

FACOLTA' DI INGEGNERIA

**CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA
IN INGEGNERIA MECCANICA**

DIEM

TESI DI LAUREA SPERIMENTALE
in
DISEGNO MECCANICO

**MODELLAZIONE, ANALISI E PROGETTO DI UN
DISPOSITIVO DI SALDATURA A ULTRASUONI PER UNA
MACCHINA AUTOMATICA**

CANDIDATO:

RICCARDO RUGGERI

RELATORE:

Chiar.mo Prof. Ing. **GIANNI CALIGIANA**

CORRELATORI:

Chiar.mo Prof. Ing. **ALFREDO LIVERANI**

Chiar.mo Prof. Ing. **FRANCESCO CESARI**

Technical Manager **MARCO CARRARA**

Ing. **DANIELE CIVOLANI**

Ing. **STEFANO DE MARIA**

Ing. **MARIALIVIA MELCHIONDA**

Anno Accademico 2008/09

Sessione II

Indice

Introduzione

1 La saldatura ad ultrasuoni

1.0 Introduzione

1.1 La saldatrice ad ultrasuoni

1.2 La risonanza nel dispositivo

1.3 Modo oscillatorio e caratteristiche dell'ampiezza nella saldatura

1.4 Componenti della saldatrice

1.4.1 Generatore

1.4.2 Convertitore

1.4.3 Amplificatore

1.4.4 Sonotrodo

1.5 I materiali saldabili

1.6 I parametri di processo

1.7 Principali applicazioni e vantaggi

2 ACMA

2.1 L'azienda

2.2 Storia dell'Acma

2.2 Storia dell'Acma

3 Rappresentazione CAD del sistema saldante

3.1 Il dispositivo di saldatura trasversale

3.2 Nucleo masse trasversali

3.3 Masse saldanti ad ultrasuoni a lame di taglio

4 Validazione vincoli

4.1 Metodo analitico

4.2 1° Modo di vibrare

4.3 2° Modo di vibrare

5 Analisi modale delle masse rotanti

5.1 Obbiettivi dell' analisi

5.2 Modello analizzato

5.3 Modi di vibrare

5.3.1 34672 Hz

5.3.2 34766 Hz

5.3.3 34903 Hz

5.3.4 34931 Hz

5.3.5 35065 Hz

5.3.6 35157 Hz

5.3.7 35196 Hz

5.3.8 35288 Hz

5.3.9 35320 Hz

5.3.10 35368 Hz

5.3.11 35496 Hz

5.4.12 35644 Hz

5.5 Conclusioni dell'analisi

6 Analisi modale dei sistemi interessati alla saldatura

6.1 Introduzione all'analisi

6.2 Sonotrodo libero

6.2.1 34525 Hz

6.2.2 35018 Hz

6.2.3 35110 Hz

6.2.4 35726 Hz

6.3 Sonotrodo vincolato

6.3.1 34796 Hz

6.3.2 35481 Hz

6.4 Cassa rotante e sonotrodo

6.4.1 34762 Hz

6.4.2 34888 Hz

6.4.3 35122 Hz

6.4.4 34546 Hz

6.5 Cassa rotante – sonotrodo - attacchi

6.5.1 34637 Hz

6.5.2 34587 Hz

6.5.3 35085 Hz

6.5.4 35321 Hz

6.5.6 conclusioni del sistema in esame

6.6 Sistema cassa rotante – sonotrodo – attacchi –

supporti lama

6.6.1 34751 Hz

6.6.2 34842 Hz

6.6.3 35034 Hz

6.6.4 35159 Hz

6.6.5 35334 Hz

6.6.6 35732 Hz

6.7 Cassa rotante- sonotrodo- attacchi - supporto lame e incudine

6.7.1 34082 Hz

6.7.2 34351Hz

6.7.3 34810 Hz

6.7.3 34810 Hz

6.7.4 34832 Hz

6.7.5 34917 Hz

6.7.6 35174 Hz

6.7.7 35498 Hz

7 Studio e ottimizzazione del sonotrodo

7.1 Nuove ipotesi costruttive

7.2 Condizione di sonotrodo non vincolato

7.2.1 Sonotrodo originale

7.2.2 Sonotrodo modificato con alette nel fondo

7.3 Condizione di sonotrodo vincolato

7.3.1 Sonotrodo originale

7.3.2 Sonotrodo modificato

7.3.3 Caso sonotrodo con alette laterali

7.4 Conclusioni per lo sviluppo futuro

7.5 Studio della identificazione del piano neutro

8 Studio dei nuovi attacchi

8.1 Modello originale

8.2 Soluzioni alternative adatte al nuovo sonotrodo

8.2.1 prima soluzione progettuale

8.2.2 Seconda soluzione progettuale

8.2.3 Terza soluzione progettuale

8.5 Conclusioni

9 Calcolo del guadagno di un sonotrodo

**attraverso un'analisi sperimentale confrontata
con un analisi FEM**

9.1 Simulazioni agli elementi finiti

9.2 Analisi sperimentale.

9.2.1 Analisi dei dati

9.3 Conclusioni

Conclusioni

Introduzione

La tesi svolta è stata condotta presso ACMAGD ,azienda produttrice di macchine automatiche . La storia quasi centenaria e le dimensioni hanno fatto sì che nell'ambito di realizzazione della tesi si potesse usufruire di strumenti avanzati di progettazione , strumentazioni di alto livello tecnologico e di un know-how sviluppato in oltre 80 anni di sviluppo e ricerca.

Lo sviluppo della tesi in questa realtà ha garantito il confronto con problematiche industriali reali, e ne ha mostrato le modalità di analisi e risoluzione.

Argomento della tesi è una macchina automatica destinata al packaging alimentare.

Utilizza una moderna tecnologia per la realizzazione delle saldature del prodotto confezionato che sfrutta l'utilizzo di saldatori che si spostano a frequenze ultrasoniche, 35000 Hz. La macchina monta i suddetti saldatori su elementi rotativi che permettono una produzione in continuo (flowpack). Questo particolare tipo di montaggio rappresenta un'esclusiva brevettata proprio dall' azienda ACMAGD.

La macchina è già stata realizzata ma presenta ancora alcuni limiti. Non risulta infatti essere flessibile a diverse velocità di utilizzo non riuscendo a garantire la perfetta integrità ed ermeticità dell' involucro.

Le cause di suddetto problema non sono ancora ben definite in quanto i parametri di processo sono numerosi e non sufficientemente analizzati: tempo di saldatura , tipologia della carta , forma del saldatore , ampiezza della vibrazione , frequenza , tipo di contatto , pressioni esercitate , fenomeni di risonanza . Se ne deduce immediatamente la difficoltà di una

corretta ottimizzazione di tutti questi parametri su di una macchina che non ha precedenti nel mondo in questo campo.

La tesi si svilupperà in una modellazione 3D della macchina in modo da realizzare successivamente simulazioni agli elementi finiti . Si ricercheranno eventuali problematiche e si svilupperanno possibili soluzioni progettuali risolutive.

1 La saldatura ad ultrasuoni

1.0 Introduzione

Gli ultrasuoni sono noti dalla seconda metà dell'800, ma hanno trovato applicazioni pratiche solo a partire dalla prima guerra mondiale, con i sistemi di rilevamento dei sommergibili, i sonar. Fu uno dei primi casi in cui si utilizzò l'effetto piezoelettrico per la loro generazione: la scoperta di questa speciale proprietà ha reso facile la realizzazione di sorgenti di onde ultrasonore ponendo le basi per una grande diffusione del loro utilizzo. I materiali piezoelettrici hanno infatti la caratteristica di allungarsi o accorciarsi in funzione della tensione cui sono sottoposti: questo consente di trasformare un segnale di tensione oscillante in una vibrazione meccanica di uguale frequenza. Intensità e frequenza della vibrazione meccanica dipendono così dalla intensità e dalla frequenza del segnale elettrico. Se la frequenza del segnale elettrico è superiore ai 16 kHz si produce dunque un'onda ultra sonora. Le principali applicazioni tecnologiche degli ultrasuoni sono:

- sensoristica (sensori di prossimità, diagnostica strutturale);
- lavaggio industriale (bagni di lavaggio con ultrasuoni);
- assemblaggio e/o lavorazione delle materie plastiche (la saldatura dei metalli, la lavorazione con asporto di trucioli).

La saldatura a ultrasuoni, è una tecnologia molto utilizzata per l'assemblaggio di parti realizzate in materiale termoplastico facendo uso di una delle tecnologie più diffuse e conosciute con frequenze comprese da 20 a 40 KHz e con ampiezza di vibrazione variabile secondo il materiale da saldare. Questa tecnologia, ha le sue origini all'inizio del secolo scorso, ma solo agli inizi degli anni 70, ha trovato applicazioni

industriali ed ha seguito l'evoluzione dei materiali polimerici. Per definizione, i materiali termoplastici sono elementi sensibili al calore. Il meccanismo fondamentale alla base di questa tecnica è lo sfruttamento delle vibrazioni meccaniche a frequenza ultrasonora per trasferire energia alla parti in plastica da trasformare, scaldandole fino al raggiungimento della temperatura di fusione. Utilizzando la saldatura a ultrasuoni, il calore necessario per fondere i materiali nella zona d'assemblaggio, è ottenuto per attrito. Si utilizza questo processo, ad esempio, nell'assemblaggio di oggetti in plastica, per unire insieme diversi componenti. In questo caso le vibrazioni meccaniche ultrasonore sono trasmesse ad uno dei due componenti plastici da saldare e attraverso di questo giungono fino alla giunzione con il secondo componente.

Un utensile vibrante, denominato sonotrodo, produce un'intensa vibrazione a cui sono sottoposte le parti da unire. Sfruttando la rigidità del materiale con cui sono realizzati i pezzi, si possono portare le vibrazioni a distanza. La zona d'assemblaggio deve essere opportunamente dimensionata e progettata in modo che le vibrazioni si concentrino in zone specifiche, denominate giunti di saldatura. La forza e la direzione delle vibrazioni sono perpendicolari ai giunti di saldatura. L'attrito e lo sfregamento delle parti da unire, genera un intenso riscaldamento con successiva fusione del materiale. È qui che per frizione si genera calore: ecco allora che i materiali si scaldano, fondono e si saldano insieme. La contemporanea applicazione di una pressione meccanica favorisce il mescolamento dei materiali fusi. La pressione generata dalla pressa facilita la penetrazione dei materiali plastificati, determinando saldature meccanicamente molto resistenti. Una volta avvenuto il raffreddamento si ottiene una giunzione omogenea tra i componenti dell'oggetto. La tecnologia di saldatura con ultrasuoni, permette di realizzare unioni a tenuta stagna senza aggiunta di materiale di apporto.

L'affidabilità e la corretta applicazione di questa tecnologia, richiedono il

rispetto di una serie di parametri, quali il tipo di materiale da saldare, il corretto dimensionamento delle parti, e l'utilizzo di sistemi vibranti adatti. Oggi, le saldatrici a ultrasuoni, sono dotate di sofisticati circuiti elettronici che permettono di ottenere saldature molto affidabili e ripetitive.

1.1 La saldatrice ad ultrasuoni

Un'attrezzatura per la saldatura ad ultrasuoni è costituita da due parti fondamentali, un generatore elettrico di segnale oscillante e una parte meccanica che li trasforma in vibrazioni ultrasoniche. I generatori creano segnali elettrici oscillanti con frequenze di 20 o 40 kHz, modulabili in ampiezza. Il segnale elettrico è convertito in oscillazione meccanica dal gruppo vibrante costituito essenzialmente da tre parti: trasduttore piezoelettrico, amplificatore (*booster*) e sonotrodo (*horn*). Il generatore di ultrasuoni, il trasduttore, l'amplificatore ed il sonotrodo lavorano in frequenza di risonanza..

Il trasduttore è il dispositivo che converte il segnale oscillante di tipo elettrico in oscillazione meccanica con la stessa frequenza e con ampiezza proporzionale.

Il *booster* amplifica l'ampiezza della vibrazione meccanica e la trasmette al sonotrodo che è l'elemento più complesso della parte vibrante ed è quello che va a contatto con la parte da saldare.

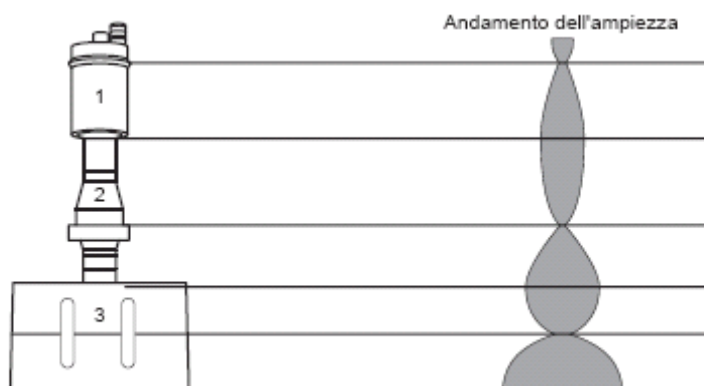
Il sonotrodo è un pezzo di metallo che si allunga e si accorcia di pochi μm alla frequenza di 20 o 40 kHz, a seconda del generatore utilizzato.

Una estremità del sonotrodo è a contatto con il booster ricevendone l'oscillazione meccanica, l'altra va a contatto con il materiale plastico da saldare cui trasmette la vibrazione amplificata. Nella saldatura di componenti costituiti di plastiche rigide, il sonotrodo fa vibrare il

componente con cui è a contatto e che si trova appoggiato all'altra parte cui deve essere saldato. Sopra a tutta la struttura vibrante si trova un cilindro pneumatico che consente di aumentare la pressione con cui il sonotrodo si appoggia, vibrando, sul componente da saldare. Il riscaldamento nella zona di saldatura è dovuto all'assorbimento ed alla riflessione delle vibrazioni meccaniche ed alla frizione delle superfici. I trasduttori piezoelettrici, e i componenti meccanici ad essi collegati meccanicamente, amplificatori e sonotrodi, oscillano sempre nella direzione longitudinale, in modo che la faccia emettitrice oscilli in modo sinusoidale con riferimento alla posizione di riposo della faccia stessa. Le parti accoppiate vengono sottoposte da parte del sistema ad ultrasuoni ad un "martellamento" ad altissima frequenza che provoca la fusione del materiale plastico, la pressione che viene contemporaneamente esercitata fa sì che avvenga la saldatura. Se invece il "martellamento" ,sempre accompagnato da un'opportuna pressione avviene contro una lama si ha il taglio

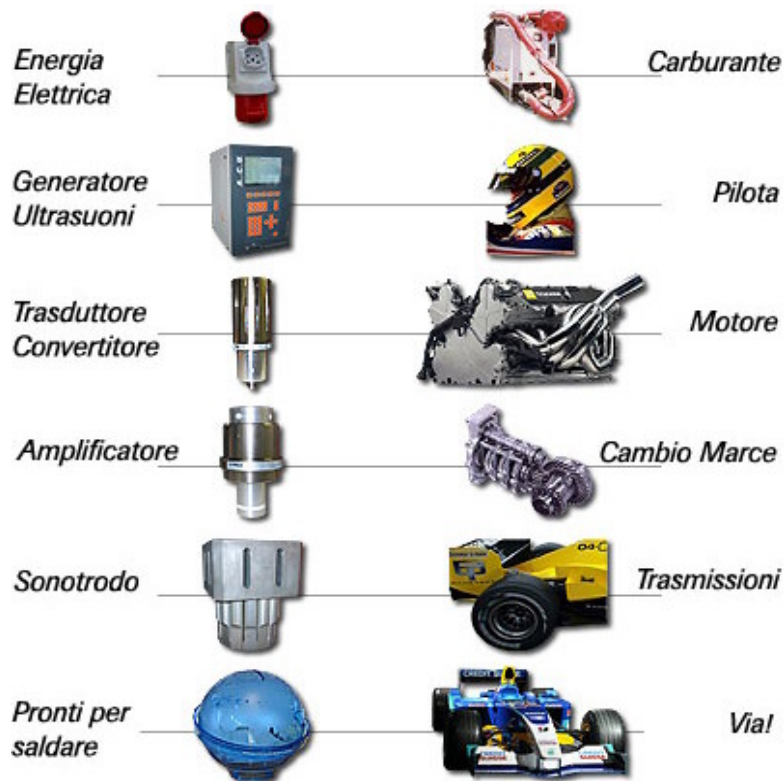
Il dispositivo vibrante si compone di:

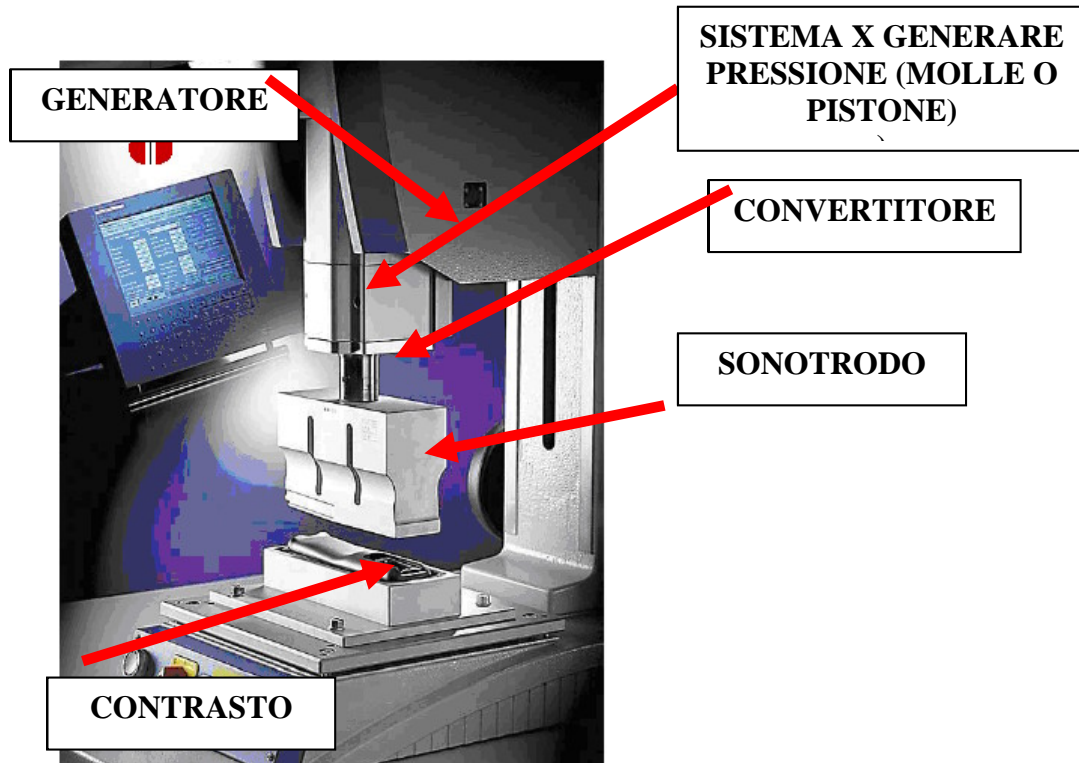
1. convertitore di ultrasuoni (convertitore)
2. amplificatore (booster)
3. sonotrodo



I tre singoli componenti sono assemblati e costituiscono un unico blocco di vibrazione. Tale blocco è predisposto in modo tale da generare una frequenza di risonanza definita. Questa frequenza viene eccitata dal convertitore che funge da generatore di impulsi e genera un'oscillazione sinusoidale, il cui modo oscillatorio ha un andamento longitudinale. Le caratteristiche dell'ampiezza che ne risulta sono rappresentate nella figura riportata qui sopra

L'illustrazione qui in basso mostra il processo di unione ad ultrasuoni, paragonato con i componenti di un'auto in Formula 1.





1.2 La risonanza nel dispositivo

I dispositivi vibranti ad ultrasuoni utilizzano il fenomeno della risonanza propria dei componenti. Si tratta di forme di movimento che è possibile eccitare anche in maniera mirata. Quando la risonanza propria di un componente viene eccitata con l'ausilio di un impulso appropriato, viene prodotta un'oscillazione (come quando si pizzica per es. la corda di una chitarra).

Le oscillazioni meccaniche vengono trasmesse sotto pressione (forza di saldatura) alla parte in materia plastica.

Tramite l'attrito molecolare a livello di struttura del materiale e tramite l'attrito delle superfici di contatto viene creato il calore necessario per la fusione (plastificazione).

