UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

# Saldatura di film polimerici: progettazione dell'attrezzatura per prove sperimentali e analisi di qualità della saldatura

# Welding of polymeric films: design of equipment for experimental testing and welding quality analysis

Relatore:
**Prof. Ing. Michele Germani**

Tesi di Laurea di:
**Federica Santucci**

Correlatore:
**Ing. Diego Gualtieri**

Anno accademico 2018/2019

# Indice

Introduzione ..... 1

Capitolo 1 ..... 3

1.1 Fameccanica ..... 3

1.2 Pannolino ..... 5

1.2.1 Definizione del pannolino ..... 5

1.2.2 La struttura del pannolino usa e getta ..... 6

1.3 Processo di saldatura ..... 15

1.3.1 Saldatura meccanica e termomeccanica di materie plastiche ..... 15

1.3.2 Saldatura ad ultrasuoni di materie plastiche ..... 18

1.4 Peel test ..... 20

Capitolo 2: Reologia dei polimeri ..... 22

2.1 Introduzione alla reologia ..... 22

2.2 Classificazione delle materie plastiche ..... 23

2.2.1 Materiali termoplastici ..... 24

2.2.2 Materiali termoindurenti ..... 27

2.3 Cenni teorici sulla saldatura dei polimeri ..... 28

2.4 Prime indagini sul meccanismo di saldatura ..... 34

Capitolo 3: Simulazione della saldatura ..... 38

3.1 Saldatura meccanica a banco ..... 38

3.2 Test sperimentali ..... 40

3.3 Simulazione strutturale della saldatura meccanica a banco ..... 47

3.4 Simulazione strutturale della saldatura con rotative ..... 52

Capitolo 4: Progettazione attrezzatura per prove sperimentali ..... 63

4.1 Definizione specifiche tecniche ..... 63
4.2 Soluzioni progettuali ..... 64
4.2.1 Facilità di misura tramite termocamera e i-speed camera ..... 65
4.2.2 Sensoristica ..... 65
4.2.3 Contro saldante riscaldabile ..... 66
4.3 Soluzioni alternative ..... 66
4.3.1 Configurazione verticale ..... 67
4.3.2 Configurazione orizzontale ..... 68
4.3.3 Configurazione rotativa ..... 72
4.3.4 Configurazione a pendolo di Charpy ..... 73
4.4 Confronto tra le configurazioni ..... 74
4.4.1 Banco prova ..... 75
4.3.2 Modifiche ..... 80
4.3.2.1 Variazione della molla ..... 80
4.3.2.2 Progettazione contro saldante con cella di carico ..... 83
4.3.2.3 Progettazione contro saldante modulabile ..... 89
4.3.2.4: Progettazione di punzoni intercambiabili ..... 92
Capitolo 5: Test sperimentali ..... 94
5.1 Prove sperimentali su saldante lineare ..... 94
5.1.1 Criticità saldante lineare ..... 94
5.2 Prove sperimentali sul picchio modificato ..... 96
5.2.1 Valutazione forza scaricata tramite cella di carico ..... 97
5.2.2 Prove di saldatura e peel test dei campioni realizzati ..... 103
5.2.2.1 Prove di saldatura sul 16 GSM ..... 104
5.2.2.2 Prove di saldatura sul 18 GSM ..... 112

5.2.2.3 Confronto tra prove di saldatura con materiali differenti ..... 119

5.2.2.4 Prove di saldatura al variare della temperatura ..... 121

5.2.2.5 Confronto tra prove di saldatura a temperature differenti ..... 124

5.2.3 Osservazione del comportamento del materiale all'impatto tramite uso del quarzo. ..... 126

Conclusioni ..... 128

Bibliografia ..... 130

# Introduzione

In questo lavoro di tesi ci si è occupati del processo di saldatura per impatto di film polimerici, valutando, in particolare, il suo utilizzo nell'ambito della fabbricazione di prodotti igienico assorbenti con scarsa presenza di collanti.

Tale lavoro è stato svolto in collaborazione con Fameccanica.Data S.p.A., azienda abruzzese leader mondiale nella progettazione e costruzione di macchine automatiche per la produzione e il confezionamento di prodotti igienico sanitari (pannolini, assorbenti ecc.).

La Fameccanica ha partecipato al progetto GLUELESS™, grazie al quale è stato dimostrato che, riducendo drasticamente l'uso della colla nel processo di produzione di prodotti assorbenti, si ottiene un significativo miglioramento dell'impatto ambientale. Il progetto, senza influire negativamente sulle performance di prodotto e sulla velocità di produzione, ha portato i seguenti risultati:

1. più del 65% di risparmio di colla;
2. una riduzione del 10% di energia usata nel processo di produzione;
3. un abbattimento dei costi di 0.5 M€ annui.

In azienda il processo di saldatura avviene tramite il passaggio dei film di materiale polimerico attraverso due rulli, di cui uno, definito saldante, dotato di appositi manicotti punzonati.

L'obiettivo di questa tesi è stato quello di analizzare in maniera dettagliata il fenomeno della saldatura, valutando sia la meccanica che vi è dietro, sia l'influenza dei parametri di processo sulla qualità del giunto saldato.

Le attività che hanno costituito tale studio sono state:

- Simulazione della saldatura meccanica a banco e rotativa: nel primo caso si è partiti dall'analisi delle forze in gioco per poi soffermarsi sulle trasformazioni dell'energia che avvengono durante il processo. Nel caso della saldatura rotativa invece, è stato studiato come la forza di saldatura tenda a modificarsi, sia nel transitorio che a regime, al variare della geometria e della velocità di rotazione.
- Riprogettazione di alcune unità del banco prova della saldatura: in tale fase sono state apportate delle modifiche e dei miglioramenti alle attrezzatture utilizzate per l'esecuzione dei test sperimentali. In particolare, sono stati realizzati dei moduli

tali da permettere un'analisi più approfondita di ciò che accade durante il meccanismo.

- Valutazione, tramite prove sperimentali, dei parametri di processo che influenzano la qualità della saldatura: in quest'ultima fase, utilizzando gli strumenti precedentemente realizzati, sono state effettuate una serie di prove per poter comprendere come cambia la qualità della saldatura al variare dei parametri di processo. In particolare, gli aspetti presi in esame sono stati: grammatura del materiale, temperatura, geometria del pattern ed entità del carico impulsivo.

# Capitolo 1

## 1.1 Fameccanica

La Fameccanica è un'azienda a tecnologia avanzata, leader mondiale nella progettazione e costruzione di macchine automatiche per la produzione e il confezionamento di prodotti igienico sanitari. La Fameccanica.Data è la capostipite del Gruppo Fameccanica (Fig. 1.1) ed è il centro di eccellenza per lo sviluppo e la progettazione di tutte le piattaforme tecnologiche. L'integrazione di strumenti all'avanguardia, esperienza, capitale umano e di una strategia sempre orientata al cliente, ha permesso a tale società italiana di scalare velocemente il mercato e di posizionarsi come leader indiscusso del proprio settore.

Fameccanica nasce nel 1975 come Fameccanica.Data, per poi ampliarsi progressivamente attorno alle consociate Fameccanica Machinery Shanghai e Fameccanica North America, in un progetto unitario che ruota sempre attorno all'italiana Fameccanica.Data.

**Figura 1.1:** Gruppo Fameccanica

Il Gruppo Fameccanica è di proprietà della Fater S.p.A., una società per azioni fondata nel 1958 da Francesco Angelini. Essa produce candeggine e prodotti intimi assorbenti per la cura della persona e li distribuisce in ben 39 Paesi. Nel 1963 la Fater comincia la produzione di pannolini lanciando il marchio Lines e, nel 1965, la linea di prodotti Lines Lady. Nel 1992 Procter&Gamble, il colosso statunitense dell'igiene personale e della

farmaceutica, acquisisce il 50% delle quote Fater dando vita ad una joint venture paritetica con il Gruppo Angelini. Grazie a questa operazione, l'offerta commerciale di Fater si apre ai prodotti per bambini con marchio Pampers. Attualmente, i brand commercializzati dal Gruppo sono: Pampers, Lines, Lines Specialist, ACE, Tampax, NEOBLANC, Dignity, Infasil, Linidor e Comet.

La Fameccanica produce linee produttive sia per la Fater che per altre aziende del settore. In particolare, essa crea, progetta, costruisce e installa macchine per la produzione e il confezionamento di articoli quali: pannolini per bambini, pannolini mutandina, assorbenti igienici femminili, salva slip, prodotti per adulti incontinenti (pannoloni, pannoloni mutandina, traverse ospedaliere) e prodotti per l'incontinenza leggera sia femminile che maschile. Oltre a ciò, Fameccanica realizza anche progetti speciali su richiesta, primariamente per il proprio settore di riferimento, ma anche rivolti a settori diversi quali la logistica leggera, il confezionamento di prodotti laundry&cleaning, il tissue converting e il labelling. Il Gruppo fornisce anche l'aiuto necessario all'installazione delle macchine, oltre a interventi di emergenza, manutenzione, assistenza alla produzione, trasferimento di tecnologia ed addestramento.

La costante innovazione è l'obiettivo prioritario dell'azienda (il cui slogan infatti è "non stop innovation") con lo scopo di garantire ai propri clienti un vantaggio competitivo nel loro segmento di mercato. Fameccanica investe annualmente circa 7 milioni di euro nella ricerca e sviluppo, dispone di 8 laboratori tests stands ed ogni anno sviluppa oltre 20 progetti innovativi. L'azienda, dalla fondazione ad oggi, ha prodotto oltre 100 invenzioni e registrato più di 600 brevetti.

**Figura 1.2**: Logo Fameccanica

## 1.2 Pannolino

Come precedentemente detto, la Fameccanica si occupa della progettazione e costruzione di macchine automatiche per la realizzazione e il confezionamento di articoli igienico sanitari. Tra questi ultimi sono presenti anche i pannolini.

### 1.2.1 Definizione del pannolino

Il pannolino è un indumento intimo con proprietà assorbenti ed è indossato dai neonati e dai bambini dalla nascita fino all'età di due anni. Le proprietà assorbenti del pannolino permettono di controllare le esigenze fisiologiche dei più piccoli, le stesse che vengono poi soddisfatte in età adulta dal pannolone, destinato a persone anziane con problemi di incontinenza o non autosufficienti. Le tipologie di pannolini sul mercato sono molteplici; una prima classificazione può essere fatta ad esempio in base al peso del bambino. Ci sono quindi prodotti adatti a bimbi del peso di 2-5 kg, 3-6 kg, 5-9 kg, 7-10 kg, 9-11 kg e oltre i 12 kg, sebbene poi queste misure standard possano variare da una marca all'altra. Una seconda classificazione può essere fatta in base al grado di assorbimento, ossia la misura di quanto liquido un pannolino può trattenere. Uno scarso assorbimento può esporre la pelle del bambino ad un'umidità persistente e ciò porta alla comparsa della dermatite. Questo tipo di infiammazione si riscontra con l'inizio dello svezzamento, cioè quando le feci del neonato sono più acide e, tenute a contatto con la pelle, causano quel rossore tipico dell'eritema. Per contrastare ciò, i pannolini moderni sono imbevuti con una lozione di Aloe Vera, la quale, oltre ad essere un ottimo antinfiammatorio, lascia traspirare la pelle mantenendola asciutta.

L'igiene e la sicurezza sono aspetti prioritari per un pannolino, esso infatti deve assorbire velocemente e trattenere tutte le fuoriuscite, deve essere facile da indossare e deve essere confortevole per il neonato. La qualità delle materie prime utilizzate influisce fortemente sul comfort di tale prodotto, ad esempio l'uso di materiali naturali e rispettosi della pelle è sicuramente preferibile rispetto allo sfruttamento di prodotti sintetici. In alcuni casi può accadere che i pannolini vengano trattati con il cloro, che può essere responsabile del rilascio di tracce di diossina, una sostanza chimica pericolosa. Per quanto riguarda gli odori, il modo migliore di gestirli è ricorrere a cambi regolari, piuttosto che all'aggiunta di coloranti e profumi che possono essere anche causa di allergie per il bambino.

Mentre in passato gli articoli principalmente utilizzati erano i pannolini lavabili, oggi, grazie alla migliore igiene e comodità, si preferisce di gran lunga il ricorso a prodotti usa e getta.

### 1.2.2 La struttura del pannolino usa e getta

Attualmente il mercato è dominato dalla presenza del prodotto usa e getta, un pannolino pratico che risponde alle esigenze dei moderni genitori che conducono una vita sempre più frenetica. Le case produttrici di pannolini oggi realizzano articoli diversi sia in termini di materiale, sia in termini di forma e dimensione.

I materiali principalmente utilizzati sono:

- Fluff (Fig.1.3): è un tappetino di polpa di cellulosa contenuto nel tampone assorbente. Tale polpa si ottiene dal legno tramite processi chimici e si distingue da quella di legno per la minore quantità di lignina.

  Cellulosa e lignina sono i principali costituenti del legno, la cui composizione è:

  - Cellulosa (circa 46%)
  - Emicellulosa (circa 24 %)
  - Lignina (circa 27%)
  - Estraibili vari: terpeni, resine, acidi grassi (circa 3%)

  Cellulosa ed emicellulosa costituiscono le fibre di legno, mentre la lignina è l'interfibra che le tiene unite.

**Figura 1.3**: Fluff

- S.A.P. (Super Absorbent Poliacrilato) (Fig. 1.4): è una polvere granulare sintetica che viene miscelata con le fibre della polpa di cellulosa e ha lo scopo di aumentare la capacità assorbente del tampone, riducendone lo spessore. 1 g di S.A.P. assorbe circa 7 volte di più rispetto ad 1 g di Fluff. In particolare, i S.A.P. sono polimeri o copolimeri reticolati di sali di acidi carbossilici e possono assorbire liquidi fino a 50-150 volte il proprio peso (in un corpo cilindrico questo equivale ad un incremento del diametro di 23 volte). Anche in caso di carico applicato, essi possono trattenere acqua fino a 10 volte il proprio peso, rigonfiandosi. I gruppi carbossilici del S.A.P., sciolti in acqua o in soluzione acquosa, si dissociano in ioni negativi che, a causa della natura elettrica identica (-), tendono a respingersi l'un l'altro. Le molecole diventano insolubili e permettono all'acqua di entrare e fissarsi. Dopo la stabilizzazione per interlacciatura si forma un gel che trattiene l'acqua con legami molto forti.

**Figura 1.4**: polvere di S.A.P.

- Ovatta (Fig. 1.5): è un tipo di cotone, definito anche idrofilo, soggetto a cardatura e a processi chimici, come il candeggio, che asportano le sostanze resinose e grasse dalle fibre, rendendolo adatto all'assorbimento dell'acqua. Soffice e di scarsa consistenza, l'ovatta si produce mischiando ritagli di cotone, precedentemente lavati, battuti e sfilacciati, con cotone vergine e cascami ripuliti. Il compito di tale materiale è quello di rafforzare l'integrità del Core assorbente e prevenire migrazioni di S.A.P. nel processo di costruzione del tampone.

**Figura 1.5**: Cotone idrofilo

- Non-woven (Fig. 1.6): il non-woven, o TNT, è un prodotto industriale simile ad un tessuto ma ottenuto con procedimenti diversi dalla tessitura (incrocio di fili di trama e di ordito tramite telaio) e dalla maglieria. La differenza che intercorre tra i due materiali è che, mentre nel primo le fibre hanno un andamento casuale senza alcuna struttura ordinata, nel secondo esse sono orientate ed ortogonali tra di loro (trama ed ordito).

  Il non-woven viene definito dalla norma ISO standard 9092 come: "Il non tessuto, un foglio, o velo o falda di fibre orientate casualmente, legate attraverso sfregamento, e/o adesione, e/o coesione, escludendo la carta e i tessuti, prodotti di maglieria, prodotti ottenuti attraverso l'ago cucitura o feltri ottenuti per macinazione ad acqua".

  Le caratteristiche di un ottimo tessuto non tessuto sono:

  - Idrorepellenza;
  - Resistenza a temperature basse ed anche elevate;
  - Morbidezza o almeno non abrasività al tatto, il che lo rende adatto al contatto con la pelle delicata del neonato.

  I non-woven utilizzati nei pannolini spesso subiscono una particolare lavorazione chiamata spunbonded. Tale tecnica, che migliora la morbidezza del prodotto e ne riduce lo spessore, consiste nella fusione del polimero, il quale viene successivamente forato e pressato.

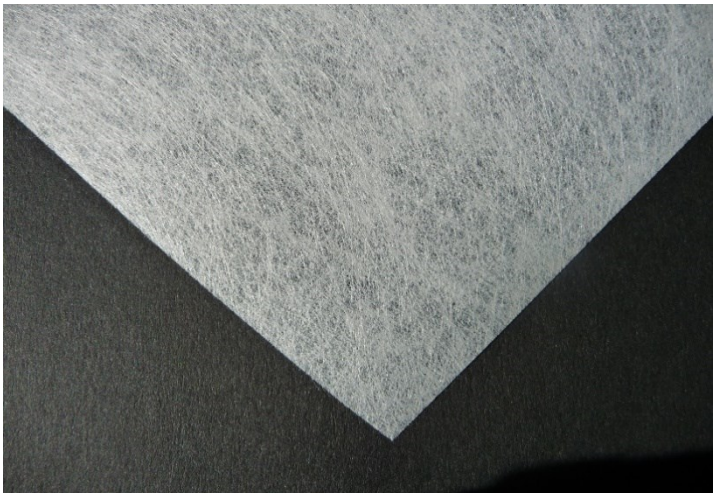


**Figura 1.6**: Non-woven

- P.E. Film: il Polietilene è una resina termoplastica con ottime proprietà isolanti, stabilità chimica, versatilità ed economicità. I film di Polietilene sono impiegati per arrestare la fuoriuscita dei liquidi, infatti la loro struttura chimica assicura l'impermeabilità del pannolino. Essi sono costituiti da un gran numero di piccole molecole uguali (monomeri) o diverse (copolimeri) unite a catena mediante la ripetizione dello stesso tipo di legame.
- Colla e adesivi: si tratta di prodotti a bassa tossicità e il più possibile compatibili con l'ambiente, con la funzione di tenere uniti i vari strati del pannolino e permettere la chiusura dello stesso in vita. Le tipologie di colla e adesivi impiegati variano in base al paese di produzione.
- Elastici: realizzati principalmente in gomma, essi sono inseriti sia in vita sia in corrispondenza delle gambe per migliorare la versatilità ed assicurare la giusta tenuta.

Prima di passare all'analisi delle features del prodotto, è importante comprendere la distinzione tra Backsheet e Topsheet.
Il Backsheet, costituito da un film di Polietilene, è lo strato di materiale, posto sulla faccia esterna del pannolino, con la funzione di arrestare la fuoriuscita dei liquidi.
Esistono principalmente tre tipologie di Backsheet:

1. Backsheet laminato: l'accoppiamento di un non-woven di Polipropilene o un'ovatta con il P.E. Film rende il Backsheet simile ad un tessuto, mascherandone la natura plastica.
2. Breathable Poly: il Backsheet viene realizzato con un Poly traspirante che consente il passaggio dei vapori ma non dei liquidi. Questa soluzione mantiene più fresca la pelle del bambino.
3. Backsheet in fase: sul film vengono impresse immagini o scritte opportunatamente fasate in modo da apparire sempre nello stesso punto in ogni pannolino.

Il Topsheet è lo strato di materiale a contatto con la pelle del bambino ed è costituito da un non-woven idrofilo che consente ai liquidi di fluire verso il Core. Quest'ultimo è il nucleo assorbente centrale ed è costituito da:

- Tampone: è un “tappetino” di polpa di cellulosa, macinata da un apposito mulino. Sulla faccia inferiore del tampone è inserito un ulteriore strato di polpa a bassa grammatura (75-95 $\frac{g}{m^2}$), senza S.A.P., utile a mantenere integro il tappetino. Tale strato prende il nome di Dust Layer e alcuni produttori lo inseriscono anche sulla faccia superiore.
- S.A.P.: il S.A.P. è inserito nel tampone sottoforma di granuli così da ridurne lo spessore e migliorarne la capacità assorbente.
- Acquisition&Distribution layer (A.D.L.): è un non-woven ad alta grammatura usato per migliorare le performance del prodotto. Questo strato permette di assorbire e distribuire i liquidi in modo uniforme lungo tutto il tampone e si applica, spesso decentrato verso il bordo frontale del pannolino, tra il Topsheet e il tappetino.
- Ovatta o Core non-woven: è un tipo di ovatta resistente applicata sul tampone, il cui compito è quello di rafforzare l’integrità del Core assorbente (pad integrity) e prevenire le migrazioni di S.A.P. durante il processo di costruzione del Core. Recentemente alcuni produttori tendono a sostituire tale ovatta con un non-woven a bassa grammatura.

  L’ovatta può presentare tre diverse configurazioni:
  1. Upper + Lower Tissue: due strati di ovatta, uno superiore ed uno inferiore, che ricoprono il tampone.
  2. Wrapped Lower Tissue: un solo strato che avvolge completamente il tappetino di cellulosa.
  3. “C” Wrapped Tissue: uno strato di ovatta a forma di “C” avvolge il tampone, lasciando scoperta solo la faccia inferiore. Quest’ultima sarà rivestita da un altro strato di ovatta.

Tra le features del prodotto si possono definire le Cuffs (Fig.1.7), barriere laterali elasticizzate che sono poste sul Topsheet del pannolino. Esse sono realizzate con un non-woven idrofobo, piegato su uno o più elastici, con lo scopo di impedire ai liquidi di fuoriuscire lateralmente. Le tipologie principali di Cuffs sono: Cuffs orientali (Narrow

Topsheet), Cuffs occidentali (Wide Topsheet), Cuffs a doppia piega (Double Fold Cuffs) e Cuffs doppie (Double Cuffs).

**Figura 1.7**: Cuffs

Un altro elemento caratteristico del prodotto è definito dai sistemi di chiusura, che, una volta indossato l'articolo, hanno la funzione di mantenerlo fermo e composto. In un pannolino standard, essi sono costituiti da un'etichetta frontale anteriore (Frontal Tape) e da due etichette laterali posteriori (Fastening Tapes).

Relativamente alla Frontal Tape, si possono distinguere due tipologie: quella classica (Fig.1.8 a), da accoppiare ad etichette adesive, e il Loop Tape (Fig. 1.8 b), da accoppiare ad etichette meccaniche (Hook Tapes). Il Frontal Tape è solitamente decorato con immagini o scritte, le quali devono essere fasate nel processo di produzione in modo da apparire sempre nello stesso punto del pannolino.

(a) Tipologia classica

(b) Tipologia Loop Tape

**Figura 1.8**: Frontal Tapes

Per quanto riguarda le Fastening Tapes, sia adesive sia meccaniche in veltro, esse possono essere ancorate al pannolino secondo due modalità: a “Y”, nel caso in cui avvolgono il Topsheet e il Backsheet, o solo sul lato Backsheet. Solitamente l’ancoraggio di tali etichette non richiede l’utilizzo di colla in quanto il materiale è fornito già adesivizzato.

Negli ultimi anni, al posto delle etichette descritte, si sono diffusi dei pannelli laterali, anche elasticizzati, volti a migliorare la vestibilità del pannolino e a ridurne i costi.

Tali pannelli possono essere suddivisi in due categorie:

1. Orecchie (Ears): usate sui pannolini rettangolari o leggermente sgambati. Esse si dividono in Front Ears, se disposte davanti al prodotto, e Back Ears, se disposte sul retro. Le orecchie richiedono sempre la presenza del Frontal Tape e sono ancorate al Core con la colla o tramite tecniche di termo-saldatura.

   Le Back Ears sono prodotte con non-woven ad alta grammatura (elasticizzato o con la sola zona centrale elasticizzata) e possono essere distinte in quattro categorie:

   - Rettangolari con Hook (Fig. 1.9)

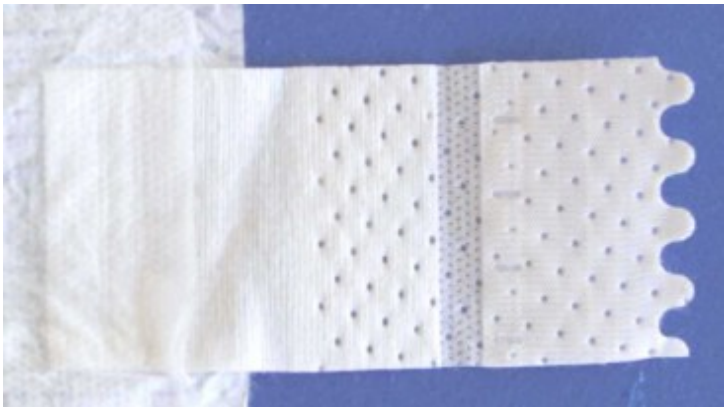


**Figura 1.9**: Back Ears rettangolari con Hook

   - Rettangolari con Fastening Tapes (Fig. 1.10)

**Figura 1.10**: Back Ears rettangolare con Fastening Tapes

- Sagomate con Hook (Fig. 1.11)

**Figura 1.11**: Back Ears sagomate con Hook

- Sagomate con Fastening Tapes (Fig. 1.12)

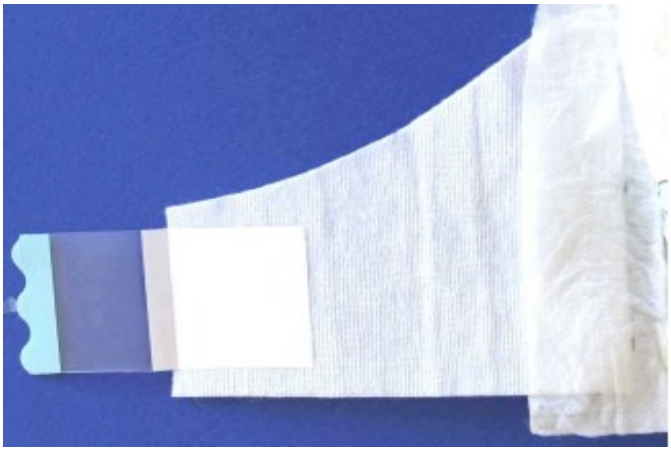


**Figura 1.12**: Back Ears sagomate con Fastening Tapes

Le Back Ears sagomate generano una percentuale di sfrido che varia dal 15% al 25%. La Fameccanica ha brevettato un processo per produrre Back Ears sagomate senza sfrido, esso prende il nome di B.E.S.T. (Back Ears Sans Trim)0

Relativamente alle Front Ears, esse sono pannelli laterali applicati facoltativamente sul davanti del pannolino e sono costituite da non-woven solitamente non elastico e sagomato. La loro funzione è principalmente estetica.

2. Side Panels: sono utilizzati sui Training Pants (pannolini a mutandina) e non richiedono Frontal Tape.

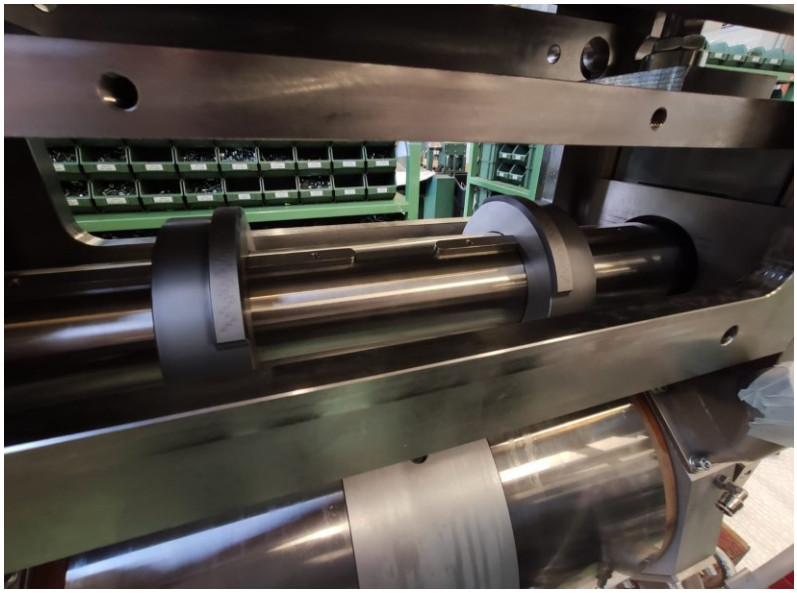
Infine, l'ultima feature da definire è rappresentata dagli elastici, installati sia in vita (solitamente non applicati in presenza di Back Ears elasticizzate), sia in corrispondenza delle gambe. I materiali principalmente utilizzati per realizzarli sono, oltre alla gomma, la Lycra e il Poliuretano.

## 1.3 Processo di saldatura

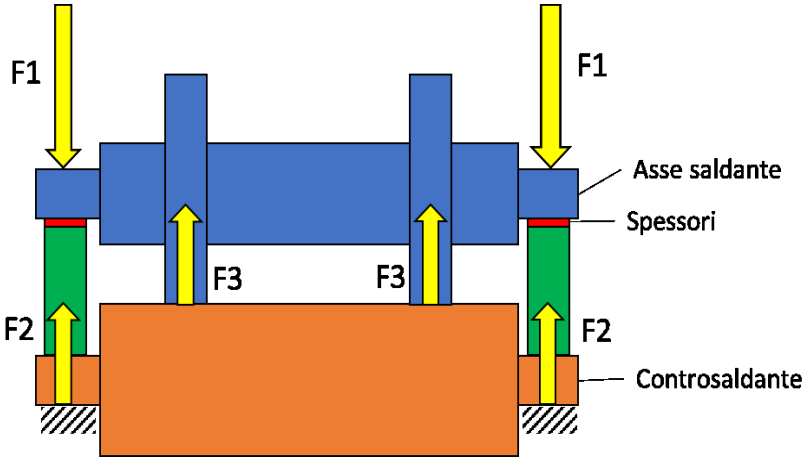
La fabbricazione di pannolini, così come quella di altri prodotti assorbenti con scarsa presenza di collanti (assorbenti, pannoloni), prevede l'utilizzo di processi di saldatura tra film polimerici (non woven). Tale tecnica di giunzione, realizzata sia tra non woven uguali che differenti, può essere principalmente di due tipi: meccanica o termomeccanica e ad ultrasuoni.

