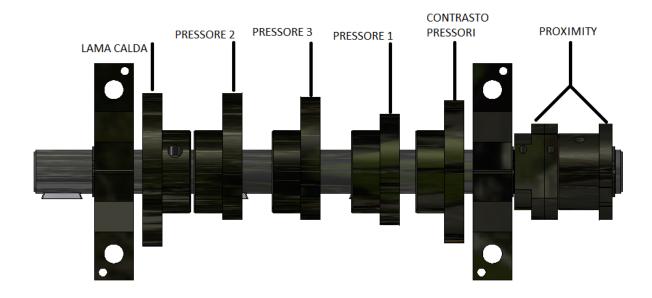


Figura 4.12: Albero a camme.

4.2.4 Contrasto pressori con guida reggia

La guida fa si che la reggia scorra liberamente sul contrasto senza rimanere incastrata nei pressori o nel fermo di arrivo reggia (sensore che rileva la fine del lancio reggia). Quando il primo pressore scende la guida si ritrae per consentire la discesa del secondo pressore, l'ingresso della lama calda e la pressatura tramite il terzo pressore.

Al termine della saldatura, dopo che il tempo di raffreddamento è terminato, salgono tutti i pressori e il contrasto scorre all'indietro per lasciare cadere la reggia sul prodotto.

Prima di iniziare un nuovo ciclo il contrasto e la guida tornano nella posizione di partenza.

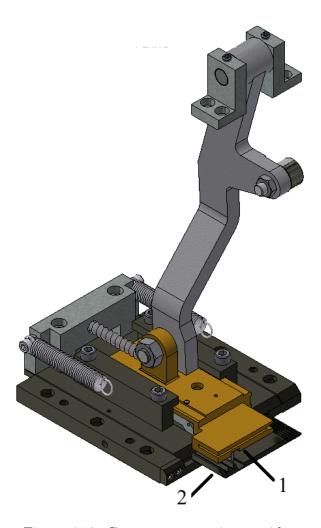


Figura 4.13: Contrasto pressori con guida reggia.

Capitolo 5

saldante.

Saldatura ad ultrasuoni

Centro del progetto di rinnovamento della testata di reggiatura è l'implementazione di un nuovo sistema di saldatura, si passa dalla tradizionale lama calda al sistema ad ultrasuoni. Nei prossimi paragrafi si espone una trattazione completa di questo argomento, partendo dalla storia della tecnologia ad ultrasuoni giungendo alla vera e propria progettazione delle componenti meccaniche e pneumatiche che consentiranno di movimentare e controllare il gruppo

5.1 La tecnologia di saldatura ad ultrasuoni

Definizione di ultrasuoni:

"...sono vibrazioni longitudinali elastiche come i suoni ma di frequenza elevatissima, superiore alla soglia di udibilità dell'orecchio umano. Il loro campo è limitato inferiormente da oscillazioni a frequenza di circa 20.000 Hertz (ossia 20.000 vibrazioni al secondo) che sono al limite superiore della sensibilità del nostro organo dell'udito. Per gli ultrasuoni, così come per i suoni, l'aumento della frequenza modifica progressivamente i fenomeni generali della diffrazione, diffusione, assorbimento e propagazione tanto da dare ad essi caratteristiche speciali che li fanno preferire nell'uso pratico per impieghi specifici e molto importanti." [5]



Figura 5.1: Scala frequenza onde sonore.

5.1.1 Storia

La storia degli ultrasuoni fa parte della storia dell'acustica.

Il primo a occuparsi di acustica fu Pitagora che, nel VI secolo A.C., scoprì le differenze di suono emesse da corde di lunghezze diverse. Passando per Galileo (1638) e per diversi scienziati e matematici del 17° e 18° secolo che studiarono l'acustica si arriva ai primi studi riguardanti gli ultrasuoni nel 19° secolo.

Joule, nel 1842, scoprì la **magnetostrizione**; ossia il cambiamento che subiscono le dimensioni di un corpo posto in un campo magnetico. Questo effetto si può osservare principalmente sulle sostanze ferromagnetiche ma, aumentando sufficientemente il campo magnetico, si verifica anche per le sostanze paramagnetiche e diamagnetiche.

Nel 1880, Pierre e Paul-Jacques Curie scoprirono l'effetto piezoelettrico. Alcuni corpi cristallini si polarizzano elettricamente se sottoposti a deformazione meccanica e viceversa si deformano elasticamente se sottoposti all'azione di un campo elettrico; il segno della polarizzazione si inverte se la deformazione avviene in trazione o compressione. [6]

I cristalli che presentano il fenomeno della piezoelettricità sono numerosi, ma la sostanza piezoelettrica per eccellenza è il quarzo, sia per la relativa abbondanza di cristalli di notevoli dimensioni, sia per la buona lavorabilità meccanica, sia infine per la costanza e la linearità con cui si presenta in esso l'effetto piezoelettrico.

Queste importanti scoperte scientifiche aprirono la strada all'utilizzo degli ultrasuoni prima nell'ambito militare (prima guerra mondiale) con l'utilizzo del *sonar* per individuare i sottomarini nemici poi, dalla seconda guerra mondiale, grazie allo sviluppo delle tecnologie elettroniche e dei materiali piezoelettrici, in campo medicale, domestico e industriale.

Nell'ambito specifico della saldatura ad ultrasuoni il primo brevetto risale al 1960 ed è stato registrato dall'azienda Statunitense SONOBOND ULTRASONICS, situata nei pressi di Philadelphia.

Fino agli anni ?70, gli apparecchi utilizzati erano costruiti per la maggior parte con trasduttori magnetoresistivi, cioè materiali ferromagnetici capaci di dilatarsi e contrarsi se eccitati da campi magnetici variabili. Questi materiali hanno un rendimento basso e un costo di produzione elevato infatti furono sostituiti da ceramiche piezoelettriche sintetiche, molto più economiche, che hanno consentito di diffondere l'utilizzo della saldatura ad ultrasuoni nell'industria.

5.1.2 Applicazioni della tecnologia ad ultrasuoni

Convenzionalmente gli ultrasuoni si suddividono in tre bande di frequenza:

- Ultrasuoni ad alta frequenza (da 1 MHz a 10 MHz): sono usati soprattutto come mezzo di diagnostica in medicina. Ad esempio nell'ecografia possiamo osservare parti interne del corpo umano senza alcun danno per il paziente, è simile ai raggi X ma con risoluzione e penetrazione inferiori. Funziona grazie alle onde riflesse che, in base a ciò che colpiscono, tornano verso il rilevatore in modo diverso generando, dopo una rielaborazione del segnale, un immagine.
- Ultrasuoni a media frequenza (da 100 kHz a 1 MHz): siccome generano calore sono utilizzati in medicina per trattamenti terapeutici contro reumatismi o altre patologie, per la sterilizzazione e per debellare microorganismi. Si possono usare per scoprire difetti o impurità nei metalli o nelle saldature.
- \bullet Ultrasuoni a bassa frequenza (da 20 kHz a 100 kHz): sono in grado di trasmettere notevoli quantità di energia e vengono utilizzati per le saldature di materie plastiche, bisogna prestare particolare attenzione alle frequenze più basse perchè sono alla soglia dell'udibile e potrebbero infastidire gli operatori a contatto con i macchinari per diverse ore.



Figura 5.2: Applicazioni ultrasuoni (sterilizzazione e saldatura).

5.1.3 Caratteristiche della saldatura ad ultrasuoni

Dal punto di vista fisico, la saldatura ad ultrasuoni è una vibrazione meccanica ad altissima frequenza, applicata sul prodotto da saldare in direzione normale alla superficie.

Sollecitando con questa vibrazione i materiali termoplastici l'attrito intermolecolare genera calore che porta a fusione la zona di giunzione.

I materiali migliori per essere saldati con questa tecnologia sono i termoplastici per via della loro struttura principalmente amorfa mentre, ad esempio, i termoindurenti non vengono saldati ma lavorati con macchine utensili.

Come già detto, i materiali termoplastici sono principalmente amorfi; significa che le catene polimeriche (composte dalle molecole costituenti del polimero, definite *monomeri*) non sono orientate secondo uno schema ordinato ma casuale. Alcune zone presentano invece una struttura cristallina; significa che le catene sono legate insieme da interazioni secondarie, cioè forze intermolecolari (legami a idrogeno, interazioni dipolo-dipolo, Van der Wals, ioniche, ecc.)

Per stabilire quante zone cristalline sono presenti nel materiale si è definito il **grado di cristallinità** definito come la percentuale in peso della sostanza allo stato cristallino rispetto al peso totale.

$$\frac{A}{C} GdC = \frac{C}{(C+A)}$$

Figura 5.3: Grado di cristallinità.

Un grado di cristallinità elevato implica un impacchettamento maggiore e quindi un aumento di densità, rigidezza, durezza e resistenza.

Nella saldatura ad ultrasuoni però, avere un elevato grado di cristallinità, è uno svantaggio:

- I materiali cristallini tendono ad assorbire l'energia di vibrazione rendendo molto meno efficiente il processo di saldatura sia in termini di tempo che energeticamente;
- I materiali amorfi rammolliscono gradualmente in prossimità della temperatura di transizione vetrosa, mentre quelli cristallini hanno una fase di transizione più netta rendendo molto meno controllabile il processo di saldatura e il contenimento del materiale fuso.

Materiali più usati sono gli amorfi come PC, PS, SAN, ABS e PMMA i quali trasmettono meglio le vibrazioni, per questo sono anche i più adatti a essere saldati a ultrasuoni. I materiali semicristallini, come per esempio PA, PP, PE e POM, sono invece adatti per una saldatura più prossima alla superficie di contatto (denominato campo vicino e caratterizzato da una distanza tra superficie di contatto e area di giunzione, inferiore ai 6/8 mm).

5.1.4 Componenti principali del gruppo saldante

Il gruppo saldante è composto da diversi elementi, il generatore si occupa di generare un'onda elettrica sinusoidale con frequenza compresa tra i 20 e i 50 kHz convertendola dalla frequenza di rete di $50/60\ Hz$. Tendenzialmente le frequenze più utilizzate sono le $20-30-35\ kHz$. Inoltre, tramite il generatore, si controlla tutto il processo di saldatura (ad esempio rilevando l'energia trasmessa alla saldatura), si effettua la diagnostica delle componenti a valle dello stesso e raccoglie tutti i dati che consentono di analizzare la bontà del processo.



Figura 5.4: Generatore $Sirius\ Electric$.

Dal generatore, un apposito cavo, trasmette l'onda ad alta frequenza al convertitore. Il convertitore è composto da due ceramiche piezoelettriche le quali, eccitate dalla corrente sinusoidale, iniziano a vibrare in fase con la corrente.



Figura 5.5: Convertitore.

Il booster trasmette la vibrazione generata dal convertitore e ne modula l'ampiezza. Tutti gli elementi del sistema ad ultrasuoni vibrano poichè, essendo eccitati ad una frequenza specifica, entrano in risonanza; ciò implica che sia sempre presente un punto nodale (ad ampiezza nulla) dal quale si diffondono le vibrazioni. Grazie al fatto che in questo punto non ci siano vibrazioni può essere utilizzato come zona di presa del gruppo saldante.

Tutti gli amplificatori (o booster) sono realizzati da barre di titanio.



Figura 5.6: Booster.

Infine si trova il sonotrodo, elemento molto delicato e importante in quanto va a contatto con il componente da saldare e ne trasmette le vibrazioni.

Anche il sonotrodo modula l'ampiezza d'onda quindi è molto importante definirne la geometria. Inoltre è necessario studiare attentamente anche l'impronta della superficie a contatto con il prodotto per ottenere saldature ottimali.



Figura 5.7: Sonotrodi.

Segue lo schema del gruppo saldante completo:



Figura 5.8: Schema gruppo saldante.

Si può osservare come l'ampiezza d'onda (sulla destra) vari in funzione delle superfici degli elementi che compongono il gruppo saldante e che sono presenti diversi punti di nodo dove si può effettuare l'afferraggio del gruppo saldante.

5.1.5 Ricerca nella saldatura ad ultrasuoni

Al momento il limite principale è la durata del sonotrodo che, essendo sottoposto a impatti ad elevata frequenza con la superficie da saldare, si danneggia molto rapidamente. Per questo motivo nel caso dei metalli la vibrazione viene applicata assialmente riducendo l'usura del sistema.

La prossima frontiera degli ultrasuoni, nell'ambito specifico della saldatura, consiste nel riuscire a saldare materiali compositi e materiali metallici (di spessore sempre maggiore) in maniera efficace e affidabile in modo tale da estendere a più settori questa tecnologia sfruttandone i notevoli vantaggi.

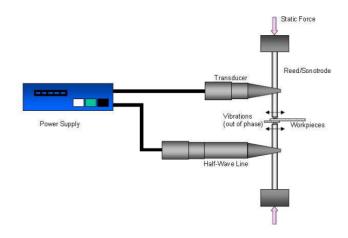


Figura 5.9: Saldatura metalli.

5.2 Stato dell'arte

I brevetti riguardanti l'applicazione della saldatura ad ultrasuoni su macchine reggiatrici emersi dalla ricerca effettuata prima di intraprendere il progetto sono i seguenti:

- \bullet SIGNODE Strapping device with an ultrasonic welding device
- $\bullet~OMS$ Compact strapping head
- \bullet MOSCA Ultrasonic welding apparatus

Nella domanda di brevetto della *SIGNODE* viene presentato un sonotrodo che consente di effettuare una saldatura inclinata, significa che l'asse del sonotrodo (12) non è perpendicolare rispetto alla reggia; ciò comporta un notevole vantaggio nella riduzione degli ingombri. Inoltre il sonotrodo presenta due superfici di saldatura (21-34) quindi, quando si usurerà la prima faccia si potrà utilizzare la seconda raddoppiando la vita del sonotrodo stesso. [7]

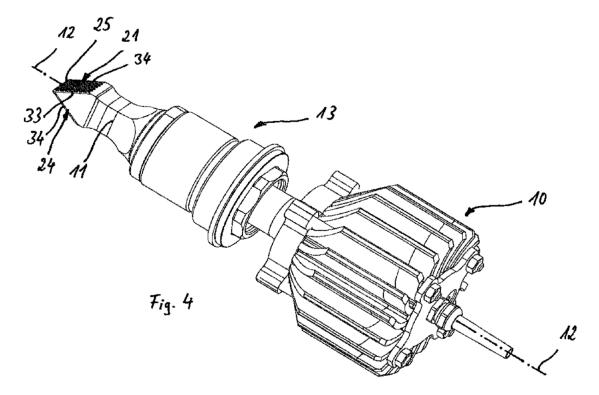


Figura 5.10: Brevetto SIGNODE.

Nel 2015 la *OMS* ha brevettato una testata di reggiatura compatta pensata per le presse in cui è presente la saldatura ad ultrasuoni; la testata è molto compatta grazie ad un sistema di camme e leve (32-33) che sostituisce il classico albero a camme e consente di controllare il gruppo saldate e le pinze che tengono la reggia in posizione durante il processo di reggiatura. [8]

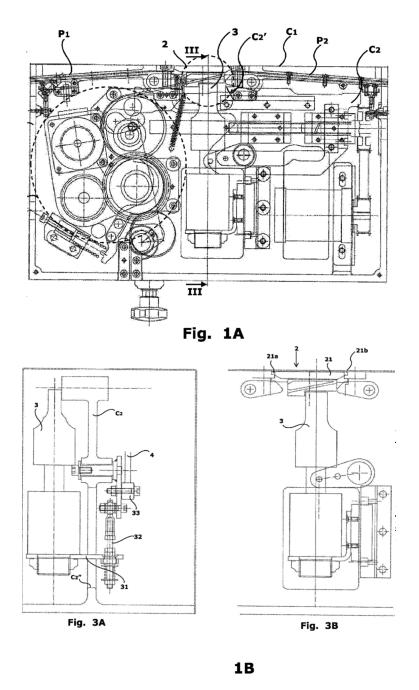


Figura 5.11: Brevetto *OMS*.

L'ultimo brevetto preso in esame è della MOSCA. Questa azienda ha brevettato una particolare impronta del sonotrodo e del contrasto che consiste nell'aver distribuito la zigrinatura superficiale (16-18) equamente fra questi due componenti raggiungendo livelli di tenuta della saldatura superiori rispetto a un sistema classico in cui il contrasto è completamente liscio. [9]

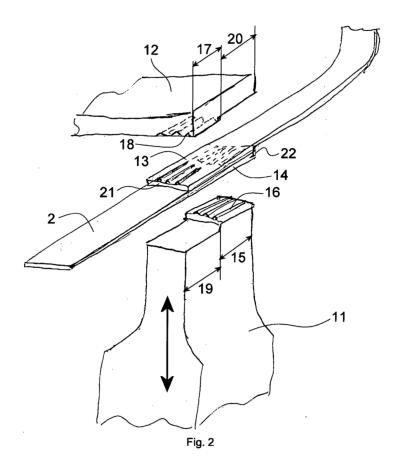


Figura 5.12: Brevetto MOSCA.