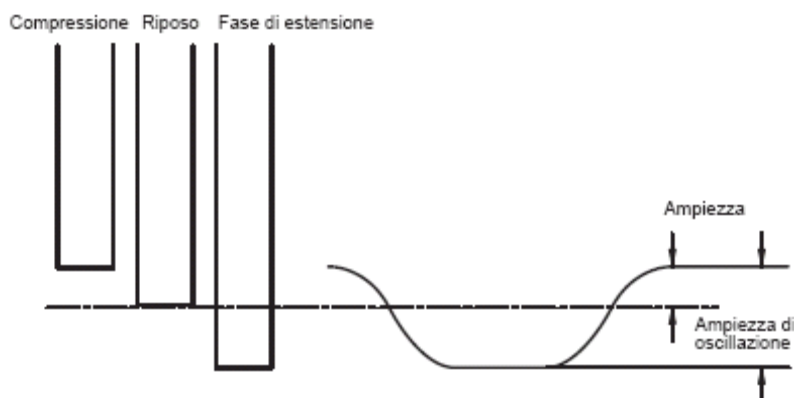
La temperatura locale (punto di collegamento) determina un aumento del coefficiente di attenuazione, fenomeno che determina l'ammorbidimento della materia plastica.

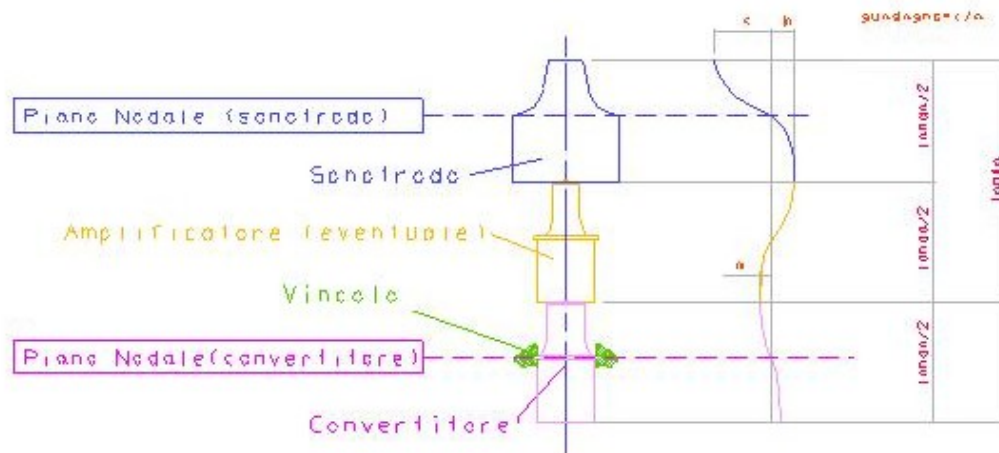
1.3 Modo oscillatorio e caratteristiche dell'ampiezza nella saldatura

L'ampiezza di oscillazione rappresenta la corsa complessiva (da picco a picco), effettuata dai singoli punti del dispositivo vibrante tra la fase di estensione e quella di compressione. Per ampiezza (mezza ampiezza di oscillazione) si intende la modifica della lunghezza tra posizione di riposo e fase di estensione/compressione.

L'ampiezza sul lato frontale del sonotrodo (superficie per la saldatura) influenza il comportamento di saldatura e di conseguenza deve venir adeguata esattamente a ciascuna operazione di saldatura. L'ampiezza risulta particolarmente importante e può essere influenzata tramite la regolazione del generatore e la trasformazione del design del sonotrodo. Poiché il carico meccanico del dispositivo vibrante dipende direttamente dall'ampiezza ed esercita in tal modo un influsso diretto sulla sua durata, si deve fare attenzione a selezionare sempre l'ampiezza strettamente necessaria.

Andamento dell'ampiezza





1.4 Componenti della saldatrice

1.4.1 Generatore

Il generatore provvede agli impulsi d'energia ad alto voltaggio, che nel convertitore sono trasmessi al trasduttore piezoelettrico e convertiti in vibrazioni meccaniche longitudinali di frequenza ultrasonica. I requisiti più importanti del generatore sono la costanza d'ampiezza per ottenere risultati riproducibili, l'automatismo di scansione delle frequenze, il funzionamento in continuo, la regolazione in continuo della potenza, la regolazione degli impulsi

1.4.2 Convertitore

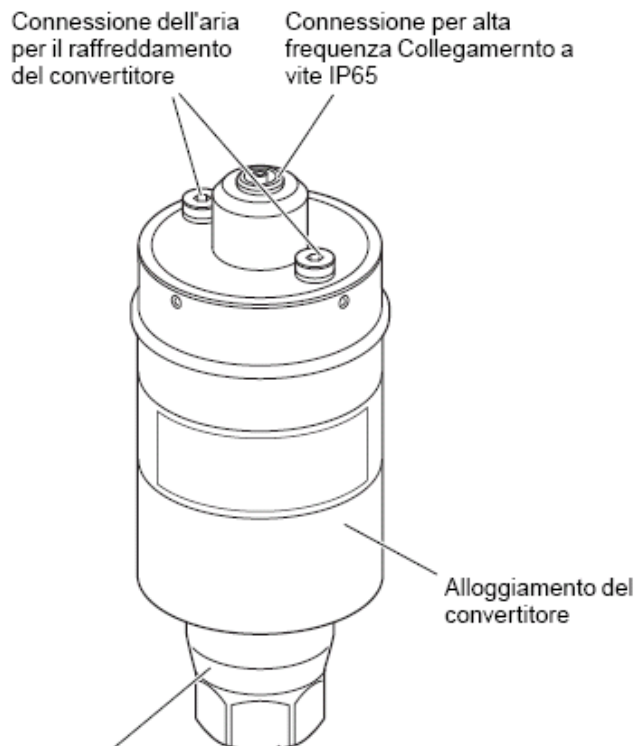
Il convertitore (convertitore di ultrasuoni) è il cuore dell'unità saldatrice ha la funzione di trasformare energia elettrica in energia meccanica. Ciò avviene con l'ausilio di dischi di piezoceramica sistemati nel suo interno. Questa piezoceramica è polarizzata artificialmente e reagisce ad una tensione applicata con la modifica della sua dimensione geometrica. Applicando una tensione alternata ad alta frequenza, sul convertitore si

verifica una modifica della lunghezza in funzione della tensione e della frequenza. Se si applica una determinata tensione alternata il convertitore funge da generatore di impulsi ed è in grado di eccitare le risonanze proprie del dispositivo vibrante. Quindi in definitiva i materiali piezoelettrici sottoposti ad una tensione alternata, si espandono e contraggono al variare del segno della stessa.

I piezoelettrici, se sottoposti a tensioni dell'ordine dei kV , a fronte di dimensioni molto ridotte, possono sviluppare forze molto elevate (anche 5 kN) per piccoli spostamenti (100 μm) oppure forze più basse (50N) per spostamenti più elevati (1000000 μm).

I materiali polarizzati divenuti piezoelettrici sono però fortemente anisotropi, presentando scarsa resistenza alle sollecitazioni meccaniche a taglio, trazione e momento torcente. Ne deriva che è preferibile posizionare verticalmente il convertitore, oppure, in alternativa, fissarlo in modo tale che sia soggetto solo a compressione. Inoltre, temperature superiori a quelle di Curie fanno perdere ai cristalli l'orientamento e quindi la piezoelettricità.

Si è detto in precedenza che la tensione di alimentazione è alternata, ma si è trascurato di definirne la frequenza. Essa è legata alle caratteristiche geometriche dell'amplificatore e del sonotrodo, è univocamente definita ed è quella di risonanza del sistema.



1.4.3 Amplificatore

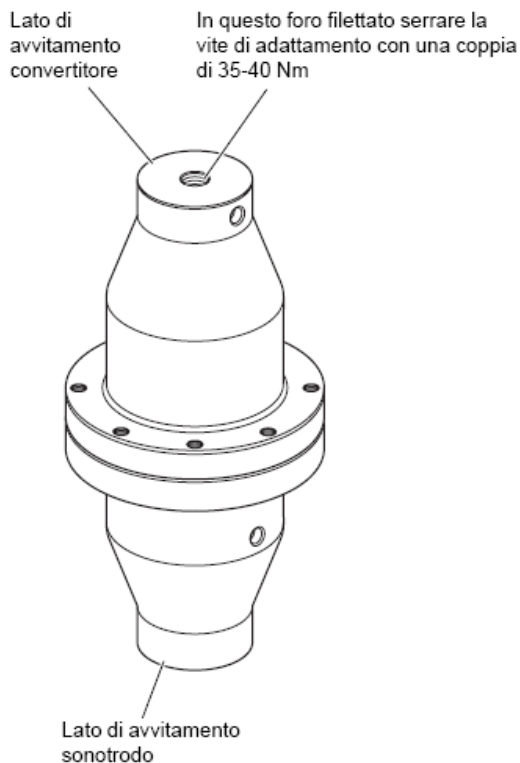
L'amplificatore ha la duplice funzione di aumentare l'ampiezza di vibrazione e di realizzare il collegamento meccanico fra sonotrodo e convertitore. Come già detto, è caratterizzato dalla frequenza di risonanza, che è legata alla geometria del pezzo. A tale proposito, per un buon funzionamento del dispositivo, è consigliabile che la temperatura durante il funzionamento non superi i 40 °C. Infatti, il riscaldamento comporterebbe la dilatazione del materiale, con conseguente variazione della geometria e quindi della frequenza di risonanza. L'amplificatore è uno dei punti nodali dell'unità saldatrice e quindi è sfruttabile per il fissaggio.

In commercio esistono degli amplificatori opportunamente sagomati (con speciali alette), in modo da poter essere facilmente afferrati.

L'amplificatore è composto da un corpo base in titanio da un anello di fissaggio sul quale poggia l'intero dispositivo vibrante posto nell'attivatore della saldatrice. Il compito dell'amplificatore consiste nel

trasformare l'ampiezza di oscillazione trasmessa dal convertitore nella dimensione richiesta dal sonotrodo e nel fornire a quest'ultimo l'energia vibratoria meccanica generata nel convertitore.

L'ampiezza di oscillazione del convertitore e quindi quella trasmessa al sonotrodo, può essere aumentata o diminuita tramite la sostituzione dell'amplificatore.



1.4.4 Sonotrodo

L'utensile per la saldatura denominato sonotrodo è la parte più critica di un sistema di saldatura ad ultrasuoni. Attraverso di esso si propagano onde di compressione e dilatazione che mettono a dura prova la resistenza del materiale (devono avere una ottima resistenza a fatica).

Il sonotrodo ha le seguenti funzioni:

- trasmissione dell'energia vibratoria
- trasmissione della forza di contatto
- trasformazione dell'ampiezza

I materiali con cui sono costruiti i sono per la maggior parte acciaio, alluminio e titanio, materiali che consentono di trasmettere le vibrazione meccaniche senza grosse perdite di potenza (in un sonotrodo in ferro la maggior parte della energia meccanica verrebbe dispersa in calore). Se le energie in gioco sono limitate si sceglie l'alluminio, ottimo dal punto di vista del basso assorbimento dell'energia sonora; tuttavia per carichi di pressione elevata occorre scegliere acciaio o possibilmente titanio, che, rispetto a quest'ultimo ha un minore assorbimento dell'energia sonora. La forma e la lunghezza del sonotrodo sono progettate in modo che la frequenza di risonanza meccanica del sonotrodo coincida con quella della vibrazione meccanica generata dal trasduttore, in modo da renderne più efficiente il trasferimento.

Esistono quindi precisi vincoli progettuali alla realizzazione di un sonotrodo, pena la rottura del sonotrodo stesso o l'insorgere di vibrazioni secondarie trasversali che non sono utilizzate nel processo di saldatura e disperdono energia inutilizzata.

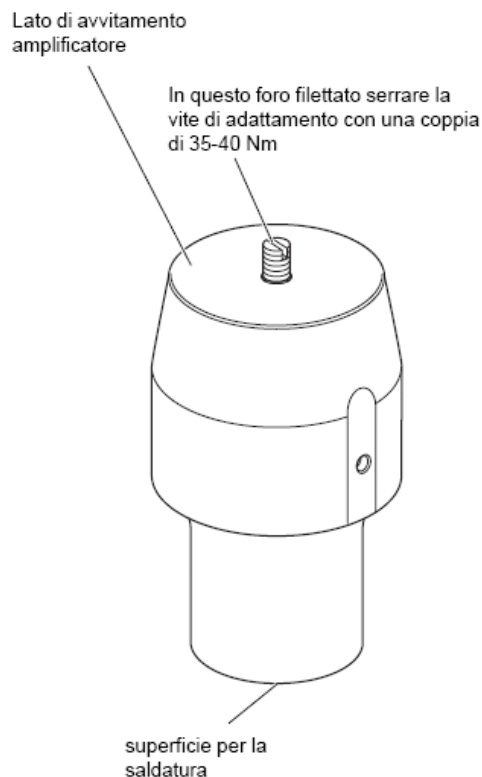
Il sonotrodo di fatto esegue la saldatura del materiale, pressandolo contro l'incudine. Essendo questo pezzo soggetto ad usura, potrebbero rendersi necessarie delle rettifiche della superficie saldante: nel caso in cui venisse asportato complessivamente più di un decimo di millimetro, la frequenza di risonanza del pezzo cambierebbe e sarebbe poi necessario ritarare il pezzo. L'accordatura del sonotrodo viene fatta per asportazione di materiale, in modo da modificarne ulteriormente la geometria.

E' importante che questi interventi siano eseguiti dalla casa fornitrice dell'apparecchiatura perché, modificando la frequenza del sonotrodo,

esso non risponde correttamente alle sollecitazioni del convertitore che, per sopperire a questo calo di ampiezza, deve fornire una potenza maggiore. Il

risultato è che, nel migliore dei casi si ha un calo qualitativo della saldatura, nel peggiore la rottura del convertitore stesso.

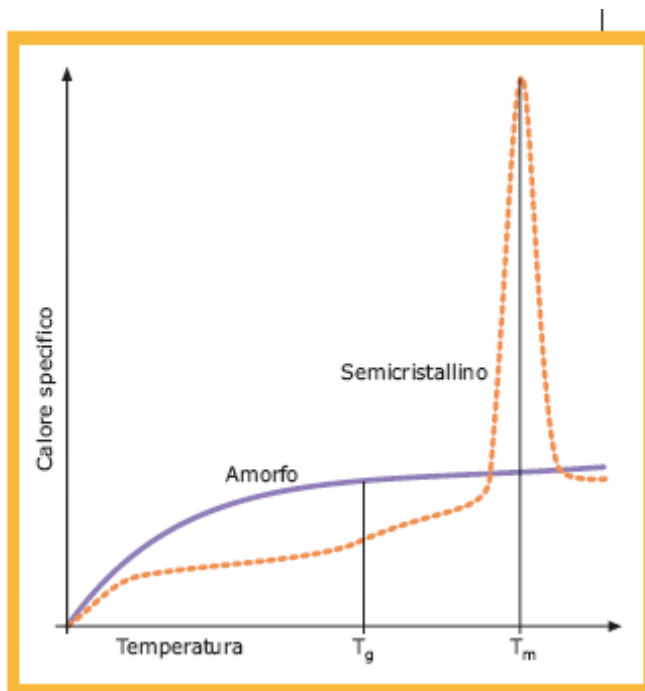
Affinché l'usura del sonotrodo sia contenuta, la superficie saldante deve essere estremamente dura (70 Rockwell) e ciò si può ottenere con opportuni trattamenti quali, per esempio, termobrasando un placca in carburo di tungsteno, con nanotecnologie, con trattamenti ceramici o impiegando leghe speciali come l'acciaio-titanio per realizzare il pezzo.



1.5 I materiali saldabili

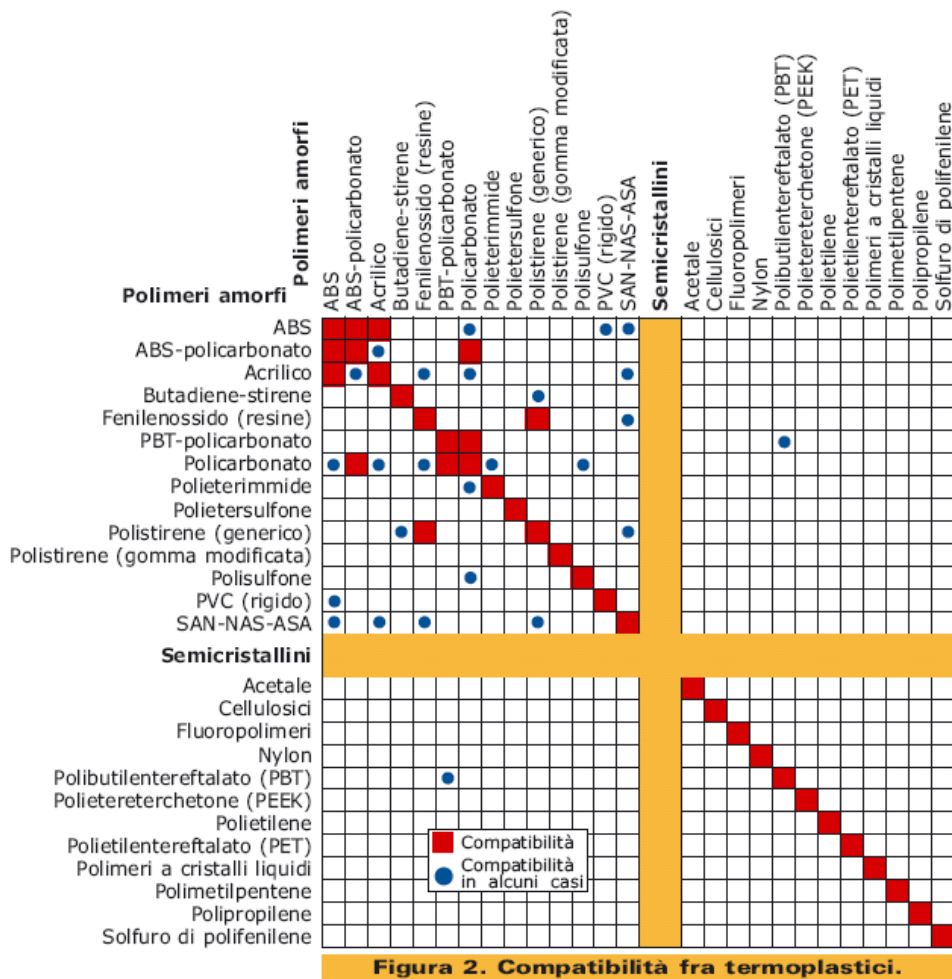
Le materie plastiche che si possono saldare con gli ultrasuoni sono in genere le resine termoplastiche, quelle che, se riscaldate,

ammorbidiscono e fondono. Fra queste in generale i polimeri amorfi si saldano meglio dei polimeri semicristallini: i primi infatti rammolliscono gradualmente dopo il raggiungimento di una temperatura caratteristica (detta appunto di rammollimento o di transizione vetrosa T_g), mentre i secondi fondono solo in prossimità di un preciso valore di rispetto agli amorfi: occorre far raggiungere al materiale della giunzione esattamente la temperatura di fusione, mentre per gli amorfi è sufficiente fornire l'energia necessaria a raggiungere una temperatura di lavoro superiore a quella di transizione vetrosa.



Regola generale perché una coppia di materiali termoplastici siano saldabili con ultrasuoni è che fondano o rammolliscano a temperature molto vicine: altrimenti può accadere che una parte fonda prima dell'altra, non essendo poi in grado di trasferire ulteriore energia per portare anche la seconda oltre la temperatura di rammollimento. I polimeri termoplastici semi cristallini possono essere saldati solo con se stessi, mentre amorfi di natura diversa sono compatibili solo a patto di avere temperature di rammollimento non troppo diverse (generalmente

20°C è la massima differenza tollerabile). Inoltre, per essere compatibili, plastiche di famiglie diverse devono avere una struttura molecolare simile, cioè devono contenere una percentuale significativa dello stesso tipo di polimero. Si scelgono quindi preferenzialmente delle miscele di polimeri per migliorare la compatibilità



1.6 I parametri di processo

Il processo di saldatura ad ultrasuoni si regola determinando la quantità di energia ceduta dal sistema alla superficie che si intende saldare, quindi, in definitiva, definendo la potenza del processo in uso ed il tempo di lavorazione:

Energia = Potenza x tempo

La potenza è determinata dalla forza con cui la superficie efficace del sonotrodo spinge sul materiale da saldare (regolata dalla pressione del cilindro pneumatico in testa al gruppo vibrante) moltiplicata per la velocità del microspostamento della superficie stessa. A sua volta tale velocità non è altro che la frequenza moltiplicata per l'ampiezza di oscillazione.