### 1.3.1 Saldatura meccanica e termomeccanica di materie plastiche

La saldatura meccanica (Fig. 1.12) è un processo di giunzione che garantisce l'unione di parti di materiale termoplastico tramite l'utilizzo di due assi motorizzati. Questi ultimi prendono il nome di asse saldante ed asse contro saldante.



a)




b)

**Figura 1.12**: Testata saldatura meccanica e termomeccanica a) e schema saldatura b)

Per quanto riguarda il primo, esso è montato su un sistema di guide laterali ed è dotato di anelli saldanti regolabili costruiti in acciaio duro temprato (ad esempio in K340 o in K110). Su questi ultimi sono presenti dei pin di forma e dimensioni differenti, i quali, entrando in contatto con il contro saldante generano la saldatura. Il contatto tra i due assi viene garantito tramite due cilindri pneumatici, ognuno dei quali esercita una forza di circa

700 kg. Essi permettono anche di regolare la forza di saldatura, infatti, nell'eventualità in cui non ci sia giunzione, la pressione dei cilindri viene aumentata.
Il contro saldante presenta gusci di acciaio temprato (realizzate ad esempio o in CPM10V o in K340) posizionati in prossimità degli anelli saldanti. Per via del maggiore diametro, è caratterizzato da una rigidezza più elevata rispetto al primo asse, per cui nella lavorazione tenderà a flettere meno.
Un aspetto importante del processo di giunzione è rappresentato dall'interferenza che intercorre tra saldante e contro saldante. Essa, posta solitamente a 0.01 mm o a 0.02 mm, (sebbene si possa saldare anche senza), viene regolata tramite degli spessori laterali e influenza fortemente la qualità della saldatura. Nella pratica l'imposizione dell'interferenza non implica una reale compenetrazione tra le parti, bensì si traduce in una flessione di entrambi gli assi motorizzati (maggiore per l'asse con minore rigidezza, ossia il saldante).
Nel caso di saldatura termomeccanica, a differenza del processo appena descritto, viene aggiunto il contributo della temperatura. Essa, garantita sugli assi tramite resistenze, come le Watlow (Fig. 1.13), ha lo scopo di aumentare l'interferenza, di migliorare la qualità della saldatura e di bilanciare la variazione di interferenza dovuta all'entrata in contatto dei rulli inizialmente freddi.

**Figura 1.13**: Resistenza Watlow

In questo tipo di processo, essendo gli assi motorizzati, per poter inviare la corrente alle resistenze e garantire il riscaldamento di saldante e contro saldante, è necessario l'utilizzo di un collettore.

### 1.3.2 Saldatura ad ultrasuoni di materie plastiche

La saldatura a ultrasuoni (Fig. 1.14) è un processo di giunzione efficacie e veloce che sfrutta il calore generato dagli ultrasuoni per saldare fra loro pezzi di materiale termoplastico. La vibrazione meccanica ad alta frequenza delle parti, su cui tale processo si basa, genera all'interno del materiale una frizione intermolecolare progressiva, da cui deriva un aumento localizzato della temperatura. Lo sviluppo di alte temperature in un lasso di tempo brevissimo determina la fusione dell'area di contatto, portando le materie plastiche ad unirsi senza rendere necessario l'impiego di colla. [1]
Le parti che devono essere saldate vengono tenute insieme sotto pressione e vengono sottoposte a vibrazioni ultrasoniche alla frequenza di 20, 30, 35 e 70kHz.

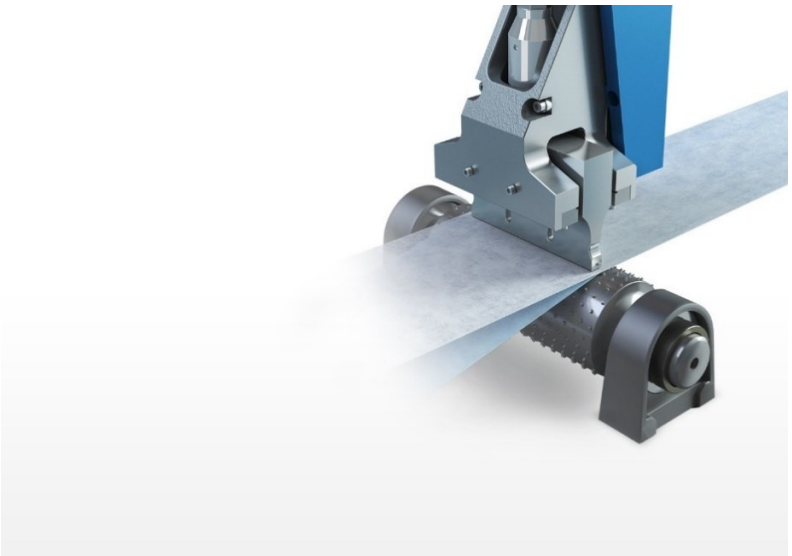


**Figura 1.14**: Saldatura ad ultrasuoni

Una macchina saldatrice a ultrasuoni è composta principalmente da 4 componenti (Figura 1.15):

- il generatore: esso ha la funzione di trasformare l'energia di rete a bassa frequenza (50 Hz), elevandola ad una frequenza superiore (20 kHz) con una tensione e una corrente proporzionale alla sua potenza.
- il converter: una ceramica piezoelettrica che ha lo scopo di convertire l'energia elettrica in energia meccanica di vibrazione a frequenze ultrasoniche.

- il booster: realizzato in alluminio o in titanio a seconda del campo applicativo, ha la funzione primaria di incrementare l'ampiezza delle onde sonore messe a disposizione dal convertitore.
- il sonotrodo (o corno): è uno strumento di saldatura che ha il compito di trasmettere la vibrazione al pezzo da assemblare e di applicare la pressione di saldatura. Tale componente può essere realizzato in materiali diversi ed è caratterizzato da una forma peculiare in modo che, a regime di funzionamento, la regione di contatto resti piana.

**Figura 1.15**: Componenti saldatrice ad ultrasuoni

La tecnologia di saldatura ad ultrasuoni, per la sua versatilità, consente di eseguire lavorazioni di saldatura, deformazione, rivettatura, bordatura, inglobamento o saldatura a punti.

I vantaggi di una tecnologia evoluta come la saldatura ad ultrasuoni sono numerosi. Tra di essi ci sono:

- Cicli di saldatura molto brevi (da pochi decimi di secondi al secondo).
- Assoluta costanza dei risultati.
- Bassissimo consumo energetico e relativo solo alla fase di saldatura.
- Nessun materiale d'apporto.
- Pezzi esteticamente perfetti, molto resistenti e subito pronti al loro utilizzo.

Gli svantaggi di tale processo sono:

- Possibilità di applicazione solo su parti di piccole e medie dimensioni e non su tutte le tipologie di materiale;
- Costo molto superiore rispetto alla saldatura meccanica

## 1.4 Peel test

A seguito del processo di giunzione descritto, i film polimerici saldati possono essere sottoposti ad una prova di trazione denominata peel test. Essa può essere definita come un test distruttivo del campione, effettuato per valutare la qualità dell'adesione tra i materiali congiunti.

Sebbene si differenzi in base al tipo di prodotto da testare, il peel test, in generale è realizzato secondo la seguente procedura:

- Preparazione dei campioni: la prima attività da svolgere è la preparazione dei provini da testare. Essi, in base al tipo di test da effettuare, sono caratterizzati da una certa forma e dimensione.
- Impostazione del tester di trazione: la seconda fase da svolgere è l'impostazione dei parametri del tester di trazione. In particolare, vengono fissate grandezze quali: la velocità di prova, la distanza tra le pinze, il precarico e il Test Path.
- Montaggio dei campioni ed esecuzione della prova: una volta eseguite le due attività precedenti, la terza fase da svolgere è il montaggio dei provini sul tester di trazione. Tali campioni, posizionati tra una pinza stazionaria e una mobile, possono essere collocati secondo configurazioni differenti (ad X o a C). Una volta scelta la disposizione e inserito il campione all'interno della macchina, il test può avere inizio.

Ciò che si ottiene dalle prove di peel test, tramite l'ausilio di un opportuno software, è l'andamento della forza in funzione dello spostamento. A partire da quest'ultimo è possibile estrapolare sia il valore massimo della forza registrata, sia il suo valore medio e sia l'energia necessaria alla delaminazione dei film polimerici.

In generale si può affermare che tanto più la forza registrata durante la prova è elevata, tanto più la saldatura risulta resistente e di buona qualità.

Lo strumento utilizzato in Fameccanica per realizzare tale test è la macchina per prove universali Zwick/Roell (Fig. 1.16), mentre i dati misurati vengono registrati tramite la piattaforma standard Testxpert II.

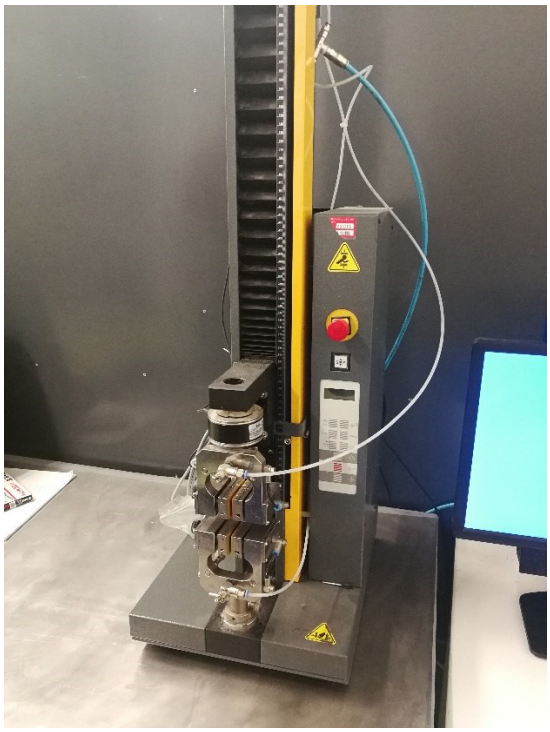


Figura 1.16: Macchina per prove universali Zwick/Roel

# Capitolo 2: Reologia dei polimeri

Per comprendere meglio ciò che accade durante il processo di saldatura dei non woven, è possibile fare ricorso ad una particolare disciplina scientifica, denominata reologia dei polimeri.

## 2.1 Introduzione alla reologia

La reologia (dal greco ρέω=scorrere) è la scienza che studia il flusso e la deformazione dei materiali sotto l'azione di forze esterne. Storicamente la reologia ha cominciato a muovere i suoi primi passi proprio in concomitanza con lo sviluppo delle tecnologie di processo per le materie plastiche ed ha continuato a svilupparsi parallelamente al progredire di tali tecnologie. Anche se oggi la reologia si interessa del comportamento di fluidi complessi di ogni tipo (dai cosmetici alle sostanze alimentari, dai fanghi ai fluidi biologici), quella dei fusi polimerici è un'area sempre molto attiva sia dal punto di vista scientifico che tecnologico.

Per chiarire il ruolo e il campo di azione della reologia dei polimeri è bene riferirsi alle sue due principali applicazioni.

La prima, tipicamente ingegneristica e tecnologica, ruota intorno al concetto di processabilità. Con questa parola si intende l'insieme delle caratteristiche di un materiale polimerico che lo rendono adatto ad un particolare processo di trasformazione. Uno degli obiettivi fondamentali della reologia dei polimeri è quello di misurare, modellare e prevedere la processabilità del materiale.

Una seconda, più avanzata e recente applicazione della reologia è invece legata alla possibilità di utilizzarla, spesso in sinergia con altre metodologie sperimentali, per lo studio e la determinazione della microstruttura del materiale polimerico. Tale approccio è basato sul concetto, applicabile ovviamente non solo ai materiali polimerici, che la microstruttura del materiale si "rispecchia" nel suo comportamento meccanico, e in particolare, nella risposta del polimero a condizioni peculiari di flusso o di deformazione. In quest'ottica la reologia può essere utilizzata come strumento indiretto per la determinazione dell'evoluzione microstrutturale dei materiali, ossia per la misura delle cosiddette proprietà viscoelastiche lineari. [2]

## 2.2 Classificazione delle materie plastiche

I materiali polimerici, detti anche materie plastiche o resine sintetiche, sono sostanze organiche con struttura macromolecolare, derivante dall'unione, tramite legami chimici, di piccole unità chiamate monomeri (polimerizzazione).

Ciò che contraddistingue i materiali polimerici e che li rende industrialmente appetibili sono: il basso peso specifico, buona resistenza e rigidezza, bassa conducibilità elettrica e termica, una buona resistenza all'attacco chimico, un elevato coefficiente di dilatazione termica e un'ottima formabilità.

Comunemente interpretate come sinonimo di polimeri, le materie plastiche possono essere classificate in vari modi. Sulla base della loro struttura, ad esempio, possono essere suddivise in: polimeri lineari (Fig. 2.1 a), in cui le unità monomeriche sono legate a formare lunghe catene, più o meno raggomitolate; polimeri ramificati (Fig. 2.1 b), quando da una catena principale dipartono ramificazioni laterali; e polimeri reticolati (Fig. 2.1 c), quando alcune ramificazioni connettono chimicamente più catene.

a) b) c)

**Figura 2.1**: Polimeri lineari a), Polimeri ramificati b), Polimeri reticolati c)

Le diverse strutture influenzano fortemente le proprietà delle materie plastiche; i polimeri lineari ad esempio sono solubili in solventi e rammolliscono all'aumentare della temperatura fino a diventare liquidi, quelli reticolati invece sono caratterizzati da insolubilità e infusibilità.

Un'ulteriore classificazione dei materiali polimerici può essere effettuata sulla base del loro comportamento al variare della temperatura. In tal caso le due categorie risultanti sono: materiali termoplastici e materiali termoindurenti.

### 2.2.1 Materiali termoplastici

I materiali termoplastici sono particolari resine sintetiche caratterizzate da una struttura molecolare formata da catene polimeriche lineari o poco ramificate. A causa di ciò tali materiali non presentano la formazione di un reticolo tridimensionale covalente, per cui quando riscaldati, passano da uno stato solido vetroso o cristallino ad uno liquido, nel quale possono essere sottoposti più volte a processi di formatura.

L'aspetto caratterizzante dei polimeri termoplastici è proprio la reversibilità del processo di fusione/solidificazione. Presentano inoltre i seguenti vantaggi: allungamento elevato a rottura, buona tenacità a frattura e resistenza all'impatto, elevata resistenza all'umidità e rapidità dei cicli di processo.

Al contempo essi hanno anche delle negatività quali: bassi punti di fusione, limitate proprietà meccaniche, scarsa durezza superficiale e scorrimento viscoso ad alte temperature, causa sia di instabilità geometriche che strutturali.

I polimeri termoplastici, sulla base della struttura molecolare assunta durante la solidificazione, possono essere suddivisi in due categorie: polimeri a struttura amorfa e polimeri a struttura parzialmente cristallina (o semicristallina).

La differenza principale tra queste due tipologie di polimeri si riscontra durante la solidificazione, cioè nel ritiro volumetrico. In figura 2.1 si denota infatti un maggiore ritiro volumetrico per i polimeri semicristallini rispetto a quelli amorfi e ciò è dovuto al fatto che nelle regioni cristalline si ha un impaccamento delle catene polimeriche che risulta più efficiente.

In un polimero allo stato fuso le macromolecole si trovano in uno stato aggrovigliato e caotico in cui sono possibili movimenti delle une rispetto alle altre. Questi movimenti non coinvolgono l'intera molecola, ma solo le parti che possiedono la giusta energia di attivazione. La diminuzione di temperatura dovuta al raffreddamento porta ad una variazione continua del volume specifico, accompagnata da un progressivo aumento della viscosità del liquido.

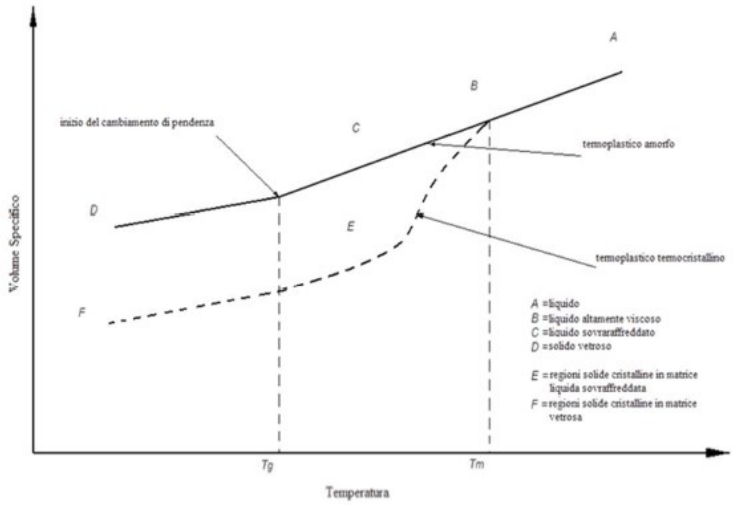



**Figura 2.1**: Curva volume vs temperatura di solidificazione e raffreddamento per i materiali termoplastici amorfi e semicristallini.

Per quanto riguarda i polimeri amorfi (es: ABS, policarbonato, polistirene) l'assenza di una fase cristallina fa sì che la fusione del materiale non avvenga ad una determinata temperatura. Al contrario si osserva un progressivo rammollimento, con un graduale passaggio dallo stato solido a quello liquido. In questo ampio intervallo, delimitato inferiormente dalla temperatura di transizione vetrosa (Tg), i materiali amorfi possono essere sia lavorati che trasformati, inoltre quando il polimero passa allo stato solido, la variazione del volume specifico al diminuire della temperatura è graduale e non avviene in modo brusco (Fig. 2.2).

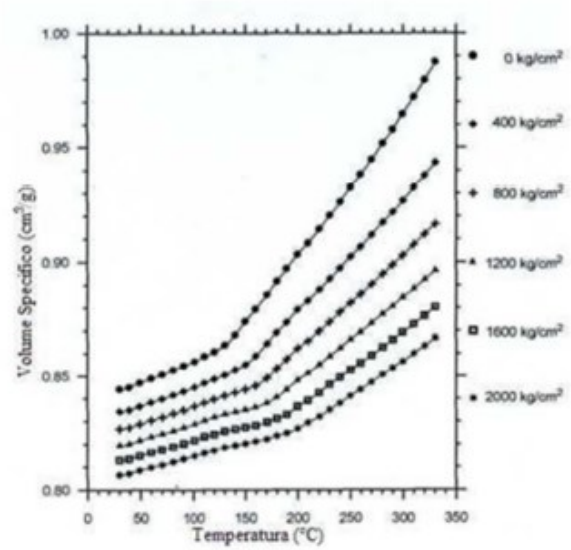



**Figura 2.2**: Volume specifico vs Temperatura di polimeri amorfi

Come si evince dall'immagine precedente, nell'intorno della temperatura di transizione vetrosa si osserva una variazione di pendenza della curva: al di sopra della Tg il comportamento del materiale è di tipo viscoso mentre al di sotto di questa si ha un comportamento fragile (dovuto alla mobilità limitata delle catene molecolari). Dal punto di vista strutturale si può affermare che il moto dei segmenti di catena, in grado di slittare gli uni sugli altri allo stato liquido amorfo, diventa praticamente congelato al di sotto della Tg.

I polimeri a struttura parzialmente cristallina invece (es: polipropilene, poliammide, polietilene) sono costituiti sia da parti amorfe che da parti cristalline (il grado di cristallinità non arriva mai al 100%) e, differentemente dal caso precedente, la fusione di queste ultime avviene ad una determinata temperatura definita Tm. L'intervallo utile per la lavorazione di questi materiali è ben più limitato rispetto ai polimeri amorfi poiché al di sotto del punto di fusione il materiale non è lavorabile e molto al di sopra di Tm, si incorre in fenomeni di degradazione termica.

Anche in questo caso, così come nel precedente, è possibile rappresentare il comportamento termico del polimero mediante un grafico del volume specifico in funzione della temperatura (Fig. 2.3).

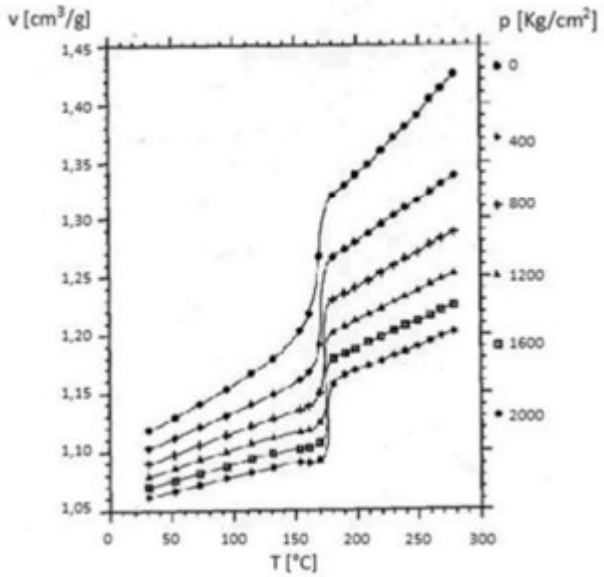



**Figura 2.3**: Volume specifico vs Temperatura di polimeri semicristallini

Come si evince dal grafico precedente, raffreddando il materiale fino al valore Tm, i polimeri semicristallini presentano una graduale diminuzione del volume specifico. Una volta raggiunta tale temperatura si ha una brusca variazione di pendenza, legata fondamentalmente al passaggio del materiale dallo stato liquido a quello cristallino. Questa forte variazione di volume specifico che si riscontra può arrivare anche a valori del 10% ed è tanto maggiore quanto più grande è il grado di cristallinità raggiunto (Questa è una conseguenza dell'impaccamento ordinato delle catene polimeriche nelle regioni cristalline, prima disordinatamente distribuite nel fuso). Continuando con il raffreddamento si giunge alla temperatura Tg alla quale si avrà un nuovo cambiamento di pendenza che rimarrà poi costante. Oltrepassata la temperatura di transizione vetrosa la matrice liquida sottoraffreddata si trasforma in uno stato vetroso e si avranno quindi regioni cristalline in una matrice vetrosa non cristallina.

### 2.2.2 Materiali termoindurenti

I materiali termoindurenti sono resine sintetiche la cui polimerizzazione comporta l'ottenimento di una rete molecolare tridimensionale e la forma del componente viene stabilita in maniera permanente ed irreversibile. Le catene molecolari reticolano nelle tre

dimensioni e la struttura diventa un'unica grande molecola con forti legami covalenti. I polimeri termoindurenti non presentano una netta temperatura di transizione vetrosa e il loro processo di polimerizzazione è costituito da una crescita lineare delle catene polimeriche, a partire da singoli monomeri fino alla ramificazione ed alla formazione di un insieme di catene polimeriche intrecciate. Queste reticolazioni avvengono ad elevate temperature, conferendo ai polimeri ottime proprietà meccaniche; inoltre a causa della natura dei loro legami, le caratteristiche di resistenza e durezza di tali materiali non sono influenzate né dalla temperatura né dalla velocità di deformazione. Questi polimeri, rispetto ai materiali termoplastici, presentano migliori proprietà meccaniche, termiche e chimiche, maggiore resistenza elettrica e stabilità dimensionale. In caso di aumento di temperatura però, essi cominciano a infiammarsi, a degradare ed a carbonizzare.
Le tipologie di resine termoindurenti più diffuse sono: le poliestere, le epossidiche, le vinilestere, le fenoliche, le poliuretaniche e le ammidiche.

## 2.3 Cenni teorici sulla saldatura dei polimeri

Secondo la teoria dell'healing, due materiali polimerici si considerano saldati quando, a causa del meccanismo di interdiffusione, si verifica l'eliminazione dell'interfaccia fisica presente tra di essi. (Fig. 2.1) Il risultato di tale processo è la generazione di un nuovo materiale in cui i polimeri sono opportunamente incatenati tra loro.

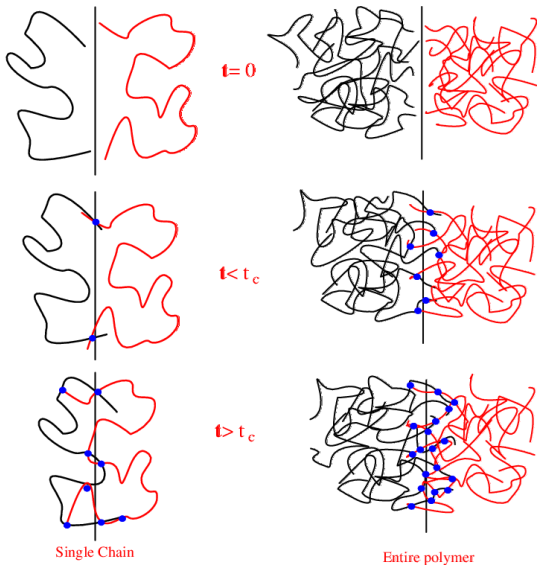



**Figura 2.1**: Diffusione polimeri

Per comprendere a fondo la dinamica che c'è dietro il processo di saldatura delle materie plastiche, è necessario andare, preliminarmente, attraverso alcuni concetti di viscoelasticità e dinamica dei polimeri:

- Modulo di Young: denominato anche modulo di elasticità, è una grandezza adimensionale che descrive il comportamento geometrico del materiale sottoposto a sforzo normale.

  Esso è determinato come:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

  dove σ è lo sforzo normale e ε è la deformazione.

  Tale modulo, nel caso di materiale viscoelastico, è costituito da due componenti: una reale, che ne determina il comportamento elastico, ed una immaginaria, che ne determina il comportamento viscoso.

  Nel caso di applicazione di una tensione σ costante un materiale viscoelastico, come ad esempio il non woven, tenderà a deformarsi in parte in maniera elastica e in parte in maniera plastica. (Fig. 2.2):

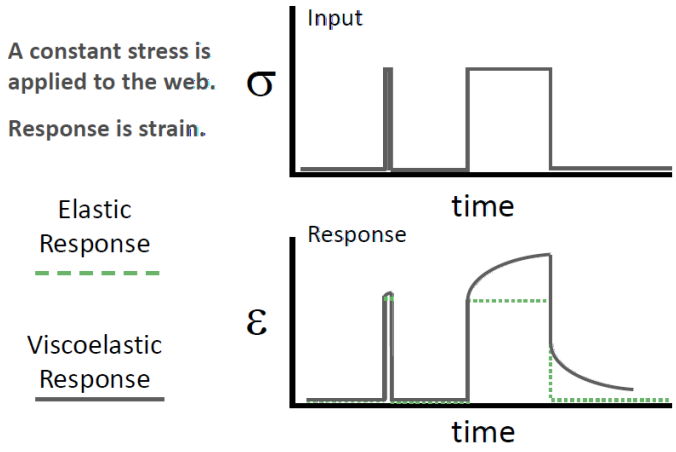



**Figura 2.2**: Deformazione viscoelastica del materiale

- Modulo di taglio: talvolta indicato con μ, detto anche modulo di scorrimento, di rigidità o di elasticità tangenziale, è una costante di Lamé che esprime il rapporto sforzo-deformazione tangenziali.

  Definito come:

$$G = \frac{\tau}{\gamma}$$

  esso è costituito, nel caso di materiale viscoelastico, da una componente reale G' (modulo elastico) e da una componente immaginaria G" (modulo viscoso).

$$G = G' + jG''$$

  I materiali polimerici di cui verrà analizzata la saldatura sono tutti caratterizzati dall'essere di natura viscoelastica, per cui presentano un modulo di Young e un modulo di taglio sia con componente reale (elastica), sia con componente immaginaria (plastica). A tal proposito, considerando test di creep recovery, step-strain e flusso oscillatorio per un fluido viscoso, un solido elastico e un liquido viscoelastico, (confinati in un reometro) è possibile mettere in evidenza come il comportamento di quest'ultimo sia dato dalla combinazione di quello degli altri due.

  Per quanto riguarda il primo test, esso consiste nell'applicare ad uno dei due piatti del reometro una tensione tangenziale costante, la quale poi viene azzerata istantaneamente. Osservando le risposte in termini di deformazione dei tre materiali descritti, si evince come queste siano sensibilmente diverse le une dalle altre e in particolare come l'ultima sia una combinazione delle due precedenti. (Fig. 2.3)

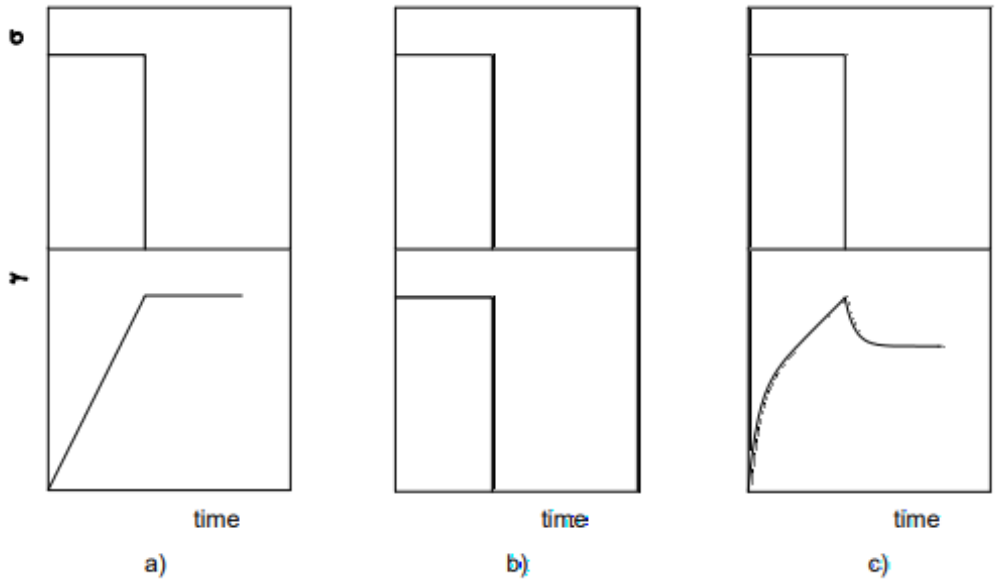



**Figura 2.3**: Deformazioni per materiale a) viscoso b) elastico e c) viscoelastico

Il test di step- strain invece, prevede l'imposizione istantanea di una deformazione di taglio costante, con successiva misurazione dei valori di sforzo generati sul materiale. Anche in questo caso, come nella prova precedente, si può osservare che l'ultimo caso presenta una risposta in tensione che è un ibrido delle altre due. (Fig. 2.4)

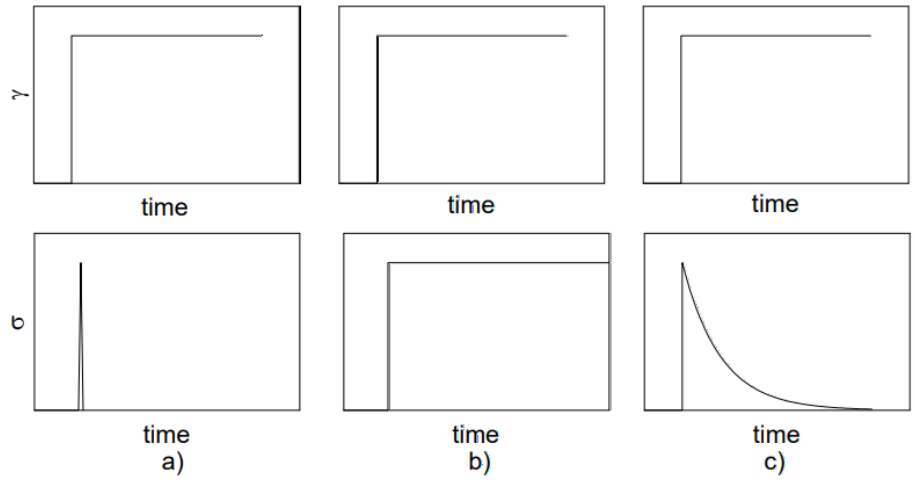



**Figura 2.4**: Sforzo normale per materiale a) viscoso b) elastico e c) viscoelastico

Infine, per quanto riguarda il test di flusso oscillatorio, comunemente indicato come risposta in frequenza, esso consiste nel sottoporre il materiale ad un moto di scorrimento oscillatorio, applicando uno spostamento di tipo sinusoidale ad uno dei due piatti del reometro. Valutando le risposte in tensione dei tre casi, si osserva che per il materiale viscoso si ha un andamento con sfasamento di $\frac{\pi}{2}$, per quello elastico un andamento in fase e per quello viscoelastico uno sfasamento di $\varphi = tan^{-1}\frac{G'}{G''}$. (Fig. 2.5)

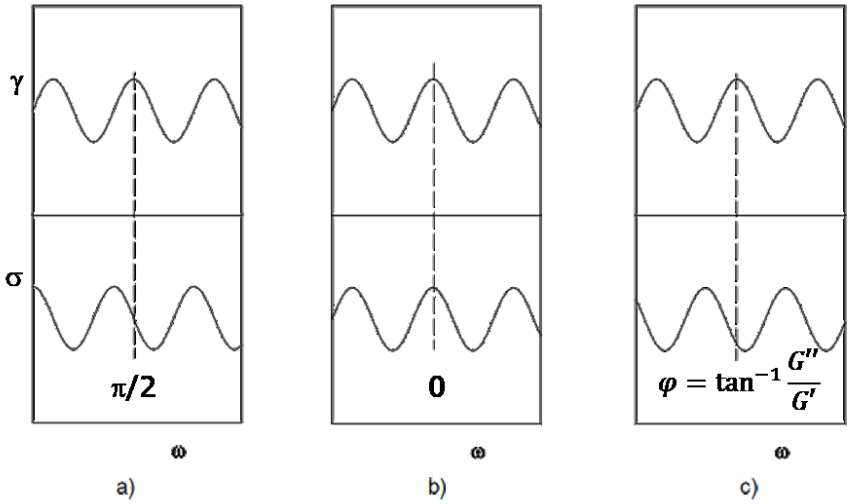



**Figura 2.5**: Risposta in tensione di materiale a) viscoso b) elastico c) viscoelastico

- Tempo di rilassamento: riportando l'andamento dei moduli G' (modulo elastico) e G" (modulo viscoso) nel test di risposta in frequenza di un materiale viscoelastico (Fig. 2.6), il tempo di rilassamento può essere definito come l'inverso della frequenza di crossover (ωc), ossia la frequenza a cui avviene l'intersezione tra le due curve riportate.