5.3 Analisi FEM di sonotrodi per saldatura ad ultrasuoni

In tutti i sistemi di saldatura ad ultrasuoni il trasduttore piezoelettrico genera vibrazioni meccaniche trasformando la corrente elettrica ad alta frequenza in arrivo dal generatore; questa ampiezza non è quasi mai sufficiente per il processo di saldatura.

Per questo motivo si utilizza il sonotrodo che svolge il compito di amplificare l'onda generata dal trasduttore.

Esistono sonotrodi di tutte le forme e dimensioni, vengono ampiamente personalizzati per ogni singola applicazione al fine di garantire le caratteristiche meccaniche ed estetiche della saldatura a patto che, come gli altri componenti, continuino a essere risuonanti alla frequenza operativa. Le frequenze comunemente più utilizzate sono:

$$f_{res} \approx 20 \div 30 \div 35 \div 40 \ [kHz]$$

Maggiore è la frequenza utilizzata minori sono le dimensioni del gruppo saldante ma anche la potenza in gioco diminuisce, si riducono l'ampiezza e le aree saldabili. Quindi per saldare componenti di grosse dimensioni si utilizzano sempre $f_{res} \approx 20 \ [kHz]$.

Le forme di partenza per il dimensionamento di un sonotrodo sono: cilindrico, conico, a gradino ed esponenziale.

Come è già stato accennato, il sonotrodo viene modificato in base all'applicazione ma devono essere rispettate determinate caratteristiche dinamiche che possono essere determinate in fase di progettazione.

Determinare queste caratteristiche risulta semplice solo per sonotrodi cilindrici, se le geometrie diventano più complesse (come nella maggior parte dei casi) conviene ricorrere ad un'analisi modale e armonica ad elementi finiti.

I due parametri fondamentali che caratterizzano un sonotrodo sono la frequenza di risonanza, che si deve avvicinare il più possibile alla frequenza caratteristica del generatore, e da un fattore di amplificazione definito come:

$$q = \left| \frac{\lambda_{out}}{\lambda_{in}} \right|$$

Dove λ_{out} è l'ampiezza in uscita dal sonotrodo mentre λ_{in} è l'ampiezza in ingresso al sonotrodo (determinata dal trasduttore piezoelettrico).

Tendenzialmente l'obiettivo è quello di ottenere q > 1.

Per una rapida stima del fattore di amplificazione si può anche effettuare il rapporto tra l'area superficiale d'uscita e l'area superficiale a contatto con il trasduttore, del sonotrodo; questa è una stima non molto precisa e soprattutto non sempre affidabile poichè sono sufficienti pochissime modifiche al sonotrodo per ottenere grandi variazioni di q.

La soluzione analitica delle vibrazioni libere di sonotrodi a sezione variabile A(x) espressa nella seguente forma:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = c_p^2 \left[\frac{1}{A(x)} \frac{\partial A(x)}{\partial x} \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \right]$$

Dove u(x,t) è lo spostamento del segnale ultrasonico nella posizione x e al tempo t, A(x) è la sezione alla distanza x mentre $c_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ corrisponde alla velocità del suono nel mezzo (E è il modulo di Young mentre ρ la densità). Per r(x) = costante l'equazione diventa:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = c_p^2 \, \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}$$

Questa equazione differenziale alle derivate parziali viene divisa in due equazioni differenziali ordinarie:

$$\frac{\partial^2 U(x)}{\partial x^2} + \frac{\omega_0^2}{c_n^2} U(x) = 0$$

$$\frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} + \omega_0^2 T(t) = 0$$

Dove ω_0 è la frequenza naturale del sonotrodo.

Adimensionalizzando le coordinata longitudinale e quella radiale e introducendo $\beta = \frac{\omega_0}{c_p} l_0$ si ottiene:

$$\frac{\partial^2 \Psi(\xi)}{\partial \xi^2} + \beta^2 \Psi(\xi) = 0$$

La cui soluzione è:

$$\Psi(\xi) = A \cos(\beta \xi) + B \sin(\beta \xi)$$

Siccome stiamo calcolando le vibrazioni libere del sonotrodo le condizioni al contorno sono nulle quindi sia in $\xi = 0$ che in $\xi = 1$ si pone u(x,0) = 0; andandole ad applicare all'equazione precedente si ottiene:

• Lunghezza d'onda adimensionalizzata del k^{th} (dove k = 1, 2, ...) modo di vibrare:

$$\lambda_k = \frac{2\pi}{\beta_k} \frac{2}{k}$$

ullet La frequenza naturale del k^{th} modo di vibrare:

$$f_{0k} = \frac{k}{2l_0} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Per analizzare gli effetti dinamici desiderati si considerano solo i primi due modi propri per k=1 "mezz'onda" e k=2 "onda"

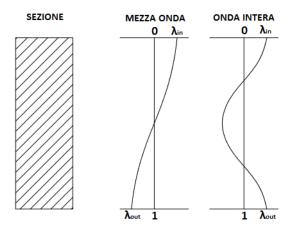


Figura 5.13: Modi propri - sonotrodo cilindrico.

I punti in cui l'ampiezza è pari a zero sono definiti punti di nodo. [10-12]

Per geometrie più complesse si deve utilizzare la simulazione agli elementi finiti. Il software che è stato utilizzato per la progettazione e l'analisi dei sonotrodi è *ANSYS*. Il comportamento dinamico di un sistema meccanico strutturale può essere modellato mediante:

- modello a parametri *LUMPED*, matrice schematica di elementi di massa connessi da molle e ammortizzatori;
- modello agli elementi finiti, continuo strutturale approssimato da elementi finiti;
- dinamica *MULTIBODY*, ogni parte del sistema è un corpo interconnesso con diversi tipi di forza o di vincoli geometrici

L'equazione di partenza è:

$$[M]{\ddot{u}} + [C]{\dot{u}} + [K]{u} = {F(t)}$$

Utilizzando il principio dei lavori virtuali si ottiene un'equazione integrale di bilancio energetico dinamico:

$$\{\delta u\}^{T} \{f\} + \int_{A} \{\delta u\}^{T} \{t_{0}\} dA + \int_{V} \{\delta u\}^{T} \{\phi\} dV = \int_{V} \{\delta \epsilon\}^{T} \{\sigma\} dV + \int_{V} \{\delta u\}^{T} \rho \{\ddot{u}\} dV + \int_{V} \{\delta u\}^{T} c_{s} \{\dot{u}\} dV$$

•
$$\int_{V} {\{\delta\epsilon\}^T \{\sigma\} dV}$$

Lavoro interno

•
$$\{\delta u\}^T \{f\} + \int_{A} \{\delta u\}^T \{t_0\} dA + \int_{V} \{\delta u\}^T \{\phi\} dV$$
 Lavoro delle forze esterne

•
$$\int_{V} \{\delta u\}^{T} \rho \{\ddot{u}\} dV + \int_{V} \{\delta u\}^{T} c_{s} \{\dot{u}\} dV$$

Lavoro dinamico interno

Introducendo le funzioni di forma [n]:

$$\{\delta s\}^{T} \{f\} + \{\delta s\}^{T} \int_{A} [n]^{T} \{t_{0}\} dA + \{\delta s\}^{T} \int_{V} [n]^{T} \{\phi\} dV = \{\delta s\}^{T} \int_{V} [b]^{T} [E] [b] dV \{s\} + \{\delta s\}^{T} \int_{V} \rho[n]^{T} [n] dV \{\ddot{s}\} + \{\delta s\}^{T} \int_{V} c_{s} [n]^{T} [n] dV \{\dot{s}\}$$

Da cui si ricava l'equazione matriciale dinamica:

$$[k]{s} + [m]{\ddot{s}} + [c]{\dot{s}} = {f} + {f_e}_{t_0} + {f_e}_{\phi}$$

Nella quale [m] è la matrice di massa mentre [c] è la matrice di smorzamento. Per l'analisi modale che sarà svolta successivamente l'equazione della dinamica può essere semplificata rimuovendo le forzanti e ponendo lo smorzamento pari a zero. [13-14]

Quindi si procede al calcolo delle frequenze naturali risolvendo il seguente determinante:

$$det([K] - \omega^2[M]) = 0$$

Dopo aver estratto le frequenze naturali si può procedere al calcolo dei modi propri risolvendo il seguente sistema lineare: [15]

$$([K] - \omega^2[M])\{\phi\} = \{0\}$$

Per i modelli FEM 3D questo approccio può essere molto dispendioso a livello di tempo di calcolo e di memoria occupata e quindi poco efficiente. Nel caso dell'analisi FEM modale si risolve questo problema con algoritmi a ordine ridotto:

- Guyan Reduction
- Subspace Iteration

Si può, inoltre, descrivere il comportamento del componente con coordinate modali:

$$\{s\} = [\Phi]\{X\}$$

Dove $[\Phi]$ è la matrice delle m forme modali e $\{X\}$ sono le m-generalizzate coordinate modali.

La parte di calcolo appena esposta viene eseguita dal calcolatore nella fase di SOLUTION del programma.

L'intero processo da seguire per ottenere la simulazione modale è il seguente: [16-17]

- Importazione del modello 3D del sonotrodo in esame (file .IGES)
- Definizione dell'elemento costituente la mesh
- Inserimento delle proprietà fisiche del materiale
- Meshing
- Applicazione delle condizioni al contorno
- Fase di Solution
- Fase di Post Processing

Per quanto riguarda l'importazione del file 3D del sonotrodo è sufficiente convertire il file CAD 3D dal formato utilizzato dal software di disegno al formato universale .IGES riconosciuto da ANSYS. Ad importazione avvenuta è molto importante verificare, anche in assenza di segnali di errore, che l'elemento sia un solido e non una composizione di aree superficiali.

Entrati nell'ambiente *Pre Processor* si va a definire l'elemento che costituirà la mesh. Il primo elemento preso in esame è il SOLID45.

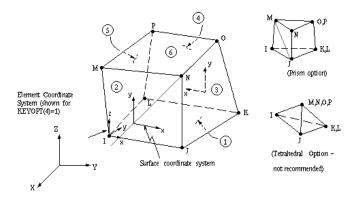


Figura 5.14: Elemento - SOLID45.

Si tratta di un elemento definito da otto nodi ciascuno con tre gradi di libertà, la pressione va imposta sulle superfici. Presenta diverse opzioni tra cui l'introduzione di extra-shapes (ulteriori possibilità di deformazione che rendono l'elemento più flessibile) e la possibilità di utilizzare una integrazione ridotta uniforme per ridurre i tempi di calcolo e le dimensioni dei file di output ma è meno accurata di quella standard. Per valutare l'accuratezza della forma ridotta si valuta il seguente rapporto:

$$\frac{Artificial\ energy}{Total\ energy} < 5\%$$

Se non si verifica questa condizione è necessario raffinare la mesh o cambiare elemento.

L'elemento SOLID95 è una versione di ordine superiore rispetto al SOLID45 che può accettare deformazioni più irregolari senza perdere molta accuratezza, è molto utile per modellare superfici curve, motivo per cui si adatta molto bene ai sonotrodi che presentano raccordi e curve anche complesse. Questo elemento è composto da 20 nodi ciascuno con tre gradi di libertà.

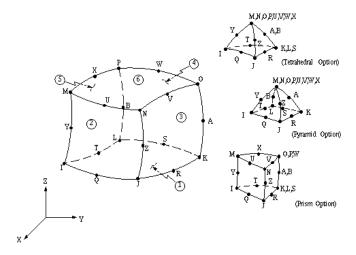


Figura 5.15: Elemento - SOLID45.

Una delle opzioni di questo elemento è l'utilizzo della matrice di massa LUMPED che, combinata con una riduzione di Guyan, può dare risultati migliori rispetto alla matrice CONSISTENTE che è più precisa per soluzioni non ridotte.

Ovviamente essendo un elemento più "flessibile" la matrice può essere meno fitta e quindi consente di arrivare a convergenza con un numero inferiore di elementi.

In seguito alle considerazioni effettuate si è utilizzato l'elemento SOLID95 in tutte le simulazioni esposte in questa tesi. [18]

Si procede inserendo le proprietà fisiche del materiale in questo caso, trattandosi di sonotrodi prototipo, è alluminio:

Densita'	2700	$[Kg/m^3]$
Modulo di elasticita'	70	[GPa]
Coeff. di Poisson	0.33	-

Tabella 5.1: Proprietà fisiche alluminio.

Per la fase di meshing il primo parametro da impostare è la dimensione degli elementi precedentemente definiti.

per determinare quale dimensione usare si è eseguito uno studio di convergenza della mesh in cui si è andato a rilevare l'errore residuo tramite il comando PRERR, l'obiettivo è quello di ottenere un $PRERR \approx 5$. Una simulazione più precisa non avrebbe senso poichè l'errore statistico delle proprietà fisiche del materiale si aggira su quell'errore percentuale.

Molto utile è anche attivare l'opzione *Smart Size* che consente di adattare meglio la mesh a geometrie particolarmente piccole o complesse.

Eseguita la mesh si passa alla definizione delle condizioni al contorno tenendo conto delle seguenti considerazioni:

- La lunghezza del sonotrodo deve essere pari o un multiplo della metà della lunghezza d'onda ultrasonica:
- Il fattore di amplificazione deve essere al massimo pari a q=5 per garantire la validità dell'assunzione della presenza di sole onde longitudinali.
- Se il sonotrodo è perfettamente accordato con il trasduttore lo si può ritenere libero di muoversi $u'(x=0)=0 \ u'(x=L)=0$

Quindi, come prima analisi, si lascia il sonotrodo libero ad entrambe estremità, così da trovarne il modo proprio più vicino ai $36 \ [kHz]$ (frequenza a cui lavora il trasduttore scelto).

Successivamente, siccome il generatore, all'avvio, effettua una scansione in un range di frequenza vicino ai 36~[kHz] per accordarsi con il sonotrodo, si può effettuare una simulazione in cui, sulla faccia superiore del sonotrodo, si applica una forzante armonica di ampiezza pari al valore di uscita del trasduttore (14 $[\mu m]$) ad una frequenza pari al modo proprio più vicino ai 36~[kHz] del sonotrodo.

Grazie a quest'ultima simulazione si può ricavare il valore preciso di ampiezza sulla superficie del sonotrodo a contatto con il materiale da saldare e il fattore di moltiplicazione q.

Passando alla fase di *Solution* si deve selezionare la simulazione modale, definire il range di frequenze in cui eseguirla (in questo caso $34 \div 38 \ [kHz]$) e quanti modi propri calcolare nel suddetto range. Si procede avviando la simulazione e attendendo il messaggio *Solution is DONE*.

Il passaggio finale è analizzare i risultati ottenuti nell'ambiente Post Processing.

Dalla prima analisi (estremi liberi) si va a estrarre il modo proprio più vicino ai $36 \ [kHz]$ e, andandone a plottare la deformata, si verifica che lo spostamento sia il più possibile uniforme e solo in direzione assiale, se nessun modo proprio vicino a questa frequenza presenta una deformazione principalmente assiale significa che il sonotrodo è mal dimensionato ed è necessario andare a modificare la geometria. Quando si otterrà una deformazione prevalentemente assiale e, possibilmente, un solo modo proprio vicino alla frequenza del sistema, si potrà passare ad eseguire e ad analizzare la seconda simulazione.

Della seconda analisi sarà importante plottare nuovamente lo spostamento e misurarlo sulla faccia inferiore.

L'obiettivo è quello di ottenere un'ampiezza sufficientemente elevata da saldare in tempi ragionevoli il materiale della reggia (PET o PP); ovviamente più l'ampiezza è ampia più si trasferisce energia alla saldatura e i tempi si riducono.

Risulta molto importante raggiungere l'ampiezza il più alta possibile ($q \approx 3 \div 4$) poichè, se risultasse eccessiva, può essere ridotta dal generatore ma se non raggiungesse un livello sufficiente per saldare l'unica soluzione sarebbe quella di riprogettare un sonotrodo differente.

Un'altra cosa molto importante da tenere in considerazione è l'uniformità di distribuzione dello spostamento nella sezione del sonotrodo e che il punto di nodo (zona in cui lo spostamento risulta circa nullo) sia nella zona centrale del sonotrodo e che, in quel punto, lo spostamento sia il più vicino possibile allo zero. [19-20]

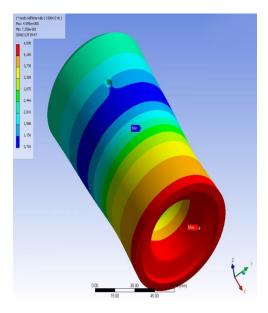


Figura 5.16: Esempio di analisi modale [Sirius Electric]. [21]

I risultati delle simulazione svolte secondo il processo appena descritto sono esposti nei successivi capitoli relativi alle singole tipologie di sonotrodi.

5.4 Saldatura inclinata

Uno degli svantaggi della saldatura ad ultrasuoni è la dimensione del gruppo saldante infatti, anche in assenza di booster, la lunghezza elevata dei sonotrodi e il diametro dei convertitori standard comportano alcune criticità nelle macchine automatiche.

Per integrare al meglio la saldatura ad ultrasuoni in macchinari automatizzati è preferibile riprogettare interamente la macchina. In questo caso però non è stato possibile poichè la testata di reggiatura è alquanto complessa, affidabile e funzionale quindi si è deciso di cercare di installare il sistema ad ultrasuoni nel poco spazio a disposizione sulla testata già esistente.