In definitiva:

Potenza ~ Pressione cilindro pneumatico. x Frequenza x Ampiezza

Per aumentare o diminuire l'energia del processo saldante si può agire principalmente sulla pressione e sull'ampiezza di oscillazione oltre che sul tempo di lavoro. Tipicamente infatti i sistemi saldanti sono a frequenza fissa, 20 kHz o 40 kHz per la maggior parte, mentre è possibile regolare in certa misura l'ampiezza dell'oscillazione. L'ampiezza di oscillazione è un fattore critico per la bontà del processo di saldatura. Per ogni materiale, a fissata frequenza, esiste una ampiezza di oscillazione ottimale

Figura 3. Ampiezza di oscillazione

Amorfi	Saldatura	Rivettatura	Crimpatura	Saldatura a punti	Inserzione
ABS	30-70	70-90	70-90	70-90	20-50
ABS-policarbonato	70-100	80-120	80-120	80-100	50-70
Acrilico	40-70	70-90	70-90	70-90	30-60
Acrilico multipolimero	60-90	70-90	70-90	80-90	50-70
Butadiene-stirene	50-90	70-100	70-100	70-90	40-60
Fenilenoossido (resine)	50-90	70-100	70-100	70-90	40-60
Poliammide-immide	70-100	80-100	80-100	80-100	40-70
Poliarilato	60-100	80-120	80-120	80-100	40-60
Policarbonato	60-100	80-120	80-120	80-100	40-70
Polieterimmide	70-100	90-120	90-120	90-120	40-70
Polietersolfone	70-100	90-120	90-120	80-100	40-70
Polistirene (generico)	30-70	70-90	70-90	60-80	20-40
Polistirene (gomma modificata)	50-90	80-100	80-100	70-90	30-50
Polisulfone	70-100	90-120	90-120	80-100	40-70
PVC (rigido)	40-80	70-100	70-100	60-80	20-50
SAN-NAS-ASA	30-70	70-90	70-90	60-80	20-40
Semicristallini					
Acetale	70-120	90-120	90-120	80-120	40-80
Cellulosici	60-100	80-120	80-120	70-100	40-70
Ionomero	80-120	90-120	90-120	80-120	40-70
Nylon	70-120	90-120	90-120	80-120	40-80
Polibutilentereftalato (PBT)	70-120	90-120	90-120	70-100	40-80
Polietereterchetone (PEEK)	70-120	90-120	90-120	80-120	40-80
Polietilene	90-120	90-120	90-120	70-100	40-80
Polieterilentereftalato (PET)	80-120	90-120	90-120	80-120	40-80
Polimeri a cristalli liquidi	70-120	90-120	90-120	80-120	40-80
Polimetilpentene	70-120	90-120	90-120	80-120	40-80
Polipropilene	90-120	90-120	90-120	70-100	40-80
Solfuro di polifenilene	80-120	90-120	90-120	70-100	40-80

Guida per l'ampiezza di oscillazione (μm) per 20 kHz.

- Per 15 kHz moltiplicare x 1.2 • Per 30 kHz moltiplicare per 0.8 •
- Per 40 kHz moltiplicare x 0.6 • (Branson Ultrasonics)

1.7 Principali applicazioni e vantaggi

- Chiusura di imballaggi in materiale composito per latte e succhi di frutta
- Chiusura di bicchieri in plastica per panna, yogurt e tubetti per prodotti alimentari
- Saldatura di giunti longitudinali e di fondo di bicchieri e ulteriori contenitori
- Saldatura continua di film piano per la formazione di film tubolare
- Chiusura ermetica di sacchetti in plastica, imballaggi verniciati e contenitori stampati a iniezione



La tecnica di saldatura con ultrasuoni è oggi molto diffusa nell'assemblaggio di componenti plastici, nei settori più diversi, dall'industria automobilistica a quella degli elettrodomestici, dal settore biomedicale a quello dei giocattoli o degli articoli per ufficio. È diffusa in tutti i settori in cui vi siano pezzi in materiale termoplastico da assemblare. Si utilizzano gli ultrasuoni anche per lavorazioni che non sono una saldatura in senso stretto, come la rivettatura, la ribordatura, l'inserzione. In questi casi si ha la deformazione per fusione di un unico particolare in plastica che viene collegato meccanicamente con un altro materiale, che non fonde a seguito dell'applicazione degli ultrasuoni (vetro, metallo o plastica con temperature di fusione diversa). Un ulteriore utilizzo della saldatura ad ultrasuoni è nel settore dell'imballaggio, in cui si utilizzano film di polimero termoplastico. Molti impianti ormai sono attrezzati con sistemi ad ultrasuoni per la chiusura delle confezioni in plastica, più veloci ed efficienti dei tradizionali sistemi di termosaldatura, dove il materiale è portato a fusione attraverso il contatto con barre riscaldate. Rispetto alle tecniche tradizionali di saldatura con solventi ed adesivi la tecnologia ad ultrasuoni ha diversi vantaggi:

- tempi di processo molto ridotti (secondi o decimi di secondo);
- basso consumo energetico;
- possibilità di saldare anche in presenza di corpi estranei (polveri o liquidi);
- possibilità di lavorare in ambiente completamente sterile (fondamentale per il settore biomedicale o per il packaging alimentare);
- qualità e affidabilità della saldatura superiore ai tradizionali sistemi a solvente o con adesivazione.

- nessuna alterazione termica del contenuto
- qualità della saldatura non alterata dall'eventuale proiezione del prodotto
- nessuna sostanza additiva necessaria - un contributo a favore dell'ambiente

La saldatura ad ultrasuoni è una tecnica economica, rapida ed ecologica perfetta per l'assemblaggio di imballaggi in materiale termoplastico e imballaggi in materiale composito, ad esempio, cartone o alluminio con rivestimento termoplastico.

2 ACMA



2.1 L'azienda

Benvenuti in oltre 80 anni di esperienza.

Oggi le attività più importanti delle società non riguardano solo i beni materiali, attrezzature capitali finanziari, ma anche quelli immateriali: brevetti, la conoscenza dei lavoratori, rapporti con i clienti e canali, l'esperienza passata che una società ha nella sua memoria istituzionale. Condividere il nostro capitale intellettuale con i nostri clienti per contribuire a creare il loro vantaggio competitivo è stato l'obiettivo di Acma negli oltre 80 anni di storia.

Possiamo vantare otto decenni di relazioni durature ed efficaci con i nostri clienti.

Creare affidabili innovazioni è il nostro modo per supportare il successo dei nostri clienti e per sostenere la loro espansione, in modo che il nostro know-how diventi la loro fonte di performance e di differenziazione del prodotto.

L' alleanza sinergica con Corniani e Ocea, fornendo sia macchine stand-alone sia linee complete, garantisce lo sviluppo rapido di nuove soluzioni nel settore del confezionamento di prodotti liquidi, e quindi è diventato un marchio di riferimento costante per i prodotti alimentari più importanti, industrie chimiche e farmaceutiche di tutto il mondo .

Come risultato, Acma sta celebrando 80 anni di attività con il desiderio e la motivazione di continuare con un altro di 80 anni di pari, se non maggiore, successo, il valore della co-creazione di nuovo packaging con i

nostri clienti.

2.2 Storia dell'acma

"Un imballaggio soddisfacente richiede un'innovazione tecnologica continua" è il motto che ha guidato Acma tutta la sua esistenza, dalla sua fondazione ad oggi. Il 31 luglio 1924 Acma è stata fondata da Mr. Gaetano Barbieri, ed è stata posata una pietra miliare per l'industria italiana di macchine automatiche per l'imballaggio.

Nella seconda metà del 1920, Acma istituisce la prima produzione industriale di due macchine per il confezionamento in polvere (l'Acma 713 e 720) per un prodotto chiamato Idrolitina, realizzata dalla Società Gazzoni.

Nel 1930 Bruto Carpigiani, leader dei progettisti bolognesi in questo settore, ha introdotto la cosiddetta "ruota a forma di Z", un dispositivo che trasforma un continuo movimento di rotazione in uno intermittente.

L'utilizzo di questo tipo di movimento consentì l'introduzione di nuovi modelli, come il rivoluzionario involucro di confetti ACMA 722.

Durante la Seconda Guerra Mondiale, Acma è stata dichiarata una fabbrica ausiliare dell'industria militare. La fine del 1940 è stata caratterizzata dallo sviluppo di numerosi modelli di macchine per l'imballaggio alimentare e prodotti chimici. Tra queste la più importante è stata la Acma 721 / 1, la prima macchina avvolgitrice di sapone prodotta da ACMA

L'aumento generalizzato della domanda dei consumatori e il rapido sviluppo del comportamento dei consumatori in seguito ai cambiamenti sociali radicali degli anni 1950, ha portato alla creazione di nuovi mercati e prodotti. Nel 1956 Acma ha realizzato le sue prime macchine per riempimento di scatole e cartoni con detersivi

Durante il 1960 e il 1970, la necessità di una maggiore specializzazione nei settori in cui le macchine automatiche sono stati utilizzati, stava diventando sempre più evidente. Così le principali aree di progetto e produzione della compagnia divennero: il confezionamento, macchine per imballaggio esterno , attrezzature per l'imballaggio di sapone, detersivi, prodotti dolciari, biscotti e lieviti. Nello stesso periodo Acma rinnovò il suo processo di produzione mediante l'adozione di nuove tecnologie, come le macchine a controllo numerico.

Seguendo la tendenza generale del mondo di raggruppare piccole imprese in una struttura più potente dal punto di vista tecnologico e commerciale nel 1986, Corniani ,leader per la fabbricazione di macchine per il processo di riempimento e tappatura, si unì al gruppo Acma.

Nel 2001 Corniani ha collaborato con OCEA azienda produttrice di macchine per l' etichettatura , famosa per la sua capacità di realizzare piccole macchine etichettatrici su misura, stabilendo così la nascita del polo di divisione dei liquidi ACMA-Corniani-OCEA

L'elettronica ha assunto una crescente importanza in macchine per il confezionamento, passando dal ruolo di verifica e controllo, al più ampio ruolo di coordinamento del trasporto e convogliamento. Moderne macchine per il moto perpetuo sono state progettate e l'Azienda è oggi il

principale fornitore di linee di confezionamento complesse.

POLITICA DI ACMA GD: Una società non produce solo beni materiali, ma crea anche e offre ai propri partner una tradizione industriale che riflette i suoi valori, idee ed esperienze. ACMA è giunta a dominare l'industria del packaging a seguito di un principio guida che è diventata la sintesi dell'identità della sua società: offrire al cliente nei settori di mercato cui si occupa, soluzioni concrete e vantaggiose per tutti i suoi problemi di imballaggio diventando così un partner ideale nel reciproco processo di ricerca eccellenza.

2.3 Sviluppo del packaging

Il mercato internazionale del packaging è molto vario.

Attraverso le sue diverse forme, materiali e design, il packaging esprime una personalità del prodotto. Ciascun paese, società e prodotto sono unici.

Questa unicità deve essere migliorata per sostenere una proposta di vendita sempre più complessa, in particolare nel mercato dei prodotti di consumo di massa.

Il nostro successo è strettamente legata alla nostra capacità di innovazione.

Abbiamo brevettato oltre 200 soluzioni innovative e vogliamo rendere questo patrimonio creativo a disposizione dei nostri clienti. IPT (Innovative Packaging Technology) è il nostro nuovo centro per lo sviluppo creativo. Per migliorare i prodotti, offriamo ai nostri clienti l'esperienza che proviene da una lunga esperienza con la libertà di concepire forme innovative di packaging che permettono al prodotto di distinguersi dagli altri.

3 Rappresentazione CAD del sistema saldante

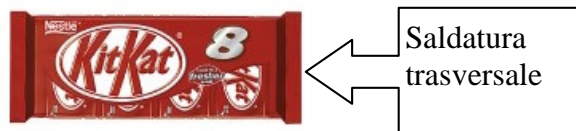
3.1 Il dispositivo di saldatura trasversale

La tesi si sviluppa con la modellazione e l'analisi di una macchina automatica, denominata YG, adibita al packaging alimentare.

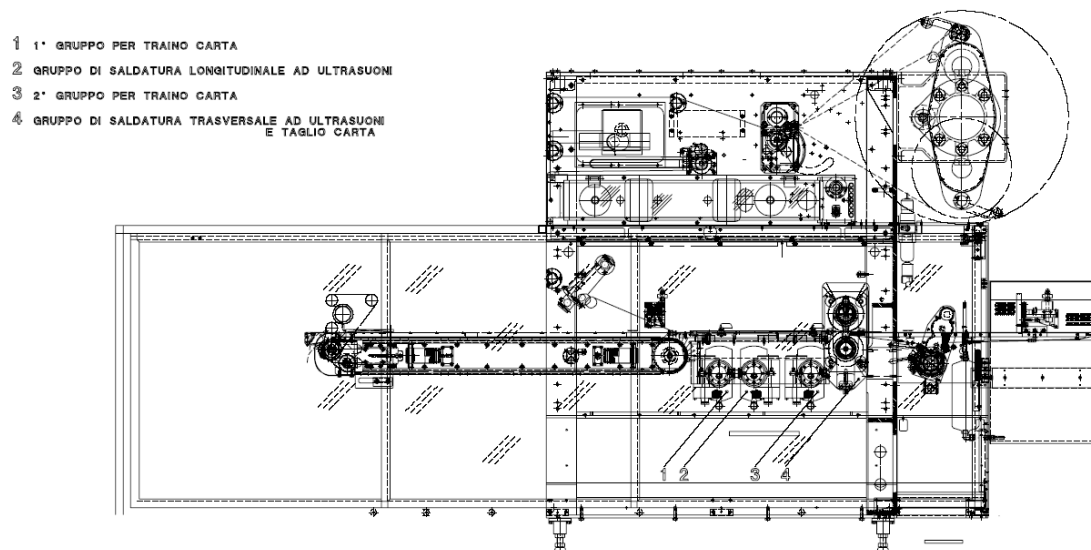


Questa macchina automatica è destinata al packaging di bustine per uso alimentare, per esempio bustine di tavolette di cioccolato o contenitori di grissini: il dispositivo deve garantire una chiusura perfettamente ermetica .

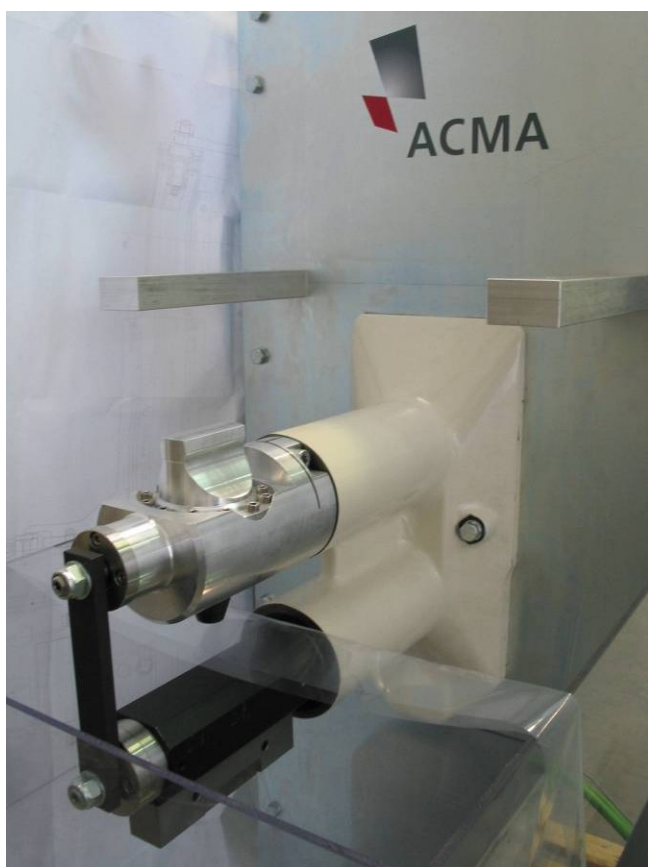
Per la chiusura del pacchetto vengono realizzate 3 saldature: 2 trasversali e 1 longitudinale.



La saldatura trasversale viene effettuata tramite una macchina rotativa con movimento quindi in continuo.



Oggetto dello studio è proprio la rappresentazione 3D del gruppo che garantisce tale saldatura.



Per effettuare analisi modali sul gruppo saldante è stato reso necessario la modellazione dello stesso con lo strumento CAD SolidWorks.

Sono state fornite le distinte di due gruppi :

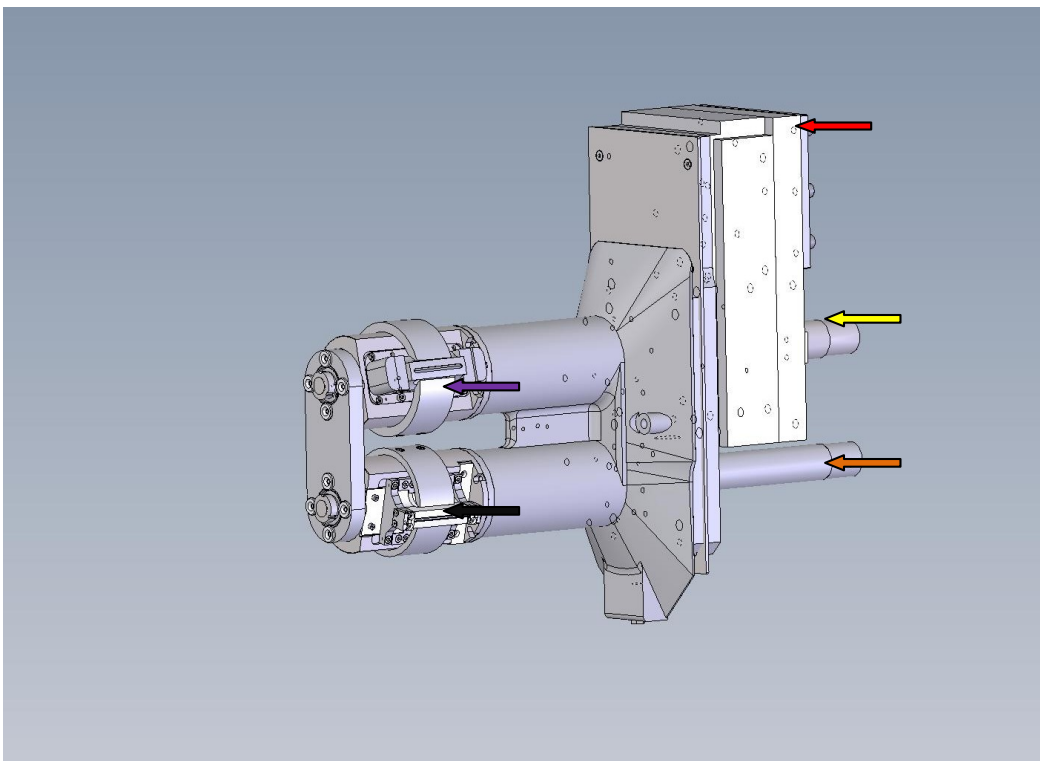
- 1) masse saldanti ad ultrasuoni e lame di taglio
- 2) nucleo masse trasversali

I due gruppi rappresentano la parte costitutiva della macchina riguardante la saldatura tramite un rotore in continuo. La prima distinta considera le masse rotanti che agiscono nel processo di saldatura, la seconda distinta invece prende in considerazione tutti quei pezzi che determinano la motorizzazione del sistema quindi l'intera struttura che determina la movimentazione dal motore agli alberi rotanti.

Sono stati forniti da ACMA le rappresentazioni 2D dei pezzi, le distinte base e i complessivi.

Sono stati rappresentati i pezzi in 3D e gli assiemi (assembly) dei due gruppi distinti. In seguito ci si è interessati all'accoppiamento e al posizionamento in fase dei due sottoassiemi.