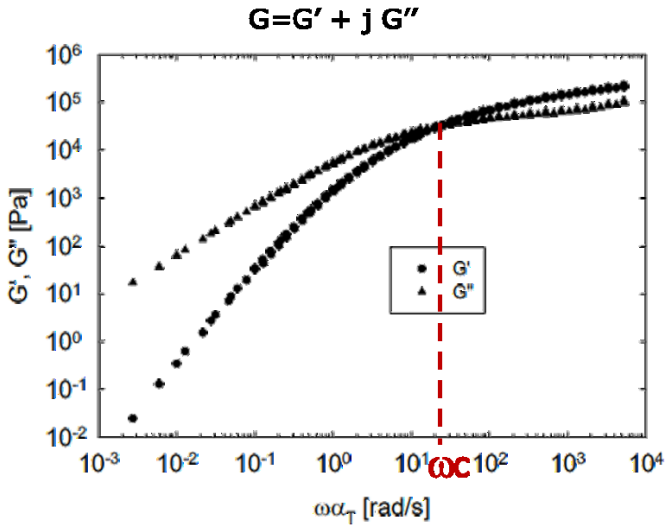



**Figura 2.6**: Andamento di G' e G" nel test di risposta in frequenza

Come si evince dal grafico precedente, un polimero si comporta essenzialmente come un materiale elastico per alte frequenze e come un materiale viscoso per basse frequenze.

- Reptation theory: nella chimica dei polimeri e delle macromolecole, con il termine nodo fisico o nodo topologico (in inglese entanglement) si indica l'interconnessione fisica tra due macromolecole.
  Sul concetto di nodo fisico si basa la teoria della reptazione, secondo la quale ciascuna macromolecola scorre all'interno della rete di nodi fisici che la circonda grazie ad un movimento ondulatorio, tipico dei serpenti. (Figura 2.7)

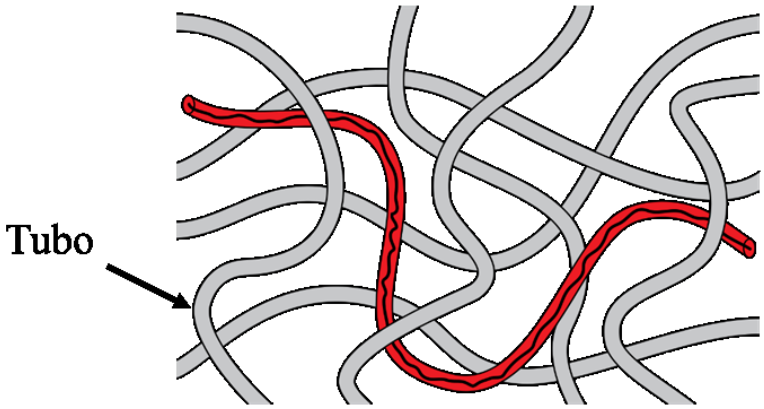



**Figura 2.7**: Movimento ondulatorio di una macromolecola

Secondo la teoria della reptazione, più la molecola è intrappolata, più difficoltà avrà a muoversi all'interno del mezzo e maggiore sarà il comportamento viscoso del materiale.

Il tempo necessario ad una molecola per muoversi di una lunghezza pari alle dimensioni del tubo è proporzionale al tempo di rilassamento.

La teoria appena descritta rappresenta la base di molti articoli che trattano il fenomeno dell'interdiffusione di polimeri in corrispondenza di un'interfaccia. In particolare, si può affermare che tenendo in contatto le facce di due polimeri si ritiene che l'interdiffusione sia avvenuta in maniera efficace solo dopo che sia trascorso un tempo almeno pari al tempo di rilassamento.

## 2.4 Prime indagini sul meccanismo di saldatura

A partire dagli aspetti teorici descritti, le prime indagini sul meccanismo di saldatura tra polimeri sono state condotte dall'Università degli Studi di Napoli "Federico II".

L'ipotesi di partenza considerata è che durante l'impatto si verifica un locale aumento di temperatura, in condizioni tali da garantire un tempo sufficiente per la fusione del materiale e il suo successivo rilassamento.

A partire da una serie di prove di saldatura meccanica a banco, lo studio in esame ha previsto le seguenti attività:

- Analisi morfologica: analisi con microscopio SEM dei campioni precedentemente realizzati. (Fig. 2.8)

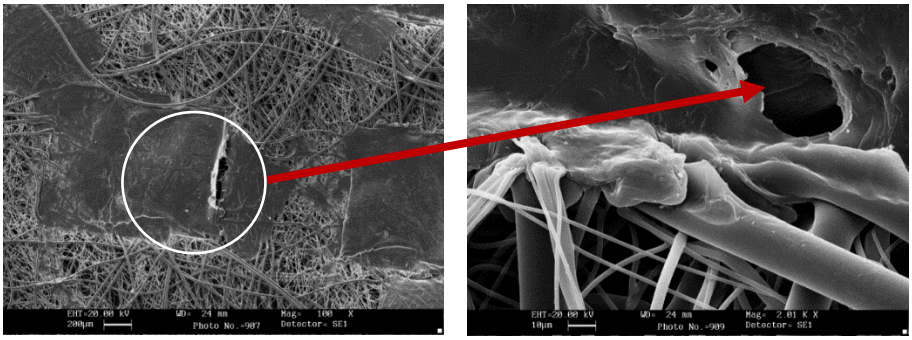



**Figura 2.8**: Analisi al microscopio di un campione saldato

Dalle immagini ottenute è stato possibile osservare sia la fusione delle fibre, sia la presenza di fratture/lacerazioni che vengono generate quando la forza d'impatto è eccessivamente elevata.

- Analisi termica: attraverso l'utilizzo di una termocamera (con frequenza di acquisizione di 100 Hz) è stato possibile valutare l'andamento della temperatura nel tempo in un punto di saldatura (Fig. 2.9).

  Essendo impossibile determinare il valore raggiunto a t=0 tramite acquisizione (poiché non si ha visibilità), i restanti punti della curva sono stati estrapolati dalla legge:

$$T = y_0 + ae^{-t/\tau}$$

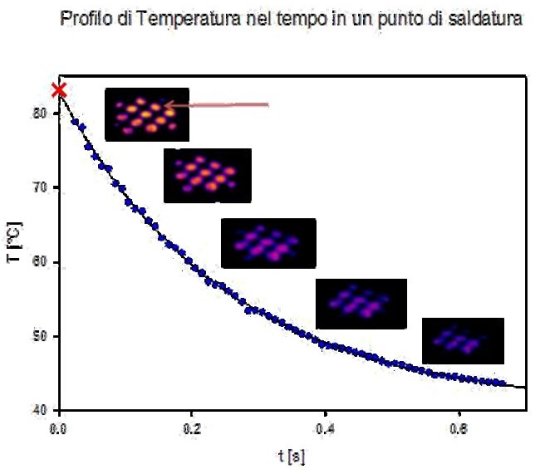



**Figura 2.9**: Andamento della temperatura nel tempo in un punto di saldatura

Dalla curva si può osservare come la massima T raggiunta è pari a 90 °C.

- Misure calorimetriche DSC: la calorimetria differenziale a scansione, nota anche con la sigla DSC (differential scanning calorimetry), è, insieme all'analisi termica differenziale (DTA), la principale tecnica di analisi termica utilizzabile per caratterizzare molti tipi di materiali (polimeri, metalli, materiali ceramici).

  Il principio di base di questa tecnica consiste nel ricavare informazioni sul materiale, riscaldandolo o raffreddandolo in maniera controllata. In particolare, il DSC si basa sulla misura della differenza di flusso termico tra il campione in esame

e uno di riferimento, mentre i due sono vincolati a una temperatura variabile definita da un programma prestabilito.

A partire da tale tecnica, per i campioni considerati, è stato ottenuto l'andamento del flusso di calore in funzione della temperatura (Fig. 2.10).

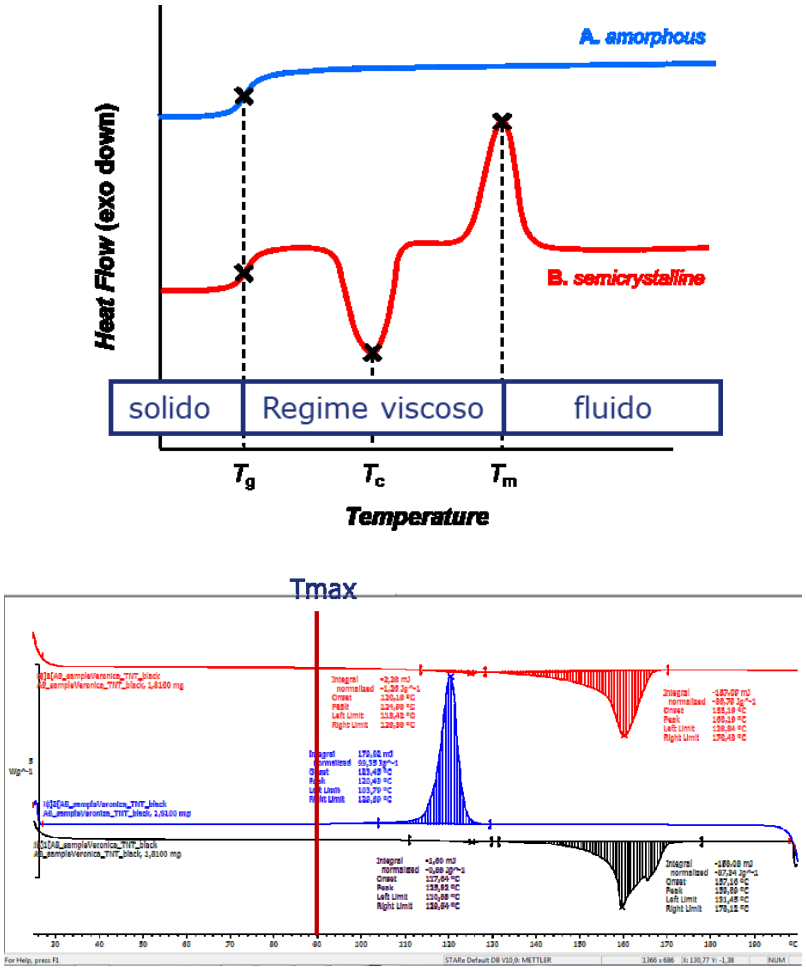



**Figura 2.10**: analisi DSC del campione

I due aspetti principali ricavati dai dati ottenuti sono stati:

- la temperatura di transizione vetrosa ($T_g$) dei polimeri costituenti le materie prime trattate è sempre inferiore a 0 °C.
- l'unica parte coinvolta nel processo di saldatura è quella amorfa.

- Misure reologiche: prove reologiche eseguite con reometro ARES, caratterizzato da una geometria piatto-piatto con un gap di 1 mm.

A partire da tali test è stato possibile determinare l'entità del tempo di rilassamento (ottenibile solo nel caso di polimeri allo stato fluido) in funzione dell'inverso della temperatura assoluta. (Fig. 2.11)

La legge utilizzata per ottenere il relaxation time è stata:

$$\log\tau = a + (b * 10^3)/T$$

$$a = -4.02$$

$$b = 2.04$$

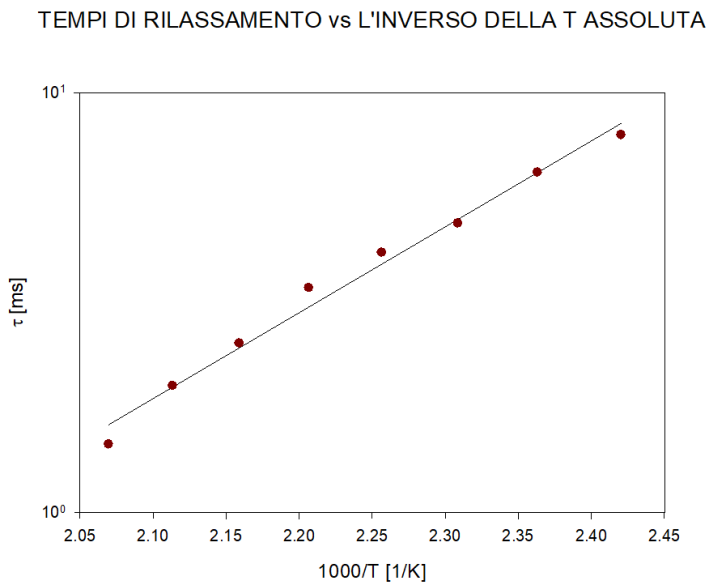



**Figura 2.11**: andamento del tempo di rilassamento in funzione dell'inverso della T assoluta.

Confrontando la temperatura raggiunta nella zona di saldatura e il tempo di rilassamento in corrispondenza della stessa, è stato possibile affermare che le catene polimeriche hanno tempo sufficiente per diffondere tra i due materiali attraverso l'interfaccia.

I risultati ottenuti dalle analisi effettuate hanno confermato non solo che il processo di saldatura sia basato sulla fusione del materiale, ma anche come l'adesione sia effettivamente dovuta all'interdiffusione della parte amorfa del polimero.

# Capitolo 3: Simulazione della saldatura

In seguito allo studio reologico descritto, per poter comprendere meglio cosa accade durante la saldatura tra film polimerici è stato fatto ricorso alla simulazione, uno strumento numerico che permette lo studio della realtà ad un elevato livello di dettaglio. I due meccanismi analizzati sono stati: la saldatura meccanica a banco e la saldatura meccanica tramite rotative.

## 3.1 Saldatura meccanica a banco

Fino ad oggi, per poter simulare fisicamente il processo industriale di saldatura meccanica dei TNT, lo strumento utilizzato è stato il "Picchio" (Fig. 3.1). Esso, denominato così per l'impatto che determina sui materiali da saldare, è costituito da una massa di entità variabile (al massimo pari a 1.5 kg) che, tramite un pattino a sfere, può scorrere lungo una guida verticale in acciaio. Il grave, realizzabile tramite una o due forme cilindriche con un apposito punzone, può essere agganciato al binario verticale ad altezze differenti e, una volta posizionato alla quota desiderata, esso viene rilasciato attraverso una leva ad azionamento manuale.

L'impatto generato sui due teli di non woven, bloccati sulla base dello strumento tramite un sistema a calamite, rappresenta il fulcro di tale attrezzatura ed è proprio in base alla sua entità che la giunzione si verifica o meno.

Inizialmente la massa è caratterizzata da un'energia potenziale pari a $E_p = m*g*h$, con h che è l'altezza di caduta impostata con un'apposita scala graduata presente sulla guida. Al momento del rilascio, tale energia potenziale tende a ridursi, traducendosi dapprima in energia cinetica ed attrito e, al momento dell'impatto con i TNT, in parte in energia di saldatura, in parte in dissipazione.

I parametri principali che vanno a influire sulla qualità della saldatura di tale strumento sono fondamentalmente due: la tipologia di pattern incisa sul punzone e l'altezza di caduta.

Per quanto riguarda il primo, i punzoni intercambiabili agganciati al grave sono caratterizzati ognuno da una certa tipologia di pattern. In base alla geometria e alla dimensione dei pin incisi su di essi, è possibile ottenere una diversa qualità della saldatura.

Relativamente al secondo invece, si può affermare che, al diminuire dell'altezza di caduta, l'energia potenziale del grave si riduce, (e dunque anche quella trasmessa ai materiali da saldare), con un conseguente peggioramento della qualità del giunto saldato. Viceversa, se la quota aumenta oltre una certa soglia, i campioni di tessuto acquisteranno una quantità di energia troppo elevata, arrivando così a presentare delle vere e proprie lacerazioni.

**Figura 3.1**: Apparecchiatura a caduta di grave

I vantaggi di questo metodo di prova risiedono principalmente in: economicità, semplicità e flessibilità (dovuta alla possibilità di modificare la massa e l'altezza di caduta, e dunque l'energia in gioco).

Al contempo però, esso presenta anche degli aspetti negativi, quali: l'attrito della guida, una zona d'impatto poco accessibile alle misurazioni, scarsa precisione e ripetibilità e la possibilità di simulare forze d'impatto limitate, in quanto dipendenti dalla quota raggiungibile sulla guida verticale. Infine, un'ultima negatività di tale strumento è rappresentata dal momento agente sul baricentro della massa, causa, durante le prove, sia di vibrazioni che di rallentamenti del punzone appena dopo l'impatto.

## 3.2 Test sperimentali

Prima di eseguire l'analisi agli elementi finiti del processo di saldatura meccanica a banco, per poter ottenere risultati di simulazione attendibili, è stato necessario effettuare alcuni test sperimentali tramite l'utilizzo del "picchio". Tali prove, che hanno lo scopo di determinare i parametri caratteristici utili per la taratura del modello, sono state svolte principalmente con l'uso di due punzoni, ognuno caratterizzato da una specifica geometria. (Fig. 3.2)

massa punzone 1 = 10,43 g

massa punzone 2 = 11,69 g

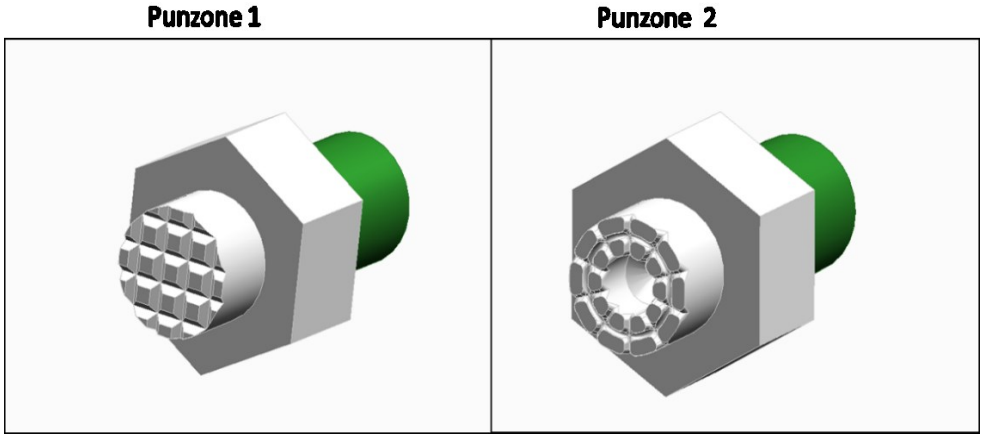



**Figura 3.2**: punzoni per test con apparecchiatura a caduta di grave

Definendo con A e B, rispettivamente, i casi con il punzone 1 ed il punzone 2, per ognuno di essi sono state valutate diverse configurazioni. In particolare, sono state realizzate prove ad altezze diverse (50 mm, 100 mm e 150 mm), con e senza non-woven sul piano d'appoggio e con masse differenti lungo la guida verticale (solo massa inferiore da 1.09 kg o massa inferiore e superiore da 1.5 kg) (Tab. 3.3).

Per ottenere un risultato con un buon grado di accuratezza ciascuna prova è stata ripetuta circa 4–5 volte, in modo tale da poter effettuare una media delle misurazioni rilevate ed eliminare eventuali errori casuali introdotti.

| File[s] | Punzone | Altezza punzon | Materiale | Massa [g] | Altezza [mm] | hg [mm] | Altezza tot [m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A11_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 50 | 66 | 116 |
| A12_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 50 | 66 | 116 |
| A13_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 50 | 66 | 116 |
| A14_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 50 | 66 | 116 |
| A15_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 50 | 66 | 116 |
| A21_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 100 | 66 | 166 |
| A22_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 100 | 66 | 166 |
| A23_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 100 | 66 | 166 |
| A24_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 100 | 66 | 166 |
| A25_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 100 | 66 | 166 |
| A31_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 150 | 66 | 216 |
| A32_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 150 | 66 | 216 |
| A33_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 150 | 66 | 216 |
| A34_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 150 | 66 | 216 |
| A41_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 50 | 51 | 101 |
| A42_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 50 | 51 | 101 |
| A43_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 50 | 51 | 101 |
| A44_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 50 | 51 | 101 |
| A51_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 100 | 51 | 151 |
| A52_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 100 | 51 | 151 |
| A53_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 100 | 51 | 151 |
| A54_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 100 | 51 | 151 |
| A61_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 150 | 51 | 201 |
| A62_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 150 | 51 | 201 |
| A63_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 150 | 51 | 201 |
| A64_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 150 | 51 | 201 |
| A71_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 50 | 66 | 116 |
| A72_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 50 | 66 | 116 |
| A73_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 50 | 66 | 116 |
| A74_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 50 | 66 | 116 |
| A81_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 100 | 66 | 166 |
| A82_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 100 | 66 | 166 |
| A83_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 100 | 66 | 166 |
| A84_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 100 | 66 | 166 |
| A91_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 150 | 66 | 216 |
| A92_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 150 | 66 | 216 |
| A93_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 150 | 66 | 216 |
| A94_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 150 | 66 | 216 |
| A101_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 50 | 51 | 101 |
| A102_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 50 | 51 | 101 |
| A103_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 50 | 51 | 101 |
| A104_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 50 | 51 | 101 |
| A111_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 100 | 51 | 151 |
| A112_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 100 | 51 | 151 |
| A113_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 100 | 51 | 151 |
| A114_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 100 | 51 | 151 |
| A121_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 150 | 51 | 201 |
| A122_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 150 | 51 | 201 |
| A123_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 150 | 51 | 201 |
| A124_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 150 | 51 | 201 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| B131_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 50 | 66 | 116 |
| B132_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 50 | 66 | 116 |
| B133_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 50 | 66 | 116 |
| B134_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 50 | 66 | 116 |
| B141_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 100 | 66 | 166 |
| B142_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 100 | 66 | 166 |
| B143_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 100 | 66 | 166 |
| B144_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 100 | 66 | 166 |
| B151_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 150 | 66 | 216 |
| B152_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 150 | 66 | 216 |
| B153_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 150 | 66 | 216 |
| B154_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 150 | 66 | 216 |
| B171_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1091.6 | 100 | 51 | 151 |
| B172_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1091.6 | 100 | 51 | 151 |
| B173_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1091.6 | 100 | 51 | 151 |
| B174_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1091.6 | 100 | 51 | 151 |
| B181_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1091.6 | 150 | 51 | 201 |
| B182_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1091.6 | 150 | 51 | 201 |
| B183_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1091.6 | 150 | 51 | 201 |
| B184_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1091.6 | 150 | 51 | 201 |
| B201_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1513.06 | 100 | 66 | 166 |
| B202_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1513.06 | 100 | 66 | 166 |
| B203_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1513.06 | 100 | 66 | 166 |
| B204_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1513.06 | 100 | 66 | 166 |
| B211_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1513.06 | 150 | 66 | 216 |
| B212_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1513.06 | 150 | 66 | 216 |
| B213_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1513.06 | 150 | 66 | 216 |
| B214_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1513.06 | 150 | 66 | 216 |
| B231_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1091.6 | 100 | 51 | 151 |
| B232_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1091.6 | 100 | 51 | 151 |
| B233_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1091.6 | 100 | 51 | 151 |
| B234_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1091.6 | 100 | 51 | 151 |
| B241_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1091.6 | 150 | 51 | 201 |
| B242_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1091.6 | 150 | 51 | 201 |
| B243_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1091.6 | 150 | 51 | 201 |
| B244_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1091.6 | 150 | 51 | 201 |

**Tabella 3.3**: prove realizzate

Per ricavare i parametri necessari alla taratura della simulazione, durante le prove è stata utilizzata una i-speed camera, ossia una speciale videocamera in grado di catturare eventi in movimento ad alta velocità. Tale dispositivo, con l'ausilio del programma i-speed viewer, ha permesso infatti sia di calcolare l'entità delle altezze di rimbalzo delle diverse configurazioni (Fig. 3.4) sia i tempi caratteristici di caduta dei soli casi senza tessuto (Fig. 3.5) (la limitazione ai casi senza non woven è stata il risultato di problemi di visibilità della zona d'impatto).

| File[s] | Punzone | Altezza punzon | Materiale | Massa [g] | Altezza [mm] | hg [mm] | Altezza tot [m | height [mm] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A11_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 50 | 66 | 116 | 3.2 |
| A12_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 50 | 66 | 116 | 2.9 |
| A13_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 50 | 66 | 116 | 2.7 |
| A14_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 50 | 66 | 116 | 2.5 |
| A15_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 50 | 66 | 116 | 2.5 |
| A21_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 100 | 66 | 166 | 5.1 |
| A22_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 100 | 66 | 166 | 5.5 |
| A23_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 100 | 66 | 166 | 5.5 |
| A24_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 100 | 66 | 166 | 5 |
| A25_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 100 | 66 | 166 | 4.8 |
| A31_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 150 | 66 | 216 | |
| A32_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 150 | 66 | 216 | 6.1 |
| A33_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 150 | 66 | 216 | 6.9 |
| A34_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 11511.8 | 150 | 66 | 216 | 6.4 |
| A41_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 50 | 51 | 101 | 0.9 |
| A42_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 50 | 51 | 101 | 0.9 |
| A43_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 50 | 51 | 101 | 0.9 |
| A44_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 50 | 51 | 101 | 1 |
| A51_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 100 | 51 | 151 | 1.9 |
| A52_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 100 | 51 | 151 | 1.8 |
| A53_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 100 | 51 | 151 | 1.9 |
| A54_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 100 | 51 | 151 | 1.8 |
| A61_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 150 | 51 | 201 | 3 |
| A62_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 150 | 51 | 201 | 2.1 |
| A63_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 150 | 51 | 201 | 2.5 |
| A64_0.jpg | 1 | 12 | 0 | 1090.34 | 150 | 51 | 201 | 2.1 |
| A71_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 50 | 66 | 116 | 2.9 |
| A72_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 50 | 66 | 116 | 4.1 |
| A73_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 50 | 66 | 116 | 4.1 |
| A74_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 50 | 66 | 116 | 4 |
| A81_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 100 | 66 | 166 | |
| A82_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 100 | 66 | 166 | 4.6 |
| A83_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 100 | 66 | 166 | 4 |
| A84_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 100 | 66 | 166 | 4.5 |
| A91_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 150 | 66 | 216 | |
| A92_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 150 | 66 | 216 | 6.5 |
| A93_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 150 | 66 | 216 | 6.4 |
| A94_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 11511.8 | 150 | 66 | 216 | 6.4 |
| A101_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 50 | 51 | 101 | 0.8 |
| A102_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 50 | 51 | 101 | 0.9 |
| A103_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 50 | 51 | 101 | 1 |
| A104_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 50 | 51 | 101 | 0.9 |
| A111_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 100 | 51 | 151 | 1.5 |
| A112_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 100 | 51 | 151 | 1.4 |
| A113_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 100 | 51 | 151 | 1.5 |
| A114_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 100 | 51 | 151 | 1.6 |
| A121_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 150 | 51 | 201 | 1.7 |
| A122_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 150 | 51 | 201 | 1.8 |
| A123_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 150 | 51 | 201 | 1.7 |
| A124_0.jpg | 1 | 12 | 1 | 1090.34 | 150 | 51 | 201 | 2.1 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| B131_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 50 | 66 | 116 | 2.9 |
| B132_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 50 | 66 | 116 | 2.8 |
| B133_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 50 | 66 | 116 | 2.9 |
| B134_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 50 | 66 | 116 | 2.8 |
| B141_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 100 | 66 | 166 | |
| B142_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 100 | 66 | 166 | 4.9 |
| B143_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 100 | 66 | 166 | 4 |
| B144_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 100 | 66 | 166 | 4 |
| B151_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 150 | 66 | 216 | |
| B152_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 150 | 66 | 216 | 6.1 |
| B153_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 150 | 66 | 216 | 5.2 |
| B154_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1513.06 | 150 | 66 | 216 | 5.7 |
| B171_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1091.6 | 100 | 51 | 151 | 1.5 |
| B172_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1091.6 | 100 | 51 | 151 | 1.8 |
| B173_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1091.6 | 100 | 51 | 151 | 1.7 |
| B174_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1091.6 | 100 | 51 | 151 | 1.8 |
| B181_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1091.6 | 150 | 51 | 201 | 1.9 |
| B182_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1091.6 | 150 | 51 | 201 | 2.1 |
| B183_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1091.6 | 150 | 51 | 201 | 2 |
| B184_0.jpg | 2 | 11.5 | 0 | 1091.6 | 150 | 51 | 201 | 2 |
| B201_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1513.06 | 100 | 66 | 166 | 4.1 |
| B202_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1513.06 | 100 | 66 | 166 | 3.9 |
| B203_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1513.06 | 100 | 66 | 166 | 3.9 |
| B204_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1513.06 | 100 | 66 | 166 | 4 |
| B211_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1513.06 | 150 | 66 | 216 | 5.5 |
| B212_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1513.06 | 150 | 66 | 216 | 5.5 |
| B213_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1513.06 | 150 | 66 | 216 | 6 |
| B214_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1513.06 | 150 | 66 | 216 | 5.7 |
| B231_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1091.6 | 100 | 51 | 151 | 1.1 |
| B232_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1091.6 | 100 | 51 | 151 | 1.1 |
| B233_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1091.6 | 100 | 51 | 151 | 1.4 |
| B234_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1091.6 | 100 | 51 | 151 | 1.2 |
| B241_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1091.6 | 150 | 51 | 201 | 1.6 |
| B242_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1091.6 | 150 | 51 | 201 | 1.8 |
| B243_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1091.6 | 150 | 51 | 201 | 1.7 |
| B244_0.jpg | 2 | 11.5 | 1 | 1091.6 | 150 | 51 | 201 | 1.8 |