Dopo aver effettuato alcune ricerche riguardo ad applicazioni di ultrasuoni in macchine automatiche si è deciso di valutare l'introduzione di un sistema di saldatura inclinato.

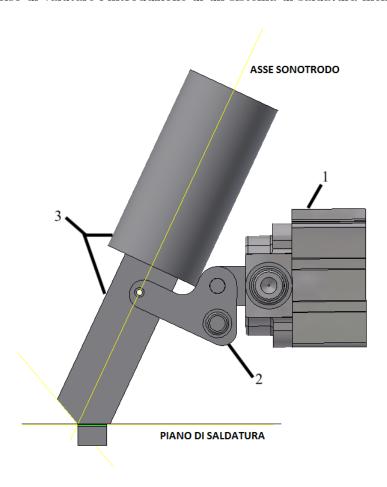


Figura 5.17: Saldatura inclinata.

Il vantaggio di questa soluzione, in cui l'asse del sonotrodo non è perpendicolare al piano di saldatura ma inclinato, è che si riesce ad evitare l'interferenza con l'albero a camme posto sopra il gruppo pressori.

Per l'installazione sarebbe necessario rimuovere il gruppo pressori e installarne uno nuovo senza il pressore centrale e rimuoverne la relativa camma sull'albero.

Segue l'immagine della testata completa.

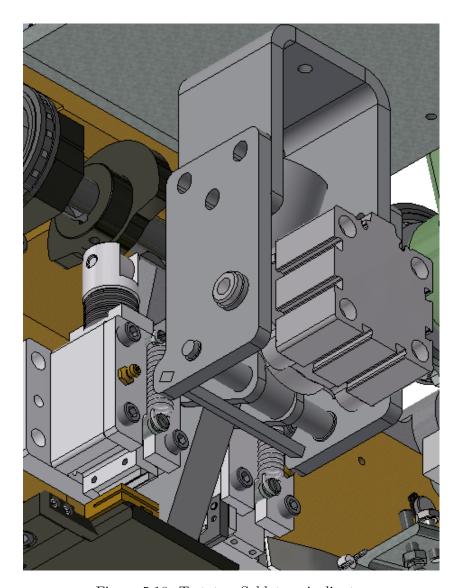


Figura 5.18: Testata - Saldatura inclinata.

L'attuatore pneumatico cilindrico (1) presente in figura, agendo su una staffa a L (2) incernierata in un apposito perno, consente di ruotare e sollevare il gruppo saldante (3) così da lasciare lo spazio al guida reggia nelle fasi iniziali del ciclo e, successivamente, di abbassarsi per la saldatura.

Per il dimensionamento dell'attuatore pneumatico è stato molto importante stimare una forza sufficiente in fase di saldatura e andare a calcolarne la corrispondente richiesta all'attuatore tenendo conto che, nonostante la pressione dell'aria negli impianti industriali arrivi tranquillamente a $6 \div 7 \ bar$, conviene limitarsi a circa $4 \div 5 \ bar$. Successivamente, basandosi sullo spazio a disposizione, si è scelta la corsa del cilindro in modo tale che dia l'escursione voluta al sonotrodo.

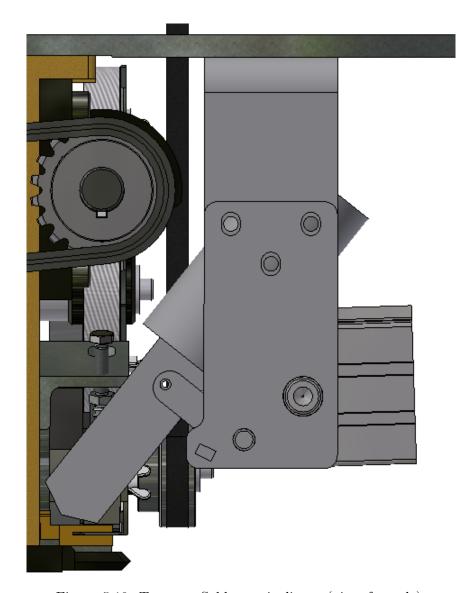


Figura 5.19: Testata - Saldatura inclinata (vista frontale).

Questa soluzione sembrava essere valida, anche se molto complessa, quindi è stata proposta ai tecnici della *Sirius Electric* per un parere da parte di esperti del settore.

Per quanto un'inclinazione così accentuata sia piuttosto estrema, dimensionando correttamente il generatore e il sonotrodo si sarebbe potuti arrivare ad ottenere un sistema funzionate anche se, a causa del momento flettente generato in fase di saldatura, sarebbe stato difficile stimare la durata del sonotrodo.

Si è deciso di non approfondire ulteriormente questa soluzione per via della domanda di brevetto presentata dalla SIGNODE che, qualora venisse approvata, impedirebbe la commercializzazione del sistema di saldatura ad ultrasuoni inclinato. [7]

5.5 Saldatura non in asse

Analizzando approfonditamente gli spazi a disposizione con la collaborazione dell'ufficio tecnico della *Sirius Electric*, grazie a un convertitore di altezza ridotta, si è deciso di studiare una soluzione di saldatura non in asse.

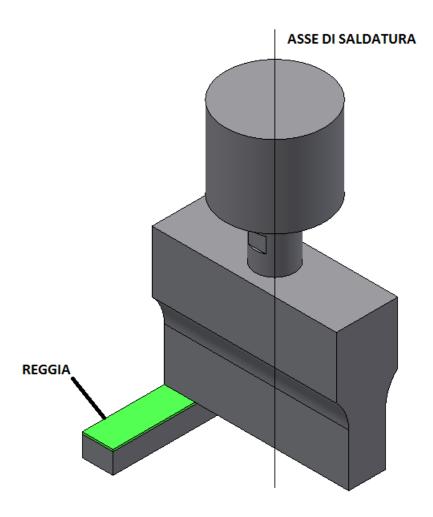


Figura 5.20: Saldatura non in asse.

Grazie a questa soluzione si risolverebbero molti problemi legati alla saldatura inclinata e si riuscirebbe anche ad installare un sistema di movimentazione molto più semplice.

Come si può osservare nelle figure seguenti lo spazio a disposizione risulta essere più che sufficiente per installare la guida e l'attuatore pneumatico necessari per muovere il gruppo saldante.

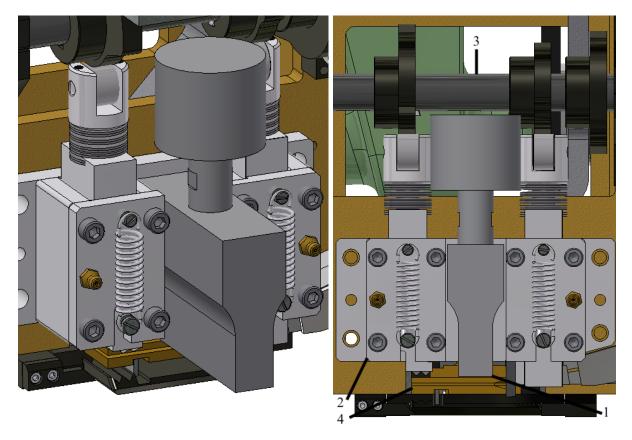


Figura 5.21: Testata - Saldatura non in asse.

Il sonotrodo (1) entra nel gruppo pressori (2) e l'altezza del gruppo completo è inferiore rispetto alla distanza compresa fra albero a camme (3) e guida reggia (4), ma non può essere montato in asse per via dell'elevato diametro del convertitore che andrebbe a toccare i due pressori laterali. Il limite di questa soluzione è l'elevato momento generato in fase di saldatura a causa del disassamento presente, ciò sicuramente andrà a inficiare sulla durata del sonotrodo ma risulta difficile, se non impossibile, prevedere di quanto poichè si tratta di un'applicazione che, secondo la ricerca effettuata, risulta non essere mai stata utilizzata.

Ciò implica una fase di collaudo piuttosto prolungata e costosa dato che è richiesta una durata minima del sonotrodo di quattro anni nel caso di un utilizzo continuativo della macchina regiatrice.

Una stima del numero di saldature effettuate in un anno di uso continuo può essere fatto considerando un numero medio di 4 saldature al minuto che moltiplicate per 24 ore corrispondono a 5760 saldature giornaliere e stimando di mantenere in funzione la reggiatrice 360 giorni all'anno si arriva a circa due milioni di saldature.

Questa stima è la più critica possibile perchè prevede l'uso continuativo della macchina alla massima velocità per tutto l'anno, effettivamente non vengono quasi mai richieste queste prestazioni.

Fatte queste considerazioni si procede con il dimensionamento del sonotrodo.

Dopo aver disegnato il modello CAD 3D si procede con l'importazione nell'ambiente ANSYS

mechanical.



Figura 5.22: Importazione sonotrodo a base rettangolare.

Definiti l'elemento costituente della mesh (SOLID95) e le caratteristiche del materiale si è passati alla fase di *meshing* impostando l'opzione *Smart Size* ad un livello di finezza intermedio pari a 6 e una dimensione dell'elemento pari a 3.

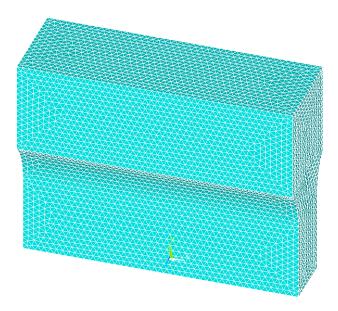


Figura 5.23: Mesh sonotrodo a base rettangolare.

Si ottiene una mesh composta da 40588 elementi.

Di seguito si riportano i valori di frequenza corrispondenti ai modi propri del sonotrodo:

$Modo\ proprio\ N^{\circ}$	$Frequenza\ [kHz]$
1	30973
2	31776
3	32141
4	33257
5	37247
6	38056

Tabella 5.2: Frequenze naturali sonotrodo a base rettangolare.

Valutando le deformate di tutti i modi propri, quella che risulta essere maggiormente assiale e uniforme è la quinta.

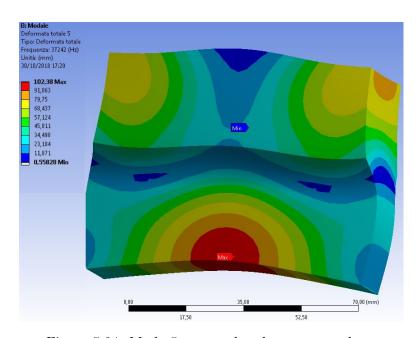


Figura 5.24: Modo 5 sonotrodo a base rettangolare.

Avendo ottenuto un'ampiezza d'onda sulla superficie inferiore del sonotrodo molto bassa (inferiore ai 30 $[\mu m]$) non si riuscirà mai a saldare il materiale con velocità e qualità accettabili anzi, forse non si riuscirà proprio a saldare la reggia poichè non l'energia trasmessa non sarà sufficiente a raggiungere la temperatura di fusione del PET o del PP.

Questa elevata incertezza sulla qualità del processo di saldatura, unita anche ai dubbi sulla resistenza a fatica del sonotrodo data l'applicazione inusuale, hanno portato alla bocciatura di questa soluzione.

5.6 Saldatura tradizionale

Giunti a questo punto ci si è ritrovati davanti ad un bivio, modificare la testata di reggiatura per garantire spazio sufficiente al sistema ad ultrasuoni o trovare un modo per ridurre il diametro del trasduttore.

La *Sirius Electric* ha messo a disposizione un trasduttore speciale di diametro inferiore ma di altezza superiore.

Grazie a questa importante novità ci si è potuti concentrare sullo studio di un sonotrodo il più corto possibile e con un'ampiezza sufficiente per saldare la reggia.



Figura 5.25: Gruppo saldante definitivo.

Gli obiettivi principali erano quelli di ottenere un sonotrodo (1) sufficientemente piccolo da poter essere installato nella macchina reggiatrice e di estendere il più possibile la superficie inferiore per garantire la tenuta della saldatura a carichi elevati; tutto ciò mantenendo un rapporto di amplificazione sufficientemente elevato e le caratteristiche classiche di un buon sonotrodo così da essere certi di ottenere un componente funzionale, efficiente e affidabile nel tempo.

Successivamente si è passati alla progettazione di un carter per il convertitore (2) che consentisse il passaggio del cavo ad alta frequenza sulla superficie laterale poichè lo spazio a disposizione sopra al gruppo saldante è praticamente nullo.

Ciò comporta la suddivisione del carter in due parti, la parte inferiore (3) viene avvitata sul trasduttore (la filettatura è posta in un punto di nodo così che non vibri), successivamente si fanno passare i cavi nella parte superiore (4) del carter che viene poi fissata ad incastro (come se fosse un tappo) sulla parte inferiore avvitata.

Questa soluzione, per quanto complessa, risulta essere la migliore per garantire l'allineamento del sonotrodo con la reggia e l'uscita dei cavi dalla parete laterale.

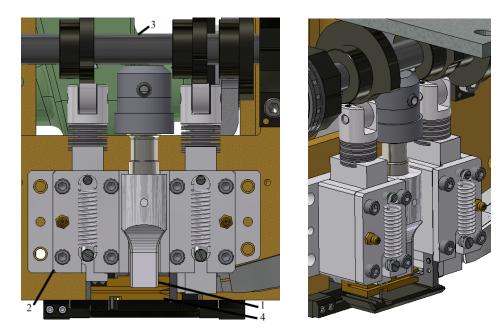


Figura 5.26: Testata - Saldatura tradizionale.

Come si può osservare il gruppo saldante (1) si integra molto bene con la testata di reggiatura. Al gruppo pressori (2) è stato rimosso il pressore centrale e modificati i canali per la lubrificazione centralizzata, all'albero a camme (3) sono state tolte le camme atte al controllo del pressore centrale e della lama calda e alla guida reggia (4) è stata aggiunta una piccola fresatura per guadagnare ulteriori $2\ mm$ di spazio. Come per il sonotrodo a base rettangolare si procede con la verifica FEM delle caratteristiche dinamiche.

Dopo aver disegnato il CAD 3D il primo step consiste nell'importazione del modello nell'ambiente ANSYS mechanical.

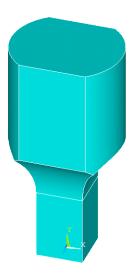


Figura 5.27: Importazione sonotrodo tradizionale.

Definiti l'elemento costituente (SOLID95) della mesh e le caratteristiche del materiale si è potuta generare la mesh impostando Smart Size al livello 6 e la dimensione dell'elemento a 3.

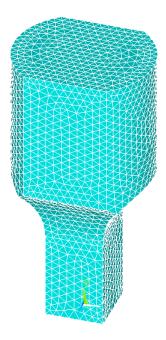


Figura 5.28: Mesh sonotrodo tradizionale.

Si ottiene una mesh composta da 4714 elementi. Di seguito si riportano i valori di frequenza corrispondenti ai modi propri del sonotrodo:

$Modo\ proprio\ N^{\circ}$	$Frequenza\ [kHz]$
1	36002
2	36738
3	38098
4	40291
5	54678
6	54996

Tabella 5.3: Frequenze naturali sonotrodo tradizionale.

Valutando le deformate di tutti i modi propri, quella che risulta essere maggiormente assiale e uniforme è la prima.

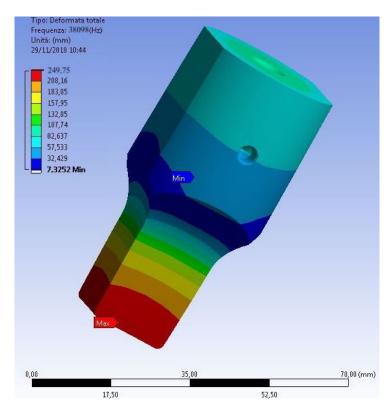


Figura 5.29: Modo 1 sonotrodo tradizionale.

A differenza del sonotrodo a base rettangolare l'amplificazione dell'ampiezza generata da questa configurazione risulta ottimale per saldare il polietilene.

Inoltre lo spostamento risulta piuttosto uniforme e tende ad annullarsi nella zona di nodo che risulta ben centrata nella zona di raccordo per il cambio di sezione.

Questo è ottimale poichè il punto di nodo è anche il punto più sollecitato del sonotrodo dato che l'onda cambia di segno.

Nella pagina seguente sono rappresentate le deformate di altri modi propri, se si eccitasse il sonotrodo a quelle frequenze sarebbe impossibile saldare la reggia poichè lo spostamento risulta essere distribuito lungo tutte le direzioni e non essere affatto uniforme.

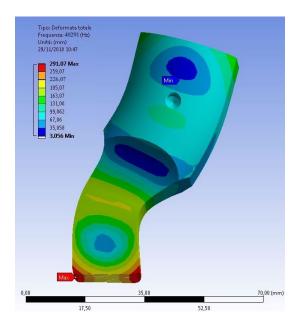


Figura 5.30: Modo 4 sonotrodo tradizionale.

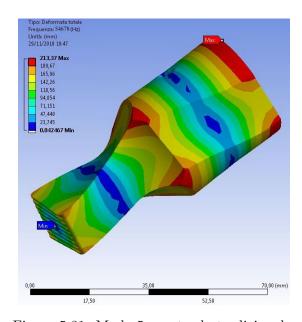


Figura 5.31: Modo 5 sonotrodo tradizionale.