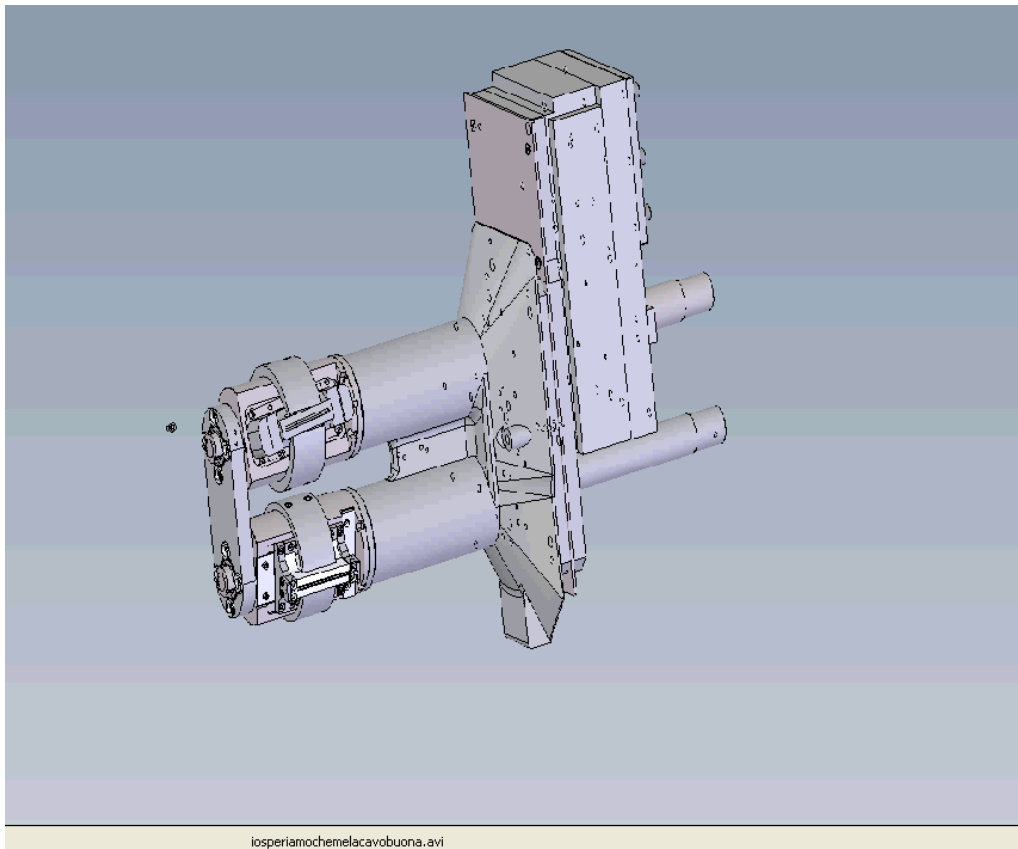
Nella figura qui riportata vediamo l'intero gruppo



O in sezione

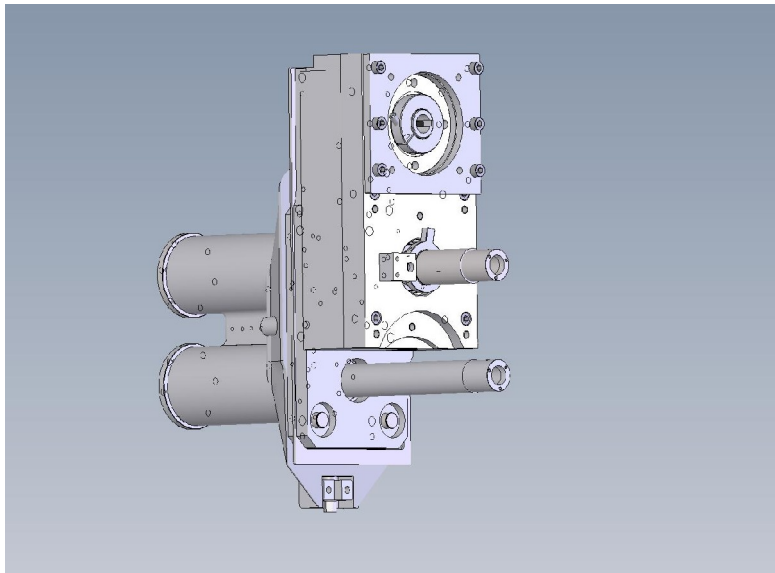
Il moto viene fornito da un motore elettrico collegato con la ruota dentata motrice (freccia rossa) e viene trasmesso attraverso una serie di ruote dentate (freccia verde) fino all'albero rotativo superiore (freccia gialla). Questo è messo in fase tramite un'altra coppia di ruote dentate (freccia blu) all'albero rotativo inferiore (freccia marrone). Sui due alberi sono posizionate le masse saldanti nelle quali vengono evidenziate le sonotrodo (freccia nera) e l'incudine (freccia viola) che garantiscono la saldatura

Attraverso una funzione di SolidWorks sono stati realizzati dei filmati che mettono in luce il funzionamento del corpo saldante.



Vengono analizzati in particolare i 2 gruppi che costituiscono il corpo saldante la cassa e le masse rotanti.

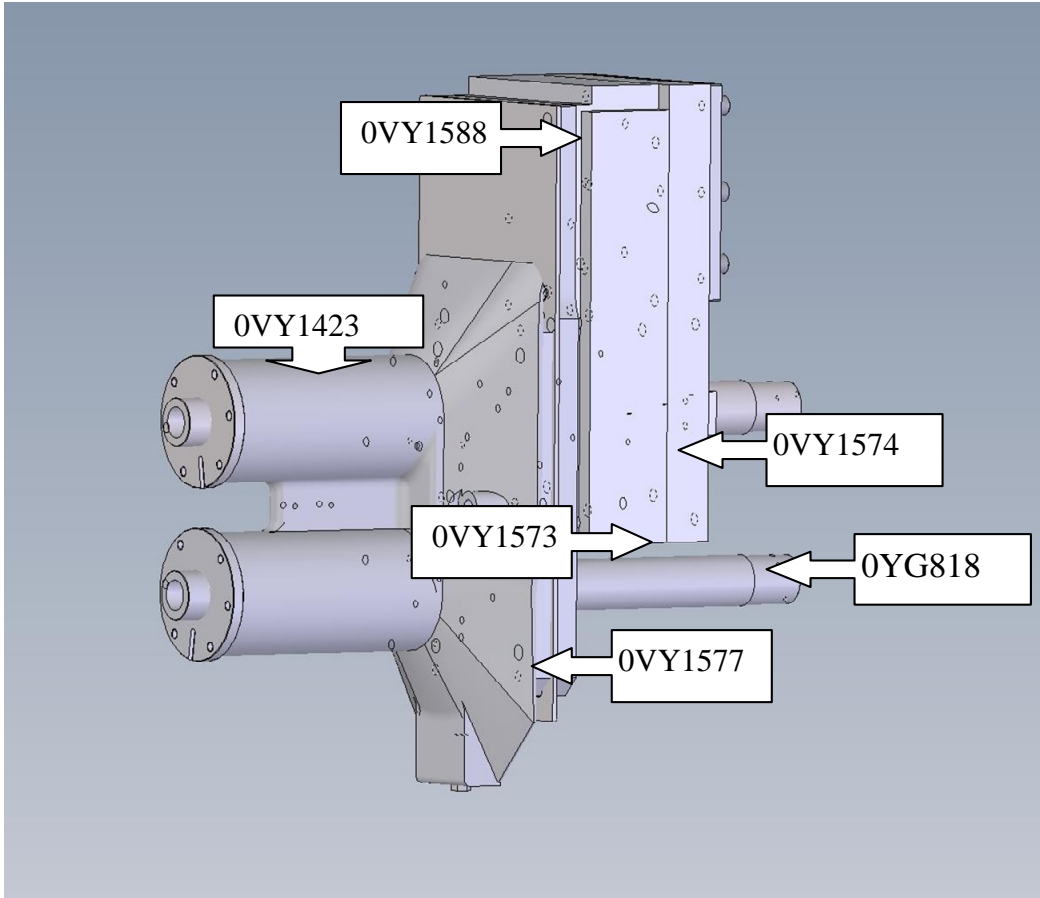
3.2 Nucleo masse trasversali



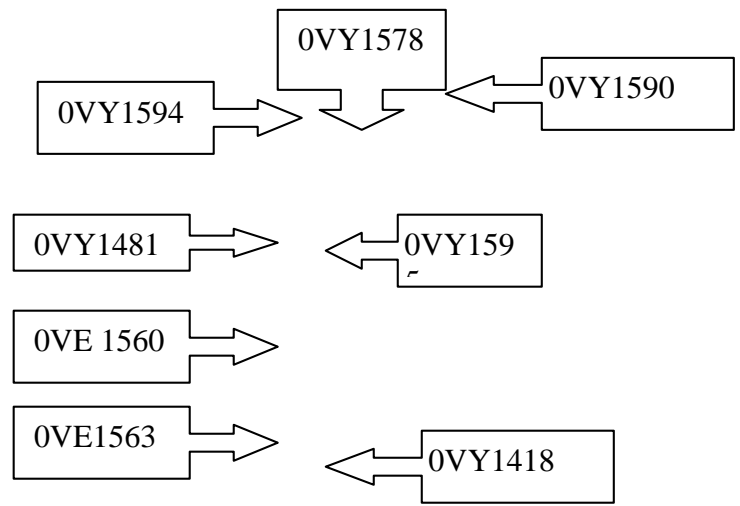
0VY1573 →

← 0VY1574

0VY1581 →



Il gruppo Nucleo masse trasversali è poggato sul basamento **0VY1582** to
0VY1423 **cassa moto rotazione celtelli** il quale è fissato **0VY1589** a
 macchina attraverso viti che **0VY1587** h apposti fori che possono vedere
 in figura.



0VY1423 cassa moto rotazione coltelli

Sono alloggiati all' interno del basamento gli alberi che alle masse saldanti ad ultrasuoni e lame di taglio.

Fori per
l'alloggiament
o viti

0YG818 albero rotazione inferiore masse rotanti

Il moto all'albero inferiore è trasmesso attraverso l'elemento **0VY1418** ossia l'ingranaggio inferiore. L'ingranaggio è serrato attraverso viti al **0VE1563 mozzo per ingranaggio**. Quest'ultimo presenta una sede per una linguetta per il corretto centraggio ed allineamento con l'albero inferiore ed una estremità conica. La **0VE 1560 flangia morsetto** viene quindi accoppiata al mozzo in modo da generare una deformazione

sull'elemento conico e generare quindi una pressione di contatto sull'albero in modo da realizzare il collegamento

0VE1563 mozzo per ingranaggio

0VE 1560 flangia morsetto

0VY1418 ingranaggio inferiore

All'ingranaggio inferiore il moto è trasmesso attraverso una coppia di ruote dentate accoppiate tra di loro **0VY1595 ingranaggio superiore** e **0VY1594 ingranaggio**. Grazie all'utilizzo di due ruote dentate si riescono ad eliminare i giochi con l'ingranaggio inferiore. Il serraggio con l'albero superiore è garantito da un elemento denominato **0VY1481 flangia morsetto** il quale viene serrato tramite bulloni contro **0VY1594** in modo da deformarne la parte conica e generare quindi la pressione necessaria all'accoppiamento con l'albero.

0VY1595 ingranaggio superiore

0VY1594 ingranaggio

0VY1481 flangia morsetto

La **0VY1590 ruota dentata condotta** posizionata sull'albero superiore e gliene trasmette il moto. Viene centrata con l'albero attraverso una linguetta e l'accoppiamento viene garantito sempre da **0VY1481 flangia morsetto** che viene accoppiata alla ruota condotta. Il vincolo per lo spostamento assiale della ruota dentata condotta viene garantito dall'utilizzo di un **distanziale 0VY1578** che viene posizionato tra la ruota condotta e l'ingranaggio **0VY1594**

0VY1590 ruota dentata condotta

0VY1578 distanziale

Il moto alla ruota dentata **0VY1590** è trasmesso alla **ruota oziosa 0VY1587**

0VY1587 ruota dentata oziosa

Il moto alla ruota oziosa è fornito dalla **0VY1589 ruota dentata motrice** la quale viene attaccata al motore elettrico esterno.

0VY1589 ruota dentata motrice

La ruota dentata motrice viene fissata attraverso dei cuscinetti a rullini alla

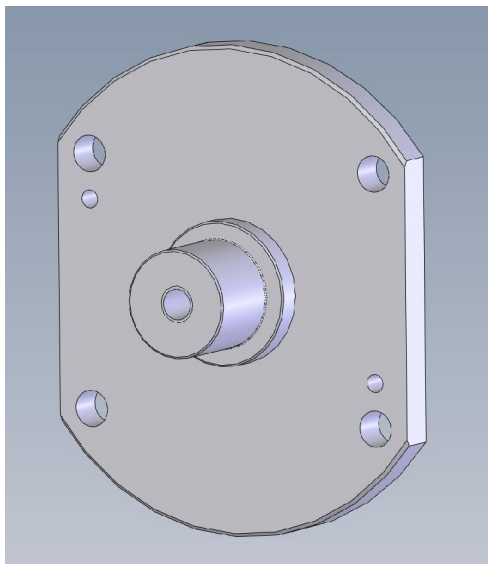
flangia ruota motrice 0VY1582

La flangia viene collegata alla cassa esterna, **0VY1574 cassa attacco motore**, con delle viti.

0VY1574 cassa attacco motore

La ruota oziosa invece viene montata su dei cuscinetti che poggiano su **0VY1581 flangia per ingranaggio ozioso**

0VY1581 flangia per ingranaggio ozioso



La flangia per l'ingranaggio ozioso è invece montata su sulla **0VY1573 cassa ruote dentate**

0VY1573 cassa ruote dentate

Alla cassa ruote dentate viene montata la **0VY1588 piastra bloccaggio**

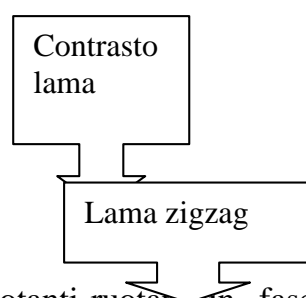
0VY1588 piastra bloccaggio

L'elemento che collega il complesso delle casse che fanno da supporto a gli ingranaggi con la cassa di moto rotazione coltelli è la **0VY1577**

piastra riferimento cassa

0VY1577 piastra riferimento cassa

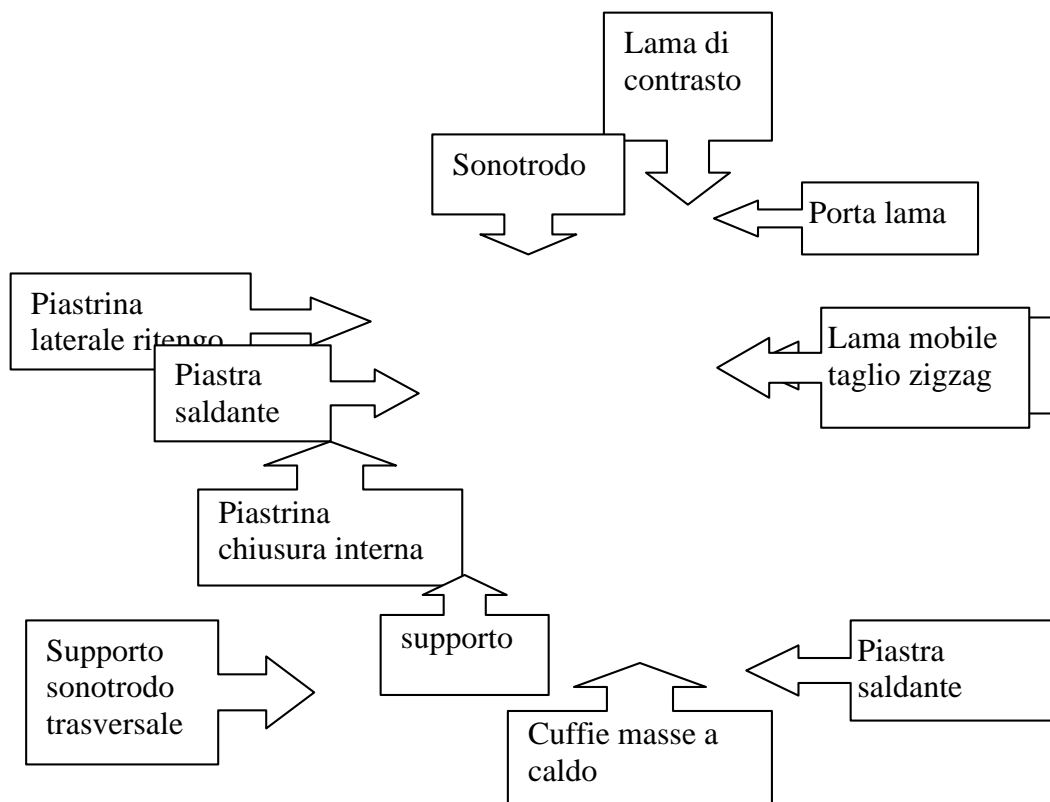
3.3 Masse saldanti ad ultrasuoni a lame di taglio



Le 2 masse rotanti ruotano in fase tra di loro. Ciascuna massa saldante presenta un sonotrodo e un supporto (incudine) montati su un supporto in posizione opposta, in modo tale che il sonotrodo vibri sempre contro l'incudine. Il sonotrodo vibrando trasferisce energia e calore alla carta da saldare (la quale si muove rettilineo). La lama di taglio premendo contro il contrasto determina il taglio del pacchetto.

Quindi grazie al moto rotatorio delle masse trasversali, considerate in fase tra di loro, e grazie il movimento della carta vengono realizzate le saldature trasversali del pacchetto e il taglio dei vari pacchetti tra di loro

Singola massa trasversale



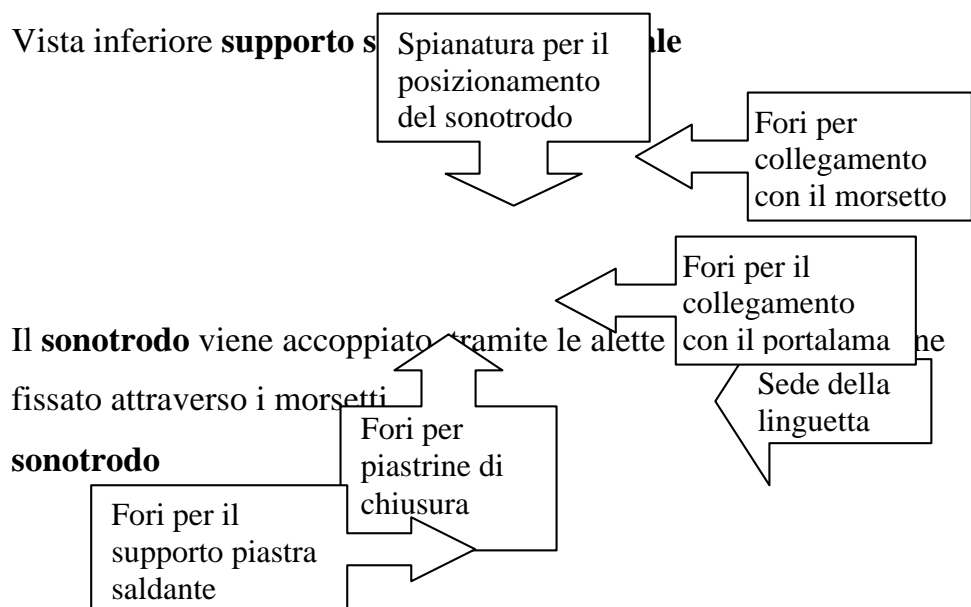
Il moto viene generato dal motore e viene trasmesso attraverso gli ingranaggi agli alberi di rotazione inferiore e superiore. Gli alberi sono collegati attraverso viti al **supporto sonotrodo trasversale** il quale è parte del gruppo masse saldanti ad ultrasuoni a lame di taglio.

Nella parte superiore del supporto vi sono alloggiati le sedi delle viti per il collegamento con il morsetto per il sonotrodo, per il porta lama e per le piastrine di chiusura. Sulla spianatura superiore del supporto viene alloggiato il sonotrodo.

I fori laterali servono per il collegamento con le cuffie.

Nella parte inferiore si notano invece i fori per il collegamento con il supporto della piastra saldante

Vista superiore **supporto sonotrodo trasversale**



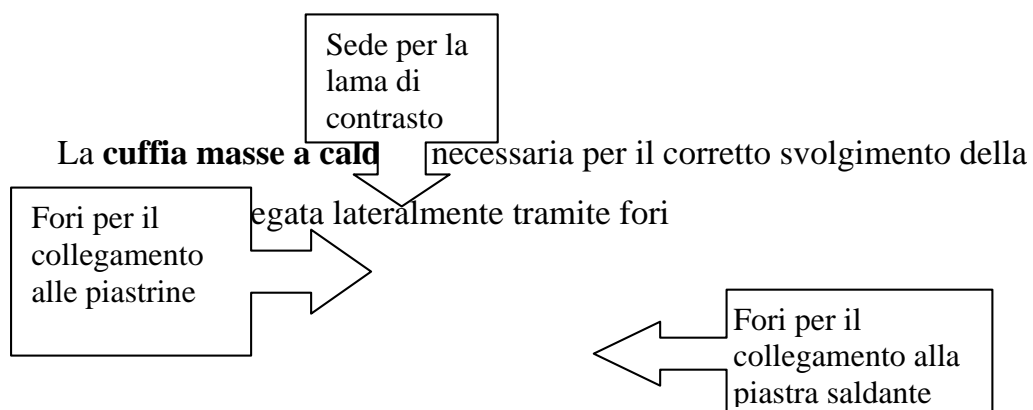
I **morsetti** presentano fori per l'alloggiamenti di viti incassate per il collegamento col supporto e una linguetta per stringere il sonotrodo.