**Figura 3.4**.: altezze di rimbalzo

| | punzone | h (mm) | m (g) | t1 (s) | t2 (s) | t3 (s) | t4(s) | t5 (s) | | dt1 (s) | dt2 (s) | dt3(s) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A11 | 1 | 50 | 11511.8 | 0.188 | 0.2973 | 0.298 | 0.3233 | 0.35 | | 0.1093 | 0.0253 | 0.052 |
| A12 | 1 | 50 | 11511.8 | 0.2647 | 0.374 | | 0.3953 | 0.422 | | 0.1093 | 0.0213 | 0.048 |
| A13 | 1 | 50 | 11511.8 | 0.1547 | 0.2627 | | 0.284 | 0.31 | | 0.108 | 0.0213 | 0.0473 |
| A14 | 1 | 50 | 11511.8 | 0.602666 | 0.710666 | | 0.733333 | 0.756666 | | 0.108 | 0.022667 | 0.046 |
| A15 | 1 | 50 | 11511.8 | 0.131333 | 0.238666 | | 0.260666 | 0.284666 | | 0.107333 | 0.022 | 0.046 |
| | | | | | media | | | | | 0.108387 | 0.022513 | 0.04786 |
| A21 | 1 | 100 | 11511.8 | | 0.403333 | | 0.435333 | 0.469333 | | | 0.032 | 0.066 |
| A22 | 1 | 100 | 11511.8 | | 0.398 | | 0.431333 | 0.466 | | | 0.033333 | 0.068 |
| A23 | 1 | 100 | 11511.8 | | 0.370666 | | 0.405333 | 0.438666 | | | 0.034667 | 0.068 |
| A24 | 1 | 100 | 11511.8 | | 0.223333 | | 0.255333 | 0.288 | | | 0.032 | 0.064667 |
| A25 | 1 | 100 | 11511.8 | | 0.150666 | | 0.181333 | 0.212666 | | | 0.030667 | 0.062 |
| | | | | | media | | | | | | 0.032533 | 0.065733 |
| A32 | 1 | 150 | 11511.8 | | 0.226 | | 0.262666 | 0.297333 | | | 0.036666 | 0.071333 |
| A33 | 1 | 150 | 11511.8 | | 0.302 | | 0.338666 | 0.377333 | | | 0.036666 | 0.075333 |
| A34 | 1 | 150 | 11511.8 | | 0.191333 | | 0.225333 | 0.266 | | | 0.034 | 0.074667 |
| | | | | | media | | | | | | 0.035777 | 0.073778 |
| A41 | 1 | 50 | 1090.34 | 0.3 | 0.4093 | | 0.4207 | 0.434666 | | 0.1093 | 0.0114 | 0.025366 |
| A42 | 1 | 50 | 1090.34 | 0.1673 | 0.278 | | 0.29 | 0.303333 | | 0.1107 | 0.012 | 0.025333 |
| A43 | 1 | 50 | 1090.34 | 0.1307 | 0.238 | | 0.2527 | 0.262666 | | 0.1073 | 0.0147 | 0.024666 |
| A44 | 1 | 50 | 1090.34 | 0.34 | 0.447333 | | 0.462 | 0.474 | | 0.107333 | 0.014667 | 0.026667 |
| | | | | | media | | | | | 0.108658 | 0.013192 | 0.025508 |
| A51 | 1 | 100 | 1090.34 | | 0.292 | 0.292666 | 0.310666 | 0.331333 | | | 0.018 | 0.038667 |
| A52 | 1 | 100 | 1090.34 | | 0.087333 | | 0.105333 | 0.123333 | | | 0.018 | 0.036 |
| A53 | 1 | 100 | 1090.34 | | 0.284666 | | 0.303333 | 0.322 | | | 0.018667 | 0.037334 |
| A54 | 1 | 100 | 1090.34 | | 0.078 | 0.078666 | 0.095333 | 0.113333 | | | 0.016667 | 0.034667 |
| | | | | | media | | | | | | 0.017834 | 0.036667 |
| A61 | 1 | 150 | 1090.34 | | 0.343333 | | 0.367333 | 0.394666 | | | 0.024 | 0.051333 |
| A62 | 1 | 150 | 1090.34 | | 0.290666 | | 0.311333 | 0.334 | | | 0.020667 | 0.043334 |
| A63 | 1 | 150 | 1090.34 | | 0.126 | | 0.148 | 0.172 | | | 0.022 | 0.046 |
| A64 | 1 | 150 | 1090.34 | | 0.086666 | | 0.106666 | 0.128 | | | 0.02 | 0.041334 |
| | | | | | media | | | | | | 0.021667 | 0.0455 |

**Figura 3.5**: tempi caratteristici di caduta nei casi senza tessuto

Come illustrato nella tabella 3.5, i tempi caratteristici ottenuti sono stati:

- dt1= tempo di caduta (t2 (impatto con il supporto) – t1 (inizio caduta massa))
- dt2=tempo di risalita (t4 (punto massima altezza di rimbalzo) – t3 (inizio distacco dal supporto))
- dt3=tempo di ulteriore impatto (t5 (secondo impatto con il supporto) – t3 (inizio distacco dal supporto))

Per quanto riguarda il tempo iniziale, esso è stato definito solo per le misure a 50 mm di caduta. Questo poiché, a differenza degli altri casi, era l'unica condizione in cui l'istante di partenza era inquadrato dalla videocamera.

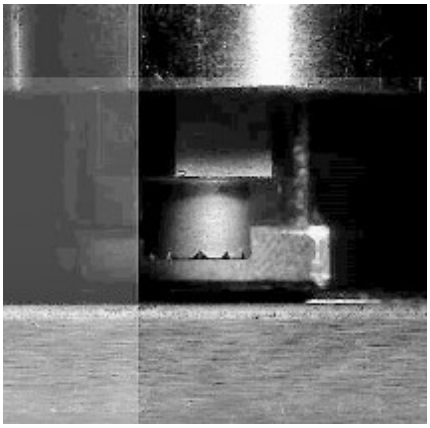
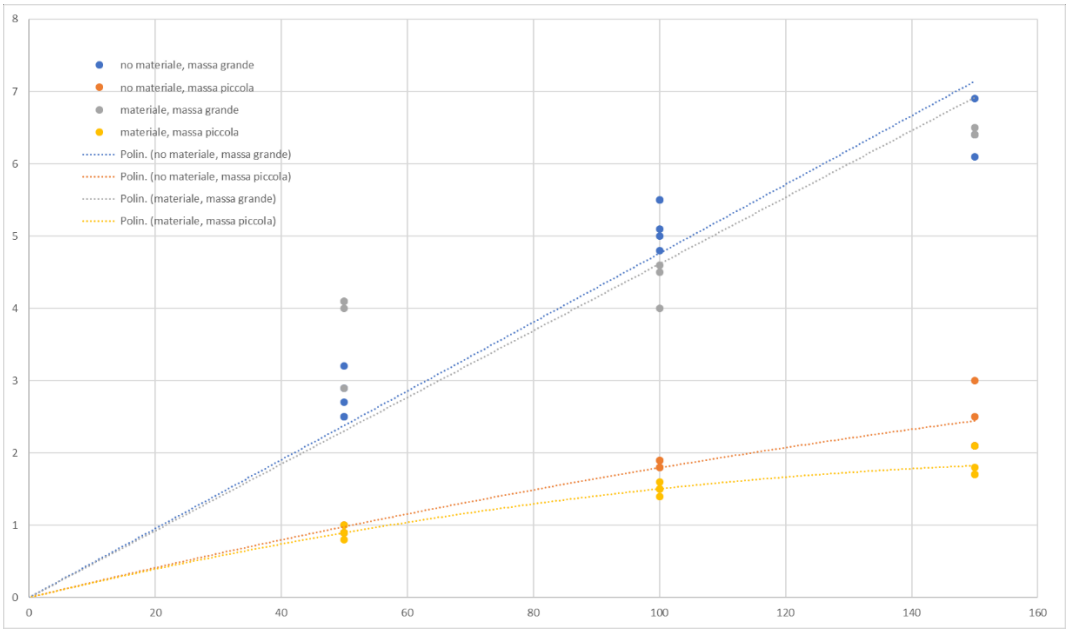
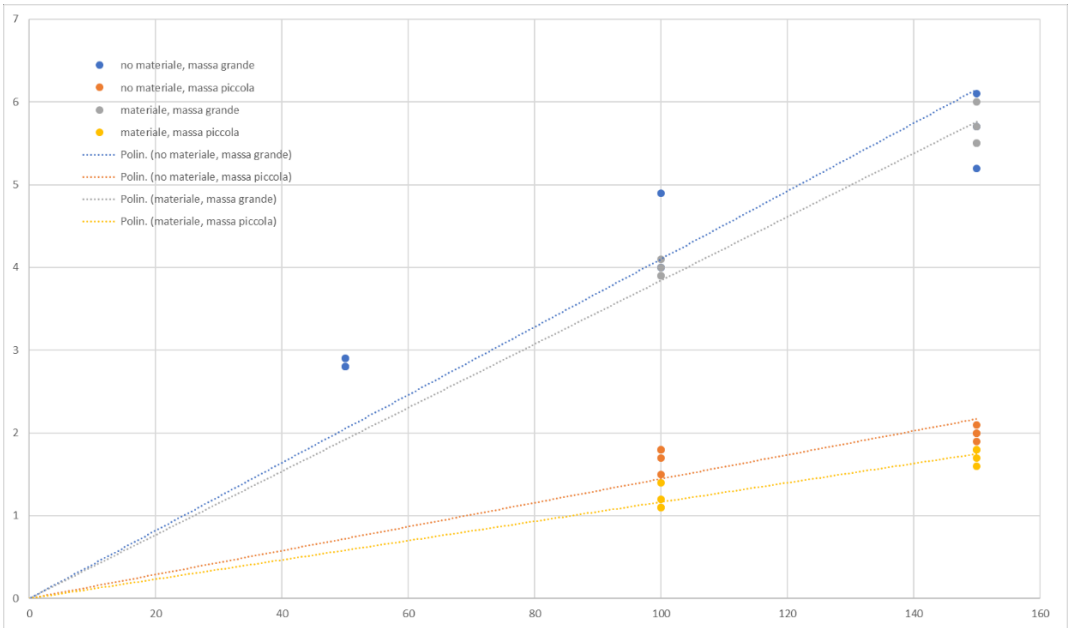


**Figura 3.6**: immagine punzone tramite i-speed viewer

Una volta calcolate le altezze di rimbalzo per le diverse configurazioni, è stato possibile definire l'andamento delle stesse in funzione dell'altezza di caduta (tramite interpolazione di punti). Tali trend, realizzati sia al variare della massa, sia con che senza materiale, sono stati ottenuti sia per il punzone 1 (Fig. 3.7 a) sia per il punzone 2 (Fig. 3.7 b)




a)




b)

**Figura 3.7**: Altezze di rimbalzo in funzione dell'altezza di caduta per il punzone 1 a) e per il punzone 2 b)

Dalle immagini precedenti si possono osservare principalmente due aspetti (validi per entrambi i punzoni):

- L'altezza di rimbalzo aumenta al crescere della quota di caduta;
- Il trend definito in assenza di non woven tende a scostarsi molto poco dal caso in presenza di materiale.

## 3.3 Simulazione strutturale della saldatura meccanica a banco

A seguito delle misurazioni sperimentali descritte, è stato possibile definire il modello FEM per la simulazione strutturale della saldatura meccanica a banco. (Fig.3.8)

Esso, tarato sulla base sia delle altezze di rimbalzo che dei tempi caratteristici di caduta (per tenere conto del fenomeno dell'attrito), è stato caratterizzato dalle seguenti ipotesi:

- Forza di attrito costante (Coulomb)
- Fenomeno di saldatura completamente meccanico/termico e non chimico
- Considerazione della conduzione del materiale, della conduzione del ferro e della convezione dell'aria
- Inclusione dell'energia di deformazione del materiale all'interno dell'energia dissipata.

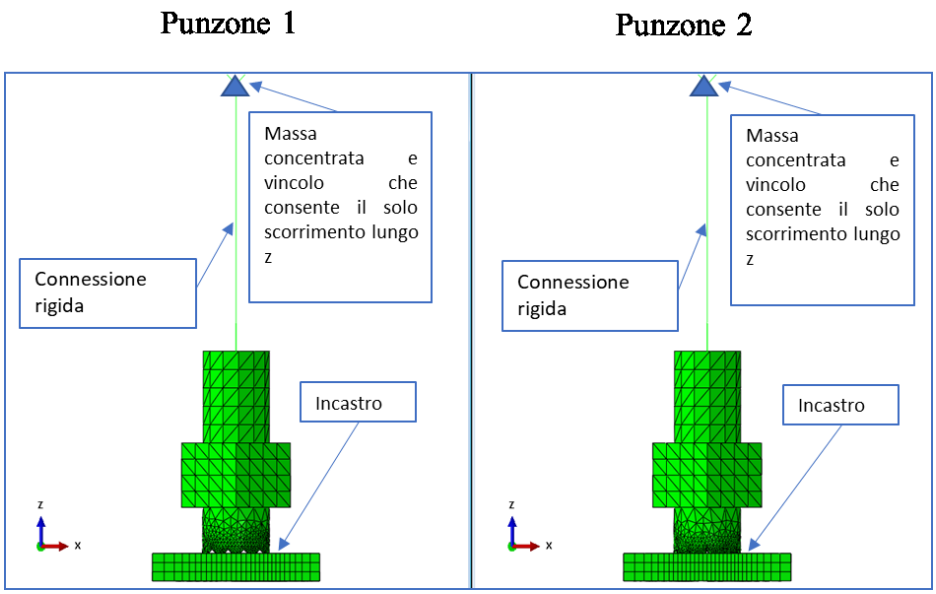



**Figura 3.8**: Modelli per la simulazione strutturale del picchio con punzone 1 e punzone 2

Dalle simulazioni strutturali realizzate, sono stati ottenuti principalmente due risultati:

- L'entità della forza scambiata in corrispondenza dell'impatto;
- L'andamento e la distribuzione delle componenti energetiche che contribuiscono al processo.

Le forze scambiate risultano essere indipendenti dal tipo di punzone e sono caratterizzate da valori molto elevati. Ciò è dovuto sia al breve lasso di tempo legato all'impulso, sia alla presenza degli spigoli del pattern.

Considerando ad esempio il grave con la sola massa inferiore ed il punzone 1, è stato possibile determinare l'andamento della pressione media di contatto in funzione del tempo. (Fig. 3.9)

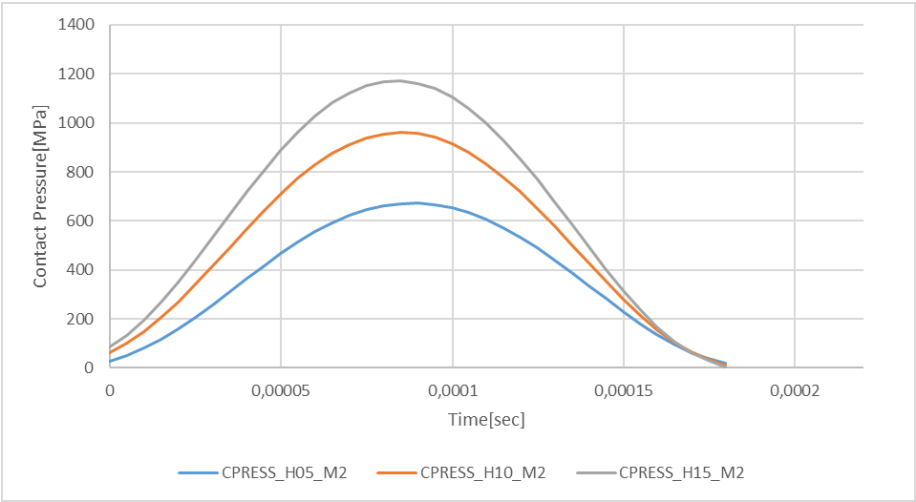



**Figura 3.9**: andamento della pressione media nel tempo al variare dell'altezza di caduta

Come si evince dal grafico, la pressione di contatto, e quindi anche la forza scambiata, è tanto più alta quanto più elevata è l'altezza di caduta della massa. Prendendo ad esempio in esame il picco a 150 mm di altezza, nota l'area di contatto pari a 13 mm^2, si raggiunge una forza massima del valore di circa 16000 N.

Relativamente all'analisi dell'energia legata al processo invece, i contributi presenti sono:

- Energia potenziale iniziale: $E_{pot\text{-}i}$ = m*g*h. A partire da tale quota, tramite conservazione dell'energia, è stato possibile determinare anche il valore della velocità d'impatto della massa v =$\sqrt{2 * g * h}$.
- Energia potenziale finale: $E_{pot\text{-}f}$ = m*g*$h_2$. La grandezza $h_2$ non è altro che l'entità del rimbalzo ed è stata ottenuta proprio dalla simulazione.
- Energia dissipata per attrito durante la caduta: $E_{att\text{-}caduta} = E_{pot\text{-}i} - E_{k\text{-}impatto_sperimentale}$
- Energia dissipata per attrito durante il rimbalzo: $E_{att\text{-}rimb} = E_{k\text{-}rimb._sperimentale} - E_{pot\text{-}fin}$
- Energia dissipata sottoforma di calore: $E_{term}$. Tale quota è stata calcolata con un modello FEM termico, in modo tale che il flusso termico applicato per la durata dell'impatto determini una temperatura nel tessuto pari a quella misurata sperimentalmente.
- Energia dissipata per deformazione e smorzamenti viscosi:

  $Ex = E_{pot\text{-}i} - E_{pot\text{-}f} - E_{att\text{-}caduta} - E_{att\text{-}rimb} - E_{term}$

Considerando ad esempio il caso di sola massa inferiore, punzone 1 e con altezza di caduta h=100 mm, è stato possibile determinare l'entità di ogni singola quota di energia coinvolta nel processo. (Tab. 3.10)

| | | |
|---|---|---|
| E pot_i | 1,069 | 100,0% |
| E pot_f | 0,019 | 1,8% |
| Eatt_cad | 0,154 | 14,4% |
| Eatt_rim | 0,00331 | 0,3% |
| E term tot | 0,094 | 8,8% |
| E term tes | 0,047 | 4,4% |
| E term sup | 0,047 | 4,4% |
| Ex | 0,798 | 74,7% |

**Tabella 3.10**: contributi energetici al processo

Per una migliore visualizzazione della distribuzione energetica, i valori ottenuti dalla simulazione sono stati inseriti all'interno di un diagramma di Sankey, un particolare diagramma di flusso in cui ogni freccia ha un'ampiezza proporzionale al contributo di flusso che rappresenta. (Fig. 3.11)

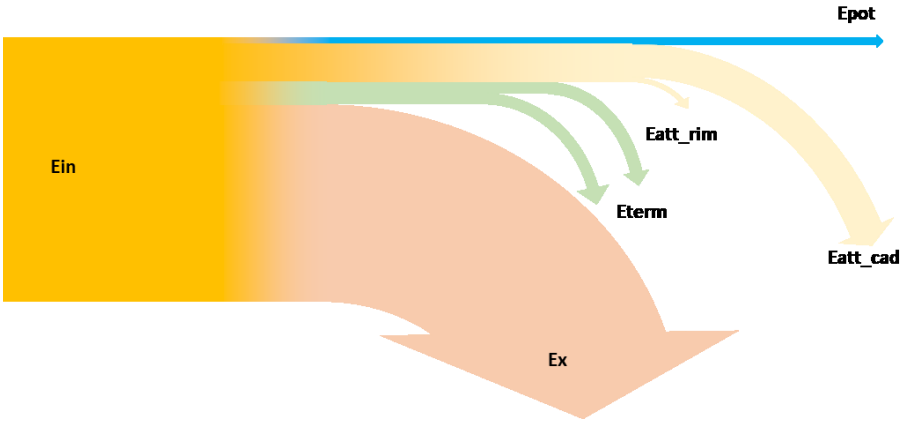
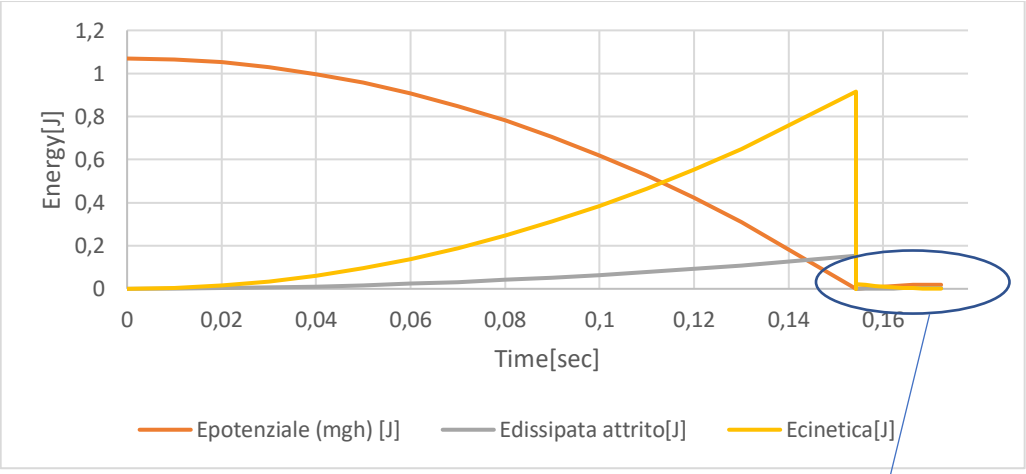



**Figura 3.11**: Diagramma di Sankey

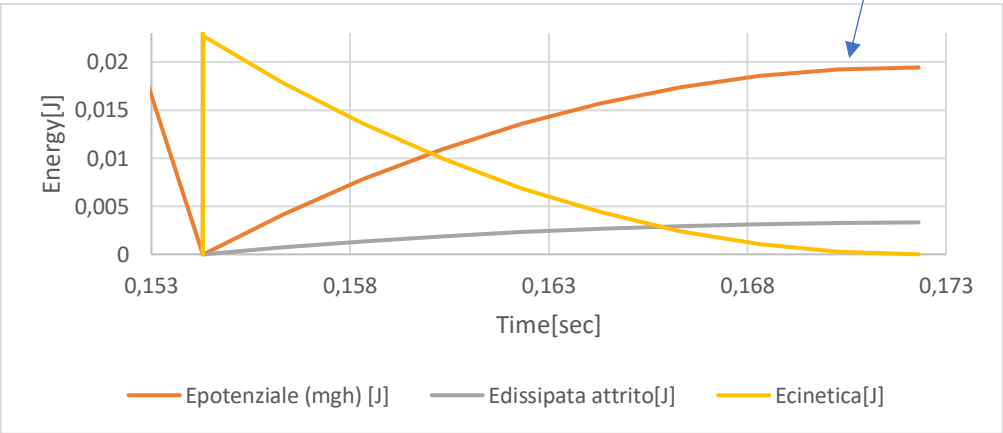
Come si può osservare dal diagramma di Sankey, nel processo di saldatura meccanica a banco la quota parte di energia maggiore è quella legata alla dissipazione per deformazione e smorzamenti viscosi. Tramite la simulazione si può quindi affermare che per poter ottimizzare tale processo bisogna agire proprio sulla quota parte di energia persa, cercando di ridurla il più possibile a favore della quota parte responsabile della saldatura.

Infine, sempre in relazione all'analisi energetica, è stato possibile determinare anche l'andamento dei diversi contributi di energia in funzione del tempo.

Tale trend è stato ad esempio valutato per la configurazione con sola massa inferiore, punzone 1 e h = 100 mm. (Fig. 3.12)




a)




b)

**Figura 3.12**: Andamento energia nel tempo a) e ingrandimento nella zona successiva all'impatto b)

Come si può osservare dalle immagini precedenti si possono distinguere due andamenti diversi: prima dell'impatto e dopo l'impatto.

Per quanto riguarda il primo si ha che l'energia potenziale diminuisce man mano che la quota h decresce, mentre l'energia cinetica e l'energia dissipata per attrito tendono ad essere crescenti. (la massa in caduta incrementa la sua velocità e scorrendo sulle guide

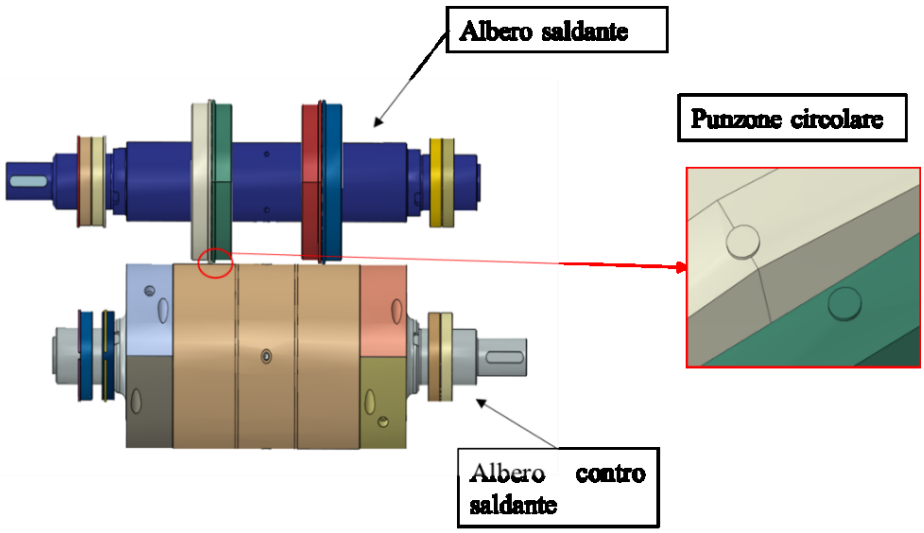
risente di un attrito crescente). Viceversa, nella zona successiva all'impatto, mentre l'energia cinetica tende a decrescere fino ad azzerarsi, le altre due voci tendono entrambe ad aumentare. L'energia potenziale aumenta perché a seguito dell'impatto si verifica il rimbalzo, quindi la quota h dopo essersi precedentemente azzerata tende a risalire.

## 3.4 Simulazione strutturale della saldatura con rotative

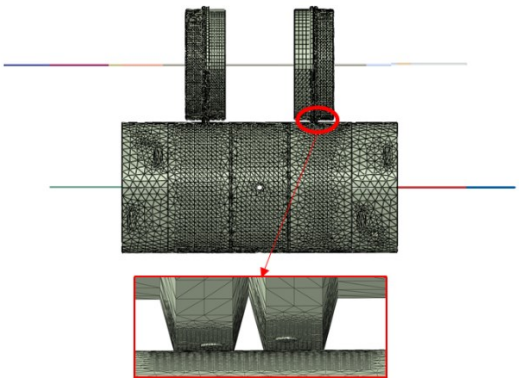
Come già anticipato, successivamente alla simulazione della saldatura lineare, un'altra tecnica di giunzione presa in esame è stata quella rotativa.

La prima geometria analizzata è stata quella con saldante a pin circolari (Fig. 3.13 a). Sebbene nella realtà il numero di pin che costituiscono il pattern sia elevato, in questo caso per poter semplificare il modello, il numero di pin presenti è stato ridotto a due.

Così come nella saldatura lineare, è stato quindi realizzato un modello FEM dell'intero sistema. (Fig. 3.13 b)




a)



b)

**Figura 3.13**: Geometria analizzata a) e modello FEM del sistema b)

Nella costruzione del modello FEM gli alberi sono stati simulati come elementi monodimensionali con sezioni equivalenti. Inoltre, per poter cogliere in maniera accurata ciò che accade durante l'impatto, la mesh della zona di contatto è stata infittita localmente. I casi di studio analizzati sono stati definiti al variare di tre parametri:

- Velocità: 300 m/min, 400 m/min e 500 m/min
- Tipologia di cuscinetti: rigidi con rigidezza radiale infinita e reali con rigidezza radiale = 300000 N/mm. L'influenza di tale parametro sul processo è stata valutata solo per il caso a velocità di 500 m/min.
- Interferenza tra asse saldante e contro saldante: 0.01 mm e 0.02 mm.

Per ognuno di essi, mediando la pressione sull'intera superficie del punzone, è stato definito sia il picco di pressione media sul primo pin in contatto, sia quello sul secondo. (Tab. 3.14)

| ID Caso | Velocita' [m/min] | Cuscinetti | Kradiale [N/mm] | Interferenza Interasse [mm] | Picco Pressione Media Secondo PIN[MPa] | Picco Pressione Media Primo PIN [MPa] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A_1_500 | 500 | Rigidi | Infinita | 0.01 | 606 | 808 |
| A_2_500 | 500 | Rigidi | Infinita | 0.02 | 1118 | 1716 |
| B_1_500 | 500 | Reali | 300000 | 0.01 | 426 | 756 |
| B_2_500 | 500 | Reali | 300000 | 0.02 | 846 | 1660 |
| B_1_400 | 400 | Reali | 300000 | 0.01 | 316 | 720 |
| B_2_400 | 400 | Reali | 300000 | 0.02 | 601 | 1576 |
| B_1_300 | 300 | Reali | 300000 | 0.01 | 162 | 656 |
| B_2_300 | 300 | Reali | 300000 | 0.02 | 310 | 1421 |

**Tabella 3.14**: Risultati simulazione a pin circolari

Dai risultati ottenuti si evince come effettivamente la pressione di contatto tenda ad aumentare sia al crescere della velocità di rotazione, sia al crescere dell'interferenza. Per quanto riguarda la rigidezza dei cuscinetti invece, la sua influenza risulta essere sufficientemente scarsa.