5.7 Ottimizzazione del sonotrodo tradizionale

In questo paragrafo si andrà ad esporre il processo di ottimizzazione del sonotrodo. Nello specifico si tratta dello studio della superficie inferiore del sonotrodo, ossia quella a contatto con la reggia.

Il primo sonotrodo testato viene definito a impronta circolare con direttori di energia piramidali, il vantaggio principale di questa geometria è la possibilità di orientare liberamente il sonotrodo; ciò renderebbe il sistema di afferraggio (definito *clamping*) molto più semplice non dovendo prevedere la possibilità di ruotare il gruppo saldante per l'allineamento.

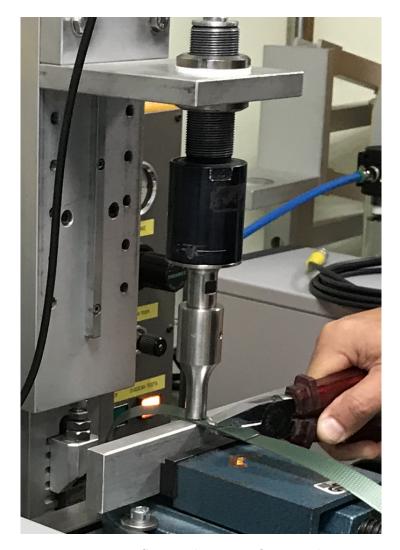


Figura 5.32: Sonotrodo a superficie circolare.

Dopo aver effettuato alcuni test alla ricerca dei parametri di saldatura che potessero iniziare ad avvicinarsi a quelli ideali sono state svolte le prove di trazione sui primi anelli di reggia. Nonostante si sia tenuto conto del fatto che i parametri di saldatura non fossero ancora stati ottimizzati al meglio il carico retto dalla saldatura è risultato molto basso.

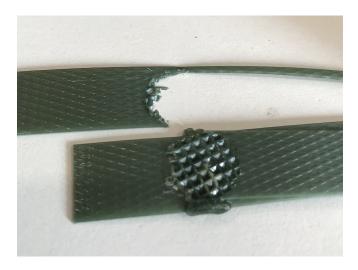


Figura 5.33: Saldatura circolare.

Analizzando la rottura nel dettaglio si può notare che avviene al bordo d'attacco della saldatura.

Ciò significa che la saldatura è resistente, le due reggie sono compenetrate perfettamente l'una nell'altra, ma il sonotrodo danneggia la reggia stessa. Questo danneggiamento è dovuto alla forma stessa del sonotrodo poichè, lasciando un fronte di saldatura curvo, le tensioni si intensificano maggiormente rispetto a una saldatura con impronta rettangolare; inoltre lo spigolo vivo al bordo del sonotrodo tende a tagliare la reggia durante la fase di saldatura.

Per migliorare la tenuta della saldatura si è passati a un sonotrodo a impronta rettangolare sempre con superficie a piramidi e con gli spigoli leggermente raccordati.

Questa geometria comporta una complicazione del sistema di clamping che dovrà consentire la rotazione del gruppo saldante per allinearlo con la reggia.

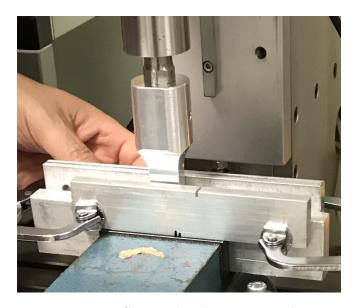


Figura 5.34: Sonotrodo a base rettangolare.

Con questa soluzione i risultati delle prove di trazione sono saliti notevolmente, si sono addirittura triplicati rispetto alle saldature precedenti ma le rotture continuano a presentare le medesime caratteristiche.

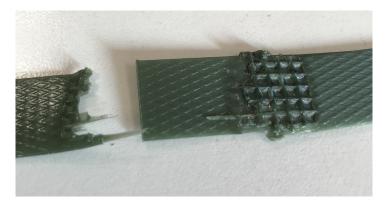


Figura 5.35: Saldatura rettangolare.

Lo step successivo è stato quello di allungare il più possibile la saldatura per poter aumentare il raggio di raccordo degli spigoli e per poter saldare con energia inferiore in modo da danneggiare meno la reggia. Inoltre è stata ulteriormente evoluta la superficie inferiore del sonotrodo la quale risulta essere molto importante poichè va a contenere il materiale fuso all'interno della reggia e a determinare la qualità della saldatura.

Quest'ultima è la soluzione che ha dato i risultati migliori nelle prove a trazione, si è passati dai $400 \ [N]$ del primo sonotrodo ai circa $1600 \ [N]$ dell'ultima versione.

Successivamente è stata eseguita un'analisi approfondita dei parametri di saldatura per valutarne l'influenza sulla resistenza della giunzione, verrà trattata nel capitolo 6.

5.8 Sistema di movimentazione

Dimensionato definitivamente l'intero gruppo saldante composto da sonotrodo, convertitore e carter si è passati alla progettazione del sistema di movimentazione.

La saldatura ad ultrasuoni per essere efficace ed affidabile richiede un montaggio preciso del gruppo saldante, una regolazione accurata del fine corsa della movimentazione e la possibilità di variare la forza con cui il sonotrodo va a premere sulla reggia.

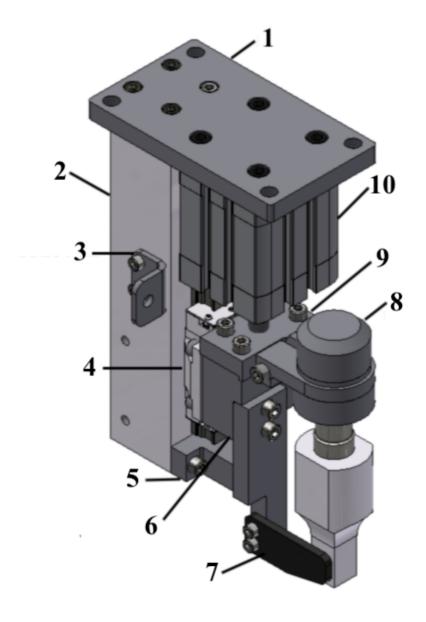


Figura 5.36: Gruppo completo di saldatura.

Per via dei motivi precedentemente elencati e per via del ridotto spazio a disposizione il gruppo saldante non può essere movimentato dall'albero a camme quindi si è introdotto un attuatore pneumatico cilindrico con regolatrice di pressione e un carrello a ricircolo di sfere. Gli elementi che compongono il sistema sono:

- Piastra base (1) e colonna (2); formano la struttura portante del gruppo saldante, è richiesta un'elevata rigidezza e precisione per garantire la complanarità del sonotrodo rispetto al piano di reggiatura.
- Staffa per la presa ad alta frequenza (3); si tratta della presa che connette il cavo ad alta frequenza che arriva dal generatore con quello che va al convertitore.
- Carrello a ricircolo di sfere e guida(4); vengono dimensionati nel sotto paragrafo 5.8.3.
- Finecorsa (5); consente di regolare la corsa massima del gruppo saldante ed impedisce urti accidentali del sonotrodo con il contrasto qualora non fosse presente la reggia nella fase di saldatura.
- Blocco centrale (6); è l'elemento centrale del gruppo saldante e fa da battuta sul finecorsa.
- Coltello e distanziale (7); il coltello taglia la reggia durante la fase di saldatura.
- Gruppo saldante (8); comprende sonotrodo, convertitore e i due carter.
- Clamping (9); consente di fissare il gruppo saldante al blocco centrale.
- Attuatore pneumatico (10); viene dimensionato nel sotto paragrafo 5.8.2.

Nei paragrafi successivi è presente una descrizione dettagliata degli elementi più importanti e complessi sopra elencati.

5.8.1 Progettazione sistema di clamping e del coltello

Il primo componente meccanico progettato è stato il sistema di clamping. Questo sistema deve vincolare il gruppo saldante al carrello a ricircolo di sfere consentendone però la rotazione al fine di effettuare l'allineamento del sonotrodo con la reggia.

La prima soluzione a cui si è pensato è stata quella di progettare un fissaggio a collare in due pezzi simile a quelli che vengono utilizzati per il fissaggio di tubi.



Figura 5.37: Collare commerciale.

Il problema di questo sistema molto semplice è che le viti laterali che servono per stringere i collari sul carter occupano molto spazio e andrebbero a toccare i pressori laterali. Per risolvere questo sistema si è deciso di optare per un afferraggio a collare monoblocco.

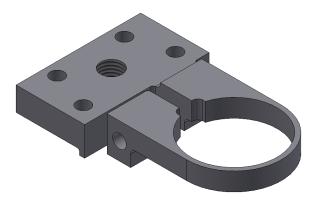


Figura 5.38: Clamping.

In questo modo si risparmia molto spazio garantendo le stesse caratteristiche di fissaggio e regolazione.

Per garantire la tenuta del clamping nella fase di saldatura è stato anche ricavato un apposito spallamento sul carter del trasduttore.

Siccome è richiesto un allineamento preciso sono stati ricavati due spallamenti da usare come riferimenti per il montaggio del clamping sul blocco centrale.

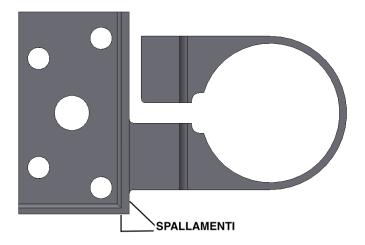


Figura 5.39: Clamping - vista dal basso.

Successivamente si è passati al dimensionamento del coltello, l'obiettivo era quello di ridurre al minimo la pressione necessaria per tagliare la reggia. Il modo migliore per massimizzare la forza a parità di pressione è quello di ridurre l'area su cui si agisce concentrandola in un solo punto, per questo motivo il coltello è stato disegnato con il tagliente inclinato di un apposito angolo γ .

Il coltello è prodotto con un materiale piuttosto difficile da lavorare (K100 - \times 205cr12, acciaio per utensili) data l'elevata durezza necessaria per garantirne la durata, per questo motivo non è stato disegnato in monoblocco ed è presente anche un apposito distanziale che consente di fissarlo al blocco centrale.



Figura 5.40: Coltello.

5.8.2 Scelta dell'attuatore e delle valvole pneumatiche

Per la scelta dell'attuatore pneumatico è stato necessario determinare quale forza massima potesse essere richiesta in fase di saldatura, in questo caso sono risultati essere più che sufficienti 500 [N]. Siccome la testa può essere installata anche con il contrasto pressori verso l'alto è stato necessario stimare il peso di tutte le componenti meccaniche in movimento del gruppo ad ultrasuoni poichè andrebbero a ridurre la pressione del sonotrodo sulla reggia, il peso è pari a circa $2 [kg] \approx 20 [N]$.

Per consentire un eventuale ulteriore aumento della forza e per evitare di far lavorare il cilindro sempre con una pressione di 6 [Bar] si è deciso di optare per un cilindro compatto ADN della FESTO da $\phi=40~[mm]$ che può generare una spinta di $\approx 750~[N]$ e, se alimentato a 4 [Bar], di $\approx 500~[N]$.

Per quanto riguarda la corsa, è stata stimata dal CAD un'escursione del sonotrodo di $\approx 15 \ [m]$ quindi, per evitare di avvicinarsi al fine corsa in fase di spinta, è stato scelto un cilindro con corsa di $25 \ [mm]$. [22]

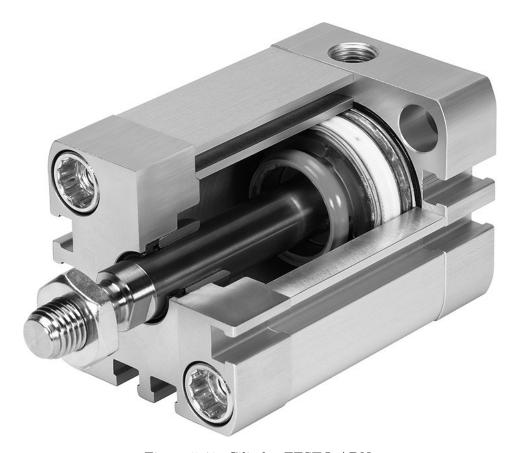


Figura 5.41: Cilindro FESTO ADN.

Per controllare il cilindro sono necessarie due valvole, una regolatrice di pressione (A) e una 5/2 vie standard (B) che consente di alzare o abbassare il cilindro a doppio effetto (C) indirizzando l'aria nelle due apposite camere.

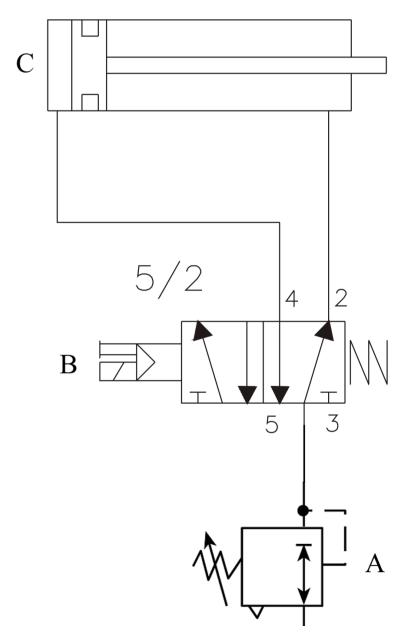


Figura 5.42: Circuito pneumatico.

Siccome la corsa è piuttosto breve è risultato molto utile installare la regolatrice a monte della tre vie così da evitare le oscillazioni di pressione che si genererebbero se fossero disposte al contrario.

Queste oscillazioni di pressioni influiscono sulla qualità e sulla ripetibilità della saldatura.

5.8.3 Dimensionamento della guida a ricircolo di sfere

La guida a ricircolo di sfere utilizzata è prodotta dalla INA.

Si tratta di una unità a ricircolazione a quattro ranghi di sfere, nello specifico il carrello è il modello KWVE15-B-KT che viene installato sulla guida TKVD15/100-20/100.

Si è deciso di utilizzare questo modello perchè presenta il miglior compromesso fra dimensioni e performance.

Carico dinamico C	6100	N
$Carico\ statico\ C_0$	11400	N
$Momento\ M_{0x}$	105	Nm
$Momento\ M_{0y}$	74	Nm
$Momento\ M_{0z}$	74	Nm

Tabella 5.4: Caratteristiche carrello KWVE15-B-KT.

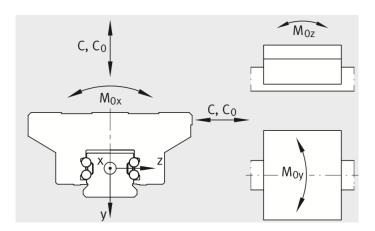


Figura 5.43: Direzioni del carico.

Per verificare il corretto dimensionamento della guida è stata seguita la seguente procedura:

$$Carico\ combinato:\ P = |F| + |M| \frac{C_0}{M_0}$$

$$Durata\ in\ 100\ km:\ L = \left(\frac{C}{P}\right)^3$$

Quindi, considerando una pressione di 2.8 [Bar] corrispondenti a 350 [N] di forza applicata dal sonotrodo sulla reggia, si genera un momento pari a: $M_{0z} = 24$ [Nm]. Svolgendo i calcoli si ottiene P = 4.5 ciò significa che il carrello ha una probabilità del 90% di raggiungere i 450 [km] prima di mostrare segni di fatica.

Nel nostro caso significa una durata, in uso continuativo della macchina, di più di 8 anni. Per il calcolo dei coefficienti di sicurazza statica invece:

$$S_0 = \frac{C_0}{P_0} >> 10$$

$$S_0 = \frac{M_0}{M} = 3.1$$

La condizione di esercizio è: Applicazione generica in cui i parametri di carico e costruttivi sono noti; quindi si richiede che l'S₀ inferiore fra i due sopra calcolati sia maggiore di tre.

La classe di precarico selezionata è la $V1=0.04\ C$ adatta per momenti elevati e rigidezza elevata.

Per la lubrificazione si è scelto di utilizzare il grasso poichè, a seguito dei calcoli effettuati, risulta sufficientemente efficace da non richiedere ulteriori ingrassaggi durante la vita del carello.

Durata in ore:
$$t_{fG} = t_f K_P K_W K_U$$

Dove t_f è un valore tabulato in funzione della velocità che in questo caso risulta essere pari a 10000 [h], $K_P = 1$ dipende dal rapporto fra il carico effettivo e il coefficiente di carico statico, $K_W = 0.9$ considera il percorso da lubrificare mentre $K_U = 1$ dipende dalle condizioni ambientali. A seguito di questi calcoli si ricava una durata dell'ingrassaggio superiore ai 12 anni. [23]

5.9 Montaggio del sistema ad ultrasuoni e integrazione nel processo di reggiatura

Per quanto riguarda il montaggio del gruppo per la saldatura ad ultrasuoni sulla testata di reggiatura è necessario seguire alcuni passaggi fondamentali in modo tale da allineare correttamente il sonotrodo.