Morsetti

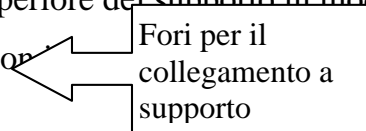
Il **supporto lama** è posizionato al lato del sonotrodo. La **Linguetta** serve per l'alloggiamento della lama di contrasto e di fori per il collegamento a piastrine destinate al serraggio della lama di contrasto stessa.

supporto lama



cuffia masse a caldo

Le **piastrine di chiusura** non hanno funzioni strutturali ma unicamente di chiusura della parte superiore del supporto in modo da evitare il contatto di parti esterne con il supporto e il supporto è posizionato all'interno del supporto.



piastrine di chiusura

La **lama di contrasto** è rivestita con carburi in modo da realizzare un corretto taglio insieme alla lama

lama di contrasto

La **piastrina laterale** serve al corretto posizionamento della lama, i fori sono necessari per il serraggio al supporto lama

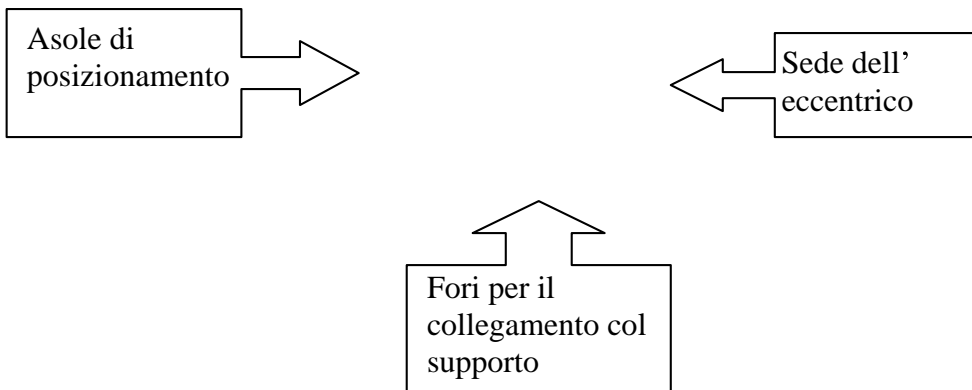
piastrina laterale

Il **supporto piastra saldante** è dotata di fori per il collegamento al supporto principale e di un asola per il posizionamento della piastra saldante (o incudine). I fori realizzati su queste asole servono al

posizionamento di un eccentrico che permette il posizionamento a diverse altezze dell'incudine.

supporto piastra saldante

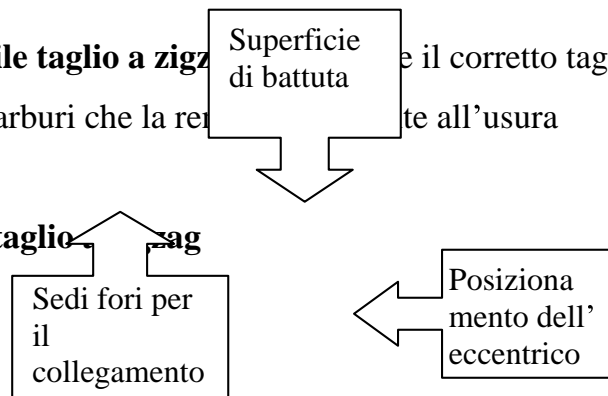
Nella parte superiore della **piastra saldante** notiamo la superficie di battuta del sonotrodo, sono presenti fori per il posizionamento dell'eccentrico e della lama a zigzag



piastra saldante

La **lama mobile taglio a zigzag** è realizzata in carburi che la rende resistente all'usura. La **superficie di battuta** è il corretto taglio della carta, è

lama mobile taglio a zigzag



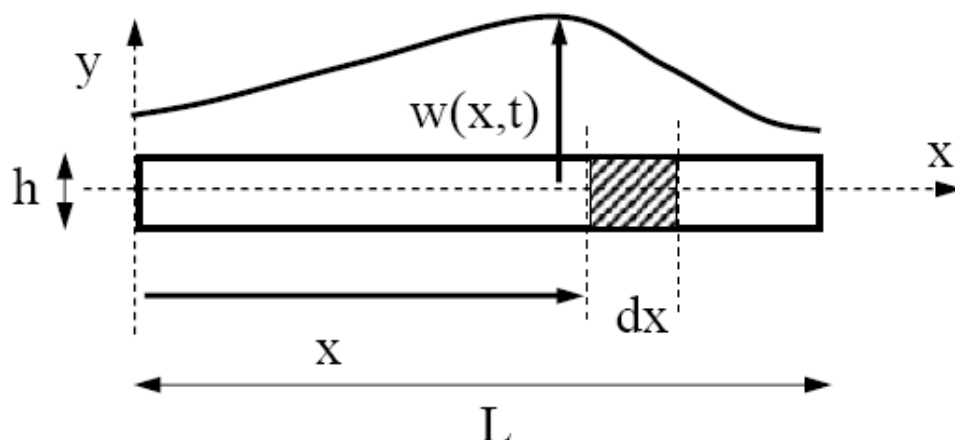
4 Validazione vincoli

Dopo aver rappresentato i 2 gruppi a CAD ci si accinge di eseguire un'analisi attraverso il software ProMecanica che utilizza lo strumento degli elementi finiti.

Prima di effettuare un'analisi modale della nostra struttura complessa è stato eseguito un'analisi di una semplice trave sottoposta a carico flessionale confrontando il risultato tra il metodo analitico del sistema continuo e il risultato del sistema a elementi finiti. Questa analisi non solo rappresenta un primo facile approccio a questo sistema di progetto ma ci chiarifica come il sistema possa rappresentare i vincoli in modo corretto mediante simulazione FEM.

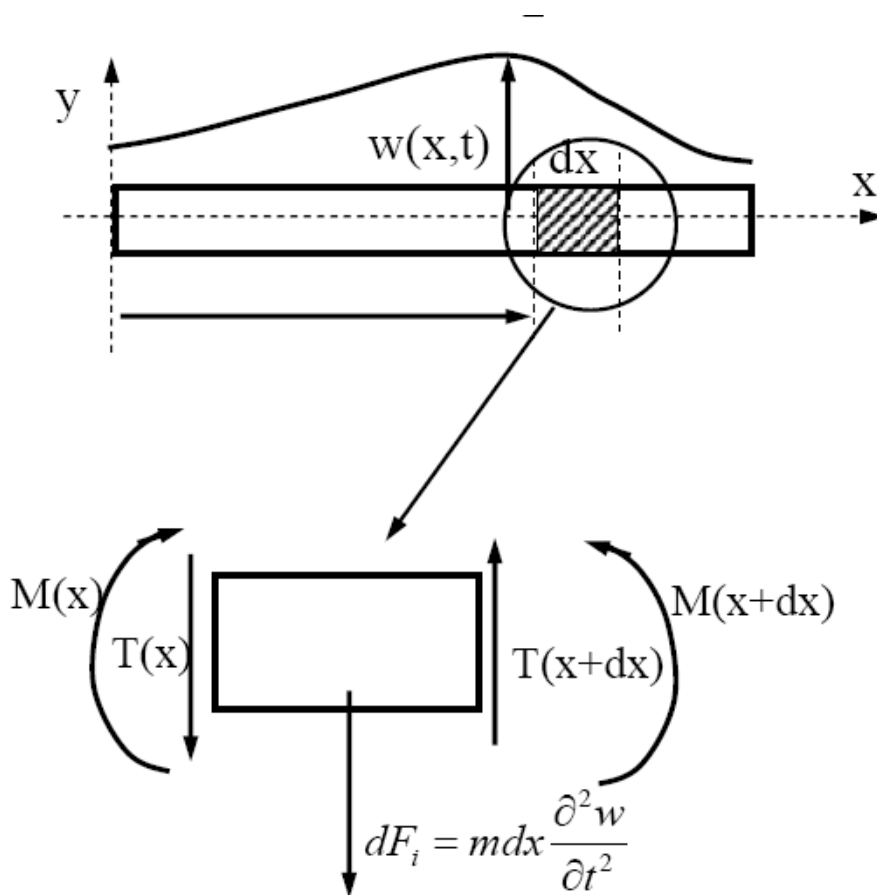
4.1 Metodo analitico

Il moto flessionale è descritto dalla funzione $w(x,t)$ che descrive al variare del tempo il moto dell'asse della trave in direzione trasversale



Isoliamo dalla trave un tronco di lunghezza infinitesima dx in posizione generica: le forze che agiscono sul tronco sono:

- la forza di inerzia dF_i
- Le azioni di taglio $T(x)$ e $T(x+dx)$ sulle facce di sinistra e di destra dell'elemento
- I momenti flettenti $M(x)$ e $M(x+dx)$ sulle due facce dell'elemento h



$$w(x,t) = [A \cos(\gamma x) + B \sin(\gamma x) + Ch(\gamma x) + DSh(\gamma x)] \cos(\omega t + \phi)$$

Rappresenta la soluzione generale delle vibrazioni flessionali stazionarie della trave.

Per ottenere il moto vibratorio effettivo della trave, si devono imporre nella soluzione generale del lucido precedente le particolari condizioni al contorno cui la trave è soggetta agli estremi.

A titolo di esempio, consideriamo il caso di trave vincolata alle estremità mediante doppio vincolo di appoggio (spostamento w bloccato, rotazione dell'estremo libera).

In tale situazione si ha:

$$w(0, t) = 0 \text{ per ogni tempo } t$$

$$w(L, t) = 0 \text{ per ogni tempo } t$$

Oltre a queste due condizioni, è però necessario imporre anche l'equilibrio delle due estremità della trave. Infatti l'equazione di moto ricavata in precedenza garantisce l'equilibrio dinamico all'interno della trave, ma non alle sue estremità.

Sostituendo nella soluzione

$$w(x, t) = [A \cos(\gamma x) + B \sin(\gamma x) + Ch(\gamma x) + DSh(\gamma x)] \cos(\omega t + \phi)$$

le due condizioni per l'estremo di sinistra $x=0$ si ottiene:

$$\left. \begin{array}{l} A + C = 0 \\ A - C = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} A = 0 \\ C = 0 \end{array} \right.$$

Sostituendo invece le due condizioni per l'estremo di destra $x=L$ e tenendo conto che A e C sono nulli,

$$\left. \begin{array}{l} B \sin(\gamma L) + DSh(\gamma L) = 0 \\ -B \sin(\gamma L) + DSh(\gamma L) = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} D = 0 \\ B \sin(\gamma L) = 0 \end{array} \right.$$

L'ultima delle quattro condizioni:

$$B \sin(\gamma L) = 0$$

Ammette la soluzione "banale" $A=B=C=D=0$, oppure la condizione:

$$\sin(\gamma L) = 0 \Rightarrow \gamma L = k\pi ; \quad \gamma = \frac{k\pi}{L}$$

E ricordando che:

$$\gamma^4 = \frac{m\omega^2}{EJ_y}$$

$$\omega = \omega_k = \sqrt{\gamma^4 \frac{EJ_y}{m}} = \left(\frac{k\pi}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EJ_y}{m}}$$

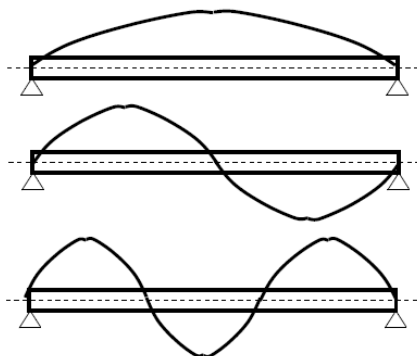
ossia le vibrazioni flessionali stazionarie possono avvenire solo a determinate pulsazioni ω_k , dette pulsazioni proprie ed espresse dalla formula sopra riportata, in cui k può assumere qualunque valore intero.

In corrispondenza di ciascuna k -esima pulsazione propria ω_k la vibrazione flessionale della trave è definita dalla funzione:

$$w_k(x, t) = \underbrace{B_k \sin\left(\frac{k\pi}{L}x\right)}_{\alpha_k(x)} \underbrace{\cos(\omega_k t + \phi_k)}_{\beta_k(t)}$$

La funzione dello spazio α_k , che descrive la forma spaziale del moto, viene detta **modo di vibrare** associato alla pulsazione propria ω_k . Per il caso considerato, tutti i modi di vibrare sono sinusoidi con lunghezza d'onda pari a sottomultipli interi del doppio della luce L della trave:

$$\alpha_k(x) = B_k \sin\left(\frac{\omega_k}{c}x\right)$$



Primo modo di vibrare

Secondo modo di vibrare

Terzo modo di vibrare

Il più generale moto libero stazionario della trave vincolata con doppio appoggio alle estremità è rappresentato dalla combinazione lineare di

tutti i moti elementari precedentemente ricavati:

$$w(x,t) = \sum_k w_k(x,t) = \sum_k \underbrace{B_k \sin\left(\frac{k\pi}{L}x\right)}_{\alpha_k(x)} \underbrace{\cos(\omega_k t + \phi_k)}_{\beta_k(t)}$$

In cui i coefficienti B_k e ϕ_k possono essere determinati imponendo le condizioni iniziali ossia il valore della posizione e della velocità di tutte le sezioni della trave nell'istante $t=0$:

$$w(x,0) = w_0(x) ; \left. \frac{\partial w}{\partial t} \right|_0 = \dot{w}_0(x)$$

Conclusione

1. La vibrazione flessionale di una trave è descritta dall'equazione:

$$EJ_y \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0$$

2. Nel caso di vincolo di tipo doppio appoggio (spostamenti bloccati, rotazioni libere alle due estremità) le frequenze proprie flessionali della trave sono date dalla formula:

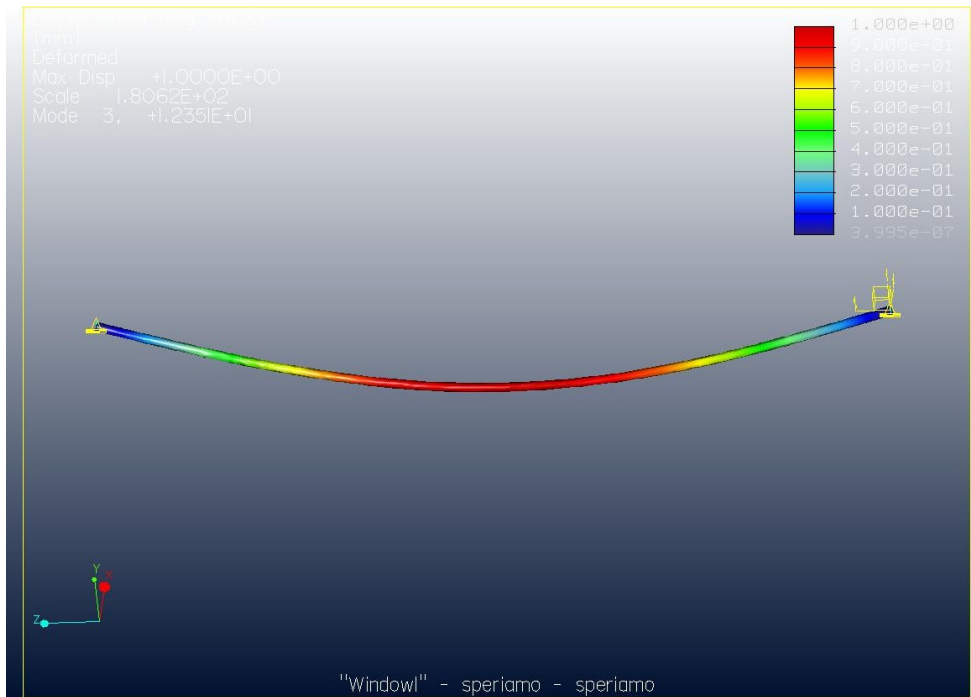
$$\omega_k = \left(\frac{k\pi}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EJ_y}{m}}$$

3. I corrispondenti modi di vibrare sono sinusoidi con lunghezza d'onda pari a un sottomultiplo intero della lunghezza della trave

Sono stati introdotti in un foglio excel i dati della trave in esame, utilizzando i calcoli riusciamo a definire le pulsazioni dei vari modi e la frequenza.

4.2 1° Modo di vibrare

lunghezza			
a		mm	1800
		Kgmm/s ²	
E		2	70000000
ro		kg/mm ³	0,0000027
			314,159265
S		mm ²	4
Raggio		mm	10
	3,1415926		
pi greco	5		
modo	1		
			7853,98163
I	0	mm ⁴	4
			77,5517991
pressione modo	1		2
			12,3427521
		frequenza	8



I dati della simulazione 12,23Hz combaciano con quelli dell'analisi analitica 12,34 Hz

video2modo.mpg

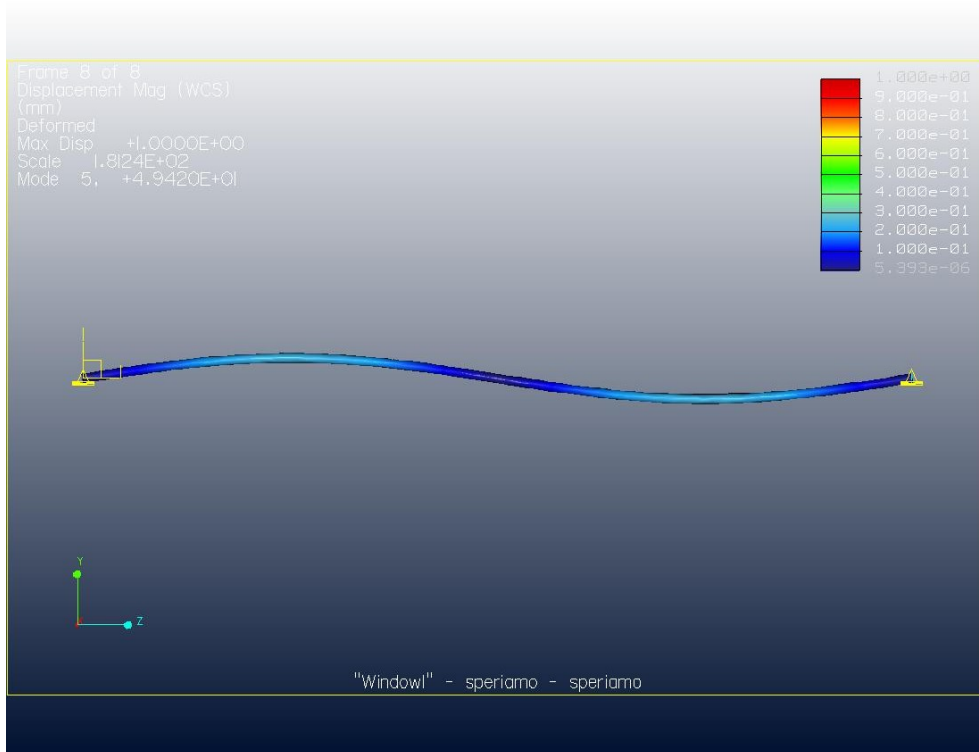
4.3 2° Modo di vibrare

lunghezza	mm	1800
E	kgmm/s ²	70000000
ro	kg/mm ³	0,0000027
S	mm ²	314,1592654
Rggio	mm	10
pireco		3,14159265
modo		2
I	mm ⁴	7853,981634

pusazione modo 2

310,2071965

frequenza 49,3710087



Anche il 2 modo dimostra come i valore dell'analisi a fem 49,42 Hz
rispecchi i valori dell'analisi modale in forma analitica 49,37 HZ

3modo.mpg

4.3 Conclusioni

In conclusione possiamo affermare come l'analisi agli elementi finiti rispecchi l'andamento analitico del problema, inoltre siamo riusciti a identificare le condizioni di vincolo all'interno del simulatore FEM di Pro-Mechanica in modo corretto.

5 Analisi modale delle masse rotanti

5.1 Obbiettivi dell' analisi

Dopo aver effettuato la validazione dei vincoli per cui si è riusciti a stabilire le condizione di vincolo in Pro/Mechanica che corrispondono a una simulazione di un cuscinetto, sono state realizzate modali mediante il medesimo programma per verificare:

- 1) a che frequenza di risonanza corrisponde il modo di vibrare del sonotrodo ;
- 2) definire se nell'intorno della frequenza di risonanza del sonotrodo vi siano condizione di risonanza di altri componenti ;
- 3) definire se alla frequenza di risonanza del sonotrodo vibrino in risonanza altri componenti;

Il generatore emette un segnale elettrico ad una frequenza di 35000Hz. Il sistema elettronico della macchina automatica ricerca la frequenza di risonanza del sonotrodo che determina la saldatura ottimale nell'intorno dei 35000Hz. Si attesta il generatore a questa frequenza di risonanza originale.

Si sono quindi cercate in un range compreso tra 34350Hz e 35650Hz le frequenze proprie del sistema.