Per poter approfondire ulteriormente quanto ottenuto, riprendendo solo i casi a cuscinetti reali, è stato effettuato un monitoring della pressione di contatto su tre specifiche zone del pin. (Front/Cen/Rear) (Fig. 3.15)

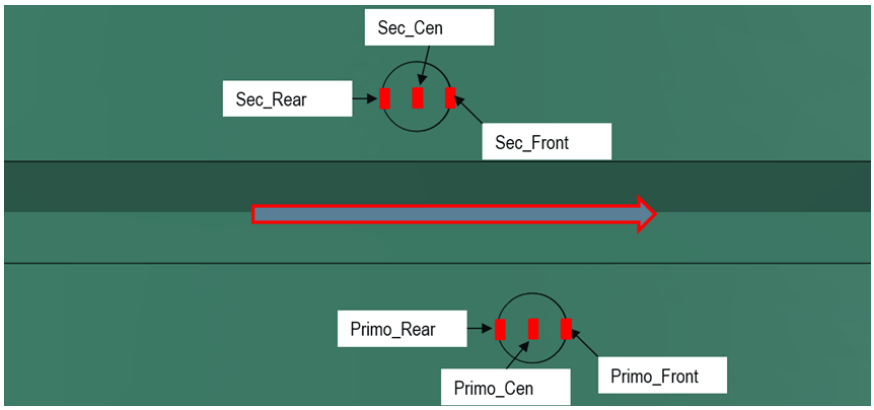
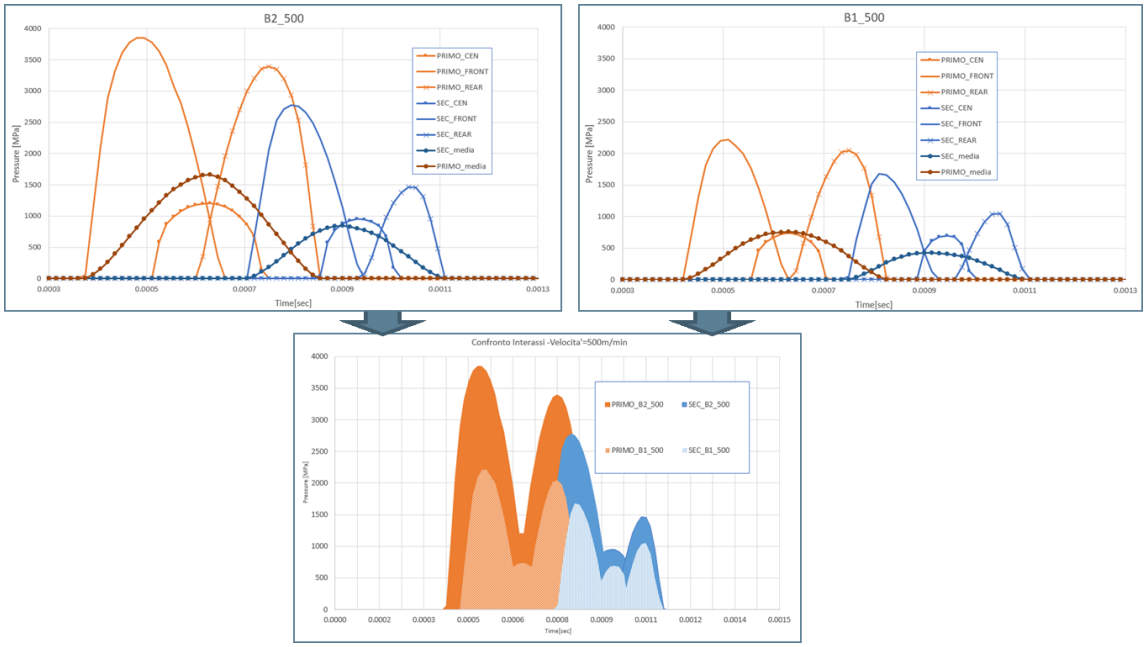
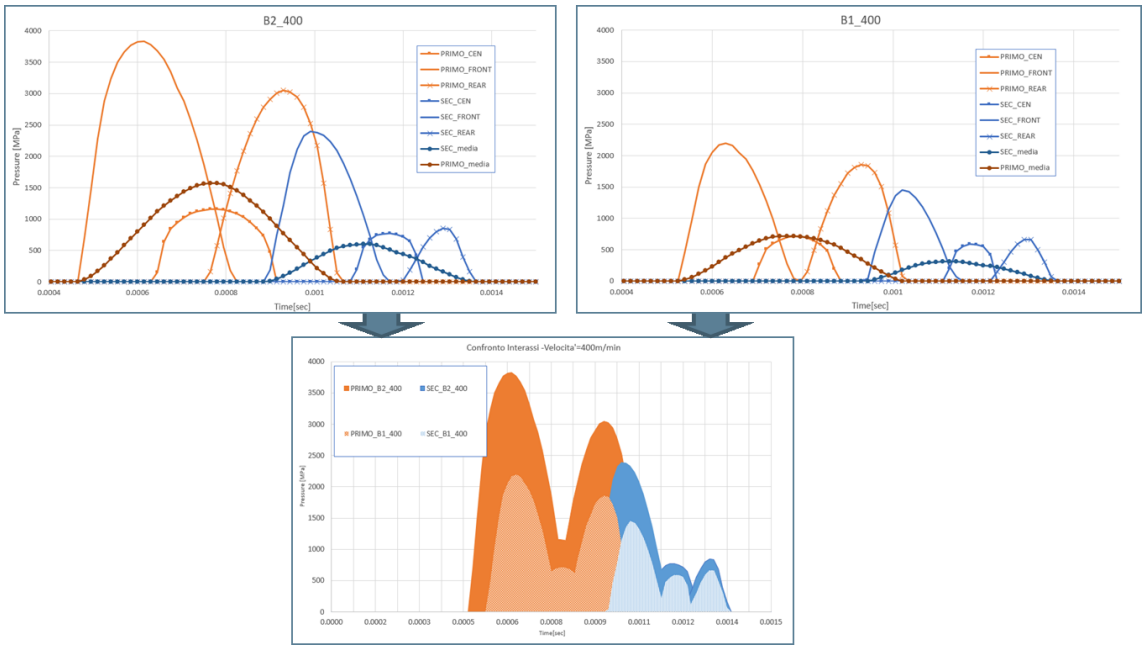



**Figura 3.15**: Zone del pin monitorate

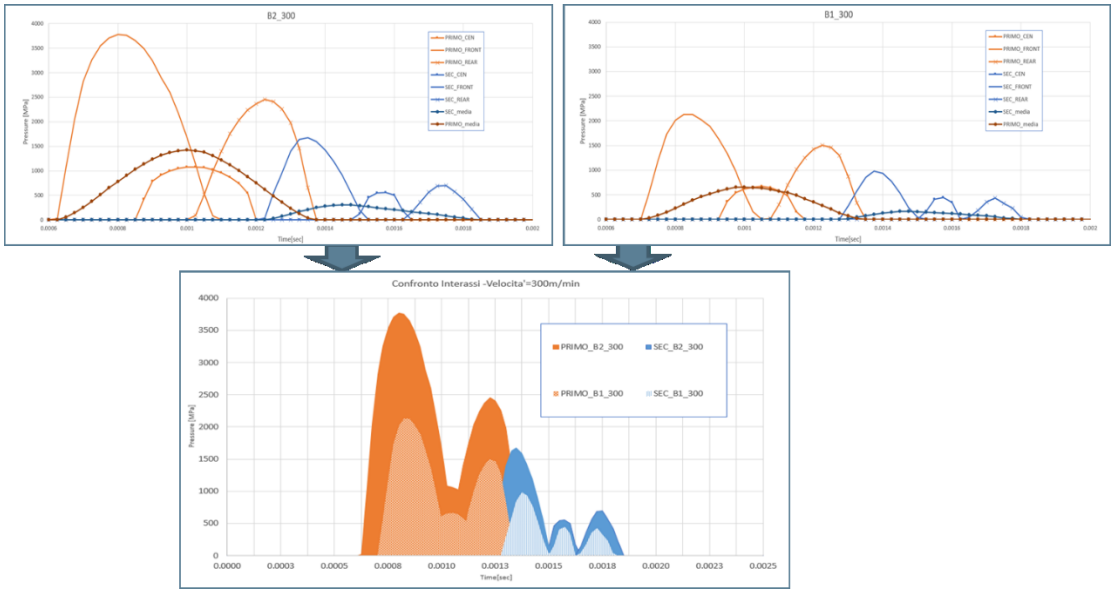
Tale analisi, svolta con lo scopo di comprendere come la pressione si distribuisca nelle diverse zone, ha permesso di ottenere i seguenti grafici, relativi sia al primo che al secondo pin: (Fig. 3.16 a, b, c)


B2_500
B1_500
PRIMO_CEN
PRIMO_FRONT
PRIMO_REAR
SEC_CEN
SEC_FRONT
SEC_REAR
SEC_media
PRIMO_media
Pressure [MPa]
Time[sec]
Confronto Interassi -Velocita'=500m/min
PRIMO_B2_500
SEC_B2_500
PRIMO_B1_500
SEC_B1_500

a)


B2_400
B1_400
PRIMO_CEN
PRIMO_FRONT
PRIMO_REAR
SEC_CEN
SEC_FRONT
SEC_REAR
SEC_media
PRIMO_media
Pressure [MPa]
Time[sec]
Confronto Interassi -Velocita'=400m/min
PRIMO_B2_400
SEC_B2_400
PRIMO_B1_400
SEC_B1_400

b)




c)

Figura **3.16**: Risultati simulazione a 500 m/min a) a 400 m/min b) e 300 m/min c)

Dall'analisi delle immagini ottenute si possono evidenziare i seguenti risultati:

- A parità di condizioni (velocità ed interferenza) le pressioni raggiunte sulle tre regioni del primo pin risultano tutte più alte rispetto a quelle del secondo. Tale effetto è dovuto principalmente al fenomeno dell'impatto, decisamente più intenso in corrispondenza del primo pin rispetto al secondo.
- A parità di velocità, il caso corrispondente ad un'interferenza di 0.02 mm (B2), determina una pressione decisamente maggiore rispetto a quello con interferenza di 0.01 mm. (B1)
- Considerando un generico pin, a parità di condizioni, la zona soggetta a pressione maggiore è quella frontale. Tale risultato trova la sua spiegazione nel fenomeno dell'impatto.
- A parità di interferenza, al variare della velocità di rotazione, il picco di pressione sulla zona frontale del primo pin tende a rimanere invariato. Tale fenomeno è dovuto all'impatto, per cui pur diminuendo la velocità di saldatura, il valore di pressione raggiunto rimane il medesimo. Lo stesso effetto non può essere riscontrato sul secondo pin in quanto, essendoci un impatto decisamente meno intenso, la pressione tende automaticamente a ridursi al decrescere della velocità.

Successivamente al caso trattato con pin circolari, per poter comprendere l'influenza della forma sulla qualità della saldatura rotativa, sono state analizzate anche ulteriori geometrie. In particolare, i quattro casi presi in esame sono stati: (Fig.3.17)

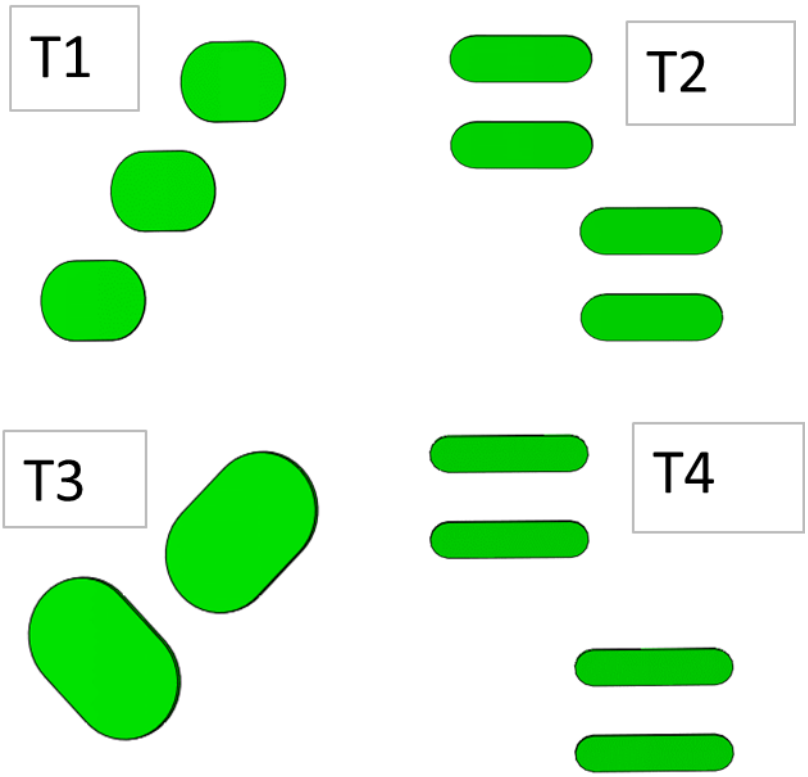



**Figura 3.17**: geometria pin analizzati

L'idea di considerare queste quattro tipologie di pin è nata fondamentalmente dal fatto che, come visto nella pratica, esse sono caratterizzate da capacità saldanti notevolmente diverse. In particolare, mentre T1 e T3 saldano male, T2 salda in maniera mediocre e T4 in modo ottimo. L'unica differenza che intercorre tra i casi T2 e T4 riguarda l'entità della larghezza, nel primo pari a 0.8 mm e nel secondo pari a 0.5 mm.

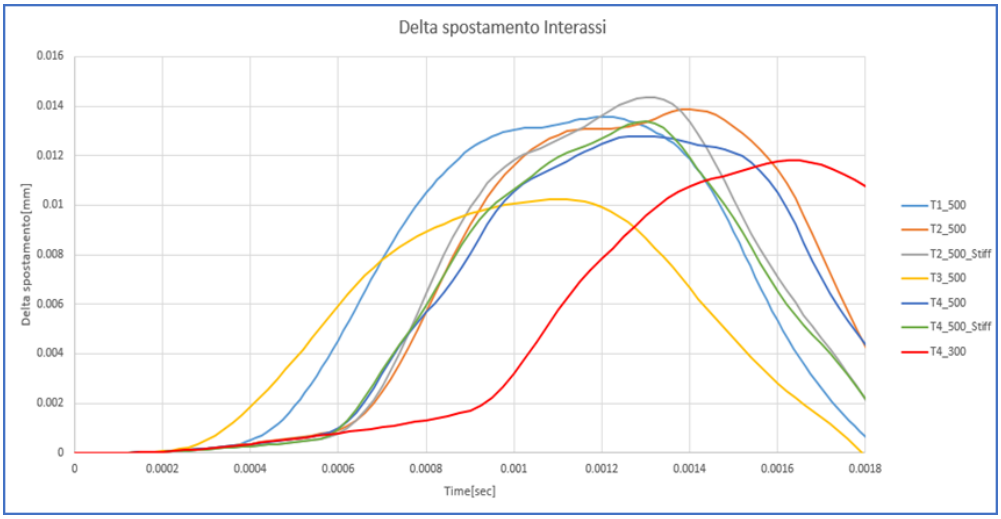
I casi studiati, con lo scopo di valutare quali sono gli aspetti su cui la geometria va ad influire maggiormente, sono stati: (Tab. 3.18)

| ID CASO | Pattern | Velocita'[m/min] | Rigidezza Alberi | Interferenza Interasse[mm] |
|---|---|---|---|---|
| T1_500 | T1 | 500 | Reale | 0.01 |
| T2_500 | T2 | 500 | Reale | 0.01 |
| T3_500 | T3 | 500 | Reale | 0.01 |
| T4_500 | T4 | 500 | Reale | 0.01 |
| T4_300 | T4 | 300 | Reale | 0.01 |
| T4_500_Stiff | T4 | 500 | Doppia | 0.01 |
| T2_500_Stiff | T2 | 500 | Doppia | 0.01 |
| LONG_T2 | T2 | 500 | Reale | 0.01 |
| LONG_T4 | T4 | 500 | Reale | 0.01 |

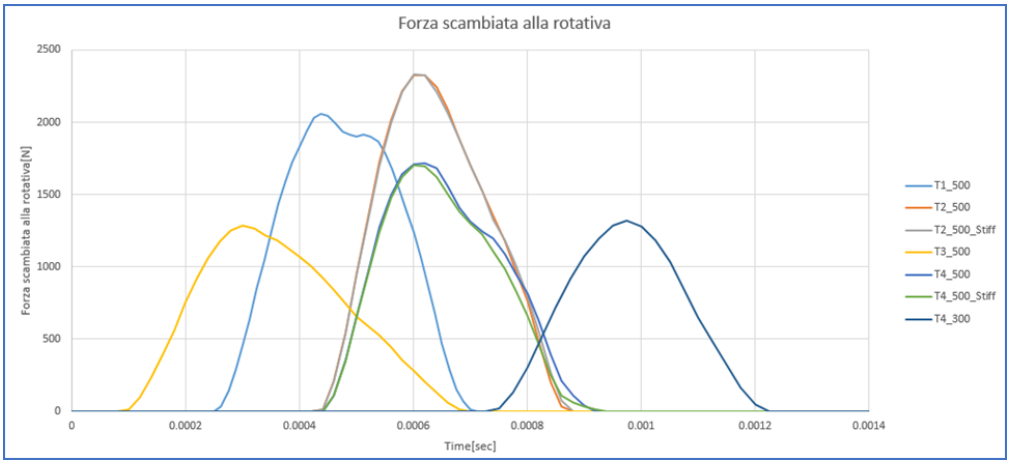
**Tabella 3.18**: casi analizzati con diverse tipologie di pin

Come si può osservare dalla tabella precedente, sono stati valutati sia casi d'impatto con rigidezza degli alberi doppia e non (per semplificare il modello il numero dei pin è stato notevolmente ridotto), sia due long run (senza riduzione del numero di pin). Questi ultimi, caratterizzati da pattern di tipo T2 e T4, sono stati presi in esame per poter valutare come il processo evolve una volta raggiunta la condizione di regime.

Partendo dalle configurazioni citate, per ognuna di esse è stato possibile determinare sia l'andamento del delta spostamento degli interassi, sia l'entità della forza scambiata in corrispondenza della rotativa. Tali andamenti sono stati ottenuti dapprima per i casi d'impatto (Fig. 3.19 a, b) e successivamente per i due long run (Fig. 3.20 a, b)

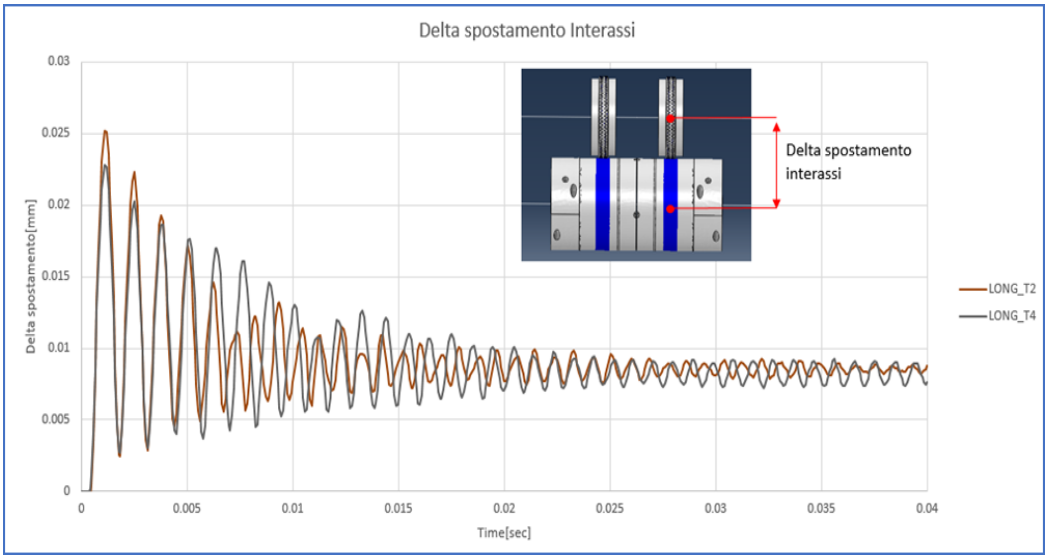



a)

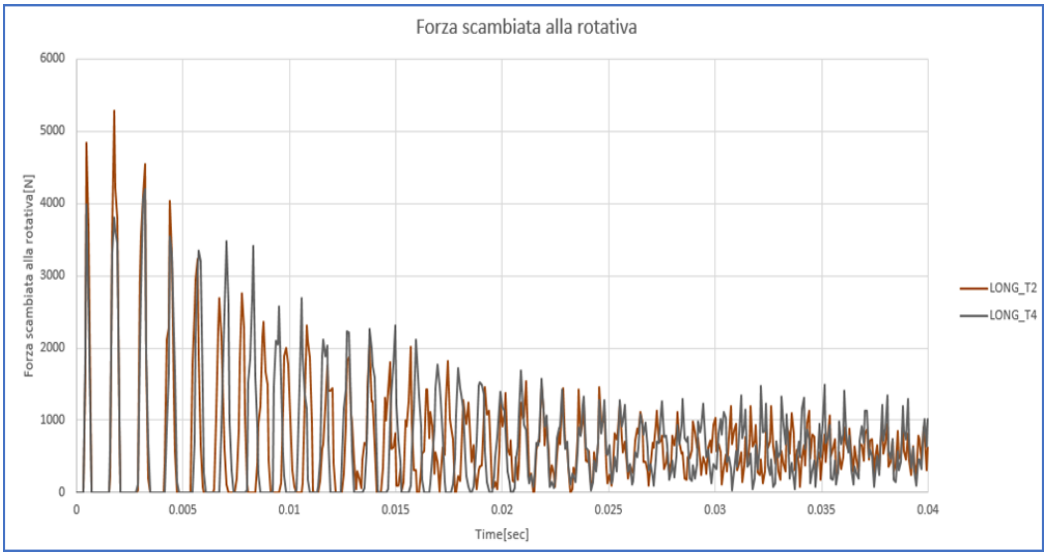



b)

**Figura 3.19**: delta spostamento interasse nei casi d'impatto a) e forza scambiata alla rotativa b)




a)




b)

**Figura 3.20** delta spostamento interasse nei long run a) e forza scambiata alla rotativa b)

Per quanto riguarda i casi d'impatto, così come illustrato nelle relative figure, si ha che:

- Escludendo il caso T3, poiché non si può fare un reale confronto con le altre geometrie, tanto più l'area di contatto è grande, tanto più elevata è la forza scambiata all'impatto. Tale effetto è dovuto principalmente al fatto che maggiore è la dimensione del pin, minore è la sua deformazione.
- Tanto più l'area di contatto è piccola tanto più basso è il delta spostamento dell'interasse. Ciò è dovuto al fatto che i pin più piccoli risultano meno rigidi rispetto a quelli più grandi.
- Confrontando i casi con alberi a rigidezza doppia e non, si evince che i due andamenti, sia in termini di forza che di spostamento, tendono ad essere sovrapponibili. Tale effetto è dovuto al fatto che la rigidezza degli alberi è di ben un ordine di grandezza superiore rispetto a quella dei supporti cedevoli, per cui tale parametro tende ad influenzare scarsamente la qualità del processo.

Dall'analisi dei long run invece, come è possibile osservare dagli andamenti riportati, possono essere estrapolati i seguenti risultati:

- A causa dell'innesto del primo pin la pressione di contatto è inizialmente discontinua e amplificata. Andando verso la condizione di regime l'oscillazione

tende rapidamente a smorzarsi e non si ha più perdita di contatto. (non si va più oltre il valore di interferenza impostato, ossia 0.01 mm)

- A partire dalla frequenza di distribuzione dei pin (calcolata dall'estensione dei pin e dalla velocità della saldante), confrontandola con l'oscillazione degli alberi, si evince come effettivamente quest'ultima sia caratterizzata da un periodo decisamente maggiore rispetto alla prima. La frequenza di vibrazione è quindi più bassa rispetto a quella della forzante e ciò è dovuto principalmente alla deformazione dei pin durante il processo.
- Il pattern T4, che implica inizialmente un salto minore rispetto al T2, andando a regime tende a saltellare di più. Tale fenomeno trova la sua giustificazione nel fatto che T4, essendo più sottile, tende a deformarsi di più, per cui implica una vibrazione decisamente più frequente.
- Il pattern T4 è inizialmente soggetto ad una forza più bassa del T2, mentre a regime questa tende a mantenersi più elevata. Ciò è dovuto al maggiore saltellamento del pin sottile rispetto a quello più spesso.
- Sebbene nella simulazione si sia impostato un valore di interferenza di 0.01 mm, a regime l'oscillazione tende a stabilizzarsi su un valore inferiore rispetto ad esso. Tale fenomeno si ha in quanto il delta spostamento interasse è sia legato al contributo della deformazione del pin sia a quello della flessione dell'albero. Dall'immagine 3.21 è possibile osservare in maniera precisa l'entità di questi due contributi.

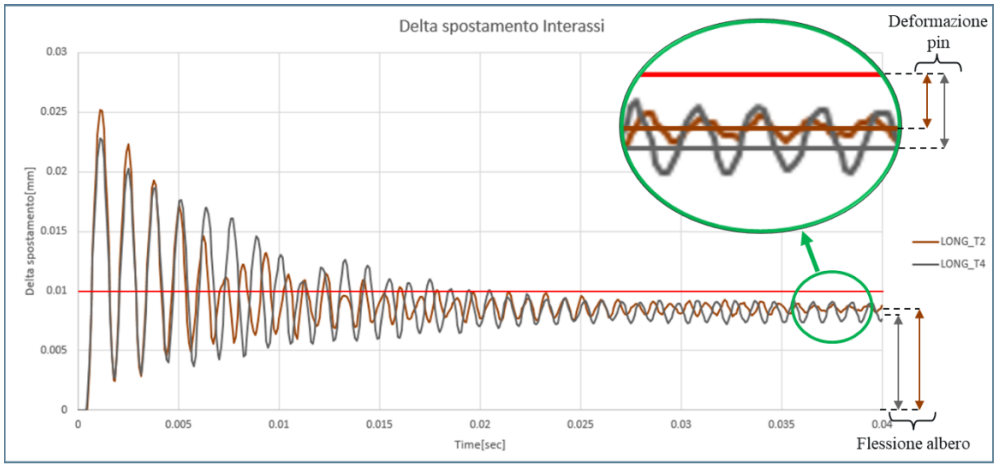



**Figura 3.21**: contributi di deformazione al delta spostamento interassi

Dato che nella pratica T4 salda meglio di T2, dai risultati elencati sembrerebbe che le due principali motivazioni sono:

- T4 presenta un picco iniziale di forza più basso rispetto al T2. Tale aspetto è positivo in quanto l'impatto iniziale, se troppo intenso, è causa molto spesso di rotture del materiale.
- T4 tende a saltare di più rispetto a T2, definendo a regime una forza di saldatura più intensa.

# Capitolo 4: Progettazione attrezzatura per prove sperimentali

Per poter analizzare meglio il meccanismo insito nella saldatura dei film polimerici è necessario, così come definito dal metodo scientifico, ricorrere all'attività di sperimentazione. A tal proposito, si è deciso, a partire dalla vecchia attrezzatura a caduta di grave, di realizzare un nuovo banco prova per la saldatura meccanica e termomeccanica, con la capacità di simulare il processo in maniera precisa e secondo diverse condizioni operative.

## 4.1 Definizione specifiche tecniche

Per poter realizzare il nuovo banco prova per l'analisi della saldatura meccanica e termomeccanica, il primo passo fatto è stato quello di andare a definire le specifiche tecniche dell'attrezzatura.

In questo caso le caratteristiche delineate sono state:

- Facilità di misura tramite termocamera e i-speed camera: per poter analizzare più dettagliatamente il processo di saldatura dei materiali polimerici è necessario avere una zona d'impatto che risulti accessibile alle misurazioni. Nello specifico, si vuole garantire la possibilità di registrare il processo sia tramite la termocamera, per ottenere la mappa di temperatura della superficie d'impatto, sia con la i-speed camera, per catturare le immagini del processo ad elevata velocità.

  Un ulteriore aspetto da garantire è l'illuminazione dello spot, in modo tale da non avere problemi di visibilità nella zona d'impatto.
- Sensoristica: il nuovo banco prova deve garantire la possibilità di inserire sull'attrezzatura stessa dei dispositivi di misura, in modo tale da valutare l'entità e la variazione dei parametri di processo durante l'intero test. Tra i sensori considerati ci sono: la cella di carico, per valutare la forza d'impatto, il micrometro, per registrare la velocità di caduta della massa e l'accelerometro, da inserire in corrispondenza del contro saldante.
- Ripetibilità dei test: i test di saldatura devono poter essere ripetibili, in modo tale da eliminare l'incertezza di misura insita nella realizzazione di ciascuna prova.

- Punzoni intercambiabili: nella nuova apparecchiatura ci deve essere la possibilità, così come nello strumento precedente, di variare il punzone di saldatura. In questo modo è possibile realizzare processi di giunzione diversi, caratterizzati da una certa geometria di saldatura e da una certa qualità di adesione tra i materiali congiunti.
- Forza variabile: così come nell'attrezzatura precedente, il nuovo banco prova deve prevedere la possibilità di variare il valore di forza che si scarica sui materiali e quindi la qualità della saldatura che si va a generare tra di essi.
- Contro saldante riscaldabile: tale specifica garantisce la capacità del nuovo strumento di prova di simulare, oltre al processo di saldatura meccanica, anche quella termomeccanica, aggiungendo quindi tra i contributi considerati anche quello della temperatura. L'applicazione di questa grandezza modifica in modo abbastanza rilevante la qualità del giunto saldato.
- Semplicità di utilizzo: la nuova attrezzatura deve essere facile da utilizzare.
- Struttura del contro saldante modulabile: la garanzia di tale modularità fa sì che, tramite lo stesso strumento, si possano fare analisi e valutazioni sensibilmente diverse le une dalle altre. La modularità inoltre rende l'apparecchiatura molto semplice, riducendone drasticamente la complessità.
- Sicurezza: la nuova apparecchiatura non deve arrecare danni.
- Basso costo: la realizzazione del sistema non deve implicare l'utilizzo di eccessive risorse economiche.
- Tempistiche: poiché il tempo disponibile per la progettazione è ridotto, è necessario che il nuovo banco prova preveda un processo di realizzazione con tempistiche ristrette.

## 4.2 Soluzioni progettuali

Una volta definite le specifiche tecniche dell'attrezzatura, per quelle maggiormente complicate è stato necessario individuare delle apposite soluzioni progettuali.