Per prima cosa si avvita la piastra di base agli appositi fori presenti sulla testata di reggiatura senza stringere le viti, successivamente si regola l'altezza del gruppo saldante avvitando lo stelo dell'attuatore (posto nella posizione tutto su) in modo tale che il sonotrodo sia a circa $1 \ [mm]$ dalla guida reggia, a questo punto si può stringere il contro dado dello stelo per bloccarlo in posizione.

Il secondo allineamento viene fatto facendo si che il coltello vada a sfiorare il primo pressore. Infine si regola la posizione del sonotrodo in modo che sia allineato con i pressori e con la reggia, serrate le viti e connesso il cavo ad alta frequenza il sistema è pronto per essere collaudato.

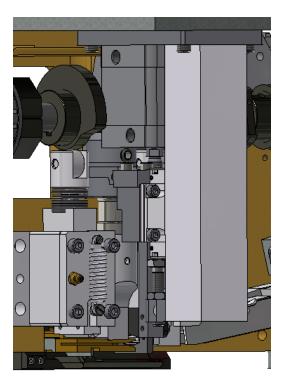


Figura 5.44: Gruppo per saldatura ad ultrasuoni installato.

Integrare la saldatura ad ultrasuoni al processo di reggiatura risulta essere molto semplice: arrivati al momento di avviare la saldatura, il PLC della reggiatrice attiva la valvola pneumatica a tre vie per abbassare il gruppo saldante e invia un segnale analogico al generatore del sistema ad ultrasuoni il quale avvia la saldatura; a saldatura ultimata il generatore restituisce al PLC un segnale di avvenuta reggiatura o di errore e il ciclo riprende normalmente.

Tutti i parametri di saldatura vengono impostati sul pannello del generatore posto vicino a quello del PLC, volendo potranno essere integrati nel PLC facendolo comunicare con il generatore attraverso un sistema di interfaccia *CAN BUS*.

Capitolo 6

Analisi dei risultati

Avendo progettato e prodotto l'intero sistema di saldatura si può passare alla fase sperimentale del progetto.

In questa fase si analizza il processo di saldatura, nello specifico la resistenza a trazione delle saldature.

La reggia utilizzata per effettuare i test è in polietilene, larghezza $15 \ mm$ e spessore $0, 6 \ mm$. La qualità della saldatura è influenzata da diversi parametri quali:

- Tempo di saldatura
- Pressione del gruppo saldante
- Ampiezza d'onda
- Affondamento del sonotrodo

L'obiettivo di questa analisi è quello di stabilire quali parametri consentano di ottenere la maggiore resistenza a trazione delle saldature con questa tipologia di sonotrodo e, successivamente, di confrontare i risultati migliori ottenuti con la saldatura ad ultrasuoni con quelli delle saldature effettuate a lama calda.

Per effettuare le prove si è utilizzata la macchina di trazione *INSTRON 8801* presente nel laboratorio di meccanica ed aerospaziale del Politecnico di Torino. Le caratteristiche tecniche di questa macchina sono le seguenti:

• Corsa attuatore: 150 mm

• Capacità di carico dinamico: $\pm 50~kN$

• Errore di lettura del carico: $\pm 0.5\%$

• Pressione idraulica richiesta: 207 Bar

• Temperatura di utilizzo: $da + 10 a + 38 \,^{\circ}C$



Figura 6.1: INSTRON 8801.

Nelle prove di trazione classiche il provino viene afferrato alle estremità da due appositi morsetti, questo sistema di presa indebolisce il campione, per questo motivo è necessario utilizzare dei provini a forma di "osso di cane" le cui dimensioni sono stabilite da apposite normative. Questa specifica forma fa si che la rottura non avvenga nella zona di presa in cui la pressione delle pinze indebolisce il materiale ma che avvenga al centro provino.

Siccome gli spezzoni di reggia da testare vengono presi da una bobina standard si è deciso di testare i campioni con degli appositi afferraggi che consentono di trazionare anelli di reggia saldati senza andare ad indebolirli con la pressione delle pinze standard.

Gli afferraggi speciali che sono stati costruiti per questa prova sono composti da un anello di diametro $d=50\ mm$ in modo tale da distribuire al meglio le tensioni sulla reggia evitando di indebolirla, da un perno removibile che blocca l'anello ma consente di inserire i campioni di reggia e da una struttura con un apposito codolo che viene afferrato dalle pinze della macchina di trazione.



Figura 6.2: Afferraggio.

Per non introdurre un momento torcente che andrebbe ad inficiare la prova e per testare al meglio la tenuta della saldatura è importante allineare bene i due afferraggi e posizionare l'anello di reggia in modo tale che la saldatura sia in verticale e non dove l'anello viene a contatto con l'afferraggio.



Figura 6.3: Afferraggio.

6.1 Analisi variazione del tempo di saldatura

Per effettuare le prove di trazione è stato definito un set di parametri base da cui partire e da li variare ogni parametro per andarne a valutare l'influenza sulla tenuta della saldatura.

Tempo di saldatura	2	s
Pressione	2	Bar
Ampiezza d'onda	90	%
$Affondamento\ sonotrodo$	0,4	mm

Tabella 6.1: Set parametri base.

Questi parametri di partenza sono stati scelti seguendo i consigli dei tecnici Sirius Electric e basandosi sull'aspeto estetico delle saldature.

Per definire l'aspetto estetico si va ad osservare la presenza di bava eccessiva, la profondità e la completezza dell'impronta del sonotrodo e la presenza di eventuali zone bruciate o non saldate. In alcuni casi l'aspetto estetico della saldatura non corrisponde alla tenuta, come vedremo in seguito, questo è uno di quei casi.



Figura 6.4: Saldatura con parametri base.

Il primo parametro preso in considerazione è il tempo di saldatura. Con la tipologia di generatore scelto si possono controllare separatamente tre tempi diversi:

- T1: tempo di ritardo di avvio vibrazione, consente di premere e stabilizzare correttamente il materiale con le pressione del sonotrodo prima di saldarlo.
- T2: tempo di saldatura, è il tempo che regola la fase in cui il sonotrodo vibra e quindi trasmette energia al materiale, è il tempo più importante da controllare.
- T3: tempo di mantenimento, è il tempo, dopo la saldatura, lungo il quale il sonotrodo continua a premere la reggia ma senza vibrare, serve per dare il tempo alla saldatura di stabilizzarsi e di indurirsi.

Il tempo T1, in questo caso, deve essere semplicemente superiore al tempo che impiega il sonotrodo a compiere la sua corsa per premere la reggia. In altre applicazioni lo si riduce per far si che quando il sonotrodo entra in contatto con il prodotto stia già vibrando a piena ampiezza riducendo il tempo del ciclo di saldatura, in questo caso non sono richieste tempistiche così strette, per cui si è deciso di dare il tempo sufficiente $(T1=0,5\ [s]$ a stabilizzare al meglio reggia.

Stesso discorso viene fatto per il tempo T3, deve essere sufficiente a far si che la saldatura si stabilizzi e che sia solidificata, nel nostro caso è richiesto un tempo abbastanza elevato $(T3 = 2 \ [s])$ poichè, appena termina la fase di saldatura, la reggia viene rilasciata sul pallet e risulta essere immediatamente tensionata.

Per ridurre il tempo T3 si è deciso di introdurre un soffio d'aria che, oltre a raffreddare la saldatura rapidamente consente di mantenere il sonotrodo ad una temperatura più uniforme e quindi di rendere il processo maggiormente ripetibile.

Per quanto riguarda il tempo T2 abbiamo provato ad utilizzare alcuni valori sia superiori che inferiori rispetto ai 2 [s] di base, ovviamente in queste prove gli altri parametri sono rimasti identici.

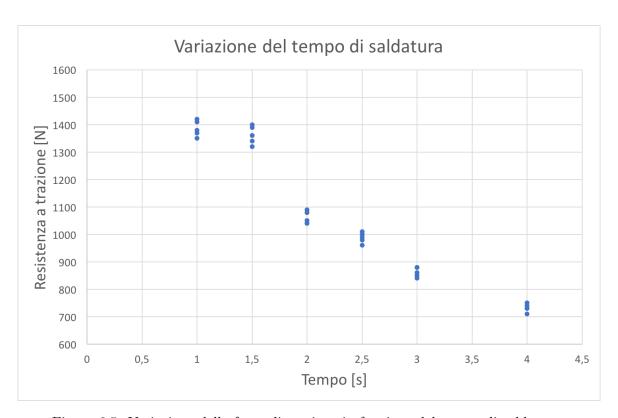


Figura 6.5: Variazione della forza di trazione in funzione del tempo di saldatura.

Si può osservare come per tempi inferiori la resistenza a trazione salga notevolmente. Andando ad analizzare le rotture è emerso che la reggia è stata saldata con un'energia troppo elevata e per troppo tempo, al punto tale che il materiale è si diventato un corpo unico ma è stato danneggiato dalla saldatura stessa che, avendolo riscaldato troppo, lo ha reso fragile. Ciò

spiega perchè le prove con tempi ridotti, nonostante presentino una rottura fragile, abbiano una resistenza superiore.

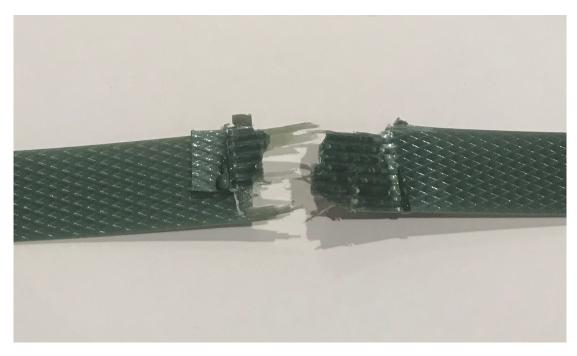


Figura 6.6: Rottura di reggia saldata con parametri base.

6.2 Analisi variazione della pressione

Il secondo parametro che è stato analizzato è la pressione.

Il valore che viene espresso corrisponde alla pressione utilizzata nell'attuatore pneumatico descritto in precedenza.

Per i test la testata è stata posta in verticale così che il gruppo saldante si muovesse orizzontalmente, quindi il peso dei componenti in movimento non contribuisce nè ad aumentare nè a diminuire la forza esercitata dal sonotrodo sulla reggia. Nelle varie applicazioni la testata potrà essere rivolta nello stesso verso dei test (saldature laterali), o orizzontalmente per saldature dall'alto o dal basso; in questi ultimi due casi sarà necessario tenere conto del peso dei componenti in movimento per aumentare o diminuire la pressione dell'aria agente sul cilindro.

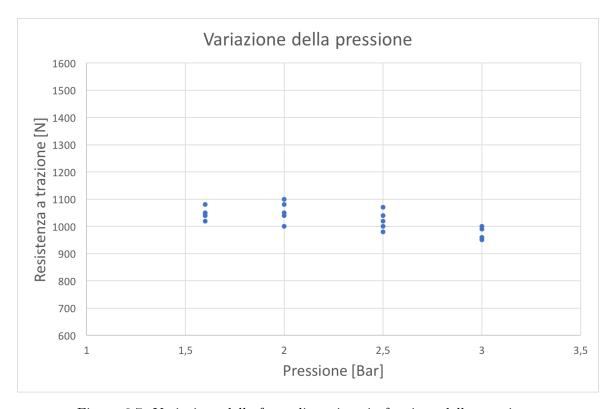


Figura 6.7: Variazione della forza di trazione in funzione della pressione.

Come si può osservare la pressione non influenza in modo particolare la resistenza a trazione della saldatura, ciò è molto importante per due motivi:

- Si può escludere un parametro da quelli che influenzano il processo di saldatura.
- Si può regolare la pressione in modo tale che il coltello abbia una forza sufficiente per tagliare la reggia senza poi doverla andare a ridurre per la fase di saldatura, ciò semplifica il processo e consente di utilizzare una valvola regolatrice di pressione manuale.

6.3 Analisi variazione dell'ampiezza d'onda

Questo parametro viene controllato dal generatore e va ad agire sul trasduttore piezoelettrico che, ricevendo un segnale elettrico più debole, vibra con ampiezza minore rispetto ai 14 $[\mu m]$ che può generare con ampiezza al 100%.

Il sonotrodo amplifica questa ampiezza fino a renderla sufficiente per l'applicazione voluta. Come detto in precedenza è molto importante dimensionare un sonotrodo con fattore di amplificazione piuttosto elevato poichè, se ce ne fosse bisogno, tramite il generatore si può andare a ridurre l'ampiezza d'onda in uscita dal trasduttore e quindi quella finale ma non la si può aumentare.

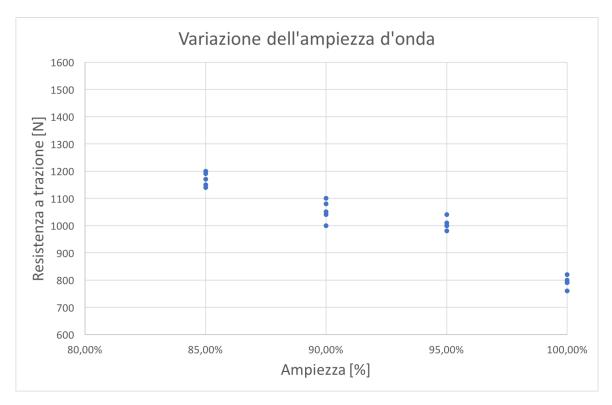


Figura 6.8: Variazione della forza di trazione in funzione dell'ampiezza d'onda.

Come nel caso dell'analisi del tempo, un'ampiezza d'onda troppo elevata causa un surriscaldamento del materiale che porta a rotture fragili della zona saldata.

Sarà necessario trovare poi un compromesso poichè riducendo notevolmente il tempo di saldatura potrebbe essere utile mantenere un elevato valore di ampiezza d'onda così da riuscire a saldare con un'energia importante ma per tempi brevi in modo tale da ottenere comunque un'elevata potenza trasmessa alla reggia ma senza eccessivi aumenti di temperatura.

6.4 Analisi variazione affondamento sonotrodo

L'ultimo parametro preso in considerazione è la regolazione del fine corsa che limita l'affondamento del sonotrodo nella reggia durante la fase di saldatura e mantenimento.

Il valore indicato nel grafico viene misurato con il sonotrodo a contatto con la reggia e corrisponde alla distanza fra la piastra che andrà in battuta con il fine corsa e il fine corsa stesso.

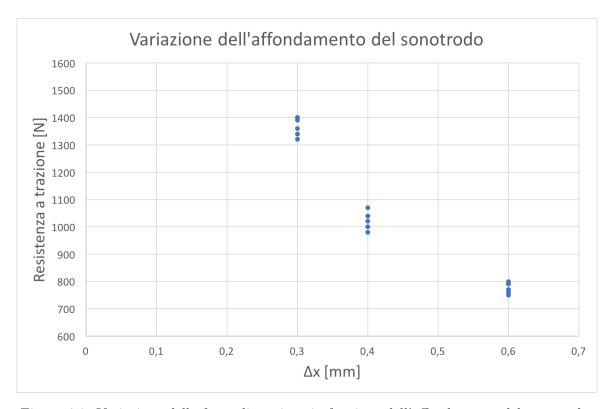


Figura 6.9: Variazione della forza di trazione in funzione dell'affondamento del sonotrodo.

Non sono stati utilizzati valori superiori agli $0,6\ [mm]$ poichè non veniva più raggiunta la battuta nel tempo base di saldatura.

Come si può osservare questo parametro è molto influente sulla tenuta della saldatura e risultati sono in pieno accordo con quanto ipotizzato precedentemente, con i parametri di base si sta surriscaldando la reggia rendendola fragile.

Nel paragrafo successivo verranno combinati tutti i parametri finora analizzati per ottenere la miglior saldatura possibile e confrontarla con quella a lama calda.

6.5 Confronto fra saldatura a lama calda e ad ultrasuoni

Avendo analizzato approfonditamente il processo di saldatura è stato possibile determinare il set ottimale di parametri per questa specifica configurazione scegliendo i migliori valori ottenuti nelle varie prove di trazione di ogni singolo parametro:

Tempo di saldatura	1.6	s
Pressione	3	Bar
Ampiezza d'onda	85	%
$Affondamento\ sonotrodo$	0,3	mm

Tabella 6.2: Set parametri definitivi.

Con questi parametri sono state effettuate diverse prove per stabilire la ripetibilità del processo, caratteristica fondamentale di questo sistema.

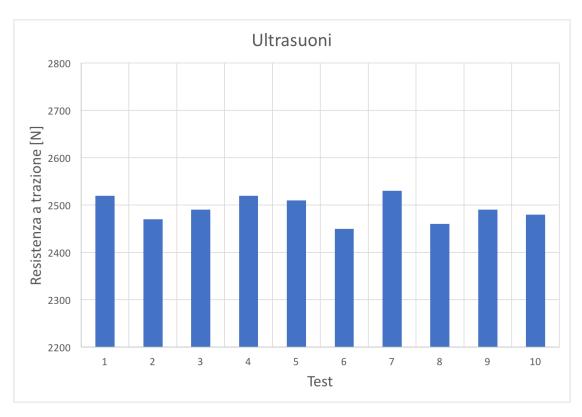


Figura 6.10: Test saldatura ultrasuoni.