5.2 Modello analizzato

Come sistema sono state considerate solo le masse rotanti, quindi tutto ciò che concerne il sonotrodo e le masse di supporto e l'albero che conferisce alla carcassa e al sonotrodo la rotazione.

Come condizioni di vincolo si è simulato il vincolo dato dai cuscinetti posti nelle posizioni evidenziate dalle frecce rosse

Per ogni modo di vibrare del sistema è stato realizzato un video e una foto che illustrano le deformazioni secondo il modo proprio di vibrare.

5.3 Modi di vibrare

5.3.1 34672 Hz

Il primo modo di vibrare del sistema si trova ad una frequenza di 34672 Hz. Si può osservare come in questa condizione di risonanza si deformino il supporto lama e le cuffie masse a caldo superiori.

34672.mpg 34672y.mpg

5.3.2 34766 Hz

Il secondo modo di vibrare corrisponde a una frequenza di 34766 Hz. Vibrano in direzione opposta i due supporti lama e la piastra saldante inferiore.

34766.mpg 34766y.mpg

5.3.3 34903 Hz

Il terzo modo di vibrare trovato si trova alla frequenza di 34903 Hz. Anche questo modo di vibrare interessa i supporti lama le cuffie masse a caldo e in misura minore l'albero.

34903.mpg 34903y.mpg

5.3.4 34931 Hz

La condizione di risonanza del sonotrodo si nota alla frequenza di 34931 Hz. Si osserva come solo il sonotrodo sia interessato alla vibrazione.



34931risonanza.mpg



34931risonanzaY.mpg

5.3.5 35065 Hz

Alla frequenza a 35065Hz il sistema viene sollecitato in questa condizione . Le cuffie masse a caldo sono l'elemento che subisce la maggiore deformazione, anche l'albero subisce una vibrazione che può pregiudicare il corretto funzionamento del sistema.

35065.mpg 35065y.mpg

5.3.6 35157 Hz

A 35157 Hz abbiamo questa condizione di risonanza per cui sia il supporto lama che le cuffie che la piastra saldante si deformano e vibrano.

35157y.mpg 35157.mpg

5.3.7 35196 Hz

Alla frequenza di 35196 Hz sono sempre le cuffie il supporto lama e la piastra saldante che subiscono una deformazione.

35196.mpg 35196y.mpg

5.3.8 35288 Hz

A questa frequenza di risonanza 35288Hz, il sistema presenta vibrazioni sia nel supporto sonotrodo trasversale sia nella piastra saldante sia nelle cuffie.

35288.mpg 35288y.mpg

5.3.9 35320 Hz

A 35320Hz la piastrina di chiusura intera , le cuffie a caldo e la piastra saldante rappresentano gli elementi che vibrano maggiormente.

35320.mpg 35320y.mpg

5.3.10 35368 Hz

A 35368Hz la piastrina, le cuffie a caldo e il supporto lama sono gli elementi maggiormente deformati

35368.mpg 35368y.mpg

5.3.11 35496 Hz

A 35499 HZ l'albero e le cuffie a caldo sono le componenti maggiormente deformate.

35496.mpg 35469y.mpg

5.4.12 35644 Hz

Alla frequenza di risonanza di 35644 Hz la cuffia masse a caldo presenta una deformazione verso il basso.

35644.mpg

5.5 Conclusioni dell'analisi

Il gruppo saldante funziona ad una frequenza di 34931 Hz per la quale entra in risonanza solo il sonotrodo mentre gli altri componenti del sistema non presentano vibrazioni. All'interno del range considerato, compreso tra 34350Hz e 35650Hz , si sviluppano però 12 condizioni di risonanza ,alcune anche molto vicine, 34903 Hz , alla frequenza di lavoro. In queste altre situazioni il sonotrodo non viene quasi mai coinvolto nella vibrazione per cui la saldatura in qualsiasi altro modo di vibrare in questo range di frequenza risulta impossibile.

6 Analisi modale dei sistemi interessati alla saldatura

6.1 Introduzione all'analisi

In questa fase di studio è stato affrontato il problema di verificare come le masse che interagiscono nel sistema interferiscano con il sonotrodo. È stato quindi analizzato il sonotrodo e sono state considerate le sue condizioni di risonanza in un range considerato da 34000 a 36000 Hz. In seguito sono state aggiunte le masse che interessano maggiormente il processo di saldatura quindi la cassa rotante ,gli attacchi , il supporto lame e l'incudine.

Sono stati studiati questi 5 differenti sistemi per evidenziare come ogni singolo componente interessi il processo di saldatura e se vi siano possibili interferenze con il movimento del sonotrodo.

Ricordiamo che gli spostamenti nelle figure e nel video sono amplificati; inoltre il programma di calcolo non definisce lo spostamento in una unità di misura di lunghezza ma fornisce un valore adimensionale.

Pro/Mechanica analizza la forma e il tipo di materiale del sistema, studia le condizioni di risonanza secondo l' intervallo di frequenze imposte e attribuisce al massimo spostamento del sistema il valore di 1 unità adimensionale. Tutti gli altri spostamenti del sistema sono rapporti e frazioni dello spostamento maggiore.

Questa premessa serve per specificare come sebbene gli spostamenti sembrino molto grandi in realtà risultano molto piccoli. Per esempio

quando il sonotrodo entra nella sua condizione di risonanza assiale , lo spostamento massimo della testa dell' sonotrodo è di circa 25 micron. L'intero processo di saldatura si basa quindi su uno spostamento di 65 micron a una frequenza di 35000 Hz circa, il tutto montato su una macchina rotativa che può girare fino a 1000 giri al minuto. Si capisce quindi come il processo necessiti la massima precisione in tutti i suoi componenti. E' proprio in questa ottica che si sviluppa questo studio che mira all'ottimizzazione (in questo campo in relazione all'analisi modale) di ogni componente interessato al processo.

Questi 5 differenti sistemi che verranno analizzati daranno indizi sulla bontà o meno del progetto esistente mettendo in luce se i vari componenti posseggano frequenze proprie prossime a quella di lavoro del sonotrodo. La condizione ottimale del sistema è ovviamente quella in cui tutto il sistema rimanga fermo ad eccezione del movimento in direzione assiale del sonotrodo.

6.2 Sonotrodo libero

In questa prima analisi si è analizzato il sonotrodo libero ovvero non vincolato in nessun punto.

Nel caso ideale il sonotrodo dovrebbe muoversi intorno alla frequenza di 35000Hz solo in direzione assiale e le alette di sostegno che fungono da attacchi dovrebbero rimaner ferme.

6.2.1 34525 Hz



34525.mpg

Dal video emerge chiaramente come a 34525Hz si trovi la condizione di risonanza del sonotrodo. Si può però notare come partecipino alla vibrazione, non solo la testa del sonotrodo, ma, in misura notevole, anche le alette. In particolare si può analizzare come la zona rossa, ossia il punto di massimo spostamento non risulti essere la testa del sonotrodo (come vorremmo nel caso ideale) ma la zona delle alette. Questo problema verrà affrontato nel capitolo successivo.

6.2.2 35018Hz



35018.mpg

A questa frequenza si nota solo un movimento delle alette di sostegno

6.2.3 35110Hz



35110.mpg

Questa situazione è la complementare di quella precedente (spesso in intervalli molto vicini troviamo 2 condizioni di risonanza molto simili e complementari l'una con l'altra). In questo caso notiamo come ora vibri l'aletta sinistra e come nella frequenza immediatamente precedente vibrasse quella a destra.

6.2.4 35726Hz



35726.mpg

A questa frequenza troviamo un altro modo di vibrare sonotrodo in direzione longitudinale

6.3 Sonotrodo vincolato

La condizione di lavoro del sonotrodo si ha a una frequenza di 34796 Hz

6.3.1 34796 Hz



34796.mpg

Si può notare come da vincolato vibri in maniera regolare anche se le alette si deformano comunque.



34796y.mpg

In questo secondo filmato si può vedere lo spostamento nella direzione Y ossia lungo l'asse di lavoro.

6.3.2 35481 Hz

A 35481Hz troviamo l'altro modo di vibrare del sonotrodo ossia in direzione trasversale.



35481.mpg

6.4 Cassa rotante e sonotrodo

In questo sistema abbiamo considerato il sonotrodo come saldato alla cassa rotante. Si mettono in luce come a frequenze molto vicine a quelle di lavoro si riscontrano situazioni di assoluta collisione del sistema stesso.

6.4.1 34762 Hz

La frequenza di lavoro è pari a 34762 Hz.



34762.mpg



34762y.mpg

In condizione di risonanza il sistema si comporta bene in quanto solo il sonotrodo è interessato alla vibrazione.

6.4.2 34888 Hz



34888y.mpg

6.4.3 35122 Hz

A soli 100 Hz di differenza notiamo come la cassa rotante si deformi pericolosamente , sia nella sede dei cuscinetti, sia nella zona di attacco all'albero.



35122y.mpg

Entra in risonanza la piastra d'attacco all' albero e la parte inferiore della cassa

6.4.4 34546 Hz



35456.mpg

A questa frequenza si nota il secondo modo di vibrare del sonotrodo.



35503.mpg

La parte maggiormente deformata risulta essere il fondo della cassa.

6.5 Cassa rotante – sonotrodo – attacchi

Il sistema è costituito dalla cassa rotante e il sonotrodo collegata ad essa tramite gli appositi attacchi.

6.5.1 34637 Hz



34637.mpg



34637y.mpg

Si può notare come si deformino zona della cassa adibita a piastra di collegamento e gli attacchi del sonotrodo.

6.5.2 34587 Hz

Viene individuata la condizione di risonanza di lavoro del sonotrodo.

6.5.3 35085 Hz



35085.mpg

Si noti come gli attacchi del sonotrodo vengano talmente sollecitati da subire un incurvamento

6.5.4 35321 Hz



35321.mpg

6.5.6 conclusioni del sistema in esame

Sono sempre gli attacchi e la zona posteriore della cassa a presentare deformazioni

In conclusione, dalle analisi condotte, risulta come debbano essere tenute in seria considerazione le modalità di realizzazione degli attacchi (che tendono sempre ad incurvarsi) e l'ottimizzazione della zona della cassa destinata all'accoppiamento con l'albero.

Gli attacchi sono una parte molto delicata perché come abbiamo visto, tendono a vibrare, quindi a trasferire le vibrazioni.

La parte posteriore della cassa trasferisce il moto dell'albero per questo non deve vibrare altrimenti mette in crisi tutto il moto del sistema.

6.6 Sistema cassa rotante – sonotrodo – attacchi - supporti lama

Rispetto al sistema precedente si sono aggiunti i due supporti laterali della lama.

La realizzazione di questo elemento necessita una notevole precisione poiché una sua eventuale rotazione comporterebbe uno spostamento della lama da taglio .

6.6.1 34751 Hz



34751.mpg

Si nota una deformazione della cassa e dei supporti lama

6.6.2 34842 Hz



34842risonanz.mpg

Si può notare come il solo elemento vibrante sia il sonotrodo , gli altri elementi sono strettamente vincolati

6.6.3 35034Hz



35034.mpg

La struttura è altamente sollecitata ;in particolare lo sono i supporti della lama e gli attacchi del sonotrodo

6.6.4 35159 Hz



35159.mpg

In questo caso i supporti della lama sono esclusi, mentre sono gli attacchi a subire deformazione 35159 Hz

6.6.5 35334 Hz



35334.mpg

La parte posteriore della cassa ovvero la zona di attacco all'albero è la zona che vibra in risonanza

6.6.6 35732 Hz



35732.mpg

La deformazione maggiore può essere riscontrata nel supporto lama più vicino alla zona posteriore della carcassa.

6.7 Cassa rotante- sonotrodo- attacchi - supporto lame e incudine

Questo ultimo sistema è composto da tutte le parti che partecipano più attivamente al processo di saldatura . Se l' incudine vibrasse infatti o avesse deformazioni determinerebbe il fallimento del processo di saldatura.

6.7.1 34082 Hz

A questa frequenza notiamo una deformazione sia nel basamento sia nel supporto lama che nei morsetti.



34082.mpg

6.7.2 34351Hz

L'incudine è l'elemento soggetto alle maggiori vibrazioni in questo modo di vibrare



34351.mpg

6.7.3 34810 Hz

A questa frequenza troviamo la condizione di lavoro per cui notiamo come l'elemento che entri in risonanza sia il sonotordo. Tuttavia è possibile notare come anche i morsetti e il supporto lama mostrino deformazioni.



34810.mpg

6.7.4 34832 Hz

In questa situazione notiamo un'altra condizione di risonanza del sonotrodo ma si possono constatare pericolose vibrazioni concentrate nella piastra saldante e nel basamento.



34832.mpg

6.7.5 34917 Hz

Il morsetto e il supporto lama entrano in risonanza a questa frequenza.



34917.mpg

6.7.6 35174 Hz

La piastra saldante (incudine) presenta vibrazioni che determinano una torsione e una deformazione.



35174.mpg

6.7.7 35498 Hz

I morsetti laterali e l'incudine inferiore sono gli elementi che presentano le deformazioni maggiori.



35498.mpg

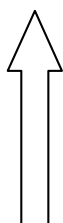
7 Studio e ottimizzazione del sonotrodo

7.1 Nuove ipotesi costruttive

E' stato eseguito uno studio riguardante il sonotrodo denominato 3YG76. Sono stati effettuati alcuni studi volti a ottimizzare la forma delle alette realizzate per l'attacco alle masse rotanti.

In primo luogo si è cercato di determinare la superficie neutra proprio del sonotrodo stesso. Si è notato come considerando una sola sezione trasversale del sonotrodo il piano neutro risulti una linea ad arco (il calcolo per ricerca del piano neutro viene riportato in fondo al capitolo).

Considerando 3 diverse sezioni del sonotrodo si è giunti a realizzare l'intera superficie della superficie neutra.



Considerando questa forma del piano neutro sono state modellate due differenti ipotetiche soluzioni per gli attacchi:

Nella prima soluzione si prevede la realizzazione degli attacchi sul fondo che seguono la linea arcuata del piano neutro. Le alette sono state opportunamente realizzate a raccordate al sonotrodo in modo da diminuire le tensioni.

Nella seconda ipotesi costruttiva si prevede la realizzazione di alette laterali con l'attacco svirgolato che segue l'andamento della superficie neutra.

Lo studio è stato sviluppato come segue:

Innanzitutto è stato verificato come i sonotrodi non vincolati entrino in risonanza a frequenze comprese tra i 34000 e i 36000Hz. Questo fornisce una misura dell'energia dispersa o delle vibrazioni che il sonotrodo potrebbe scaricare sulla base.

In secondo luogo sono state valutate le tensioni presenti nel sonotrodo in condizione di risonanza e le reazioni dei vari attacchi.

7.2 Condizione di sonotrodo non vincolato

7.2.1 Sonotrodo originale

Si può vedere come sia verificata la condizione di risonanza intorno ai 34500Hz. Si può notare come la zona di maggiore deformazione si

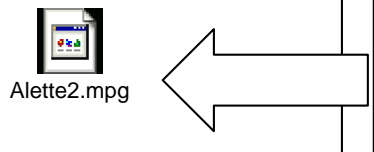
verifichi proprio in corrispondenza delle alette fungenti da attacchi e come inoltre la deformazione della superficie saldante del sonotrodo sia proporzionalmente molto più bassa rispetto a quella delle alette.



Si noti inoltre che in condizioni di assenza di vincolo gli attacchi stessi sono luogo delle maggiori tensioni ($8.1e*07$).

7.2.2 Sonotrodo modificato con alette nel fondo

Nel sonotrodo modificato si può notare come le alette non subiscano deformazioni, l'unica deformazione (quella più evidente) è come prevedibile quella della tura saldante del sonotrodo.

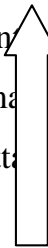


Per quanto riguarda le tensioni in condizione di non vincolo si ottengono valori 4 volte inferiori rispetto all'altro caso ($2,5e*07$)



Ma da un'analisi più dettagliata notiamo come nei pressi delle alette non vi siano tensioni alte: le tensioni elevate sono presenti in prossimità della cavità che contiene il convertitore.

Il modello di tensioni di un sonotrodo non vincolato, simula la condizione reale di un sonotrodo non collegato strettamente alla base, per via di difetti o di allentamenti delle viti. Possiamo notare dallo studio eseguito come le tensioni maggiori siano concentrate nel caso del sonotrodo originale sugli attacchi, nel caso del sonotrodo originale nella sede del convertitore.



7.3 Condizione di sonotrodo vincolato

7.3.1 Sonotrodo originale

Come previsto in condizioni di vincolo gli attacchi non subiscono deformazioni

Per quanto riguarda le tensioni analizziamo la figura sottostante.

Le tensioni nel caso di vincolo perfetto diminuiscono rispetto al caso non vincolato di 4 volte, $2.1 \cdot 10^7$. La tensione massima anche in questo caso si trova nei pressi della sede del convertitore.

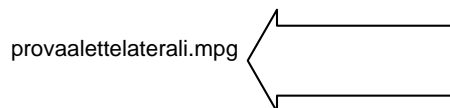
7.3.2 Sonotrodo modificato

Anche nel sonotrodo dotato di alette sul fondo non si riscontrano particolari deformazioni nelle alette, si osserva inoltre come le tensioni sulle alette stesse risultino molto basse.

Si possono notare le deformazioni nel campo del sonotrodo vincolato

7.3.3 Caso sonotrodo con alette laterali

Si può notare dall' immagine sottostante come le tensioni siano molto alte intorno ai $2 \cdot 10^8$, e come queste si concentrino nei pressi delle alette



Per quanto concerne la deformata si osserva come siano sempre le alette le zone più soggette a deformazione

Dalle analisi FEM effettuate non si riscontrano particolari miglioramenti né nel campo delle tensioni né in quello delle deformazioni.

Inoltre le alette laterali svirgolate risultano essere una geometria molto difficile da realizzare in sede costruttiva ,pertanto questa ipotesi costruttiva non risulta essere migliorativa rispetto quella già esistente

7.4 Conclusioni per lo sviluppo futuro

La geometria ad alette modificate sul fondo rappresenta un miglioramento:

- 1) anche in condizioni non vincolato, reggendosi sul piano neutro le alette non vibrano quindi dovremmo avere meno dissipazioni di energia e minor trasmissioni di vibrazioni alla base
- 2) la tensione che grava sugli appoggi risulta bassa sia nel caso di vincolo sia nel caso di assenza di vincolo.

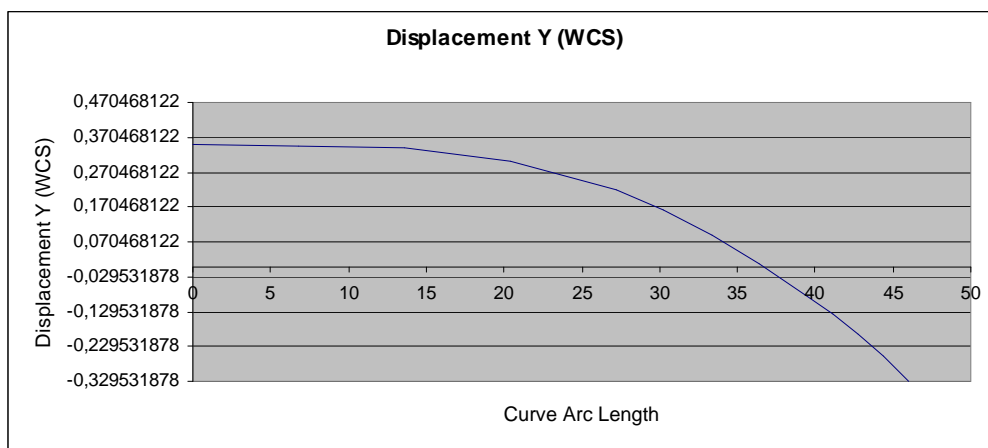
7.5 Studio della identificazione del piano neutro

Per il calcolo volto alla determinazione del piano neutro si è proceduto nel modo seguente:

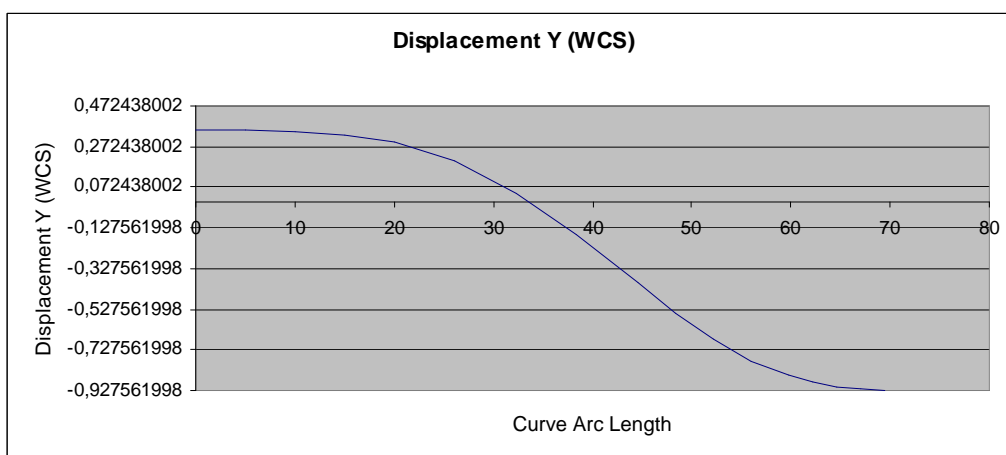
- 1) si è identificata la faccia esterna del sonoro.
- 2) si sono definite una serie di linee di costruzione orizzontali per la determinazione della linea degli zeri a distanze stabilite.