### 4.2.1 Facilità di misura tramite termocamera e i-speed camera

Per poter rendere più facile la misurazione tramite termocamera e i-speed camera si è pensato di utilizzare un contro saldante costituito da materiale trasparente, capace di resistere agli urti e alle temperature raggiunte durante il processo senza rompersi o deformarsi eccessivamente. L'utilizzo di un materiale con queste proprietà permette di osservare perfettamente ciò che accade durante l'impatto, cosa invece impossibile nel "picchio" precedente.

I materiali considerati per tale applicazione sono stati:

- Policarbonato lexan: ha la stessa trasparenza del vetro ed è molto lucido. Nell'intervallo termico da -150 ºC a +135 ºC è resistente agli urti e presenta rigidità e solidità elevate.
- Plexiglass: leggero e più resistente agli urti rispetto al vetro, ma meno rispetto al policarbonato. È caratterizzato da una luminosità ed un'economicità rispetto al policarbonato decisamente più elevate.
- Quarzo trasparente: caratterizzato da un'alta stabilità meccanica e termica, contraddistinto anche da un notevole grado di durezza.
- Vetro temperato: più robusto e resistente del normale vetro, è denominato anche "vetro di sicurezza" in quanto, a seguito di rottura, si frammenta in tanti piccoli pezzi non pericolosi per l'incolumità delle persone.

### 4.2.2 Sensoristica

Per poter osservare l'entità dei parametri di processo durante il meccanismo di giunzione si è pensato di dotare l'attrezzatura di appositi sensori.

I dispositivi di misura considerati sono stati:

- Cella di carico: un sensore utilizzato per misurare la forza all'impatto sfruttando la deformazione dell'oggetto. In questo caso è stato immaginato di installare tale dispositivo sul contro saldante il quale, per non falsare l'analisi, deve essere considerato scorrevole.
- Accelerometro: strumento di misura in grado di rilevare e/o misurare l'accelerazione, effettuando il calcolo della forza rilevata rispetto alla massa

dell'oggetto (forza per unità di massa). In questo caso si è deciso di inserire due accelerometri, uno sul contro saldante e uno su un appoggio rigido inferiore.

- Sensore laser: uno strumento ad altissima precisione che misura la posizione istantanea di un oggetto in movimento. Tramite il suo utilizzo, si è pensato di valutare la posizione della massa in caduta, derivando da quest'ultima sia la velocità sia l'entità del rimbalzo della stessa. Per quanto riguarda il collocamento di tale dispositivo, è stata presa in considerazione l'idea di metterlo in alto rispetto all'attrezzatura.

### 4.2.3 Contro saldante riscaldabile

Poiché il processo di saldatura tra non woven è fortemente influenzato dalla temperatura, si è deciso di realizzare un contro saldante riscaldabile in modo tale da osservare la saldabilità del materiale al variare di tale grandezza. Una soluzione presa in considerazione è stata l'utilizzo di due resistenze elettriche inserite all'interno del contro saldante, con l'aggiunta di un'opportuna sonda con la funzione di termostato.

## 4.3 Soluzioni alternative

Per quanto riguarda invece la configurazione della nuova attrezzatura si è deciso di considerare una serie di soluzioni differenti, valutando per ciascuna di esse sia i vantaggi e gli svantaggi, sia come queste rispettino le specifiche definite. Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto, ad ogni caratteristica è stato associato un valore numerico da 1 a 3, corrispondente rispettivamente ad un livello scarso, medio ed ottimo.

Le configurazioni prese in esame sono state:

- Configurazione verticale
- Configurazione orizzontale
- Configurazione rotativa
- Configurazione a pendolo di Charpy

### 4.3.1 Configurazione verticale

Tale configurazione è costituita da una massa che viene fatta scorrere per gravità su una guida verticale. Essa, caratterizzata da un apposito punzone, determina il processo di saldatura impattando su un piano d'appoggio.

Essendo tale configurazione la stessa del picchio, la scelta di tale opzione non implica la riprogettazione dell'intero strumento, bensì l'apporto di una serie di modifiche a partire da quello precedente.

I vantaggi di tale sistema sono:

- Altezza di caduta regolabile
- Semplicità
- Economicità

Gli aspetti negativi invece sono:

- Attrito sulla guida
- Zona d'impatto poco accessibile alle misure

Per quanto riguarda il rispetto delle specifiche tecniche individuate si ha:

- Facilità di misura tramite termocamera e i-speed camera: media accessibilità alla zona di interesse, si hanno limitazioni nel posizionamento della camera. (2)
- Sensoristica: elevata possibilità di inserire sensori di misura sull'attrezzatura. (3)
- Ripetibilità dei test: buona ripetibilità, soprattutto con la presenza di sistemi di aggancio e sgancio automatico. (2)
- Punzoni intercambiabili: possibilità di utilizzare punzoni avvitati alla massa facilmente sostituibili. (3)
- Forza variabile: elevata capacità di modificare la forza in gioco, variando sia l'entità della massa che il valore della corsa di caduta. (3)
- Contro saldante riscaldabile: possibilità di inserire resistenze sul contro saldante in modo tale da realizzare giunzioni con l'effetto della temperatura (3)
- Semplicità di utilizzo: estremamente semplice, basta sganciare la massa per poter determinare la giunzione. (3)
- Struttura del contro saldante modulabile: elevata possibilità di realizzare un contro saldante modulabile, capace di rendere realizzabili test di vario genere. (3)

- Sicurezza: elevato grado di sicurezza del sistema (3)
- Basso costo: tale sistema è molto conveniente (3)
- Tempistiche: essendo già realizzato, la modifica di tale sistema richiede delle tempistiche ristrette. (3)

### 4.3.2 Configurazione orizzontale

In tale caso, a differenza del precedente, la massa a cui è attaccato il punzone viene fatta scorrere su due guide laterali tramite un opportuno sistema di azionamento.

I vantaggi di tale sistema sono:

- Assenza di momento sulla massa dovuto alla gravità
- Buona accessibilità alla zona d'impatto

Gli aspetti negativi invece sono:

- Attrito sulle guide laterali
- Necessità di un sistema di azionamento

Per quanto riguarda il rispetto delle specifiche tecniche individuate si ha:

- Facilità di misura tramite termocamera e i-speed camera: buona accessibilità alla zona di interesse in quanto si ha la possibilità di posizionare la camera frontalmente rispetto alla regione d'impatto. (3)
- Sensoristica: elevata possibilità di inserire sensori di misura sull'attrezzatura. (3)
- Ripetibilità dei test: buona ripetibilità dei test. (2)
- Punzoni intercambiabili: possibilità di utilizzare punzoni avvitati alla massa facilmente sostituibili. (3)
- Forza variabile: elevata capacità di variare la forza in gioco modificando la potenza del sistema di azionamento. (3)
- Contro saldante riscaldabile: possibilità di inserire resistenze sul contro saldante in modo tale da realizzare giunzioni con l'effetto della temperatura (3)
- Semplicità di utilizzo: abbastanza semplice, basta azionare l'attuatore per poter determinare la giunzione. (2)

- Struttura del contro saldante modulabile: elevata possibilità di realizzare un contro saldante modulabile, capace di rendere realizzabili test di vario genere. (3)
- Sicurezza: elevato grado di sicurezza del sistema (3)
- Basso costo: tale sistema ha un costo più elevato rispetto alla configurazione precedente (2)
- Tempistiche: buone tempistiche di realizzazione. (2)

Per quanto concerne i possibili sistemi di azionamento di tale configurazione, i meccanismi considerati sono stati:

- Azionamento con meccanismo a molla: tale sistema è stato pensato come costituito da una molla adeguatamente tarata, la quale viene compressa tramite un opportuno meccanismo (ad esempio tramite un blocco d'acciaio). Nel momento in cui essa raggiunge il livello desiderato di compressione, viene bloccata e successivamente rilasciata, andando così ad esercitare una spinta sulla massa che andrà ad impattare sul contro saldante.

  I vantaggi di tale sistema sono:

- Ripetibilità
- Semplicità
- Economicità
- Flessibilità del sistema
- Possibilità di sfruttare molle con rigidezze differenti

  Facendo ulteriori valutazioni su tale tipologia di meccanismo è stato possibile ottenere, al variare della rigidezza della molla e della sua compressione, il valore della velocità della massa all'impatto. (Fig. 4.1)

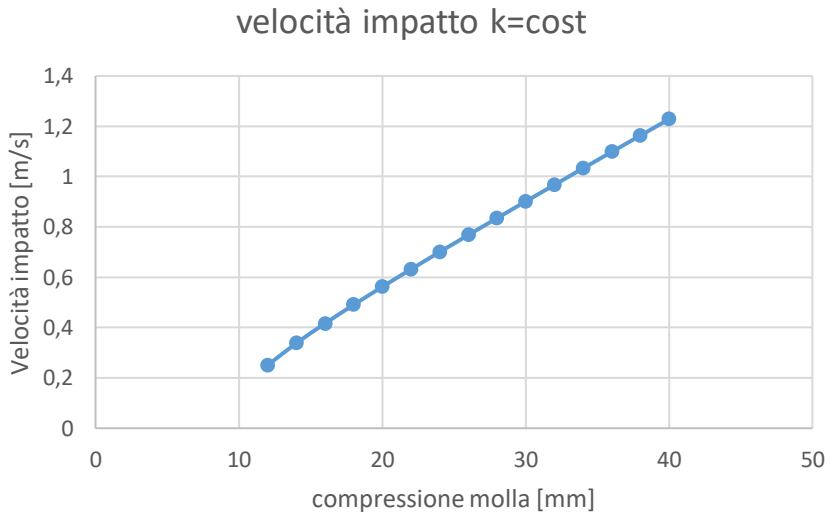
**CALCOLO MOLLA ORIZZONTALE**

| | | |
|---|---|---|
| g | 9.81 | m/s^2 |
| massa | 1090 | g |
| | 1.09 | kg |
| k molla | 8 | N/mm |
| | 8000 | N/m |
| h caduta | 220 | mm |
| | 0.22 | m |
| F attrito caduta | 0.534645 | N |
| E attrito caduta | 0.117622 | J |
| x (compr. molla) | 20 | mm |
| | 0.02 | m |
| E pot molla | 1.6 | J |
| E cin finale | 1.482378 | J |
| F molla | 160 | N |
| F peso massa | 10.6929 | N |
| coeff. Attrito din. | 0.05 | |

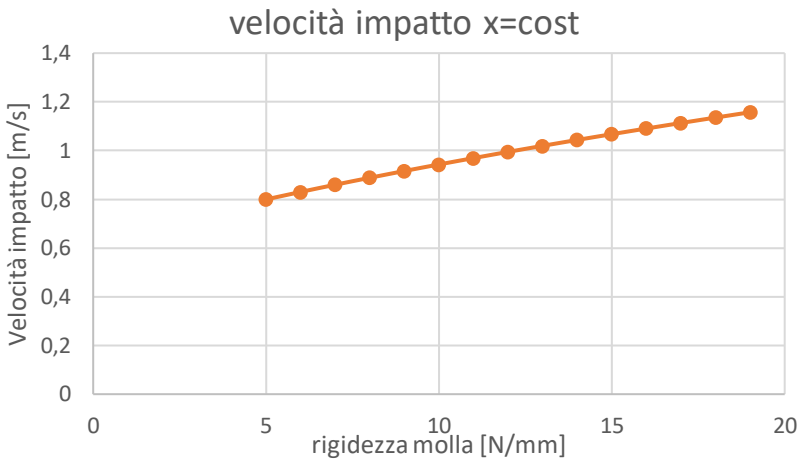
| | | |
|---|---|---|
| v impatto | **1.64923** | m/s |

**Figura 4.1**: Velocità d'impatto molla orizzontale

Sono stati inoltre calcolati gli andamenti della velocità d'impatto sia a k=cost (rigidezza della molla costante) al variare di x (compressione della molla), sia a x=cost al variare di k (Fig. 4.3)




a)




b)

**Figura 4.3**: Velocità d'impatto a k=cost a) e a x= cost b)

Dalle immagini precedenti si evince che la velocità d'impatto tende a crescere sia all'aumentare della rigidezza della molla, sia all'aumentare della sua compressione.

Azionamento pneumatico: tale sistema sfrutta l'energia dell'aria compressa per azionare un meccanismo di spinta sulla massa che va ad impattare sul contro saldante. L'azione sulla massa è dovuta al fatto che, raggiunta la pressione desiderata nella camera di compressione, si sfrutta l'espansione dell'aria che viene fatta uscire dalla camera tramite un'opportuna valvola.

I vantaggi di tale sistema sono:

- Maggiore spinta della massa
- Ripetibilità
- Flessibilità

Gli aspetti negativi invece sono:

- Complessità
- Necessità di aria compressa
- Costo maggiore rispetto all'azionamento a molla

A partire dalla forza precedentemente ricavata per il meccanismo a molla, necessaria a portare la massa alla velocità d'impatto voluta, è stato possibile ricavare il diametro dell'attuatore pneumatico da utilizzare. Considerando una pressione di 5 bar si è ottenuto che il diametro necessario a tale applicazione è all'incirca di 20 mm. (Tab. 4.4)

| CALCOLO ATTUTATORE | | |
|---|---|---|
| p | 5 | bar |
| | 500000 | Pa |
| F | 160 | N |
| A | 0.00032 | m^2 |
| | 320 | mm^2 |
| D | 20.18506 | mm |
| h | 200 | mm |

**Figura 4.4**: Calcolo diametro attuatore pneumatico

Sebbene a livello statico il diametro dell'attuatore sia quello calcolato in tabella, ciò che si vuole definire è un evento di tipo impulsivo, per cui tale dimensione deve essere maggiorata almeno di un fattore di sicurezza pari a 4. (D=80 mm)

### 4.3.3 Configurazione rotativa

Questa configurazione è costituita da un saldante motorizzato, caratterizzato da un certo pattern, e da un contro saldante folle. Tra i due ci può essere o meno una certa interferenza.

I vantaggi di tale sistema sono:

- Maggiore vicinanza al processo reale
- Contatto graduale tra le due rotative

Gli aspetti negativi invece sono:

- Complessità
- Scarsa economicità
- Conoscenza poco approfondita del fenomeno

- Necessità di azionamento con un motore elettrico

Per quanto riguarda il rispetto delle specifiche tecniche individuate si ha:

- Facilità di misura tramite termocamera e i-speed camera: scarsa accessibilità alla zona di interesse in quanto essa risulta estremamente ristretta. (1)
- Sensoristica: media possibilità di inserire sensori di misura sull'attrezzatura. (2)
- Ripetibilità dei test: ottima ripetibilità. (3)
- Punzoni intercambiabili: impossibilità di utilizzare punzoni intercambiabili, in quanto il pattern è direttamente inciso sulla rotativa saldante. (1)
- Forza variabile: elevata capacità di variare la forza in gioco modificando la velocità di rotazione del sistema. (3)
- Contro saldante riscaldabile: possibilità di inserire resistenze sul contro saldante in modo tale da realizzare giunzioni con l'effetto della temperatura (3)
- Semplicità di utilizzo: il sistema è abbastanza semplice da utilizzare, basta mettere in moto le rotative. (2)
- Struttura del contro saldante modulabile: scarsa possibilità di realizzare un contro saldante modulabile. (1)
- Sicurezza: elevato grado di sicurezza del sistema (3)
- Basso costo: tale sistema è molto complesso, per cui richiede un apporto economico rilevante (1)
- Tempistiche: necessita di tempistiche di realizzazione molto lunghe. (1)

### 4.3.4 Configurazione a pendolo di Charpy

Tale sistema è costituito da un'asta saldante che, con una massa caratterizzata da un punzone, genera l'impatto sul contro saldante. Quest'ultimo, caratterizzato dall'essere un cilindro, richiede con molta probabilità una motorizzazione (per andare alla stessa velocità dell'asta saldante).

I vantaggi di tale sistema sono:

- Maggiore vicinanza al processo reale
- Contatto graduale tra saldante e contro saldante

Gli aspetti negativi invece sono:

- Scarsa economicità
- Saldante e contro saldante impattano su facce non parallele
- Necessità di motorizzazione del contro saldante

Per quanto riguarda il rispetto delle specifiche tecniche individuate si ha:

- Facilità di misura tramite termocamera e i-speed camera: media accessibilità alla zona di interesse. (2)
- Sensoristica: media possibilità di inserire sensori di misura sull'attrezzatura. (2)
- Ripetibilità dei test: buona ripetibilità dei test. (2)
- Punzoni intercambiabili: possibilità di utilizzare punzoni avvitati alla massa facilmente sostituibili. (3)
- Forza variabile: buona capacità di variare la forza in gioco modificando l'altezza di caduta dell'asta. (2)
- Contro saldante riscaldabile: possibilità di inserire resistenze sul contro saldante in modo tale da realizzare giunzioni con l'effetto della temperatura (3)
- Semplicità di utilizzo: il sistema è abbastanza semplice da utilizzare. (2)
- Struttura del contro saldante modulabile: scarsa possibilità di realizzare un contro saldante modulabile. (1)
- Sicurezza: elevato grado di sicurezza del sistema (3)
- Basso costo: tale sistema richiede un costo di realizzazione elevato (1)
- Tempistiche: la configurazione in esame, essendo complessa, richiede tempi abbastanza lunghi. (1)

## 4.4 Confronto tra le configurazioni

Riportando per ciascuna opzione i valori relativi al rispetto delle specifiche tecniche definite, si può affermare che tra le possibilità considerate quella che risulta in generale più vantaggiosa da scegliere è quella verticale. (Tab. 4.5)

| Specifiche | Configurazione verticale | Configurazione orizzontale | Configurazione rotativa | Pendolo di Charpy |
|---|---|---|---|---|
| Facilità di misura con termocamera e i-speed camera | 2 | 3 | 1 | 2 |
| Sensoristica | 3 | 3 | 2 | 2 |
| Ripetibilità dei test | 2 | 2 | 3 | 2 |
| Punzoni intercambiabili | 3 | 3 | 1 | 3 |
| Forza variabile | 3 | 3 | 3 | 2 |
| Contro saldante riscaldabile | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Semplicità di utilizzo | 3 | 2 | 2 | 2 |
| Struttura del contro saldante modulabile | 3 | 3 | 1 | 1 |
| Sicurezza | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Basso costo | 3 | 2 | 1 | 1 |
| Tempistiche | 3 | 2 | 1 | 1 |
| **TOTALE** | **31** | 29 | 21 | 22 |

**Tabella 4.5**: Punteggio delle configurazioni considerate

Come si evince dalla tabella, gli aspetti che hanno principalmente differenziato tale soluzione sono stati: basso costo e tempistiche molto ridotte. Ciò è giustificato dal fatto che tale opzione, a differenza delle altre, è l'unica nella quale non si richiede un totale processo di progettazione, bensì l'apporto di semplici modifiche.

### 4.4.1 Banco prova

In alternativa alla configurazione scelta, ossia quella verticale, un'altra possibilità considerata è stata quella di utilizzare un banco prova già presente in laboratorio. Esso, mai testato fino ad ora, risale all'incirca a sei anni fa ed è stato realizzato per un progetto europeo legato all'analisi del processo di saldatura tra film polimerici. (Fig.4.5)

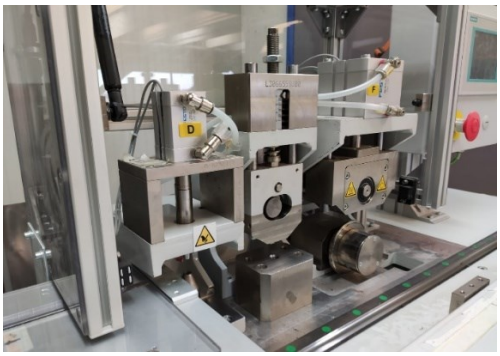


**Figura 4.5**: banco prova

Tale strumento è controllato da un PLC e presenta una tavola movimentata su cui fissare il materiale da testare.
Esso è costituito principalmente da tre unità:

- Fustella
- Saldante lineare
- Rotativa

Per quanto riguarda la fustella (Fig.4.6), essa ha lo scopo di forare i film di materiale polimerico tramite l'azione di spinta, su uno stelo tagliente, di una camera d'aria in compressione.

**Figura 4.6**: Fustella

Il materiale tagliato via dal non woven, affinché non si disperda, viene raccolto all'interno di una scatola, posta inferiormente al piano d'appoggio dell'unità.

Per quanto riguarda la saldante lineare (Fig. 4.7) invece, essa ha esattamente lo stesso scopo del "picchio", sebbene con un principio di funzionamento notevolmente diverso.

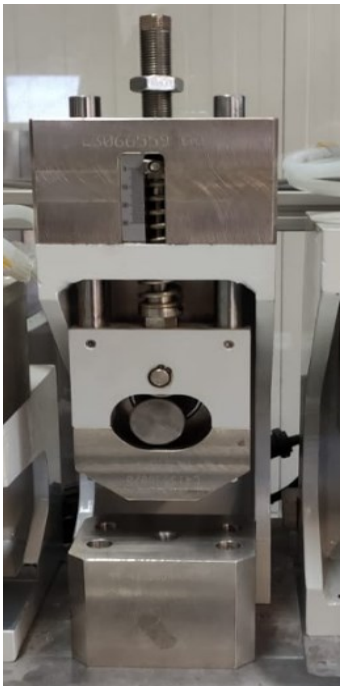


**Figura 4.7**: Fustella

A differenza dello strumento precedente infatti, essa non genera l'impatto sfruttando la gravità, bensì utilizzando un meccanismo a camma alimentato da un motore elettrico.

Tale sistema è costituito da una camma circolare (movente) (Fig. 4.8 A) che, posta in rotazione da un motore elettrico (Fig. 4.8 B) (con un opportuno riduttore), trasmette, mediante un cuscinetto (Fig. 4.8 C), il moto al corpo su cui è posizionato il punzone (ovvero il cedente).

Il contatto durante il moto tra movente e cedente è garantito dalla presenza, nella zona superiore, di una molla (Fig. 4.8 D), la quale può essere utilizzata sia con, che senza precarico, fino ad un massimo di circa 30 mm di precompressione (il precarico della molla è regolato da una vite che viene poi fissata al valore desiderato con un opportuno dado).

La massa traslante (Fig. 4.8 E), montata su due guide laterali, presenta nella zona inferiore un foro filettato a cui viene collegato il punzone (realizzato in K110). Il valore d'interferenza impostato tra saldante e contro saldante è pari a 0.01 mm.

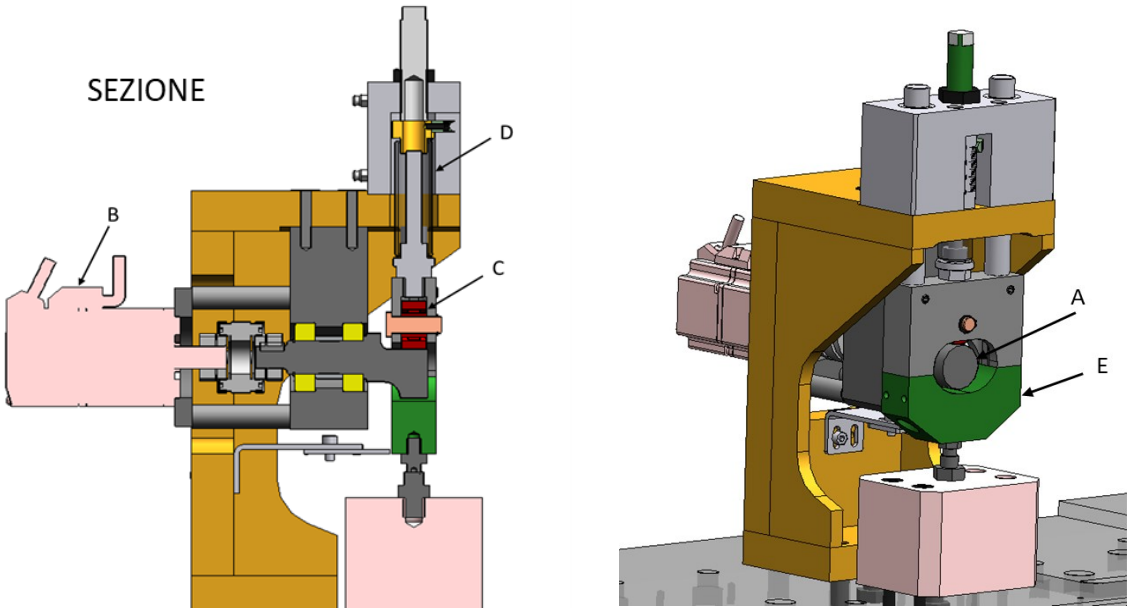



**Figura 4.8**: Saldante rotativa

Ad ogni giro della camma corrisponde un colpo del punzone sul contro saldante, definendo così un processo di saldatura meccanica sul materiale da testare.
Il motore elettrico scelto per tale applicazione ha la capacità di variare la sua velocità di rotazione da 0 a 3800 giri/min (il valore di tale parametro può essere fissato direttamente a pannello dall'operatore).

Infine, per quanto concerne la rotativa (Fig. 4.7), anch'essa, come la saldane lineare, simula il meccanismo di giunzione tra film polimerici. A differenza della seconda unità però, stavolta il processo è ben più vicino alla realtà, in quanto si hanno due rulli, uno saldante e uno contro saldante, che, tramite motorizzazione, entrano in contatto in maniera graduale, determinando così la saldatura.

**Figura 4.8**: saldante rotativa

In questo sistema si ha la possibilità di modificare il valore della temperatura del contro saldante tramite l'utilizzo di opportune resistenze inserite all'interno dello stesso. In questo caso quindi, si parla di simulazione di una saldatura non più meccanica, bensì termomeccanica.

L'azionamento di tale attrezzatura implica uno spostamento della tavola su cui è posizionato il materiale in maniera automatica, tale per cui la velocità di rotazione del saldante e quella lineare della tavola risultino essere corrispondenti (questo è l'unico caso in cui il moto della tavola è automatico e la massima velocità raggiungibile è pari a 6 m/min). Il pattern di saldatura in questo sistema si trova in corrispondenza della rotativa saldante ed è molto simile a quello presente sul punzone della saldante lineare. La somiglianza tra i pin della seconda e terza unità è un aspetto di notevole interesse in quanto, a parità di condizioni, è possibile effettuare un confronto diretto tra la saldatura realizzata in modo lineare e quella ottenuta tramite moto rotatorio.

### 4.3.2 Modifiche

Una volta scelte le attrezzature da utilizzare (configurazione verticale e banco prova), per entrambe sono state definite una serie di modifiche. Esse hanno avuto lo scopo di migliorare l'analisi del processo di saldatura tra non woven, favorendo il maggior numero di misurazioni possibili e l'osservazione diretta del fenomeno tramite i-speed camera.

Per quanto riguarda i cambiamenti relativi al banco prova, l'unità presa in considerazione per la riprogettazione è stata soltanto la saldante lineare. L'esclusione delle restanti due unità è stata dovuta al fatto che entrambe presentano dei limiti. Mentre la fustella ha delle restrizioni relative alla forza di spinta legata alla pressione nella camera d'aria, la rotativa ha invece delle limitazioni correlate alla velocità raggiungibile (in questo secondo caso infatti il saldante non è libero di ruotare come vuole, bensì la sua velocità è collegata a quella raggiungibile dalla tavola movimentata).

Nel rispetto delle specifiche tecniche precedentemente elencate, i cambiamenti definiti risiedono principalmente in quattro interventi.

Esclusivamente per il banco prova:

- Variazione della molla che mantiene in contatto movente e cedente durante la rotazione della camma.

Per entrambe le attrezzature:

- Progettazione di un contro saldante con cella di carico.
- Progettazione di un contro saldante modulabile.
- Progettazione di punzoni intercambiabili

#### 4.3.2.1 Variazione della molla

Dall'osservazione della saldante lineare si è notato che la molla inserita all'interno dell'unità presentava una rigidezza estremamente bassa (circa 1 N/mm), tale per cui si è pensato che non fosse sufficiente a garantire il contatto permanente tra movente e cedente durante la rotazione del motore (Fig. 4.9).

**Figura 4.9**: molla con rigidezza 1 N/mm

A partire da ciò, per verificare tale ipotesi, si è deciso di realizzare il cinematismo in esame tramite il programma working model, un software di simulazione ingegneristica che consente di valutare l'interazione tra le parti di un modello, graficando per ogni componente sia i movimenti, sia l'entità delle forze scambiate durante il moto. (Fig. 4.10)

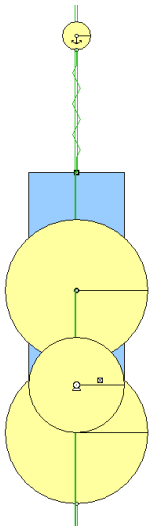


**Figura 4.9**: Modello saldante rotativa working model

Inserendo nel modello la molla con bassa rigidezza, si è effettivamente visto che questa non era sufficiente a mantenere il contatto tra movente e cedente, determinando un

distacco tra i due quasi immediato. Alla luce di ciò, incrementando iterativamente la rigidezza della molla, è stato possibile definire il minimo valore di k oltre il quale non si verificava più il distacco. A partire da quest'ultimo è stata quindi eseguita la scelta della nuova molla che, definita all'interno del catalogo D.I.M., è rappresentata dal codice D23350 (Figura 4.10 a, b).

a)

| | | |
|---|---|---|
| **Features** | Wire diameter (d) mm: **3,2** | Length loaded (L1) mm: **37,1** |
| | Mean diameter (Dm) mm: **20** | Number turns (n): **8,5** |
| | Axle diameter inside spring (Da) mm: **16,1** | Load at L1 (P1 Newton): **480,33** |
| | Hole diameter outside spring (Df) mm: **23,9** | Rate c N/mm (P/f): **13,07** |
| | Length free (Lo) mm: **74** | |

b)

**Figura 4.10**: Molla con rigidezza 13.07 N/mm a) e features della molla scelta b)

Come si può notare, la differenza in termini di rigidezza tra la nuova molla e la precedente è all'incirca di un ordine di grandezza, mentre la lunghezza libera delle due risulta essere la medesima.

### 4.3.2.2 Progettazione contro saldante con cella di carico

Per quanto riguarda sia la configurazione verticale che la saldante lineare, il primo intervento effettuato ha riguardato l'installazione di un contro saldante con sede per la cella di carico (Fig. 4.11).

**Figura 4.11**: Contro saldante con cella di carico

Esso permette di misurare l'entità della forza che si scarica in corrispondenza dell'impatto, così da determinare il valore della stessa per cui si genera la saldatura.

Il sistema in esame è costituito da una massa, di circa 300 g (Fig. 4.12 A), la quale da un lato poggia al centro della parte sensibile della cella di carico (Fig. 4.12 B), mentre dall'altro è soggetta all'impatto con il punzone (questa parte è realizzata in K110 per poter resistere all'impatto). Durante la simulazione del processo tale massa, che scorre verticalmente su un ball bushing (Fig. 4.12 C) (per non falsare la misura), va a schiacciare la parte centrale della cella di carico la quale, deformandosi, misura l'entità della forza scaricata.