I test sono risultati sufficientemente positivi, la dispersione è piuttosto ridotta e il valore di rottura è aumentato notevolmente.

La resistenza a trazione media, ottenuta dalle 10 prove a trazione esposte in figura 6.10, risulta

essere pari a $\approx 2500~[N]$ mentre lo scarto quadratico medio è pari a 27 quindi il 95% delle prove ricade nell'intervallo pari a:

$$Media \pm (1, 96 \cdot Dev.St.) \Rightarrow 250 \pm (1, 96 \cdot 27)$$

L'intervallo in cui ricadranno la maggior parte delle saldature è quindi pari a circa ± 50 [N]; valore più che sufficiente per definire il processo altamente ripetibile.

La stessa analisi viene fatta anche sulle saldature a lama calda.

La resistenza a trazione media risulta essere pari a $\approx 3000 \ [N]$ mentre lo scarto quadratico medio è pari a 130 quindi il 95% delle prove ricade nell'intervallo pari a:

$$Media \pm (1,96 \cdot Dev.St.) \Rightarrow 300 \pm (1,96 \cdot 130)$$

Ciò significa che l'intervallo in cui ricadranno la maggior parte delle saldature è quindi pari a circa $\pm 260~[N]$ per cui alcune saldature non avranno una tenuta notevolmente superiore rispetto a quelle ad ultrasuoni.

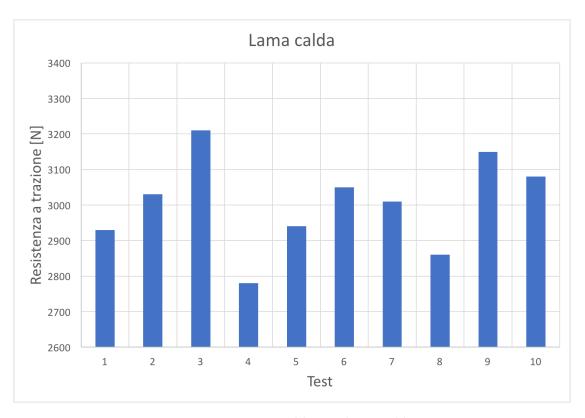


Figura 6.11: Test saldatura lama calda.

Per rendere più semplice e immediato il confronto fra le due tipologie di saldatura è stato preparato il grafico presente nella pagine seguente (Figura 6.12) in cui si può rendere conto della differenza di dispersione e di qualità delle due tecnologie differenti.

La saldatura a lama calda presenta valori di resistenza a trazione leggermente superiori ma il processo è molto meno ripetibile mentre la saldatura ad ultrasuoni risulta essere molto più ripetibile anche se meno resistente.



Figura 6.12: Confronto saldatura lama calda e ultrasuoni.

Due ulteriori analisi da effettuare sono quella energetica e quella di sicurezza che verranno trattate nel paragrafo successivo.

6.6 Analisi energetica e di sicurezza

Tra i vari aspetti da tenere in considerazione per valutare le due tecnologie è molto importante effettuare anche un'analisi energetica del processo di saldatura.

L'analisi è stata effettuata tenendo conto di due situazioni, il caso in cui la macchina reggiatrice venga usata 8 ore al giorno per 220 giorni all'anno al ritmo di 5 saldature al minuto e il caso in cui venga usata continuativamente per 360 giorni all'anno sempre al ritmo di 5 saldature al minuto.

Il trasformatore utilizzato per la saldatura ad ultrasuoni è da 200 [W] ed è sempre acceso quando la macchina è attiva mentre il generatore del sistema ad ultrasuoni è da 500 [W] ma consuma energia solamente nella fase di saldatura.

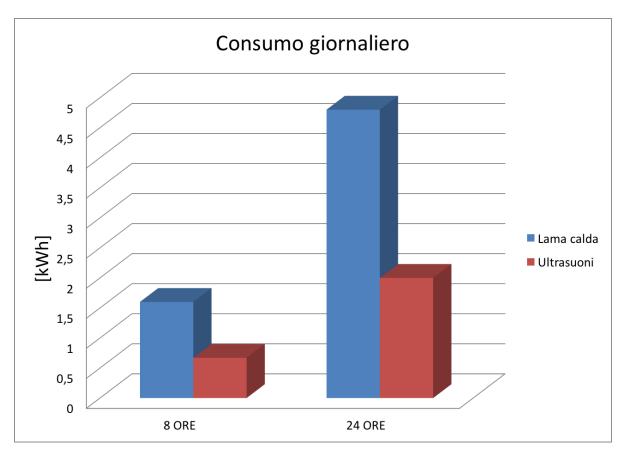


Figura 6.13: Consumo giornaliero.

Nel caso di un utilizzo di sole 8 ore giornaliere la differenza di consumo giornaliero fra le due tipologie di saldature è pari a 1 [kWh] mentre se la macchina viene utilizzata per 24 ore la differenza di consumo sale a 2,8 [kWh].

Si ricorda inoltre che il sistema ad ultrasuoni non ha bisogno di preriscaldamento e di effettuare i cicli di pulizia.

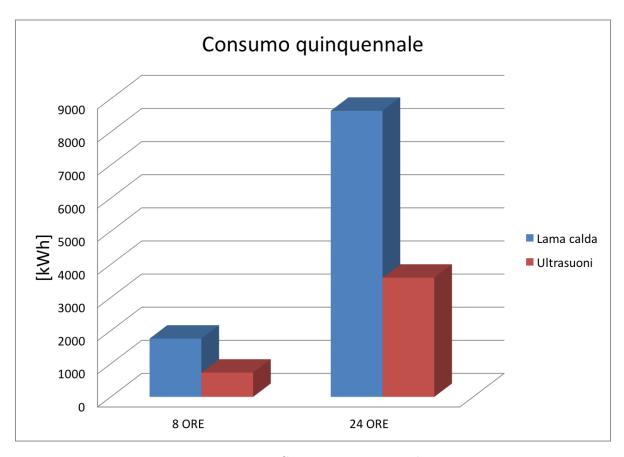


Figura 6.14: Consumo quinquennale.

Nel caso di un utilizzo di sole 8 ore giornaliere la differenza di consumo quinquennale fra le due tipologie di saldature è pari a $1000 \ [kWh]$ mentre se la macchina viene utilizzata per 24 ore la differenza di consumo sale a $5000 \ [kWh]$.

Per quanto riguarda la sicurezza è necessario prendere in considerazione diversi aspetti. Uno dei rischi principali delle reggiatrici a lama calda è quello di ustione dell'operatore perchè, siccome quando la macchina è accesa la lama viene portata a temperature superiori ai $350\,^{\circ}C$, nel caso di un malfunzionamento o di un errore che comporti l'arresto del processo se non intercorre un tempo sufficiente prima che l'operatore stesso tocchi la lama (anche inavvertitamente) rischierà di restarne ustionato.

Anche il sonotrodo si scalda se la frequenza con cui avvengono le saldature è elevata ma non andrà mai a superare i $50 \div 60$ °C e quindi non c'è alcun pericolo nel caso di interventi sulla testata.

Per entrambe le tecnologie di saldatura va tenuto conto del fatto che è presente corrente ad alto amperaggio o voltaggio quindi è necessario isolare correttamente determinati componenti e far si che la corrente si stacchi in caso di avvicinamento dell'operatore alla macchina.

Nel caso della saldatura a lama calda, quando si fonde la reggia e, soprattutto quando si arriva alla fase di surriscaldamento per la pulizia della lama stessa, si produce un'elevata quantità di fumi.

Nel caso di macchine semi-automatiche, in cui l'operatore è vicino alla zona di saldatura, è necessario prevedere una cappa di aspirazione.

Inoltre, quando sarà necessario effettuare delle operazioni di pulizia e manutenzione, la quantità di fuliggine e di sporco accumulati che si troveranno nella zona dei pressori è davvero notevole.

I prodotti presenti nei fumi risultanti dalla fusione della reggia sono:

- Diossido di carbonio
- Monossido di carbonio
- Formaldeide
- Cloruro di idrogeno
- Acido benzoico
- Acido acetico

Il monossido di carbonio prodotto è molto pericoloso ma le quantità prodotte non sono elevate quindi, se l'ambiente in cui si installa la macchina è sufficientemente grande e ventilato non dovrebbe causare problemi agli operatori.

La formaldeide è cancerogena è quindi, nel caso di un esposizione prolungata risulta essere molto pericolosa per la salute.

Il cloruro di idrogeno (comunemente detto acido cloridrico) è altamente corrosivo, può essere pericoloso quindi non deve essere inalato e non deve entrare in contatto con la pelle o con le mucose.

La saldatura ad ultrasuoni non emette fumi quindi tutte queste sostanze non vengono prodotte e non rischiano di essere inalate dall'operatore.

Le macchine che lavorano con gli ultrasuoni possono produrre delle sub armoniche percepibili dall'orecchio umano soprattutto nel caso in cui si utilizzi un sistema a 20 [kHz] con i 35 [kHz] invece non viene prodotto nessun suono fastidioso.

La potenza trasmessa attraverso l'aria inoltre si riduce molto rapidamente (8 volte al raddoppiare della distanza).

Per gli operatori con pacemaker non si sono riscontrati problemi poichè gli ultrasuoni non causano alcuna interferenza o malfunzionamento con gli apparecchi; è necessario però tenere conto che i campi magnetici generati dal trasduttore, se mal isolato, potrebbero disturbare i pacemaker anche se fino ad ora non ne è stato registrato nessun caso.

Capitolo 7

Fase di tensionamento a controllo elettronico

Una fase molto importante del ciclo di reggiatura è quella di tensionamento poichè una tensione adeguata consente di stabilizzare al meglio il carico pallettizato.

Questa operazione avviene dopo quella di recupero della reggia ed è svolta da una puleggia con una superficie zigrinata che viene premuta sulla reggia da un attuatore pneumatico. Imprimendo una pressione sufficientemente elevata si riesce a conferire alla reggia la tensione voluta, ovviamente è necessario tenere conto del limite sopportabile dalla reggia che è inferiore al carico statico di trazione indicato sulle schede tecniche poichè si riduce in funzione della velocità di applicazione del carico (figura 7.1 in cui Rate sta per velocità di deformazione esposta in s^{-1}) . Vi è anche un limite massimo sopportabile dalla testa, per i modelli standard risulta circa $3500\ N$.

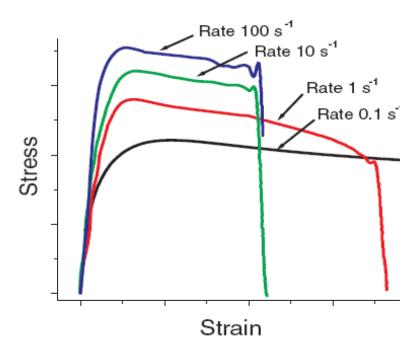


Figura 7.1: Effetto della velocità di deformazione. [3]

Questo effetto della velocità di applicazione del carico (o di deformazione) è dovuto al fatto che, nei materiali semicristallini o amorfi, applicando il carico le fibre si orientano lungo la direzione del carico stesso; questo allungamento aumenta la deformazione consentendo di assorbire maggiore energia.

Quando il carico è applicato troppo velocemente si ha un picco iniziale superiore ma anche una rottura anticipata.

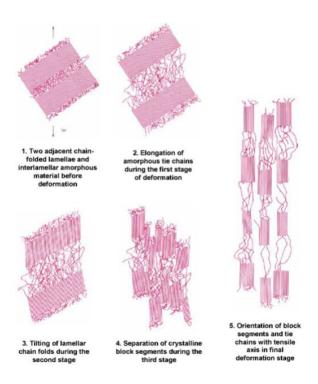


Figura 7.2: Allungamento fibre. [3]

Osservando nel dettaglio il fenomeno di deformazione di un materiale semicristallino si nota che, inizialmente si muovono le zone amorfe del materiale che iniziano a distendersi, successivamente si inclinano le pieghe delle catene lamellari. Infine si separano i blocchi cristallini e si orientano i suddetti blocchi come le catene della parte amorfa.

Fino ad'ora la tensione è stata sempre regolata regolando il tempo di tensionamento.

Dopo che la reggia viene lanciata e bloccata dalla prima pinza iniziano le fasi di recupero e, successivamente, di tensionamento. Per passare alla fase di tensionamento si attende il segnale di un sensore di prossimità che rileva un lieve tensionamento della reggia, il tempo viene conteggiato a partire da questo momento.

Si continua a tendere la reggia per tutto il tempo prestabilito, appena termina l'intervallo di tempo si blocca la reggia con la seconda pinza.

A questo punto viene rimossa la tensione (solo nel tratto di reggia che sta per essere saldato e tagliato) per garantire un taglio ottimale senza eventuali sfilacciamenti.

Il problema di questo sistema è che non si ha un dato preciso e puntuale della tensione raggiunta dalla reggia.

Alla fine del tensionamento potrebbe risultare troppo tesa o, molto più probabilmente, poco tesa a causa delle condizioni variabili della reggia (sporcizia, grasso, superficie) e delle pulegge (usura superficiale, pressione sulla reggia).

Inoltre il tempo viene preimpostato e deriva da misure sperimentali che non possono garantire al 100% la copertura di tutte le condizioni di utilizzo della macchina, ciò comporta modifiche manuali tramite pannello di controllo da parte dell'utente.

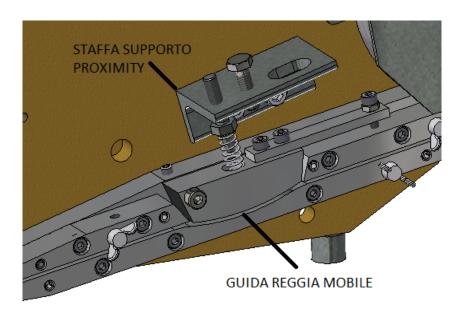


Figura 7.3: Tensionamento a "tempo".

7.1 Progettazione del sistema di misura

Per ovviare ai limiti imposti dal controllo temporizzato della fase di tensionamento si è pensato di introdurre un sistema di controllo della tensione della reggia.

Il nuovo sistema verrà posizionato al posto del sensore di prossimità sfruttando la curva già presente sulle guide della reggia.

I principali fattori di cui tenere conto sono:

- Attrito e scorrevolezza reggia;
- Ingombri e peso del sistema;
- Efficacia e affidabilità delle misurazioni;
- Costo delle celle di carico;

L'attrito è molto importante per stabilire in che materiale produrre le componenti che saranno in contatto con la reggia poichè, dato che le macchine vengono progettate per resistere a un elevato numero di reggiature, si deve tenere conto dell'usura di queste parti. Inoltre, per tensionamenti elevati, l'attrito genera una componente di forza tangenziale che potrebbe danneggiare il sistema di misura.

Molto stringenti risultano anche gli ingombri poichè stiamo andando ad inserire un nuovo sistema in una testata non progettata appositamente per accoglierlo; ad esempio i sensori di prossimità agenti sull'albero a camme scendono molto in basso nella zona di misura.

Ovviamente, installando questo sistema su di una macchina molto affidabile deve essere duraturo e preciso senza andare ad incidere troppo sui costi della testata.

Come prima soluzione, per andare ad ovviare ai problemi di attrito e usura del sistema di misura si è pensato ad una cella di carico apposita per pulegge con cuscinetto integrato modello PS79-104 della GICAM con portata massima pari a 1000 [N] e errore relativo pari allo 0.2%. [24]



Figura 7.4: Cella di carico per pulegge.

Partendo da questa cella sono state progettate le componenti meccaniche necessarie per il fissaggio alla testata di reggiatura ed è stata disegnata la puleggia.

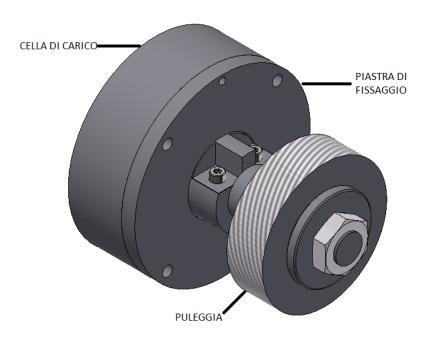


Figura 7.5: Cella di carico per pulegge.

Il problemi principali di questa soluzione sono che la cella di carico adeguata al carico da misurare è di dimensioni troppo elevate ed è molto costosa, inoltre sarebbe necessario lavorare una delle pareti interne della testata che, essendo un pezzo stampato, risulta ancora grezza.

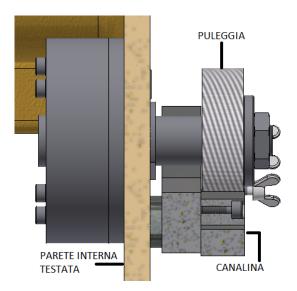


Figura 7.6: Testata con cella di carico e puleggia.

Per sopperire ai limiti della soluzione appena proposta si è deciso di introdurre una cella di carico classica sulla quale va a premere una guida che impone alla reggia la curvatura necessaria per ricavare una forza proporzionale alla tensione e misurabile dalla cella.

Resta il problema di decidere come tenere la guida perpendicolare alla cella di carico consentendole però il movimento verticale.