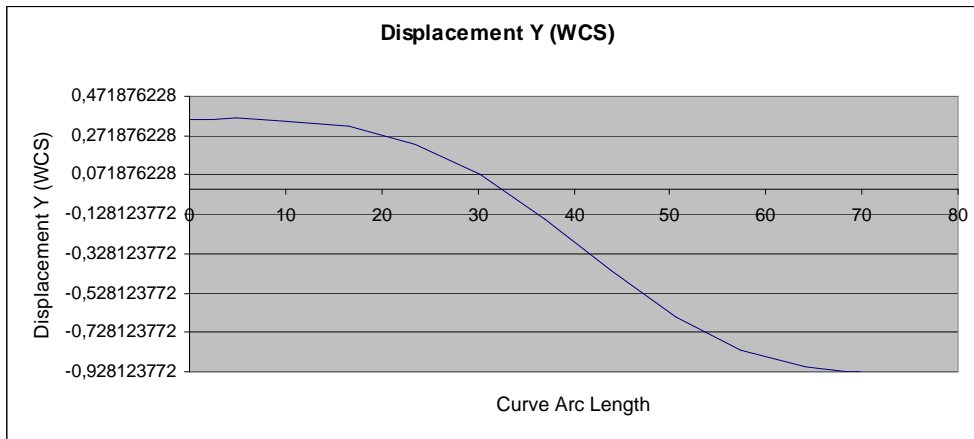
3) si determinano gli spostamenti relativi di ogni singolo punto delle linee orizzontali. Ad esempio per la linea di costruzione evidenziata con la freccia rossa (posta a 10 mm dalla superficie laterale del sonotrodo) si è realizzato il grafico riportato qua sotto che evidenzia come il punto di spostamento nullo sia disposto a 37 mm dal fondo del sonotrodo.



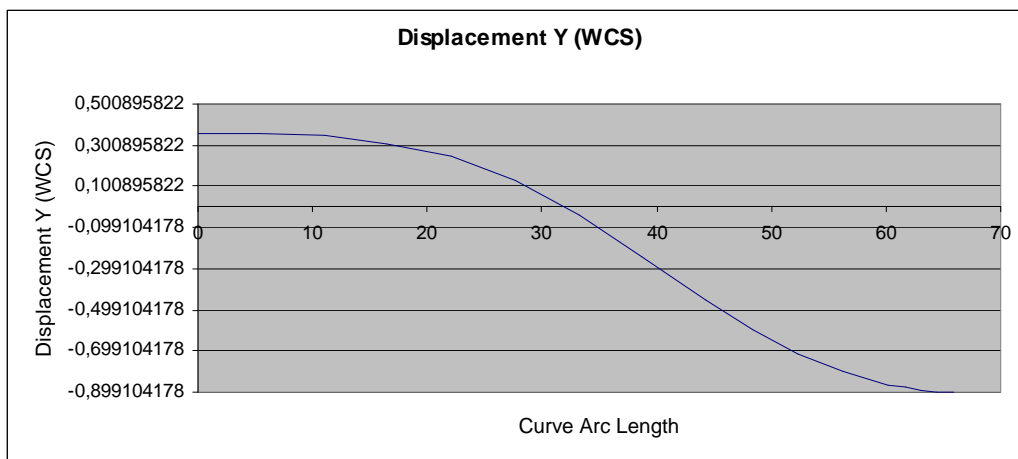
La linea di costruzione evidenziata dalla freccia blu (posta a 14 mm dalla superficie laterale del sonotrodo) evidenzia che il punto che non subisce deformazione sia situato a 35 mm dal fondo.



La linea di costruzione verde (posta a 17 mm dalla superficie laterale del sonotrodo) possiede il punto di spostamento nullo a 33 mm dal fondo.



La linea di costruzione viola ,disposta nella mezzeria del sonotrodo(a 21 mm dalla superficie laterale del sonotrodo) mostra il punto a deformazione nulla a 32 mm dal fondo.



Congiungendo i punti trovati in questa maniera si determina la linea degli zeri della superficie esterna del sonotrodo.

4) si considerano altre superfici realizzando altre linee di costruzione e determinando i punti di spostamento nullo.

5) si congiungono queste linee disposte su varie superfici e si ottiene il piano di spostamento nullo

8 Studio dei nuovi attacchi

Si è quindi progettato un sonotrodo di nuova concezione, dotato di alette posizionate sul fondo, il quale come abbiamo visto nel capitolo precedente dovrebbe risultare migliore in termini di tensioni massime e di vibrazioni trasmesse. Si è proceduti quindi allo sviluppo di attacchi innovativi apposti per il fissaggio del sonotrodo al supporto trasversale.

8.1 Modello originale

Si può analizzare cosa accada quando il sistema viene eccitato alla propria frequenza di risonanza a 34820 Hz

originale.mpg

Si può notare come i morsetti per il sonotrodo siano soggetti a vibrazione, la vibrazione viene trasferita quindi dal sonotrodo ai morsetti attraverso le alette (poste non in posizione dei punti neutri).

Dalla figura si può notare come la tensione più alta sia di $5 \cdot 10^8$ e sia proprio localizzata in corrispondenza della linguetta dell'aletta del sonotrodo su cui si inserisce il morsetto.

8.2 Soluzioni alternative adatte al nuovo sonotrodo

Le specifiche per la realizzazione dei nuovi attacchi sono state

- 1) non modificare il supporto sonotrodo trasversale
- 2) realizzare il numero minimo di pezzi
- 3) realizzare pezzi semplici quindi economici da realizzare

8.2.1 prima soluzione progettuale

Come si può vedere dal disegno per il montaggio si sono realizzate 2 piastre simili per l'appoggio inferiore del sonotrodo e 1 piastra superiore per il serraggio della parte superiore della aletta del sonotrodo.

Per il serraggio delle piastre al supporto si sono utilizzati i medesimi fori che erano stati realizzati in precedenza per il supporto lama.

Piastra per l'appoggio inferiore lato fondo

Piastra per l'appoggio inferiore lato testa

Entrambe le piastre utilizzate per l'appoggio della parte inferiore delle alette sonotrodo sono dotate di una cava (che dovrà essere lavorata in tolleranza) atta al perfetto centraggio del sonotrodo rispetto al sue piastre di supporto. Si è facilitato quindi il montaggio che garantisce un veloce e preciso montaggio del sonotrodo stesso. Le piastre inferiori inoltre sono dotate di una nervatura inferiore destinata all'irrigidimento della struttura per evitare una flessione dell' appoggio stesso.

Piastra per l' appoggio superiore

La piastra per il serraggio della parte superiore delle alette del sonotrodo è stato realizzato in modo che potesse essere montata accoppiandosi con entrambi gli attacchi inferiori.

È stata realizzata una sezione del complessivo in modo da evidenziare il corretto accoppiamento dei vari pezzi.

Per quanto riguarda l'analisi modale si può notare come alla frequenza di risonanza del sonotrodo le vibrazioni non vengano trasmesse dal sonotrodo alla cassa e come gli attacchi non subiscano deformazioni.

deformaznogioco.mpg deformgioco.mpg

Per ciò che concerne le tensioni risultano essere $2,7 \cdot 10^7$

E risultano essere concentrate nella sede del convertitore

Si sviluppavano le stesse tensioni quando si era analizzato solo il sonotrodo ciò denota che il fissaggio del sonotrodo alla cassa non ha comportato l'aumento delle tensioni anzi le tensioni rimangono invariate con il serraggio.

8.2.2 Seconda soluzione progettuale

Con la seconda ipotesi costruttiva si è cercato di ovviare ad alcuni problemi.

- 1) realizzare anche il supporto lama che nell'altra soluzione era difficile da realizzare
- 2) rendere più rigida la piastra inferiore che funge da appoggio al sonotrodo

In luogo delle 2 piastre che fungevano da supporto inferiore per le alette del sonotrodo, si è realizzata un'unica piastra.

Piastra inferiore

Questa piastra è dotata di 4 fori per il serraggio con la cassa, e di 4 fori filettati per l'accoppiamento con il nuovo supporto lama. Grazie alla realizzazione di una piastra unica, si è resa la struttura molto più rigida. Si è dotata la piastra delle cave per il corretto centraggio del sonotrodo, in questo modo si può montare il sonotrodo esternamente alla macchina e successivamente montare il gruppo sonotrodo - piastre supporti lame

come un unico blocco sulla cassa. Ovviamente le cave devono essere lavorate in stretta tolleranza per garantire il perfetto centraggio.

Supporto lama modificato

Il supporto lama assolve in questa maniera due importanti funzioni, quella di garantire il serraggio con la parte superiore delle alette del sonotrodo e quella di reggere la lama di contrasto. In questo modo si minimizza la produzione di pezzi. Si notano anche i fori per la sede delle viti che si andranno poi ad ancorare alla piastra di sostegno.

Si può notare nella sezione il corretto accoppiamento dei pezzi.

Per ciò che concerne l'analisi modale vediamo che la frequenza di risonanza si attesta alla frequenza di 34821Hz

deformazioneip4.mpg

Anche in questo caso come si può notare dalla simulazione, le vibrazioni non sono trasmesse dai supporti, il sonotrodo vibra correttamente.

Per ciò che concerne le tensioni notiamo che la tensione massima si trova in corrispondenza di uno spigolo in prossimità del nuovo supporto lama ed ha un valore di circa $4 \cdot 10^7$

Questa tensione però è localizzata in un'area molto ristretta in prossimità di uno spigolo quindi potrebbe non comportare alcun problema alla struttura.

8.2.3 Terza soluzione progettuale

Nella terza ipotesi viene ottimizzata la piastra che era stata realizzata in precedenza.

Ricordiamo che il processo di saldatura si basa sul funzionamento del sonotrodo il quale subisce variazioni di lunghezza di 35 micron. Data la precisione del sistema si è realizzato un centraggio accurato della piastra inferiore di appoggio con la cassa rotante. Originariamente ricordiamo che il sonotrodo era poggiato sulla cassa e serrato ad essa tramite i morsetti senza alcun centraggio, il corretto posizionamento era da attribuirsi alla abilità dell'operatore. Secondo questa soluzione invece il centraggio del sonotrodo è garantito dalle cave della piastra inferiore per il centraggio del sonotrodo sulla piastra stessa e dalle scanalature di

centraggio che garantiscono il corretto posizionamento della piastra sulla cassa rotante.

Nuova piastra inferiore

Le scanalature di centraggio sono realizzate in tolleranza per collegarsi perfettamente nella direzione trasversale con la cassa. Da notare che le scanalature non poggiano sulla cassa per evitare un doppio e ridondante accoppiamento con la cassa

La frequenza di risonanza si trova a 34823 Hz

deformazioneip5bis.mpg

Notiamo come il sonotrodo non trasmetta vibrazioni al sistema.

La tensione massima risulta essere intorno $3 \cdot 10^7$. e risulta essere sviluppata presso la cava che alloggia l'aletta del sonotrodo.

In definitiva la realizzazione del nuovo sonotrodo con le alette poste nel fondo si ottiene una riduzione delle vibrazioni trasmesse effetto che viene dimostrato anche dalla riduzione delle tensioni che si sviluppano nel modello che passano dai $5 \cdot 10^8$ ai $3 \cdot 10^7$.

8.5 Conclusioni

In questo capitolo si è sviluppato una sistema di attacchi che permettano il collegamento tra il nuovo sonotrodo dotato di alette sul fondo con il vecchio supporto trasversale. Si è giunti a realizzare una struttura molto rigida che prevede l'utilizzo di soli tre componenti, una piastra inferiore e di due supporti lama . Attraverso i nuovi attacchi si è giunti ad un abbassamento notevole delle tensioni ed a una diminuzione delle vibrazioni trasmesse al supporto. Inoltre si è realizzato un sistema di cave e incastri che permette il perfetto centraggio del sonotrodo con il supporto e garantisce all'operatore un montaggio più semplice .

9 Calcolo del guadagno di un sonotrodo attraverso un'analisi sperimentale confrontata con un analisi FEM

Come si è analizzato nella introduzione, per ciascun materiale che viene saldato attraverso gli ultrasuoni esistono ampiezze ottimali di spostamento del sonotrodo che garantiscono una saldatura ottimale.

Ne emerge che nella progettazione di un sonotrodo risulti estremamente importante il calcolo della ampiezza della vibrazione del sonotrodo.

Per guadagno si intende il rapporto tra lo scostamento della testa saldante del sonotrodo e la zona del sonotrodo che prevede la sede del convertitore.

Conoscendo lo scostamento reale del sonotrodo, per generatori di 35.000 Hz si utilizzano convertitori che presentano spostamenti intorno ai 6 micron, si ottiene lo spostamento reale della testa saldante moltiplicandolo per il guadagno.

Spostamento reale testa saldante = (spostamento reale convertitore) x guadagno

Guadagno = (spostamento virtuale testa saldante) / (spostamento virtuale convertitore)

A questo punto risulta facile verificare e confrontare se il sistema saldante garantisce un'ampiezza tale da garantire una saldatura soddisfacente.

Occorre sempre però confrontare i dati delle simulazioni virtuali con sperimentazioni reali, in modo da garantire la bontà dei risultati ottenuti. Il problema della misurazione sperimentale può presentare difficoltà nel calcolo di misure e scostamenti molto piccoli (trattiamo spostamenti che si aggirano intorno a una decina di micron). Gli strumenti di misura devono quindi possedere una accurata precisione in modo da non inficiare i dati ottenuti.

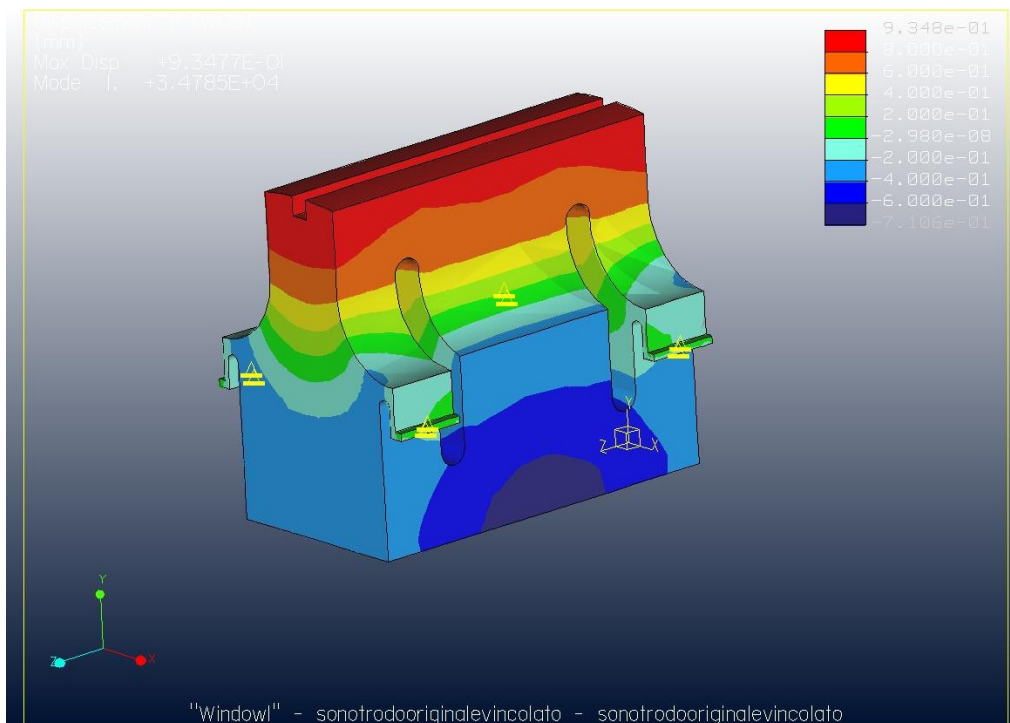
E' stato realizzato per il sonotrodo 3YG76 questo studio atto a valutare il valore reale e virtuale del guadagno. Grazie al calcolo dello spostamento dei punti di testa si riesce anche a valutare un altro parametro che ci informa sulla qualità della nostra saldatura . Infatti una saldatura soddisfacente prevede che tutta la superficie saldante della testa del sonotrodo presenti gli stessi scostamenti e gli stessi guadagni.

L' analisi sperimentale inoltre può essere utilizzata per confrontare i valori che sono stati elaborati dal simulatore FEM. Se i valori di spostamento reale risultano infatti essere congrui a quello virtuale si può ragionevolmente dedurre che anche i valori delle tensioni possano risultare simili.

9.1 Simulazioni agli elementi finiti

Consideriamo il sonotrodo 3YG76 vincolato montato con il suo prigioniero

Dalla analisi agli elementi finiti si ottiene questo andamento delle deformazioni.



Bisogna precisare come il sistema fornisca ovviamente uno spostamento adimensionale.

Il sistema considera che lo spostamento massimo sia di una unità, tutti gli altri spostamenti sono calcolati in relazione allo spostamento massimo. Grazie a questi dati però si riesce a calcolare in modo ottimale il guadagno che è dato come rapporto tra questi spostamenti adimensionali.

Attraverso il programma possiamo ottenere gli spostamenti virtuali di testa, di cui ne facciamo una media per ottenere uno spostamento medio della testa.

Curve	
Arc	Displacement
Length	Y (WCS)
0	0,927895
6,546761	0,912892
13,09353	0,91653
19,64029	0,931978
26,18705	0,952407
39,64029	0,992009
53,09353	0,954193
66,54677	0,91195
80,00001	0,938274
media	0,93757

Nella tabella viene riportata nella colonna di sinistra la coordinata del punto della testa preso in considerazione e nella colonna di sinistra il suo spostamento nella lungo la direzione di eccitazione del convertitore.

Si calcolano anche gli spostamenti della sede del sonotrodo (presi lungo una linea circolare).

Curve	
Arc	Displacement
Length	Y (WCS)
0	-0,25099
0,702814	-0,2511

1,404293 -0,25187
2,105714 -0,25305
2,808551 -0,25442
4,125209 -0,25924
5,43413 -0,26463
6,743035 -0,26984
8,059711 -0,27414
9,896695 -0,27734
11,70949 -0,27684
13,52229 -0,27292
15,35927 -0,26583
17,01477 -0,25995
18,65034 -0,25439
20,28615 -0,25006
21,9413 -0,24785
21,9413 -0,24785
23,98475 -0,25046
25,99168 -0,25681
27,99822 -0,26412
30,04221 -0,26964
31,49372 -0,27546
32,93445 -0,27766
34,37518 -0,27693
35,82669 -0,27397
37,24393 -0,27102
38,6512 -0,26575
40,05848 -0,25918
41,47572 -0,25231
42,07663 -0,25278
42,67683 -0,25234
43,27707 -0,25157

43,87796 -0,25099

media -0,26127

Dove la colonna di sinistra rappresenta sempre la coordinata del punto considerato e nella colonna di destra il suo spostamento.

Il rapporto tra i due valori medi di spostamento rappresenta il guadagno ovvero il rapporto tra lo spostamento della testa e della sede del convertitore. Il 3YG76 presenta un guadagno:

guadagno -
3,588457

Considerando che questo sonotrodo vibra ad una frequenza di 35.000Hz spostandosi di 6.5 micron, si ottiene che la testa del sonotrodo si sposti di 23 micron circa.

Considerando l'andamento degli spostamenti della testa saldante si può calcolare lo scostamento di testa che è dato dal
 $|\text{MAX}(\text{valori testa}) - \text{MIN}(\text{valori testa})|$.

Questo valore deve essere ovviamente piccolo . In questo caso

scostamento

testa 0,08006

Questi dati fino ad ora raccolti sono stati ottenuti sempre con l'analisi agli elementi finiti (FEM).

9.2 Analisi sperimentale

Si sono effettuate prove sperimentali per validare tali risultati.

Si è utilizzato uno strumento estremamente preciso ,un tastatore MITUTOYO LINEAR GAGE COUNTER.