Altri componenti presenti, caratterizzati dall'essere semplicemente degli elementi di centraggio, sono: un anello nella zona inferiore (Fig. 4.12 D) e una struttura esterna in acciaio. (Fig. 4.12 E)

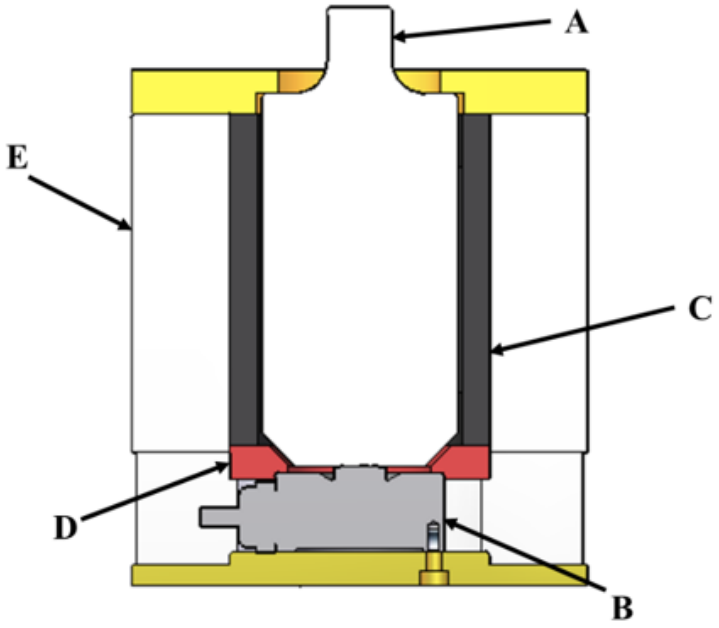



**Figura 4.12**: Sezione contro saldante con cella di carico

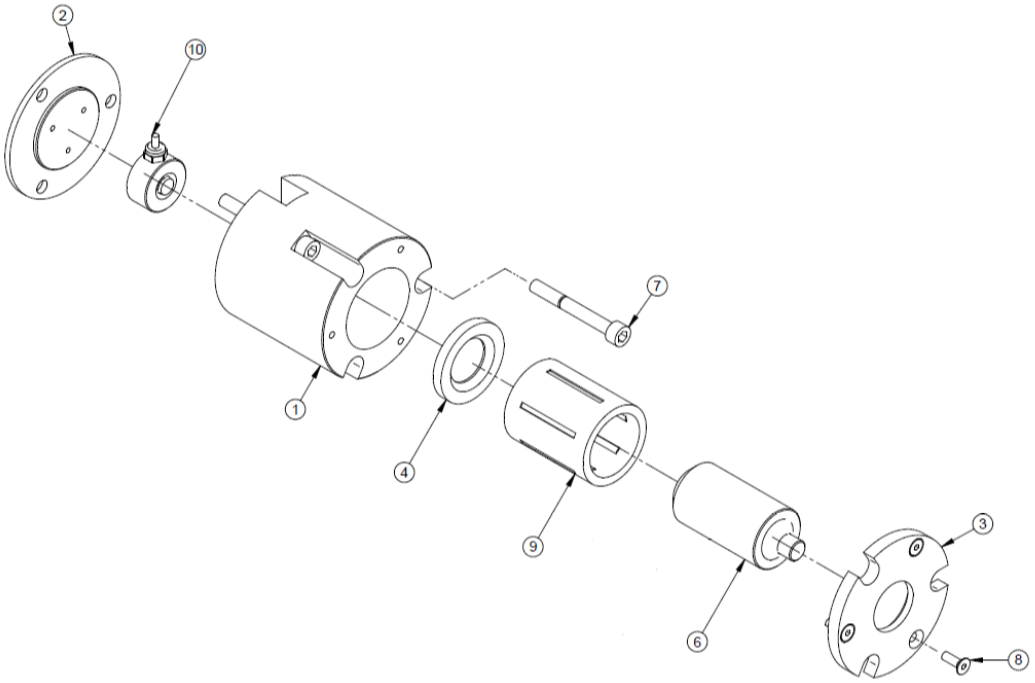



**Figura 4.13**: Esploso contro saldante con cella di carico

La cella di carico utilizzata per tale applicazione è la C9C da 20 kN. (Fig. 4.14 a, b)

**Figura 4.14**: Cella di carico C9C da 20 kN

La scelta di tale trasduttore di forza HBM è stata effettuata attraverso due differenti studi:

- Analisi dell'accelerazione del cedente della saldante lineare del banco prova. A partire da quest'ultima, nota l'entità della massa traslante, è stato possibile risalire alla forza scambiata nella zona d'impatto.
- Calcolo analitico della forza impulsiva nell'attrezzatura a configurazione verticale (picchio).

Per quanto riguarda il primo studio, gli approcci utilizzati sono stati principalmente due: analitico, tramite formule da letteratura, e numerico, con il cinematismo definito in working model.

Per quanto riguarda il primo, essendo il sistema un meccanismo a camma circolare eccentrica con punteria a rotella, lo spostamento di un punto del cedente è stato ottenuto dalla relazione:

$$y(\varphi)=e*(1-\cos(\varphi)+d*(1-\sqrt{1-j^2*\mathrm{sen}^2(\varphi)} \quad [5]$$

Dove:

φ è l'angolo di rotazione;

e è la lunghezza della manovella;

d è la lunghezza della biella;

j=e/d è l'eccentricità relativa.

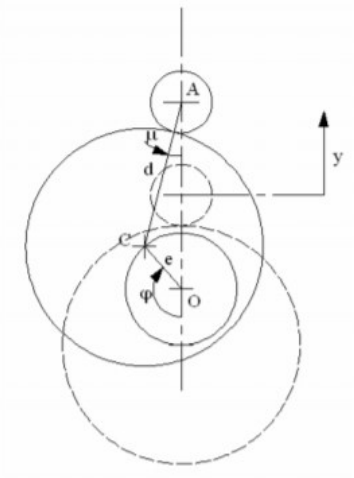



**Figura 4.15**: rappresentazione del meccanismo a camma circolare eccentrica con punteria a rotella

A partire dal calcolo dello spostamento descritto, è stato possibile risalire sia all'entità della velocità, sia all'accelerazione al variare dell'angolo di rotazione. Considerando la configurazione in cui la camma è in basso (ossia φ =0) e moltiplicando l'accelerazione del punto scelto per la massa traslante, è stata calcolata la forza relativa all'impatto.

Ipotizzando ad esempio il caso di una velocità di rotazione pari a 500 giri/min e una precompressione della molla (con k=13 N/mm) pari a 30 mm, l'entità dell'accelerazione equivale all'incirca a 36 m/s^2. (Fig. 4.16)

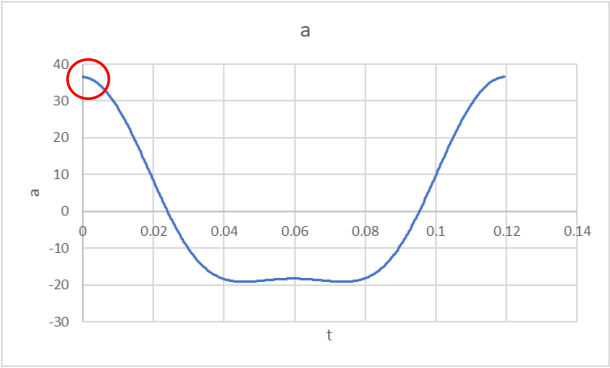



**Figura 4.16**: Accelerazione cedente in funzione del tempo

Moltiplicando tale accelerazione per l'entità della massa traslante (pari a m=1.009 kg), si ottiene un valore di forza scambiato all'impatto pari a 166 N. (Fig. 4.17)

| | | |
|---|---|---|
| m_ecc | 0.315 | kg |
| m_sup | 1.009 | kg |
| ω | 500 | giri/min |
| | 52.35988 | rad/s |
| d1 | 30 | mm |
| e | 10 | mm |
| d2 | 30 | mm |
| r | 25 | mm |
| v | 0.137078 | m/s |
| t giro | 0.002 | min |
| | 0.12 | s |
| delta_theta | 0.017453 | rad |
| delta_t | 0.000333 | s |
| k molla | 13 | N/mm |
| d | 30 | mm |
| j | 0.333333 | |
| precarico molla | 10 | mm |
| F molla | 130 | N |
| F | 36.87215 | N |
| F tot | 166.8722 | N |

**Figura 4.17**: Forza scambiata all'impatto

Per quanto riguarda l'approccio in working model invece, si è partiti dallo stesso cinematismo della saldante lineare precedentemente realizzato.

Una volta identificato un generico punto sul cedente, grazie all'ausilio del software, per esso è stato definito l'andamento dell'accelerazione in y in funzione del tempo (Fig. 4.18).

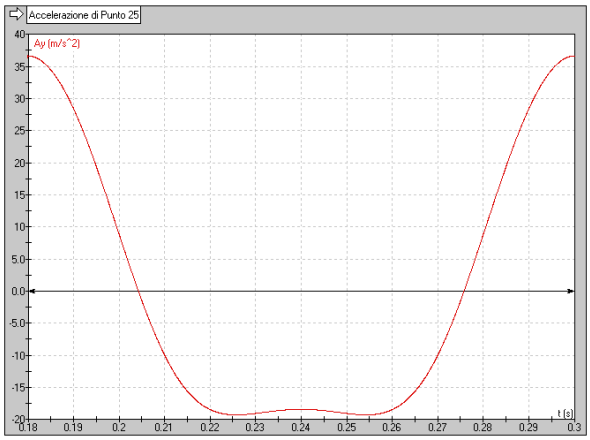



**Figura 4.18**: accelerazione cedente a velocità di rotazione 500 rpm e k=13 N/mm

Considerando l'accelerazione del punto del cedente nella configurazione con la camma in basso e moltiplicandola per l'entità della massa traslante, è stato possibile determinare, così come in precedenza, il valore di forza scambiato all'impatto.
Confrontando i risultati dei due approcci descritti, si può notare come i valori di accelerazione e quindi di forza scambiata siano esattamente gli stessi.
Poiché nessuno dei due metodi però tiene conto dell'impulsività del fenomeno in esame, i risultati di tale studio sono stati maggiorati tramite un coefficiente di sicurezza molto elevato (x =10). Alla luce di ciò, sebbene la massima forza calcolata sia stata pari a 1500 N, il trasduttore di forza necessario secondo tale analisi doveva essere caratterizzato da un carico di rottura almeno pari a 20 kN.

Per quanto riguarda il secondo studio invece, l'entità del carico impulsivo scaricato sul contro saldante è stato calcolato tramite la relazione seguente, direttamente fornita da HBM:

$$F_{Impuls}=\sqrt{2 * c * m * g * h}$$

Dove:
c è la rigidezza della cella di carico;
m è la massa in caduta;
g è l'accelerazione di gravità;
h è l'altezza di caduta.
Poiché tale formula dipende dalla rigidezza della cella di carico, ciò presuppone che il valore di forza risultante è strettamente correlato al trasduttore di forza scelto. A partire dal tipo di cella di carico ottenuto dallo studio precedente (C9C da 20 kN), è stato possibile affermare che il massimo valore di forza raggiunto con l'attrezzatura a configurazione verticale (ad h=150 mm e m=m1+m2) equivale all'incirca a 15 kN. Tale risultato ha quindi confermato che la cella di carico a 20kN risulta essere adeguata sia per l'analisi sul banco prova, sia per quella sul picchio.

### 4.3.2.3 Progettazione contro saldante modulabile

Un ulteriore intervento fatto sia sulla saldante lineare che sul picchio è stato definito dalla realizzazione di un contro saldante modulabile.

Esso permette di eseguire principalmente due tipologie di test:

- Osservazione dal basso del comportamento del materiale all'impatto tramite i-speed camera.
- Valutazione dell'influenza della temperatura sulla qualità della saldatura tra film polimerici.

Le due rispettive soluzioni progettate sono:

- Contro saldante trasparente: unità rigida in acciaio al di sopra del quale è posizionato un tondo in materiale trasparente, tenuto in presa da due morsetti laterali. (Fig. 4.18)

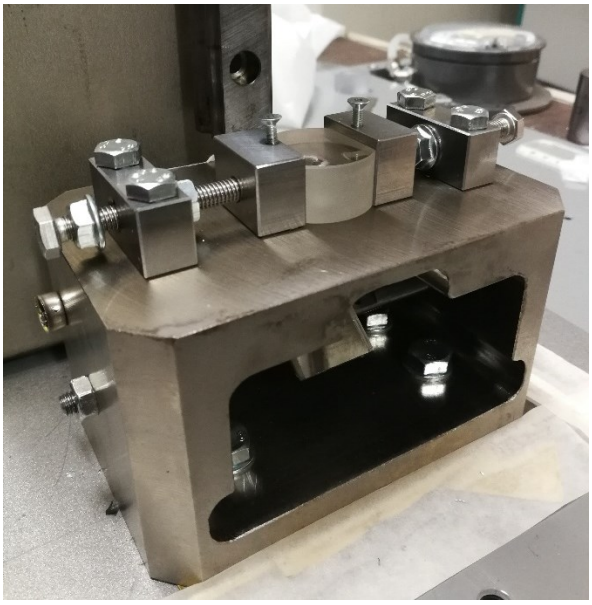


**Figura 4.18**: Contro saldante trasparente

Tale tondo, che deve essere sufficientemente duro, non deformabile e trasparente, è stato realizzato in quarzo, in modo tale da garantire una chiara osservazione tramite telecamera di ciò che accade durante l'impatto. Per poter inquadrare la regione di interesse, non avendo lo spazio sufficiente nella zona inferiore, si è pensato di utilizzare un sistema di specchi.

Dal calcolo dell'angolo di rifrazione è stato quindi individuato l'orientamento a cui porre lo specchio in modo tale da visualizzare in maniera corretta la zona d'impatto.

Lo specchio (Fig. 4.19 A), incollato su un alberino con un piatto, può essere ruotato tramite una manopola e fissato in una determinata posizione stringendo un opportuno dado. Poiché è importante che la visualizzazione della zona d'impatto sia chiara e precisa, è stata introdotta una luce led (Fig. 4.19 B) nella zona posteriore del contro saldante, attraverso la quale è possibile illuminare il foro al di sotto del tondo di materiale trasparente.

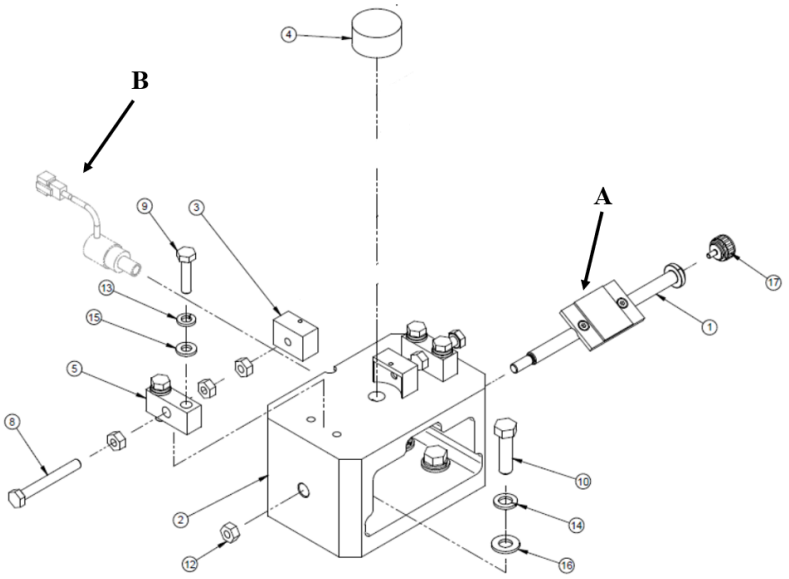



**Figura 4.19**: Esploso contro saldante trasparente

- Contro saldante riscaldabile: unità realizzata sempre in acciaio, al di sopra del quale stavolta è avvitato un piatto in K110 (Fig. 4.20). Quest'ultimo presenta due fori, all'interno dei quali vengono messe due resistenze così da portare la sua temperatura al valore desiderato. La scelta del materiale è stata dettata dal fatto che il contro saldante deve essere sufficientemente rigido, in modo tale da resistere in modo efficace all'impatto del punzone.

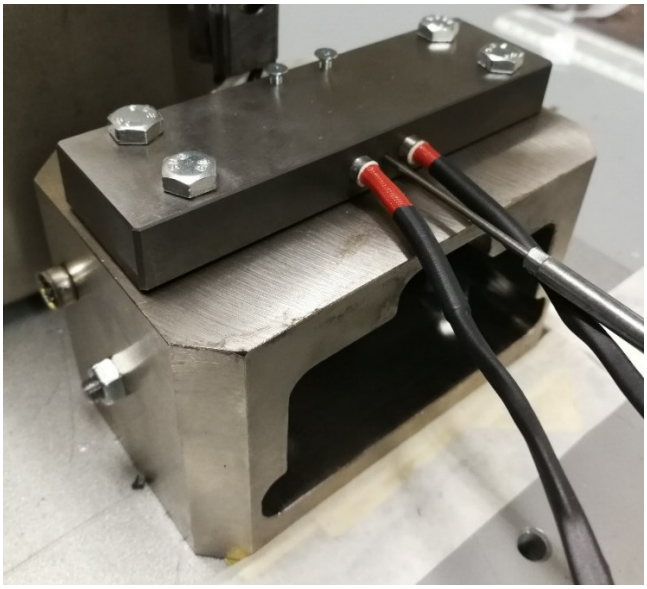


**Figura 4.20**: Contro saldante riscaldabile

Come si può notare dall'immagine precedente, sul contro saldante è presente anche una sede per la sonda, elemento fondamentale in quanto ha il ruolo di termostato.

Al fine di valutare la deformazione della struttura realizzata, è stata effettuata come verifica anche una simulazione FEM.

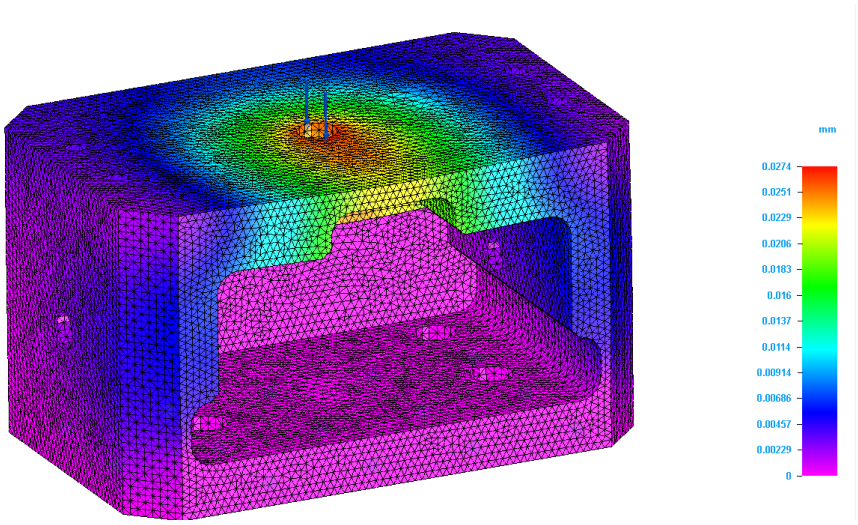



**Figura 4.21**: simulazione struttura contro saldante con carico di 14 kN

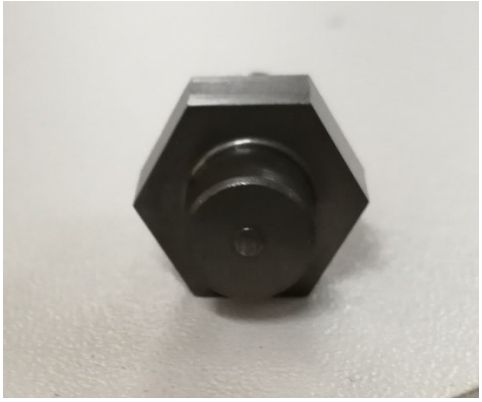
Come si evince dall'immagine precedente, anche con carichi molto elevati (14 kN), la deformazione rimane contenuta (0.02 mm). Ciò implica che la struttura è adatta all'applicazione in esame.

### 4.3.2.4: Progettazione di punzoni intercambiabili

Per poter successivamente valutare l'influenza della geometria sulla qualità della saldatura, l'ultimo intervento realizzato è stata la progettazione di tre punzoni, ognuno dei quali caratterizzato da pattern di forma e dimensioni differenti.

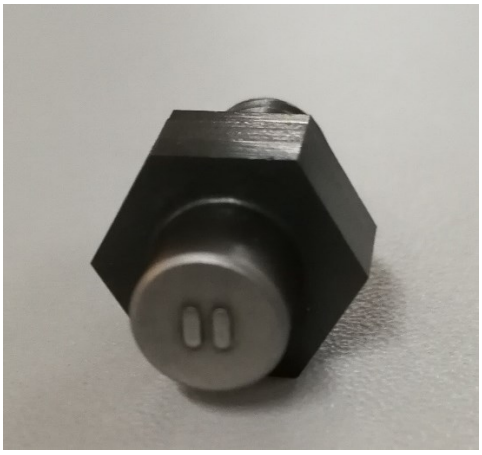
Realizzati in K110 per poter reggere all'impatto, i saldanti considerati sono stati:

- pin circolare (Fig. 4.22 a)
- pin con spessore di 0.5 mm (Fig. 4.21 b)
- pin con spessore di 0.8 mm (Fig. 4.21 c)



a)

b)



c)

**Figura 4.22**: Punzone a pin circolare a), a pin con spessore 0.5 b) e a pin con spessore 0.8 c)

Come è possibile notare, i pattern a 0.5 e a 0.8 sono i medesimi precedentemente considerati nelle simulazioni rotative.

# Capitolo 5: Test sperimentali

Una volta apportate le modifiche descritte sulle attrezzature, l'ultima attività svolta è stata la realizzazione di test sperimentali.

Tali prove, effettuate per comprendere in maniera dettagliata ciò che accade durante la saldatura tra film polimerici, sono state svolte dapprima sulla saldante lineare del banco prova e successivamente sul picchio.

## 5.1 Prove sperimentali su saldante lineare

I primi test realizzati sul banco prova sono stati quelli di saldatura. A partire da questi c'è stata sia la conferma degli aspetti negativi dell'attrezzatura, già definiti, sia la messa in evidenza di nuove criticità.

### 5.1.1 Criticità saldante lineare

La prima attività svolta sulla saldante lineare ha previsto la realizzazione di alcune prove di saldatura con la molla a bassa rigidezza (molla originale).

Tali test, effettuati su un non woven 18 GSM (Fig. 5.1 a) e con un determinato punzone (Fig. 5.1 b) (già esistente), sono stati eseguiti a tre diverse velocità di rotazione del motore:

- 1000 giri/min
- 2400 giri/min
- 3800 giri/min (massima velocità raggiungibile)

a) b)

**Figura 5.1**: 18 GSM a) e punzone di saldatura b)

Sebbene alla velocità più bassa il non woven sembrasse saldato in maniera corretta, analizzando più dettagliatamente tale caso sono emersi alcuni importanti problemi di funzionamento.

In particolare, ciò che è stato evidenziato è stata la perdita di contatto tra movente e cedente sin dalle basse velocità. Tale aspetto, già ipotizzato e risolto nella preliminare fase di riprogettazione, è stato osservato tramite l'utilizzo della i-speed camera e del software i-speed viewer.

Utilizzando un'acquisizione a 50000 frame, essendo il fenomeno dell'ordine dei microsecondi, ciò che si è visto è che la camma, quasi immediatamente, tende a staccarsi dal cedente, determinando sulla massa traslante una serie di colpi consecutivi.

Tali impatti, tradotti in una serie di rimbalzi del punzone, determinano quindi un processo di saldatura non controllato.

Successivamente, eseguendo i test all'aumentare della velocità di rotazione, sono stati evidenziati, oltre a quanto già detto, altri due particolari aspetti:

- La qualità della saldatura tendeva stranamente a decrescere con la velocità. Questo fenomeno è stato valutato tramite applicazione del peel test ai campioni realizzati.
- L'impronta del pattern sul materiale a velocità superiori a 1000 giri/min risultava palesemente deformata.

A partire da queste considerazioni è stato quindi possibile mettere in luce anche un'altra criticità, ossia la non perfetta rigidezza e precisione del sistema, in quanto il punzone tendeva a spostarsi lateralmente. Tale fenomeno è stato causato dal gioco eccessivo presente sulle guide laterali della massa traslante.

Sebbene per quest'ultima negatività non siano stati presi provvedimenti (poiché non era noto), per quanto riguarda la prima è stata acquistata preliminarmente una molla più rigida, sufficiente a garantire il corretto funzionamento del sistema.

A tal proposito, sostituendo la molla originale con quella nuova, le prove precedenti sono state ripetute.

A differenza di quanto emerso dai primi test, stavolta, grazie all'incremento della rigidezza della molla, non si verifica più il distacco tra movente e cedente. Nonostante il principio di funzionamento sia rispettato però, è stato possibile mettere in luce un'ulteriore aspetto negativo del sistema. In particolare, in questo caso, sia alle basse velocità che a

quelle più elevate, il punzone non generava più alcun giunto saldato. Tale aspetto è stato giustificato dal fatto che la camma, dovendo fare un profilo di velocità triangolare in un tempo molto piccolo, non riesce a raggiungere la velocità corretta, per cui non determina un impatto sufficientemente intenso. Questa problematica implica che il motore presente nella saldante lineare non sia stato dimensionato in maniera corretta.

Le possibili soluzioni alle problematiche non risolte di tale sistema sono:

- Riprogettazione della struttura della saldante in modo tale che sia più rigida e precisa.
- Scegliere un motore con potenza maggiore o adottare una camma desmo, tale per cui il punzone possa raggiungere le velocità richieste.

A tal punto, a causa delle numerose criticità evidenziate, si è deciso di accantonare il banco prova, eseguendo sia i test di saldatura che le analisi sperimentali successive soltanto sul picchio modificato.

## 5.2 Prove sperimentali sul picchio modificato

A seguito di quanto definito sulla saldante lineare, sono state realizzate una serie di prove sperimentali sul picchio. Esso, modificato tramite gli interventi precedentemente descritti, è stato dotato anche di una struttura di sostegno in acciaio, tale non solo da renderlo più rigido, ma anche più preciso ed accurato. (Fig. 5.3)

**Figura 5.3**: Picchio con struttura di sostegno in acciaio

I test sperimentali svolti tramite tale attrezzatura sono stati:

- Valutazione della forza scaricata tramite cella di carico;
- Prove di saldatura e peel test dei campioni realizzati;
- Prove di saldatura al variare della temperatura;
- Osservazione del comportamento del materiale all'impatto tramite uso del quarzo.

### 5.2.1 Valutazione forza scaricata tramite cella di carico

Le prime analisi realizzate sul picchio sono state relative alla valutazione della forza impulsiva scambiata all'impatto. I test, eseguiti senza materiale, sono stati svolti con l'uso del contro saldante con cella di carico precedentemente progettato.

Per poter ottenere l'entità della grandezza d'interesse, la cella di carico è stata collegata, tramite sistema di acquisizione HBM, ad un pc. Una volta tarato il trasduttore di forza con una massa nota e azzerato, è stato possibile iniziare la valutazione.

Per quanto riguarda le acquisizioni fatte, essendo l'impatto un fenomeno impulsivo e molto rapido (dell'ordine di microsecondi), per riuscire a comprendere se quanto letto fosse reale o se il picco di forza venisse tagliato, sono state effettuate una serie di prove con frequenze di acquisizione differenti. Una volta raggiunta la condizione per cui la forza registrata non cambi al variare della frequenza, significa che quanto misurato corrisponde al reale picco generato.

Le analisi svolte, ripetute due volte per ogni caso, sono state effettuate all'inizio con una frequenza di acquisizione di 192 kHz.

La prima configurazione considerata è stata quella con altezza di caduta h= 50 mm e massa singola. Il picco di forza registrato è stato pari a: 6.8 kN. (Fig. 5.4)

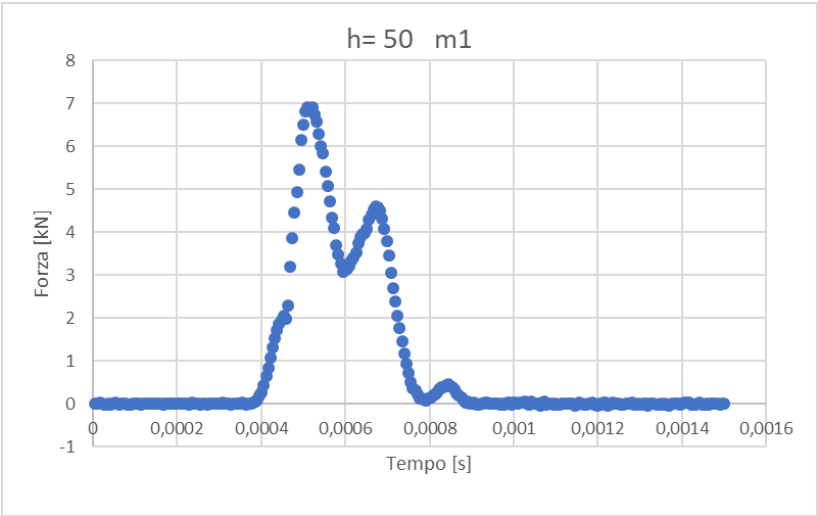



**Figura 5.4**: Picco di forza per h=50 mm e massa singola a 192 kHz.

Come si evince dal grafico il picco risiede in un lasso di tempo estremamente piccolo.