La prima soluzione sviluppata è la seguente:

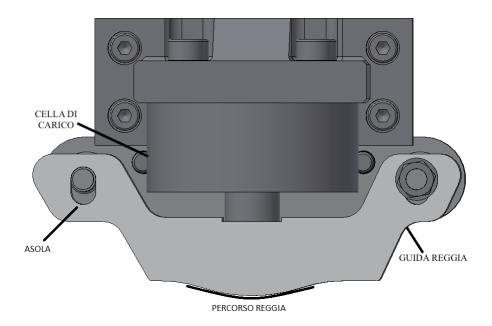


Figura 7.7: Guida reggia con asole.

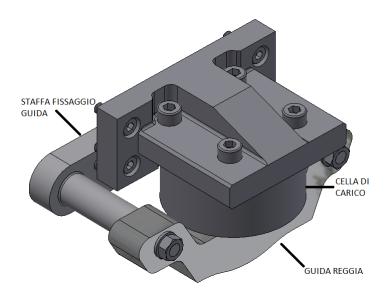


Figura 7.8: Confronto sistemi di misura.

Le asole consentono il movimento verticale alla guida che può trasmettere così la forza alla cella, il problema è che delle asole non garantiscono la precisione desiderata, si dovrebbero utilizzare delle guide prismatiche ingombranti e costose.

Molto probabilmente la guida si sbilancerebbe da un lato per via della forza tangenziale agente sulla stessa, inoltre la staffa di fissaggio si va ad appoggiare sulla parete interna della testata che andrebbe lavorata appositamente.

Per ovviare a queste ulteriori criticità si è trovata questa soluzione:

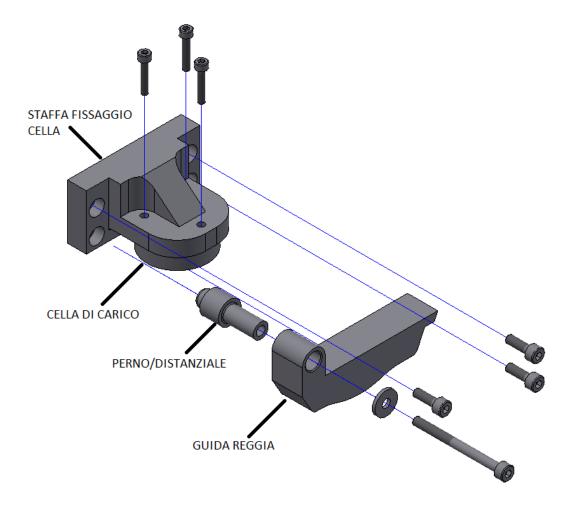


Figura 7.9: Soluzione definitiva.

Il perno (o distanziale) viene piantato nella staffa di fissaggio della cella per far si che, sotto l'azione del carico tangenziale, la guida, che è libera di ruotare, non si muova lateralmente. I fori per il fissaggio sulla testa della staffa sono di diametro leggermente superiore allo standard per consentire il centraggio del sistema di misura.

Nell'immagine successiva si può vedere il gruppo di misura installato sulla testata.

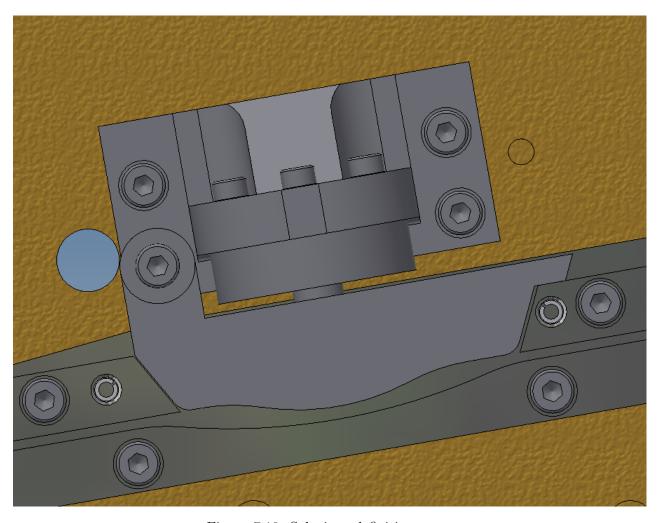


Figura 7.10: Soluzione definitiva.

Durante l'installazione si deve portare il gruppo tutto a sinistra e in basso in modo tale che l'angolo che forma la reggia contro la guida sia quello previsto.

Il contatto della guida con la cella di carico è ottimale poichè la superficie della cella non è piatta ma forma un arco così che, anche con la rotazione della guida, ci sia un punto solo di contatto.

7.2 Calcoli trigonometrici

Per calcolare la forza generata dalla reggia sulla cella di carico, durante la fase di tensionamento, si è utilizzato il teorema del coseno, chiamato anche di Carnot. Semplificando, la nostra geometria è questa:

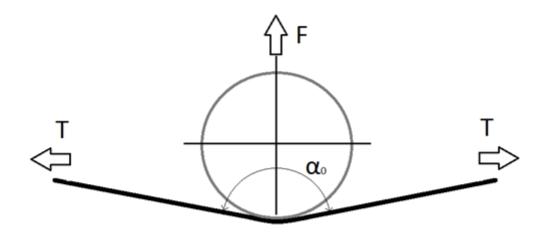


Figura 7.11: Scomposizione delle forze.

Dove la linea spessa rappresenta la reggia e la circonferenza il profilo della guida nel punto di contatto con la reggia stessa.

$$F = \sqrt{2 T^2 + 2 T^2 \cos(\alpha)}$$

Questa formula corrisponde alla regola del parallelogramma a cui è applicato anche il teorema del coseno.

Se ne può ricavare anche l'inversa, in cui si esplicita la tensione della reggia in funzione della forza F misurata dalla cella di carico.

$$T = \sqrt{\frac{F^2}{2 + 2\cos(\alpha)}}$$

Siccome l'angolo α è molto grande e nelle formule se ne usa il coseno, il risultato che si ottiene dai calcoli è molto sensibile alle variazioni di questo angolo, per questo motivo si va ad introdurre un fattore correttivo che compensa la deformazione della cella di carico Δ la quale sarà definita in funzione della cella scelta.

$$\Delta = \frac{F\ Deformazione_{MAX}}{Carico_{MAX}}$$

Si introduce quindi l'angolo α funzione di Δ e della geometria del sistema ricavata dal CAD.

$$\alpha = 2 \left[90 - \sin^{-1} \left(\frac{H - \Delta}{L} \right) \right]$$

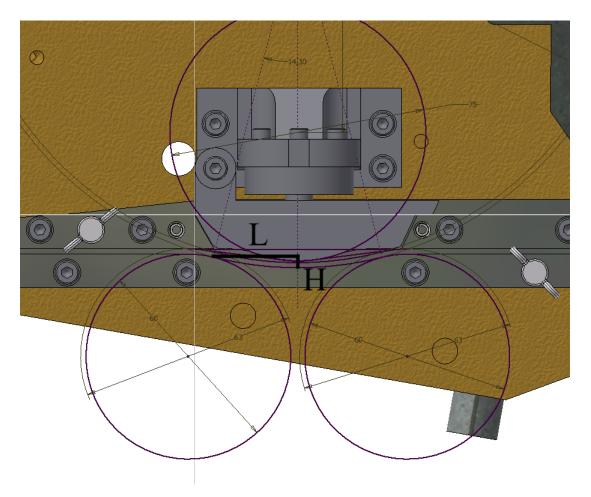


Figura 7.12: Schema geometrico.

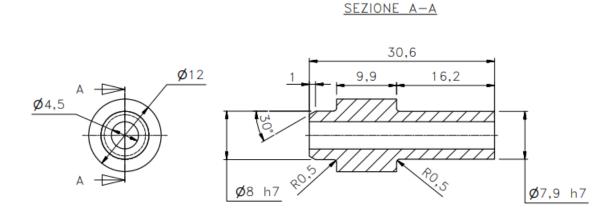
Quindi l'utente imposta da PLC un valore di tensione desiderato, questo valore deve essere compreso tra un minimo di 100 [N] e un massimo variabile in funzione della reggia utilizzata. Questo valore viene convertito in una $F_U = Forza\ Utente$.

Avviato il ciclo di reggiatura e giunti alla fase di tensionamento la cella di carico rileva la forza F, il PLC legge questo valore e lo confronta con il valore F_U noto, appena tale valore viene raggiunto, un segnale del PLC pone fine alla fase di tensionamento.

7.3 Dimensionamento perno/distanziale

Per il dimensionamento del perno/distanziale si è seguita la teoria delle travi, naturale estensione del principio di $De\ Saint-Venant$ che consente di ottenere una risoluzione semplificata a un problema elastico per un corpo solido di forma particolare, una trave appunto. Non si utilizza il principio di $De\ Saint-Venant$ per gli stringenti vincoli che ne regolano la validità:

- Geometrico, una dimensione deve essere di molto maggiore rispetto alle altre due;
- Statico, le forze devono essere applicate sollo alle basi;
- Cinematico, le travi sono vincolate e ciò non consente tutti gli spostamenti previsti da una deformazione congruente;



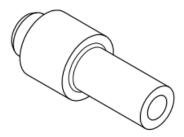


Figura 7.13: Disegno perno/distanziale.

Siccome il perno è piantato nella staffa di fissaggio della cella viene dimensionato dallo spallamento a contatto con la staffa (spallamento a sinistra nell'immagine superiore) in poi, considerandolo come una trave incastrata.

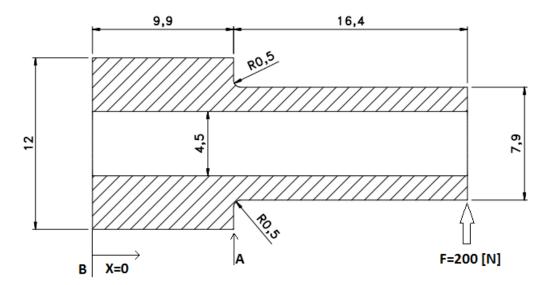


Figura 7.14: Trave.

Il carico applicato $F=200\ [N]$ è ottenuto moltiplicando il carico verticale generato durante il massimo tensionamento applicabile dalla macchina per un coefficiente di attrito dinamico presente fra reggia e guida pari a: f=0,3. Essendo un valore piuttosto incerto e variabile in base al tipo di reggia è stato appositamente sovrastimato.

I punti critici che vengono valutati sono alla base dello spallamento dove abbiamo una sezione ridotta e un fattore di intensificazione degli sforzi e alla base del perno (x = 0) dove il momento flettente è massimo.

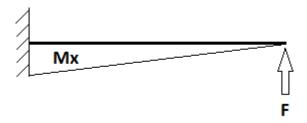


Figura 7.15: Andamento momento flettente.

Lo sforzo di taglio sarà uniforme su tutta la lunghezza del perno. Si procede con l'equilibrio alla rotazione da cui:

$$M_0 = -F \ L = 5,26 \ [Nm]$$
 Da cui:

$$M_f = -F x + M_0$$

Siccome il contributo dovuto al taglio risulta trascurabile si procede a calcolare le tensione massime nelle due sezioni critiche:

$$\sigma_{max} = \frac{32\;M_f\;D}{\pi\;\left(D^4-d^4\right)}$$

$$\sigma_{max\ A} = 76\ MPa$$

$$\sigma_{max B} = 32 MPa$$

Il punto critico risulta essere A, anche perchè deve essere ancora considerato il fattore di intensificazione degli sforzi Kt che viene ricavato dalla seguente tabella e risulta pari a 2.

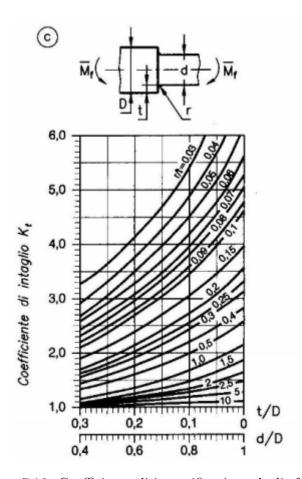


Figura 7.16: Coefficinete di intensificazione degli sforzi.

$$\sigma_{MAX} = Kt \ \sigma_{max \ A} = 152 \ MPa$$

Il perno è in Fe 510 quindi presenta un carico di snervamento $Rp_{0,2}=355 \; [N/mm^2];$ da cui:

$$CS = \frac{Rp_{0,2}}{\sigma_{MAX}} = 2,3$$

Nonostante il coefficiente di sicurezza non risulti particolarmente elevato i carichi sono stati ampiamenti sovrastimati quindi il valore raggiunto è stato ritenuto sufficiente.

7.4 Cella di carico

La cella di carico è un trasduttore in grado di misurare una forza, e quindi un peso, applicato lungo il proprio asse convertendola in un segnale elettrico proporzionale alla deformazione causata della forza sulla cella stessa.

Dati i limiti di ingombri molto stringenti si è deciso di utilizzare una cella di carico a compressione a basso profilo.

Per decidere la taglia opportuna da acquistare è stata effettuato un dimensionamento di massima supponendo una tensione della reggia di 8000 [N] (ottenibile solo su macchine speciali con reggia da 19 [mm]). Eseguendo i calcoli precedentemente esposti si ottiene una forza F agente sulla cella pari a $\approx 2000 \ [N]$.

Per garantire maggiore precisione e affidabilità al sistema è meglio sovradimensionare la cella di carico in modo tale da non farla lavorare in prossimità del carico massimo misurabile; per questo motivo è stato scelto un modello da 5000 [N]

Le caratteristiche tecniche della cella di carico a compressione che si è deciso di utilizzare sono le seguenti:

CARATTERISTICHE TECNICHE		TECHNICAL FEATURES
SENSIBILITA'	1 mV/V +/- 10%	RATED OUTPUT
EFFETTO DELLA TEMPERATURA SULLO ZERO	0.005 % / °C	TEMPERATURE EFFECT ON ZERO
EFFETTO DELLA TEMPERATURA SUL FONDO SCALA	0.005 % / °C	TEMPERATURE EFFECT ON SPAN
COMPENSAZIONE TERMICA	- 10°C / + 50°C	COMPENSATED TEMPERATURE RANGE
CAMPO DI TEMPERATURA DI LAVORO	- 20°C / + 70°C	OPERATING TEMPERATURE RANGE
CREEP A CARICO NOMINALE DOPO 4 ORE	0.3 %	CREEP AT NOMINAL LOAD AFTER 4 HOURS
TENSIONE DI ALIMENTAZIONE MAX TOLLERATA	15 Volt	MAX SUPPLY VOLTAGE WITHOUT DAMAGE
RESISTENZA D'INGRESSO	400 ohm +/- 100	INPUT RESISTANCE
RESISTENZA DI USCITA	350 ohm +/- 5	OUTPUT RESISTANCE
BILANCIAMENTO DI ZERO	+/- 1 %	ZERO BALANCE
RESISTENZA D'ISOLAMENTO	> 5000 Mohm	INSULATION RESISTANCE
CARICO STATICO MASSIMO (% sul Fondo Scala)	120 %	SAFE OVERLOAD (% of Full Scale)
CARICO DI ROTTURA (% sul Fondo Scala)	> 200 %	ULTIMATE OVERLOAD (% of Full Scale)
DEFLESSIONE A CARICO NOMINALE	0.3 mm	DEFLECTION AT NOMINAL LOAD

Figura 7.17: Caratteristiche tecniche cella di carico.

L'ultima caratteristica presente nella tabella è la deformazione massima Δ ottenuta al carico nominale ed è quella che viene utilizzata nella formula correttiva dell'angolo α .

Altri due fattori molto importanti per la scelta della cella sono:

- ullet Grado di protezione o IP 67
- Errore combinato $\rightarrow \leqslant \pm 0.3 \%$

Il grado di protezione risulta più che sufficiente alle condizioni di utilizzo della cella, il limite maggiore poteva essere la polvere dovuta allo scorrimento della reggia e i fumi legati alla saldatura a lama calda.

L'errore risulta compatibile con i risultati richiesti da questo sistema, tensionando 8000 [N], che danno 2000 [N] di forza agente sulla cella, l'errore di misura di F è pari a soli $\approx \pm 10 [N]$.

kg 200 kg 500 kg 1000 kg 2500 Ε В 10 16 120° С Ø 32 Ø 38 D Ø 8.1 Ø 11 Ε МЗ МЗ Ċ 13 ± 0.2 16 ± 0.2 F Dimensions (mm)

Per quanto riguarda le dimensioni della cella, gli ingombri sono i seguenti:

Figura 7.18: Dimensioni cella di carico.

Le quote più rilevanti per capire se la cella si adatta agli spazi disponibili sono la B e la C. Per questo modello risultano sufficientemente ridotti.



Figura 7.19: Cella di carico.

Nell'immagine si nota la superficie bombata per la zona di contatto con la guida reggia che garantisce il contatto su un solo punto nonostante la rotazione della guida stessa. [25]

Capitolo 8

Prove sperimentali

Il sistema di misura risulta composto da:

- Cella di carico;
- Guida reggia;
- Perno distanziale;
- Struttura di supporto principale;

Per poter verificare le formulazioni teoriche precedentemente esposte si è realizzato un primo prototipo della soluzione di cui sopra da installare su una testata di prova.