LGD-M

0.01mm/.0005" Reading Digimatic Code (SPC) Output

This LGD-M ultra-compact ABS linear gage maintains the origin once it is set.
Metal bushings have replaced the ball bearings of the original LGD gage for higher cost-effectiveness.

ABSOLUTE™
Absolute System Patented by MITUTOYO

IP66



FEATURES

- The use of an absolute scale* in the sensor makes it possible to maintain the origin setting even when the power is cut off.
- The spindle is supported at both ends, improving the accuracy to 15µm.

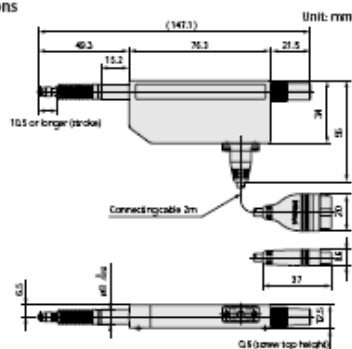
*: See page 3 for an explanation of the absolute scale.

OPTIONAL ACCESSORIES

Order No.	Description	Refer to p.28
02AC A176	Spare rubber boot	Refer to p.28
065275 *	Digimatic Power Supply Unit	Refer to p.29

*: □ is left blank or an appropriate suffix (A or E) is inserted, depending on the AC supply voltage (blank: 100V; A: 120V; E: 240V).

Dimensions



SPECIFICATIONS

Order No.	575-325	575-335
Resolution	0.01 mm	.0005"
Measuring range	10mm	.4"
Accuracy (20°C)	15µm	.0006"
Measuring force	Upward (↑)	2.0N or less
	Horizontal (↔)	1.8N or less
	Downward (↓)	1.8N or less
Dust/water protection*	IP-66 equivalent	
Contact point	Ø3mm carbide (mounting threads: M2.5 (P = 0.45) X 5mm), 001312	
Stem diameter	Ø8mm	
Bearing type	Slide-bearing type	
Position-detection method	Capacitance-type absolute linear encoder	
Response speed	Unlimited; measurement by scanning cannot be performed	
Output signal	Digimatic output	
External input	Origin-setting signal (absolute positional origin can be changed externally)	
Output cable length	2m	
Power supply	Supply voltage: 5V (4.5V to 5.5V), Ripple voltage: 200mV p-p max.	
Power consumption	20mA	
Operating environment	0°C to 40°C (20%RH to 80%RH, without condensation)	
Mass	182g	
Standard accessories	Wrench for contact point (538610)	

*1: IP level is the standard of protection from solids/foreign matters and water. This may not be applicable depending on the kind of liquid.

Questo tastatore è in grado di misurare micron e è dotato di una precisione di 0,5 micron.

Per garantire la qualità dell'analisi sperimentare ed eliminare gli errori di misura si sono eseguite successive misurazioni considerando il posizionamento del tastatore in zone di saldatura della testa diverse, in modo da analizzare l'andamento dello spostamento su tutta la superficie della testa

Tastatore posizionato sul sonotrodo ,basamento sul corpo macchina

Si sono eseguite 3 successive prove sperimentali posizionando il tastatore in 5 diversi punti lungo la testa del sonotrodo a 0 mm ,a 20 mm,a 40mm ,a 60mm a 80 mm dalla superficie laterale di riferimento.

I risultati del MITUTOYO son espressi in micron

N	0 mm	20mm	40mm	60mm	80mm
1	19,5	19,9	20,5	20,1	20,0
2	19,8	19,8	21,3	20,3	19,9
3	20,0	19,9	20,9	21,0	19,8
	19,7	19,8	20,9	20,4	19,9

Modello statistico

Il modello statistico è il seguente:

$$y_{ij} = \mu + \tau_j + \epsilon_{ij} \quad (1)$$

con

$i = 1, \dots, R$ repliche

$j = 1, \dots, C$ livelli

μ = media generale o media delle medie per un campione con un numero teoricamente infinito di dati.

τ_j effetto differenziale associato all' j -esimo livello di x

$$\left(\sum_{j=1}^C \tau_j = 0 \right) \quad *$$

ϵ_{ij} rumore o errore associato a ciascuna misura

L'esperimento produce $R \times C$ valori di y_{ij}

È possibile stimare $\mu, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_C$ e quindi, per differenza, ϵ_{ij}

* (Più precisamente l'effetto delle variabili non prese in considerazione).

Sostituendo ai valori incogniti le stime sul campione, si ha un modo per misurare la variabilità della risposta del processo.

$\bar{y}_{..}$ è una stima di μ (media generale o gran media)

$\bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..}$ è una stima di τ

$\hat{\epsilon}_{ij} = y_{ij} - \bar{y}_{.j}$ è una stima dell'errore sperimentale

Pertanto si ha, al posto della (1), la stima indicata nella figura precedente:

$$(y_{ij} - \bar{y}_{..}) = (\bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..}) + (y_{ij} - \bar{y}_{.j})$$

Se si esegue il quadrato di entrambi i membri e si sommano rispetto ai due indici delle prove (j) e delle ripetizioni (i), si osserva che i termini del doppio prodotto danno contributo nullo; rimangono solo i termini indicati nel seguito.

$$\sum_{j=1}^C \sum_{i=1}^R (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = R \sum_{j=1}^C (\bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..})^2 + \sum_{j=1}^C \sum_{i=1}^R (y_{ij} - \bar{y}_{.j})^2 \quad (2)$$

cioè la variazione totale rispetto alla media generale, è somma della variazione tra le prove, e della variazione all'interno delle prove:

$$TSS_{(totale)} = SSB_c \text{ (tra le prove, ovvero tra le colonne)} + SSW \text{ (all'interno delle prove, ovvero tra le righe all'interno di ogni col.)}$$

SST = Somma totale dei quadrati delle differenze rispetto alla media

SSB_c = Somma dei quadrati delle differenze tra le colonne

SSW = Somma dei quadrati delle differenze all'interno delle colonne.

Uso dell'analisi della varianza per la valutazione della significatività dei fattori

L'espressione precedente scinde la variabilità totale, (somma del quadrato di tutte le distanze dal valore medio) in due termini: la variabilità dei risultati dovuta agli effetti dei fattori di controllo e la variabilità dovuta ai fattori non considerati, origini degli errori sperimentali.

*Tali variabilità vengono **rese confrontabili** una volta che siano divise per il numero dei confronti possibili fra i diversi valori (gradi di libertà), che valgono rispettivamente $C-1$ (confronti tra le colonne) e $C(R-1)$. ($R-1$ sono i confronti possibili tra i dati di riga in ciascuna colonna e $C(R-1)$ quelli possibili tra tutti i dati di riga).*

Si ottengono così le medie quadratiche.

Al fine di condurre in modo razionale l'analisi della varianza (ANOVA) è bene organizzare i dati come nella tabella seguente:

Organizzazione dell'ANOVA

TABELLA 2

Causa di variaz.	Somma del quadrati	Gradi di libertà	Media quadratica	Valore calcol. di F
SSB_c Tra le colonne	$R \sum_{j=1}^C (\bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..})^2$	$C - 1$	$MSB_c = \frac{SSB_c(\text{tra le c.})}{C-1}$	$\frac{MSB_c}{MSW}$
SSW Entro colonna (errore)	$\sum \sum (y_{ij} - \bar{y}_{.j})^2$	$C(R - 1)$	$MSW = \frac{SSW(\text{errore})}{(R-1)C}$	MSW
Totale	$\sum_j^C \sum_i^R (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2$	$RC - 1$	-	-

Nell'ultima colonna si riporta il rapporto tra la media quadratica tra le colonne e la media quadratica tra le righe che ha il significato di errore sperimentale.

N	0 mm	20mm	40mm	60mm	80mm
1	19,5	19,9	20,5	20,1	20,0
2	19,8	19,8	21,3	20,3	19,9
3	20,0	19,9	20,9	21,0	19,8
	19,7	19,8	20,9	20,4	19,9

9.2.1 Analisi dei dati

Media generale 20,1

Calcoliamo la deviazione standard

deviazione standard.

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

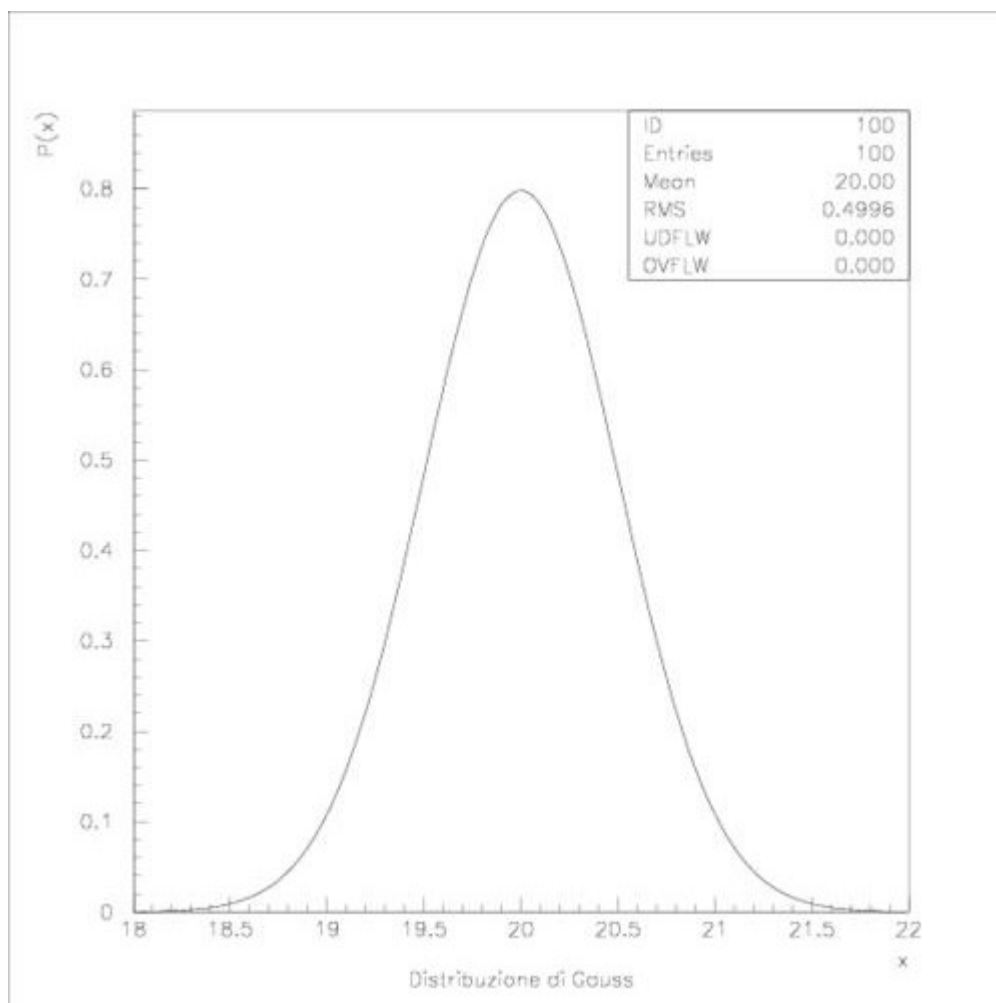
Deviazione standard = $((SSTOT) / 15)^{1/2} = 0,5$

Dove SSTOT = 37,3

Dove si è considerato N = misure = 15

Consideriamo la legge di distribuzione normale è caratterizzata da una densità di probabilità della forma:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$



Vediamo che la forma della campana è molto stretta poiché la deviazione standard è molto piccola.

Al 95 % dei casi

spostamento testa = valor medio spostamento testa \pm 2 Deviazioni standard

$$= 20,1 \pm 1 \text{ micron}$$

La misurazione risulta quindi essere accurata e i dati precisi

Sviluppiamo ora l'analisi **ANOVA** per determinare se i fattori hanno avuto influenza sul risultato. Quindi sapere se lo spostamento della testa del convertitore è influenzato dal posizionamento del tastatore.

Siam in presenza di un progetto a un fattore a 3 livelli

$$SSB = 30,2$$

$$SSW = 9,3$$

$$C = 5$$

$$R = 3$$

$$C(R-1) = 10$$

$$MSW = 9,3$$

$$MSB = 302,07 / (C-1) = 76,75$$

$$F = MSB / MSW = 8,25$$

Dobbiamo confrontare i dati con una distribuzione di Fischer con gradi di libertà 4 per il numeratore e 10 per il denominatore

Tavola distribuzione F

GdL denomi natore	Prob α	Gradi di liberta' al Numeratore										
		1	2	3	4	5	6	7	8	12	24	∞
1	0.05	161	200	216	225	230	234	237	239	244	249	254
1	0.025	648	800	864	900	922	937	948	957	977	997	1018
1	0.01	4052	5000	5403	5625	5764	5859	5928	5981	6106	6235	6366
1	0.005	16211	20000	21615	22500	23056	23437	23715	23925	24426	24940	25465
2	0.05	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.41	19.45	19.50
2	0.025	38.51	39.00	39.17	39.25	39.30	39.33	39.36	39.37	39.41	39.46	39.50
2	0.01	98.50	99.00	99.17	99.25	99.30	99.33	99.36	99.37	99.41	99.46	99.50
2	0.005	198.50	199.00	199.20	199.20	199.30	199.30	199.40	199.40	199.40	199.50	199.50
3	0.05	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.74	8.64	8.53
3	0.025	17.44	16.04	15.44	15.10	14.88	14.73	14.62	14.54	14.34	14.12	13.90
3	0.01	34.12	30.82	29.46	28.71	28.24	27.91	27.67	27.49	27.05	26.60	26.13
3	0.005	55.55	49.80	47.47	46.19	45.39	44.84	44.43	44.13	43.39	42.62	41.83
4	0.05	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	5.91	5.77	5.63
4	0.025	12.22	10.65	9.98	9.60	9.36	9.20	9.07	8.98	8.75	8.51	8.26
4	0.01	21.20	18.00	16.69	15.98	15.52	15.21	14.98	14.80	14.37	13.93	13.46
4	0.005	31.33	26.28	24.26	23.15	22.46	21.97	21.62	21.35	20.70	20.03	19.32
5	0.05	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.68	4.53	4.36
5	0.025	10.01	8.43	7.76	7.39	7.15	6.98	6.85	6.76	6.52	6.28	6.02
5	0.01	16.26	13.27	12.06	11.39	10.97	10.67	10.46	10.29	9.89	9.47	9.02
5	0.005	22.78	18.31	16.53	15.56	14.94	14.51	14.20	13.96	13.38	12.78	12.14
6	0.05	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.00	3.84	3.67
6	0.025	8.81	7.26	6.60	6.23	5.99	5.82	5.70	5.60	5.37	5.12	4.85
6	0.01	13.75	10.92	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.72	7.31	6.88
6	0.005	18.63	14.54	12.92	12.03	11.46	11.07	10.79	10.57	10.03	9.47	8.88
7	0.05	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.57	3.41	3.23
7	0.025	8.07	6.54	5.89	5.52	5.29	5.12	4.99	4.90	4.67	4.42	4.14
7	0.01	12.25	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.47	6.07	5.65
7	0.005	16.24	12.40	10.88	10.05	9.52	9.16	8.89	8.68	8.18	7.65	7.08
8	0.05	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.28	3.12	2.93
8	0.025	7.57	6.06	5.42	5.05	4.82	4.65	4.53	4.43	4.20	3.95	3.67
8	0.01	11.26	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.67	5.28	4.86
8	0.005	14.69	11.04	9.60	8.81	8.30	7.95	7.69	7.50	7.01	6.50	5.95
9	0.05	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.07	2.90	2.71
9	0.025	7.21	5.71	5.08	4.72	4.48	4.32	4.20	4.10	3.87	3.61	3.33
9	0.01	10.56	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.11	4.73	4.31
9	0.005	13.61	10.11	8.72	7.96	7.47	7.13	6.88	6.69	6.23	5.73	5.19
10	0.05	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	2.91	2.74	2.54
10	0.025	6.94	5.46	4.83	4.46	4.24	4.06	3.95	3.85	3.62	3.37	3.08
10	0.01	10.04	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.20	5.06	4.71	4.33	3.91
10	0.005	12.83	9.43	8.08	7.34	6.87	6.54	6.30	6.12	5.66	5.17	4.64

Da questa tabella emerge che l' $F_{critico} = 4,46$ per una probabilità del 95%

In quanto $F > F_{critico}$ si può dire che si ha fiducia almeno del 95% che la testa del sonotrodo non vibri in maniera sincrona, ossia che spostamento della testa del convertitore è influenzato dal posizionamento del tastatore.

9.3 Conclusioni

Il valore dello spostamento della testa che era stato fornito dal simulatore FEM = 23,0 micron mentre quello ottenuto dalla analisi sperimentale risulta essere di 20,1 \pm 1 micron . I valori risultano essere molto prossimi tra loro, confermando quindi la validità di tutti i risultati a proposito di tensioni e frequenze analizzati fino ad ora riguardo al sonotrodo. Dall'analisi dei dati sperimentali si nota che la deviazione standard risulta essere molto bassa. Dall'analisi ANOVA emerge come il sonotrodo non abbia uno spostamento perfettamente uniforme ma che nella mezzeria del sonotrodo questo si deforma maggiormente rispetto i lati (questo risultato era inoltre visibile nelle simulazioni).

Conclusioni

La tesi è stata svolta presso un'azienda produttrice di macchine automatiche destinate al packaging di prodotti per uso alimentare. E' stata presa in esame una macchina flowpack (flusso continuo di prodotto) , destinata principalmente all'impacchettamento di prodotti dolciari. La macchina utilizza una particolare tecnologia ad ultrasuoni per la saldatura del pacchetto. La macchina presenta ancora alcuni limiti in fase di lavoro . E' stata affrontata in questa tesi un'analisi modale del sistema volta alla determinazione e alla risoluzione dei problemi esistenti.

L'attrezzatura per la saldatura ad ultrasuoni è costituita da un generatore elettrico di segnale oscillante, da un convertitore che commuta il segnale elettrico del generatore in una vibrazione ultrasonica e da uno sonotrodo il quale, collegato al convertitore, è un elemento metallico che si allunga e si accorcia di qualche micron trasferendo energia al pacchetto saldandolo.

In primo luogo si è modellata tramite software 3D SolidWorks l'intero sistema che realizza la saldatura trasversale del pacchetto. Esso è composto dai due gruppi:

masse saldanti ad ultrasuoni e lame di taglio che rappresenta il corpo saldante

nucleo masse trasversali il quale concerne la motorizzazione del sistema ; E' composto dall'intero complesso di basamenti ingranaggi e casse che consentono di trasferire il moto dal motore esterno al corpo saldante stesso.

Successivamente è stato analizzato il gruppo saldante attraverso un software ad elementi finiti ProMechanica . E' stata trovata la frequenza di lavoro del sistema a 34931 Hz ma sono stati scoperti altri 11 modi propri di vibrare del sistema in prossimità della frequenza di lavoro.

In seguito sono state analizzate le masse direttamente coinvolte al processo di saldatura. Si è evidenziato il comportamento quando sono sottoposte a frequenze di oscillazione vicine a quelle di lavoro. Sono stati messi in luce i componenti critici del sistema saldante.

Si è focalizzata successivamente l'attenzione sull'elemento saldante del sistema ossia il sonotrodo. E' stato determinato il piano nodale del sonotrodo, e si è constatato come l'attacco del sonotrodo con il proprio basamento non fosse posizionato sul piano stesso. Si è proceduto con la realizzazione di attacchi alternativi che hanno evidenziato un notevole miglioramento sia dal punto vista delle tensioni presenti che delle vibrazioni trasmesse.

Si è modificato quindi l'intero corpo saldante realizzando una soluzione progettuale alternativa a quella esistente in modo da permettere il fissaggio del sonotrodo modificato con il resto della struttura. Si è ottenuta una struttura molto rigida priva di vibrazioni parassite che permette il pieno sfruttamento delle potenzialità del sonotrodo. La nuova struttura è soggetta inoltre a uno stato tensionale più basso di quella originale . Il nuovo sistema di ancoraggio garantisce inoltre un montaggio più preciso ed affidabile grazie alla realizzazione di elementi in tolleranza destinati al corretto posizionamento del sonotrodo.

Per validare i risultati ottenuti dal calcolatore FEM sono state eseguite una serie di analisi sperimentali . E' stato confrontato il valore della

dilatazione del sonotrodo fornito da ProMechanica con quello riscontrato in via sperimentale tramite comparatore Mitutoyo di grande precisione. Il risultato reale è risultato molto prossimo rispetto a quello virtuale fornito dal programma e l'analisi statistica dei dati sperimentali ha garantito la qualità della misurazione .L'analisi ANOVA inoltre ha fornito informazioni sul modo di vibrare del sonotrodo stesso,per cui la testa si sposta maggiormente in mezzeria che sul bordo esterno.