Un riscontro valido si può ottenere reggiando una struttura tubolare apposita non un pacco qualunque, che potrebbe deformarsi nella fase di tensionamento o di misura.

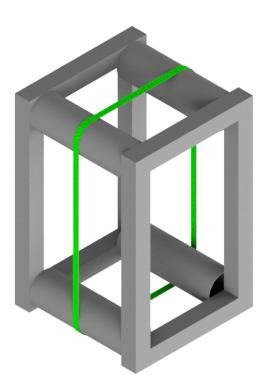


Figura 8.1: Struttura tubolare.

Il valore di tensione effettivamente raggiunto viene determinato con uno strumento certificato, si tratta del STX-1000 prodotto dalla TENSITRON.



Figura 8.2: TENSITRON STX-1000.

Per questo sistema una precisione del \pm 5 % risulta sufficiente poichè il valore di tensione effettiva rilevato sul pallet sarà anche funzione della rigidezze del carico pallettizzato stesso.

La procedura sperimentale seguirà i seguenti step:

- Per eseguire la fase di tensionamento si utilizza il metodo di controllo a tempo già implementato sulla testata di prova, viene impostato un tempo iniziale casuale (ad esempio 0.2 [s]) e si esegue la reggiatura;
- Si rileva la forza letta dalla cella di carico in [N];
- A saldatura eseguita si misura la tensione effettiva della reggia sulla struttura di prova con l'SXT-1000 opportunamente tarato;
- I tre dati raccolti vengono inseriti in una finestra apposita (TEST CELLA DI CARICO) controllata da una macro di Excel attivata dal tasto "INSERIMENTO DATI";
- Premendo "INSERIMENTO DATI" i valori vengono riportati nella tabella in alto a sinistra dove sono elaborati restituendo i risultati voluti nelle celle sottostanti in modo tale da consentire un primo controllo;

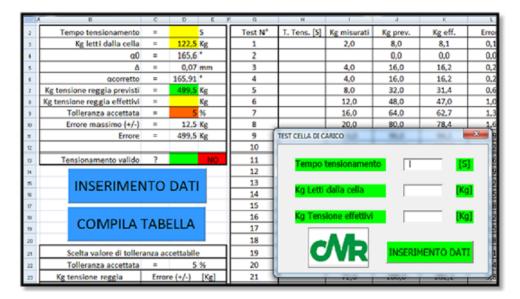


Figura 8.3: File Excell - INSERIMENTO DATI.

• Utilizzando la macro "COMPILA TABELLA" i risultati di maggior interesse vengono automaticamente riportati nella prima riga libera della tabella di destra dove viene analizzato l'andamento delle misure e degli errori al variare della tensione applicata alla reggia;

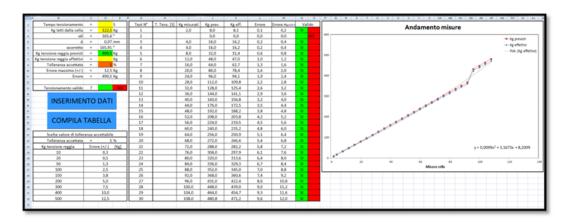


Figura 8.4: File Excell - COMPILA TABELLA.

• Automaticamente si riaprirà la finestra per l'inserimento di nuovi dati;

8.1 Analisi risultati

Per poter procedere con la fase sperimentale è stato necessario tarare il misuratore STX-1000 sulla reggia in esame, per fare ciò si è utilizzato un anello di reggia saldata. A questo anello sono stati fissati pesi diversi e sono stati sollevati dal carroponte dotato di una cella di carico.

La taratura richiede dalle 5 alle 10 prove con carichi crescenti, ad ogni prova si legge il valore misurato dalla cella di carico del carroponte, lo si divide per due (dato che si sta utilizzando un anello) e lo si va ad inserire manualmente sullo strumento che lo associa al carico letto dalla cella presente nello stesso. Per effettuare una taratura precisa è necessaria la cella di carico sul carroponte poichè, anche se il valore dei pesi sollevati è noto in modo abbastanza preciso, si rischierebbe di trascurare il peso dei golfari e di altri elementi. Nelle prove a basso carico potrebbero risultare molto influenti e quindi falsare la taratura dello strumento.

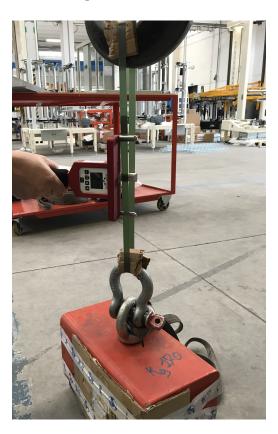


Figura 8.5: Test STX-1000.

Il metodo di prova utilizzato per eseguire i test sperimentali consiste nel controllare il tensionamento direttamente tramite cella di carico, ciò significa che è stato implementato nel PLC il modello teorico esposto nei paragrafi precedenti.

I valori di tensione test che sono stati utilizzati sono compresi tra i $100 \div 1000 [N]$ perchè è il range di utilizzo della macchina con la reggia da $15 \times 0.7 [mm]$ in polietilene.

Per ogni valore impostato sono state eseguite cinque saldature e quindi cinque tensionamenti.

Ad ogni ciclo di reggiatura sono stati registrati il carico rilevato dalla cella, la corrispettiva tensione prevista secondo i calcoli e la tensione effettivamente raggiunta che è stata misurata con l'STX-1000.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dai test:

$F_U[N]$	$Tensione\ prevista\ [N]$	$T.\ misurata\ media\ [N]$	Deviazione standard
25	100	145	10.8
50	200	240	11.5
74	300	349	9.9
98	400	438	11.5
123	500	547	8.7
148	600	645	7.5
172	700	752	13.4
197	800	849	9.1
220	900	941	11.9
245	1000	1049	10.2

Tabella 8.1: Analisi test tensionamento.

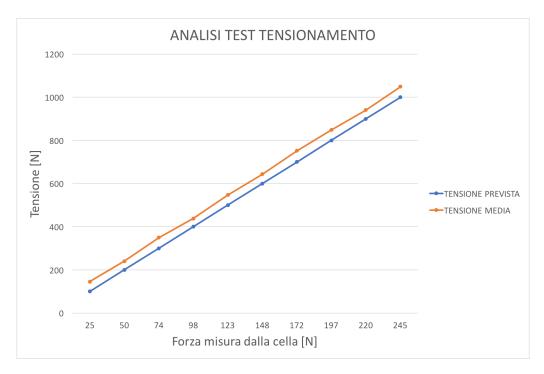


Figura 8.6: Analisi Tensione prevista - Tensione media.

La tensione ottenuta dalla media sui cinque test effettuati viene confrontata con la tensione prevista, corrispondente al valore imposto dall'operatore, e risulta esserne sempre superiore. Per capire meglio a cosa sia dovuta questa differenza la si va a rappresentare per ogni set di test:

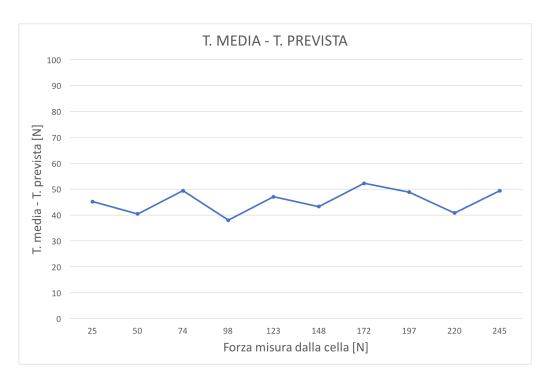


Figura 8.7: Analisi errore (*T. misurata - T. prevista*).

I valori ottenuti risultano essere piuttosto uniformi e costanti, quindi, analizzando approfonditamente il processo in esame, è stato constatato che questo eccesso di tensione è dovuto al fatto che, nell'intervallo di tempo che intercorre tra la lettura del segnale della cella di carico e la fine effettiva del tensionamento, la macchina continua a tendere la reggia.

Volendo si potrebbe compensare questo errore dato che è sufficientemente costante e prevedibile ma, siccome la reggia tende a diminuire di tensione negli istanti successivi alla reggiatura, si è preferito non correggerlo per far si che, qualora si misurasse la tensione della reggia dopo qualche minuti, risulti ancora vicina al valore impostato dall'operatore.

Come ulteriore parametro per valutare la bontà del sistema implementato è stata calcolata la deviazione standard per ogni singolo set di prove, i valori ottenuti sono tutti inferiori a 20 ed è un ottimo risultato per il livello di precisione ed affidabilità richiesto a questo sistema da parte dell'azienda.

La deviazione standard è l'errore da associare al valor medio della serie. Il 68% dei risultati ricadono nel range compreso tra valor medio della serie \pm la deviazione standard.

Di seguito si riportano tutti i risultati dei test.

Tabella 8.2: Risultati test tensionamento

N° prova	$F_U[N]$	$Tensione\ prevista\ [N]$	Tensione misurata [N]
01	25	100	158
02	25	100	142
03	25	100	151
04	25	100	146
05	25	100	129
06	50	200	229
07	50	200	227
08	50	200	246
09	50	200	248
10	50	200	252
11	74	300	361
12	74	300	348
13	74	300	357
14	74	300	336
15	74	300	345
16	98	400	431
17	98	400	428
18	98	400	430
19	98	400	449
20	98	400	452
21	123	500	554
22	123	500	548
23	123	500	532
24	123	500	549
25	123	500	552

(Continua alla pagina successiva)

(Continua dalla pagina precedente)

Continua	aatta pagt	na precedente)	
27	148	600	635
28	148	600	649
29	148	600	650
30	148	600	639
31	172	700	764
32	172	700	732
33	172	700	759
34	172	700	745
35	172	700	761
36	197	800	845
37	197	800	851
38	197	800	837
39	197	800	849
40	197	800	862
41	220	900	959
42	220	900	926
43	220	900	938
44	220	900	942
45	220	900	939
46	245	1000	1033
47	245	1000	1048
48	245	1000	1060
49	245	1000	1051
50	245	1000	1055

Tabella 8.2: Risultati test tensionamento

Nell'immagine sottostante si può osservare l'intero gruppo di misura della tensione installato e funzionante dopo essere stato utilizzato per tutti i test di calibrazione.

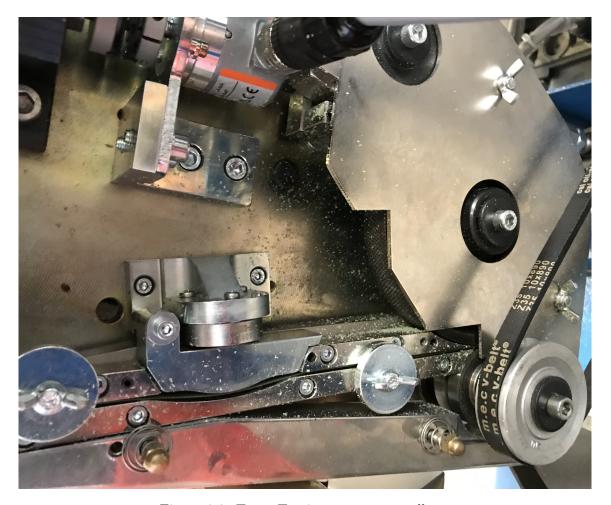


Figura 8.8: Test - Tensionamento controllato.

Capitolo 9

Conclusioni

Nella presente tesi è stata rinnovata e ottimizzata la testata di reggiatura prodotta dalla TOSA S.P.A.

Il primo sistema introdotto è quello di saldatura ad ultrasuoni che, pur mantenendo una buona resistenza delle saldature ha portato i seguenti vantaggi:

- Ripetibilità della saldatura elevata.
- Adattabilità della saldatura a tutte le tipologie di reggia utilizzate (dimensione e materiale).
- Assenza di fumi pericolosi per gli operatori e l'ambiente.
- Risparmio energetico.
- Completa adattabilità alle testate attuali consentendone l'installazione come optional.
- Possibilità di installare questo sistema su macchine già in commercio come kit di ammodernamento.

Lo svantaggio principale di questo sistema è il costo maggiore rispetto al tradizionale sistema di saldatura a lama calda.

La seconda novità sviluppata è il tensionamento controllato elettronicamente che consente di rimuovere una variabile empirica come il tempo di tensionamento introducendo un controllo preciso e in grado di adattarsi alle condizioni di usura della macchina e alle condizioni della reggia.

I prossimi obiettivi possono essere i seguenti:

- Migliorare ulteriormente la resistenza a trazione delle saldature eseguite con il sistema ad ultrasuoni andando ad ottimizzare l'impronta del sonotrodo.
- Semplificare alcune componenti meccaniche del sistema ad ultrasuoni al fine di ridurre ulteriormente i costi e semplificarne il montaggio.

Appendice A

Lo scarto quadratico medio o devizione standard è un indice di dispersione statistico.

Questo indice è molto usato nel campo fisico e ingegneristico al fine di stimare la variabilità di una popolazione di dati o di una variabile casuale.

Indica la dispersione dei dati attorno ad un indice di posizione che spesso corrisponde alla media aritmetica della popolazione. Ha la stessa unità di misura dei dati analizzati e, in questo caso, va a valutare la ripetibilità delle saldature e la precisone del sistema di tensionamento controllato.

La deviazione standard viene indicata con la lettera σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

Dove: $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i$ è la media aritmetica dei dati.

Siccome è impossibile conoscere la media esatta di tutto il campione poichè le prove sperimentali potrebbero essere infinite, si ha solo una stima della media, per questo motivo spesso viene utilizzato lo scarto quadratico medio corretto:

$$\bar{s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

In questo caso si corregge la tendenza dello scarto quadratico medio di sottostimare la dispersione dei dati, soprattutto nel caso di campioni di numero ridotto (N piccolo) tuttavia le differenze che si ottengono non sono elevate.

Si può semplificare la formula come segue:

$$\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^{N} (x_i^2 - 2x_i \bar{x} + \bar{x}^2)$$

$$= \left(\sum_{i=1}^{N} x_i^2\right) - \left(2\bar{x} \sum_{i=1}^{N} x_i\right) + N\bar{x}^2$$

$$= \left(\sum_{i=1}^{N} x_i^2\right) - N\bar{x}^2$$
Da cui: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i^2 - \bar{x}^2}$

Bibliografia

- [1] www.tosagroup.com
- [2] www.trasportale.it/logistica/la-lunga-storia-del-pallet
- [3] www.teufelberger.com
- [4] Alessandro Salmi (2018), Dispense del corso di "Progettazione di processo".
- [5] www.treccani.it/enciclopedia
- [6] www.soltec.it/d1/it/ultrasuoni-storia
- [7] Takidis D., Hurni H., 2017, Strapping device with an ultrasonic welding device. International application No PCT/IB2017/000139. International Publication No. WO2017/144967 A1
- [8] Tacchini F., Orfano M., 2015, Compact strapping head. European Patent EP2857318 A1.
- [9] Mosca T., Ludtke P., 2010, Ultrasonic welding apparatus. European Patent EP1479611 B1.
- [10] M. Roopa Rani, R. Rudramoorthy (2013), "Computational modeling and experimental studies of the dynamic performance of ultrasonic horn profiles used in plastic welding", www.elsevier.com/locate/ultras.
- [11] Amza G, Drimer D. (1976), "The design and construction of solid horns for acoustic energy" Ultrasonics.
- [12] Ioan-Calin Rosca, Mihail-Ioan Pop, Nicolae Cretu (2015), "Experimental and numerical study on an ultrasonic horn with shape designed with an optimization algorithm", www.elsevier.com/locate/apacoust.
- [13] Antonio Gugliotta (2002), "Elementi finiti" Otto editore.
- [14] Aurelio Somà (2018), Dispense del corso di "Progettazione di prodotto".
- [15] Alessandro Fasana, Stefano Marchesiello (2006), "Meccanica delle vibrazioni" CLUT.
- [16] Amin, Ahamed, Yousef (1995), "Computer-aided design of acoustic horns for ultrasonic machining using finite element analysis", Journal of Materials Processing Technology 55.
- [17] M. Nad (2010), "Ultrasonic horn design for ultrasonic machining technologies", Applied and Computational Mechanics 4.
- [18] www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3

- [19] A. Benatar, Z. Cheng (1989), "Ultrasonic welding of thermoplastics in the far field", Polymer Engineering and Science 29.
- [20] A. Cardoni, M. Lucas (2002), "Enhanced vibration performance of ultrasonic block horns", Ultrasonics 40.
- [21] www.siriuselectric.it
- [22] www.festo.com
- [23] www.minettigroup.com/Portals/0/pdf/Schaeffler/ina/sistemi_guide_profilate.pdf
- [24] www.gicamgra.com
- [25] www.laumas.com/it

ŗ	Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica
Professoressa Daniela Maffiodo, la Professoressa Daniela Maffiodo, la Professore mi hanno guidato, consigliato e, sopra Ringrazio la Sirius Electric per la collabora ha dato un contributo molto importante	o contribuito a questa tesi, in particolar modo la pressa Raffaella Sesana e l'Ing. Giovanni Lori che attuto, insegnato molto durante questi mesi. Zione e nello specifico Mario Ferraris Fusarini che e alla riuscita di questo progetto. Un ulteriore a S.P.A. con cui ho collaborato in questi mesi.