La seconda configurazione è stata quella con h=50 mm e massa doppia. Il picco di forza registrato è stato pari a 8.2 kN. (Fig. 5.5)

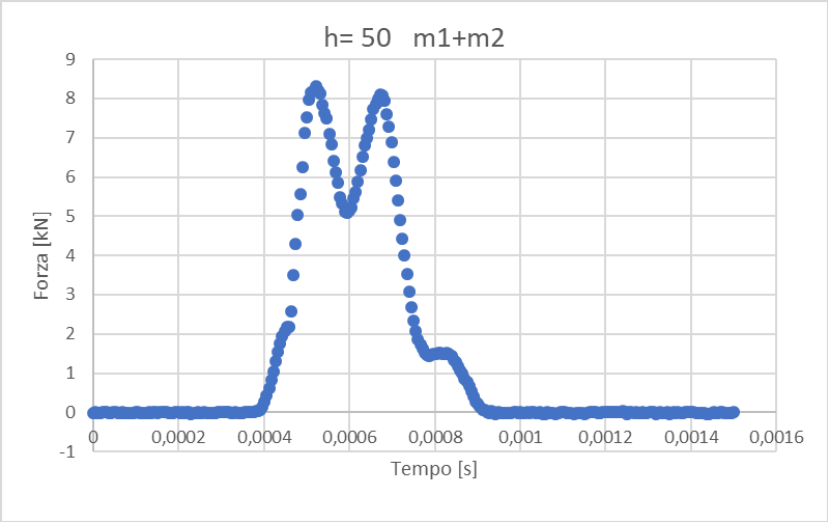



**Figura 5.5**: Picco di forza per h=50 mm e massa doppia a 192 kHz.

La terza configurazione è stata quella con h=100 mm e massa singola. Il picco di forza registrato è stato pari a 10 kN. (Fig. 5.6)

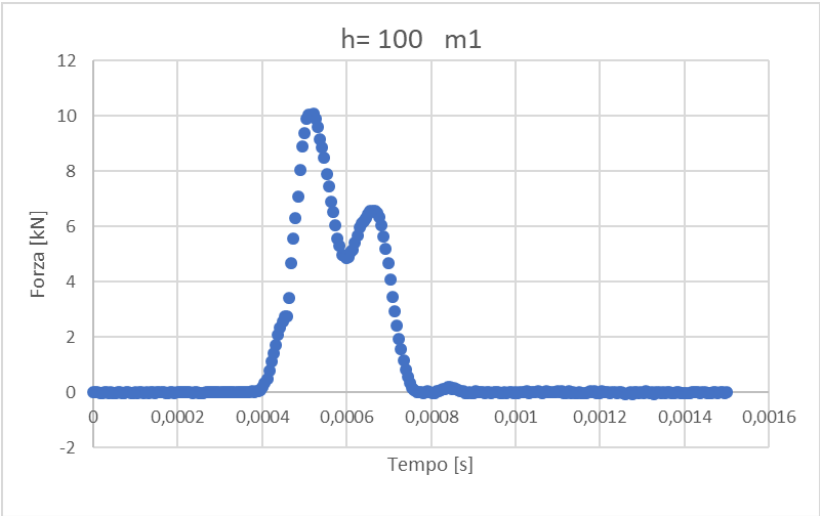



**Figura 5.6**: Picco di forza per h=100 mm e massa singola a 192 kHz.

La quarta configurazione è stata quella con h=100 mm e massa doppia. Il picco di forza registrato è stato pari a 12.1 kN. (Fig. 5.7)

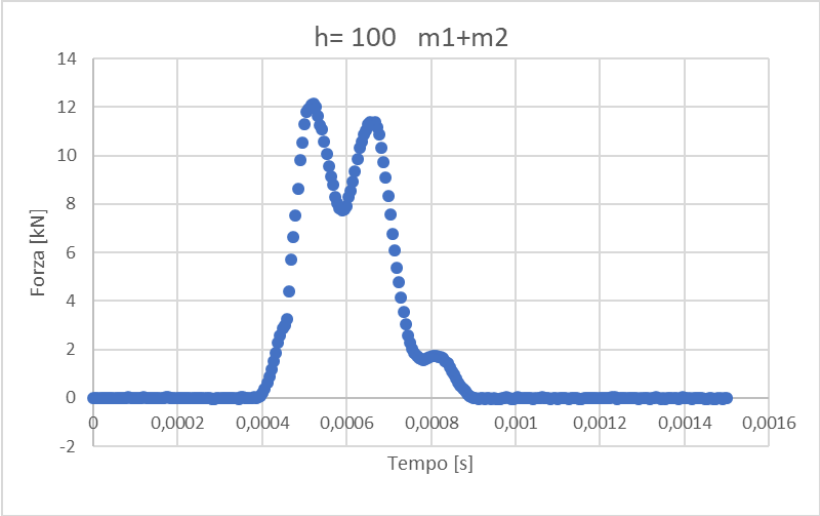



**Figura 5.7**: Picco di forza per h=100 mm e massa doppia a 192 kHz.

La quinta configurazione è stata quella con h=150 mm e massa singola. Il picco di forza registrato è stato pari a 12.5 kN. (Fig. 5.8

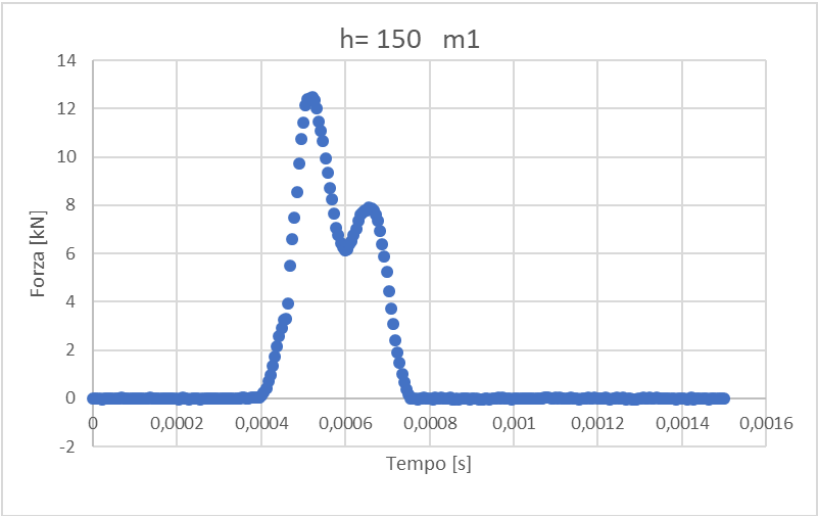



**Figura 5.8**: Picco di forza per h=150 mm e massa singola a 192 kHz.

L'ultima configurazione considerata è stata quella con h=150 mm e massa doppia. Il picco di forza registrato è stato pari a 14.9 kN. (Fig. 5.9)

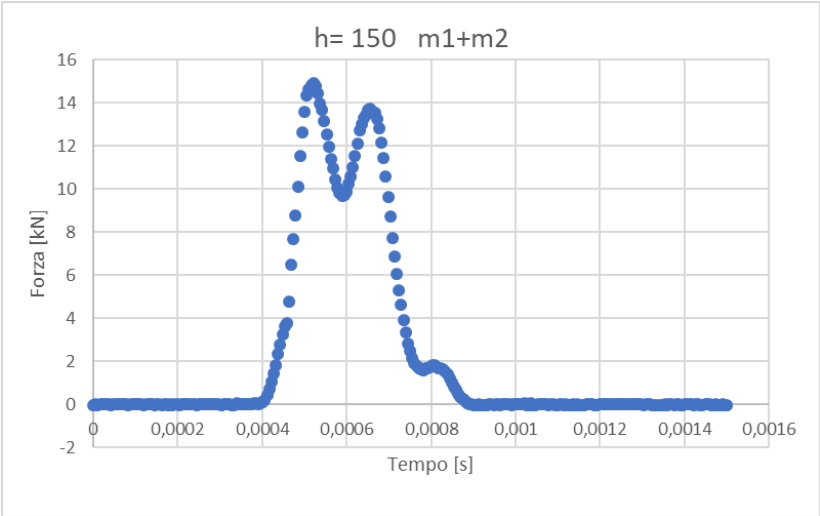



**Figura 5.9**: Picco di forza per h=150 mm e massa doppia a 192 kHz.

Per poter verificare che quanto ottenuto sia veritiero, successivamente a questi test è stata effettuata anche un'ulteriore prova, riducendo la frequenza di acquisizione a 96 kHz. Prendendo in considerazione il caso con altezza di caduta h =100 mm e massa doppia, si è ottenuto un picco di forza pari a 12 kN. (Fig. 5.10)

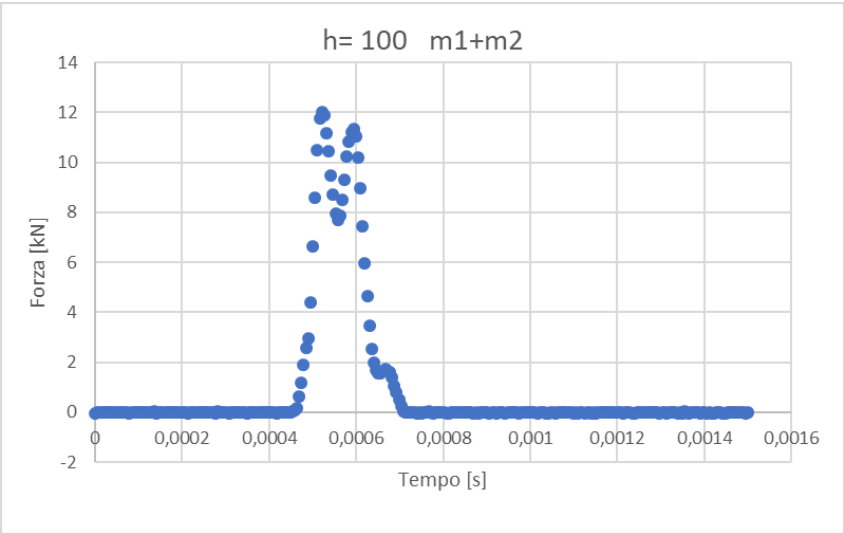



**Figura 5.10**: Picco di forza per h=100 mm e massa doppia a 96 kHz.

Confrontando tale risultato con quanto ottenuto a frequenza d'acquisizione maggiore si è visto che il picco ottenuto risulta essere il medesimo. Ciò implica che andando a 96 kHz non si è verificato alcun taglio del segnale, per cui i risultati estrapolati sono reali.

Si è provato poi a ridurre ulteriormente la frequenza a 48 kHz e questa volta si è constatato un abbassamento del picco. Questo significa che con un'acquisizione a tale frequenza non è possibile costruire in maniera corretta il segnale fisico.

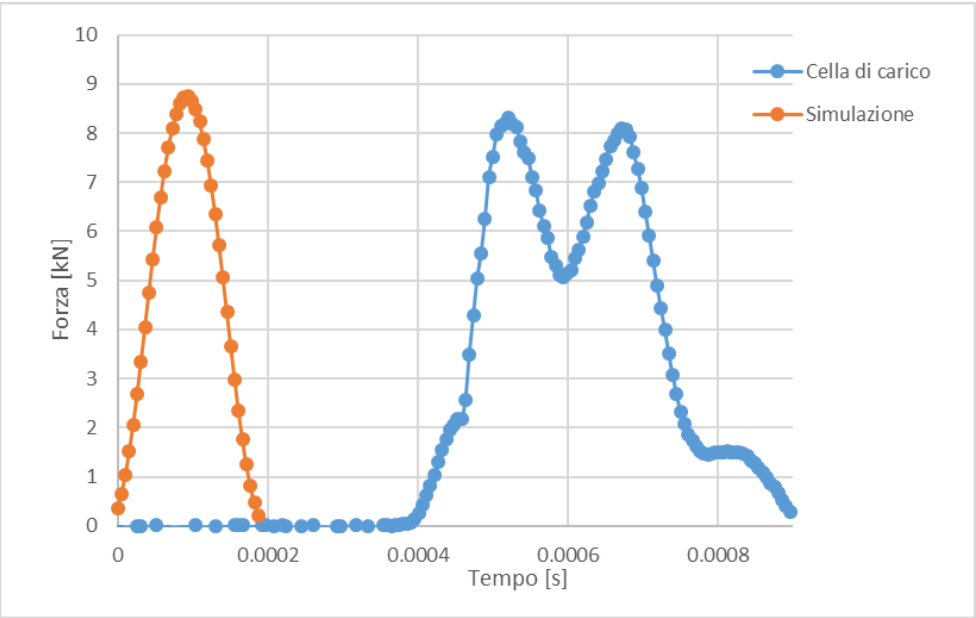
Dai valori ottenuti dai test ad alta frequenza di acquisizione si può affermare che:

- A parità di altezza, più la massa aumenta più la forza scaricata è elevata;
- A parità di massa, tanto più l'altezza di caduta sale tanto più la forza impulsiva cresce.

Poiché l'entità del carico impulsivo risulta indipendente dal tipo di punzone utilizzato, è stato possibile anche effettuare un confronto diretto tra quanto ottenuto dalle simulazioni sulla saldatura lineare e i risultati dei test sperimentali appena descritti.

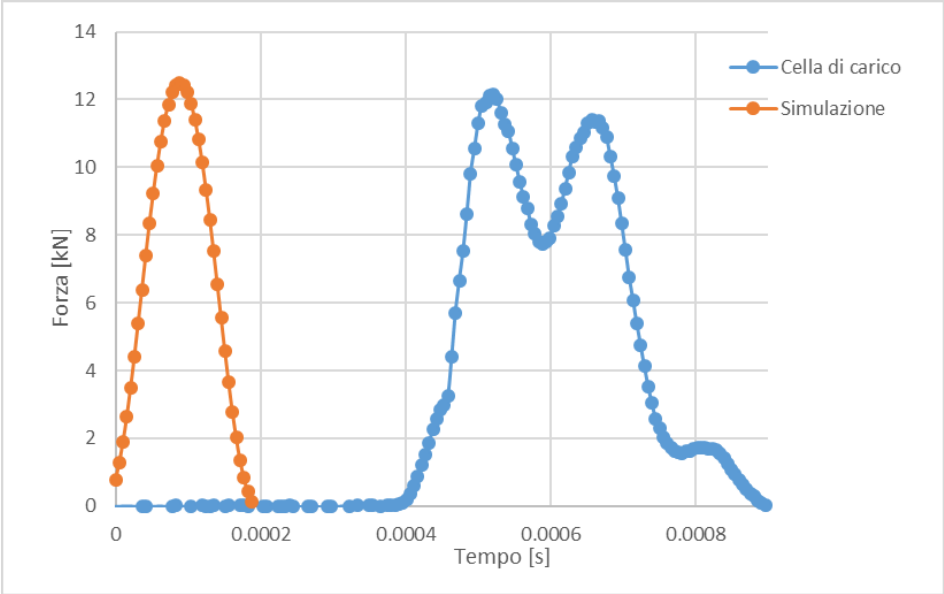
Paragonando i casi a doppia massa al variare dell'altezza di caduta, si ha:

- h= 50 mm (Fig. 5.11 a)



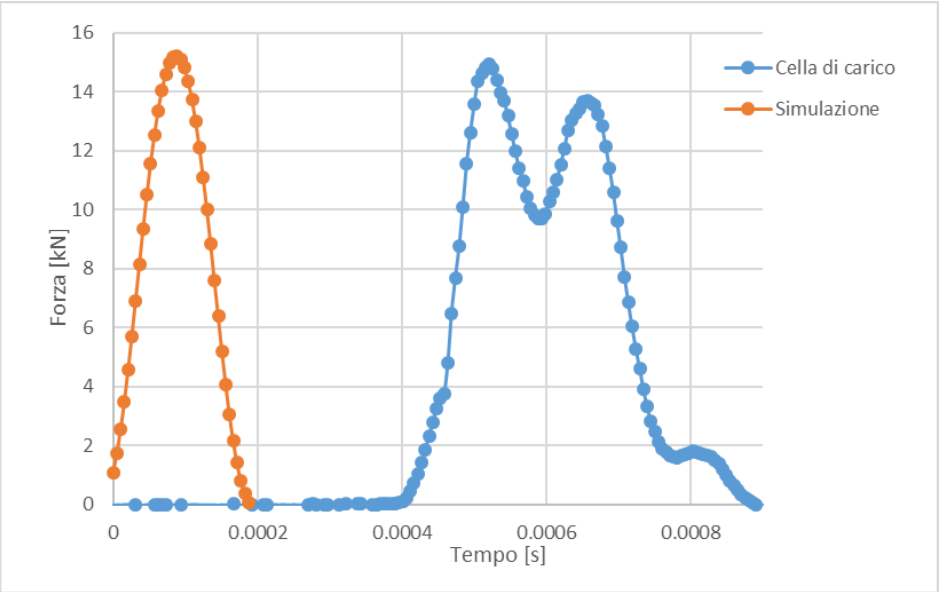

a)

- h= 100 mm (Fig. 5.11 b)




b)

- h= 150 mm (Fig. 5.11 c)




c)

**Figura 5.11**: Confronto picco di forza tra simulazioni e test sperimentali a h=50 mm a), h=100mm b) e h=150 mm c).

Come è possibile osservare dalle immagini precedenti i valori di forza ottenuti dalle due analisi sono all'incirca gli stessi. Ciò conferma come le simulazioni realizzate siano state in grado di considerare anche un fenomeno impulsivo così veloce come quello in esame.

### 5.2.2 Prove di saldatura e peel test dei campioni realizzati

In seguito alla valutazione delle forze scaricate all'impatto, la seconda attività svolta ha previsto dapprima la realizzazione di test di saldatura al variare dei parametri di processo e in seguito l'analisi della qualità dei provini realizzati tramite peel test. Le prove, eseguite con lo scopo di determinare l'influenza delle grandezze di processo sulla qualità della giunzione, sono state realizzate al variare di:

- Materiale: i non woven considerati sono stati:
  - 16 GSM
  - 18 GSM

Essendo questi materiali rispettivamente a più bassa e alta grammatura, tale scelta ha avuto lo scopo di valutare come questo parametro influenzi la qualità del giunto saldato.

- Massa in caduta: i due casi utilizzati sono stati:
  - Massa singola: m1=1.09 kg
  - Massa doppia: m1+m2=1.5 kg
- Altezza di caduta: le tre quote considerate nei diversi test sperimentali sono state:
  - h=50 mm
  - h=100 mm
  - h=150 mm

Le variazioni della massa e dell'altezza di caduta sono state considerate per poter valutare come il processo in esame sia influenzato dall'entità della forza d'impatto.

- Punzone: i cinque casi analizzati nei test sperimentali sono stati:
  - Punzone con pattern a griglia (denominato punzone 1)
  - Punzone con pattern a corona circolare (denominato punzone 2)
  - Punzone con pin circolare (denominato punzone 3)
  - Punzone con pin con larghezza 0.5 mm (denominato punzone 4)
  - Punzone con pin con larghezza 0.8 mm (denominato punzone 5)

  Prendere in esame punzoni con pattern differenti ha permesso di valutare come la geometria dei pin influenzi il processo di saldatura.

#### 5.2.2.1 Prove di saldatura sul 16 GSM

Le prime prove realizzate sono state condotte con l'utilizzo del materiale 16 GSM.
Per poter effettuare tali test la prima attività svolta è stata quella di ritagliare i provini di saldatura, definiti, in questo caso, con una larghezza di 40 mm. (Fig. 5.12)

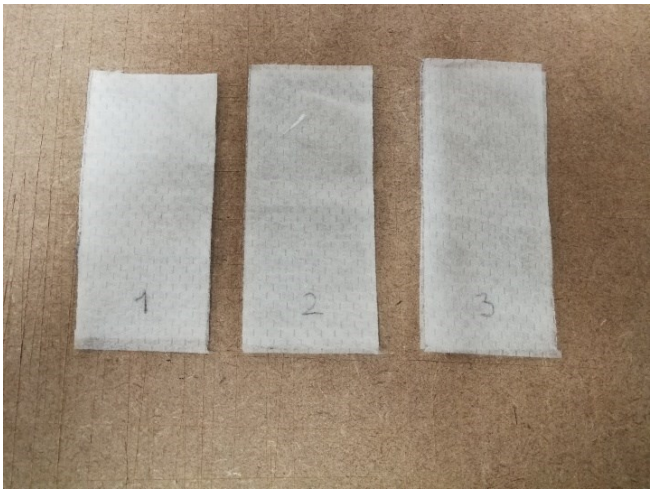



**Figura 5.12**: provini di saldatura di 16 GSM

Una volta realizzati i campioni, hanno avuto inizio i test di saldatura. Le prime configurazioni analizzate sono state: (Tab. 5.13 a, b)

| Run | Massa | Materiale | Punzone | h [mm] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | m1 | 16 GSM | 1 | 50 |
| 2 | m1 | 16 GSM | 1 | 50 |
| 3 | m1 | 16 GSM | 1 | 50 |
| 4 | m1 | 16 GSM | 1 | 50 |
| 5 | m1+m2 | 16 GSM | 1 | 50 |
| 6 | m1+m2 | 16 GSM | 1 | 50 |
| 7 | m1+m2 | 16 GSM | 1 | 50 |
| 8 | m1+m2 | 16 GSM | 1 | 50 |
| 9 | m1 | 16 GSM | 1 | 100 |
| 10 | m1 | 16 GSM | 1 | 100 |
| 11 | m1 | 16 GSM | 1 | 100 |
| 12 | m1 | 16 GSM | 1 | 100 |
| 13 | m1+m2 | 16 GSM | 1 | 100 |
| 14 | m1+m2 | 16 GSM | 1 | 100 |
| 15 | m1+m2 | 16 GSM | 1 | 100 |
| 16 | m1+m2 | 16 GSM | 1 | 100 |
| 17 | m1 | 16 GSM | 1 | 150 |
| 18 | m1 | 16 GSM | 1 | 150 |
| 19 | m1 | 16 GSM | 1 | 150 |
| 20 | m1 | 16 GSM | 1 | 150 |
| 21 | m1+m2 | 16 GSM | 1 | 150 |
| 22 | m1+m2 | 16 GSM | 1 | 150 |
| 23 | m1+m2 | 16 GSM | 1 | 150 |
| 24 | m1+m2 | 16 GSM | 1 | 150 |

| Run | Massa | Materiale | Punzone | h [mm] |
|---|---|---|---|---|
| 25 | m1 | 16 GSM | 2 | 50 |
| 26 | m1 | 16 GSM | 2 | 50 |
| 27 | m1 | 16 GSM | 2 | 50 |
| 28 | m1 | 16 GSM | 2 | 50 |
| 29 | m1+m2 | 16 GSM | 2 | 50 |
| 30 | m1+m2 | 16 GSM | 2 | 50 |
| 31 | m1+m2 | 16 GSM | 2 | 50 |
| 32 | m1+m2 | 16 GSM | 2 | 50 |
| 33 | m1 | 16 GSM | 2 | 100 |
| 34 | m1 | 16 GSM | 2 | 100 |
| 35 | m1 | 16 GSM | 2 | 100 |
| 36 | m1 | 16 GSM | 2 | 100 |
| 37 | m1+m2 | 16 GSM | 2 | 100 |
| 38 | m1+m2 | 16 GSM | 2 | 100 |
| 39 | m1+m2 | 16 GSM | 2 | 100 |
| 40 | m1+m2 | 16 GSM | 2 | 100 |
| 41 | m1 | 16 GSM | 2 | 150 |
| 42 | m1 | 16 GSM | 2 | 150 |
| 43 | m1 | 16 GSM | 2 | 150 |
| 44 | m1 | 16 GSM | 2 | 150 |
| 45 | m1+m2 | 16 GSM | 2 | 150 |
| 46 | m1+m2 | 16 GSM | 2 | 150 |
| 47 | m1+m2 | 16 GSM | 2 | 150 |
| 48 | m1+m2 | 16 GSM | 2 | 150 |

**Figura 5.13**: test effettuati con punzone 1 a) e punzone 2 b)

Come si evince dalle due tabelle, i pattern considerati inizialmente in questi test sono stati solo quelli del punzone 1 e del punzone 2. Inoltre, ogni prova è stata ripetuta 4 volte, in modo sia da poter fare una media dei risultati ottenuti, sia da eliminare eventuali incertezze ed errori presenti.

Concluse le prove, i campioni ottenuti sono stati sottoposti a peel test.

Relativamente alla sua realizzazione, dapprima è stata settata la macchina (imponendo un precarico di 0.1 N e una distanza tra le pinze pari a 30 mm), poi sono stati montati i provini ed infine si è passati alla fase esecutiva.

Per quanto riguarda il posizionamento dei campioni sulla macchina di prova Zwick/Roell, è stata scelta la configurazione più sfavorevole, ossia quella a C. (Fig. 5.14)

**Figura 5.14**: Peel test con posizionamento a C del provino

Per almeno un campione di ogni prova (solitamente quello visibilmente migliore) è stata effettuata anche una micrografia tramite microscopio Dino Lite (Fig. 5.15 a, b). Tale analisi ha permesso di valutare in maniera dettagliata cosa accade al materiale durante la saldatura, mettendo in evidenza sia la nettezza del giunto di saldatura, sia la fusione dei polimeri e sia, eventualmente, le lacerazioni che si generano.

a)

b)

**Figura 5.15**: microscopio Dino Lite.

A partire dai peel test descritti, tramite il software TestXpert II, è stato possibile estrapolare per ciascuna configurazione, l'andamento della forza di trazione in funzione della corsa.

Ad esempio, il  trend ottenuto per il punzone 1 ad h =50 mm e massa singola è stato (Fig. 5.16) :

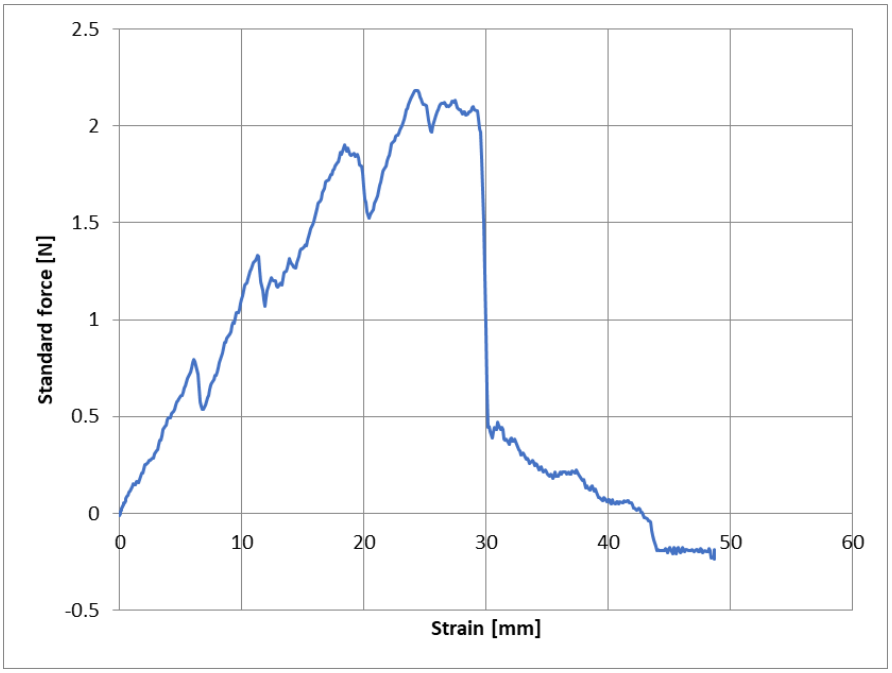



**Figura 5.16**: andamento della forza in funzione della corsa a massa singola h=50 mm e con punzone 1

Lo stesso trend ottenuto per il punzone 2 invece è stato (Fig. 5.17):

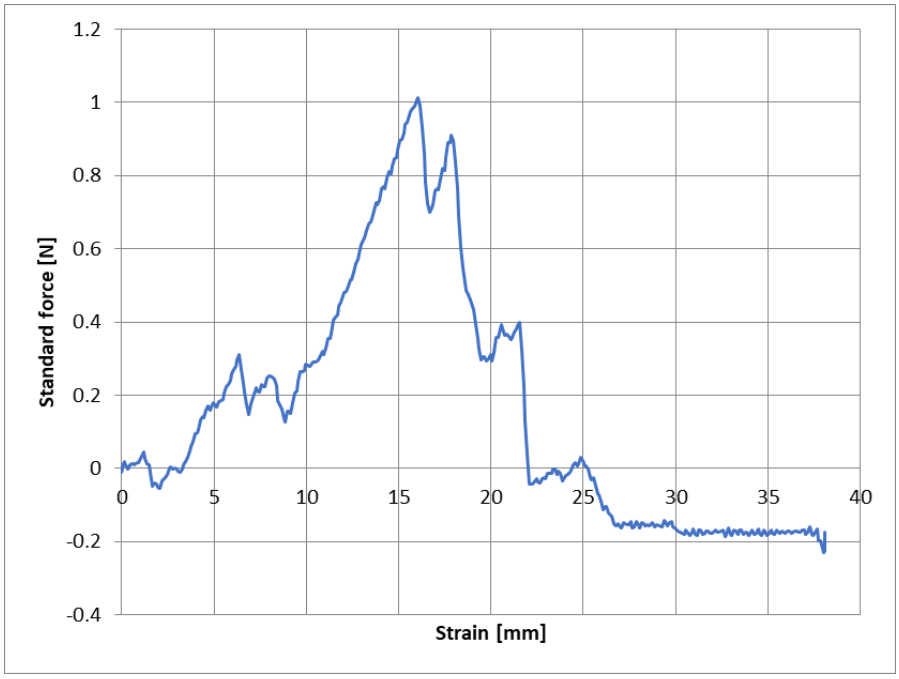


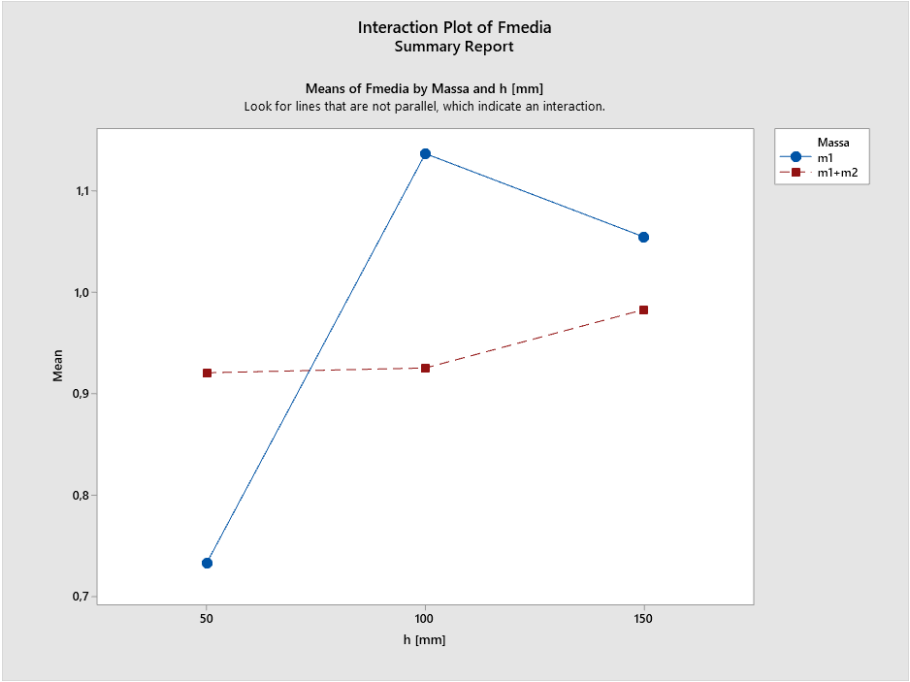

**Figura 5.17**: andamento della forza in funzione della corsa a massa singola h=50 mm e con punzone 2

A partire dagli andamenti ricavati, per ciascun caso è stato possibile estrapolare il valore medio della forza raggiunta. Tale parametro è fondamentale, in quanto è proprio sulla basse di essa che una saldatura viene giudicata di qualità o meno. (e non in base all'entità del picco).

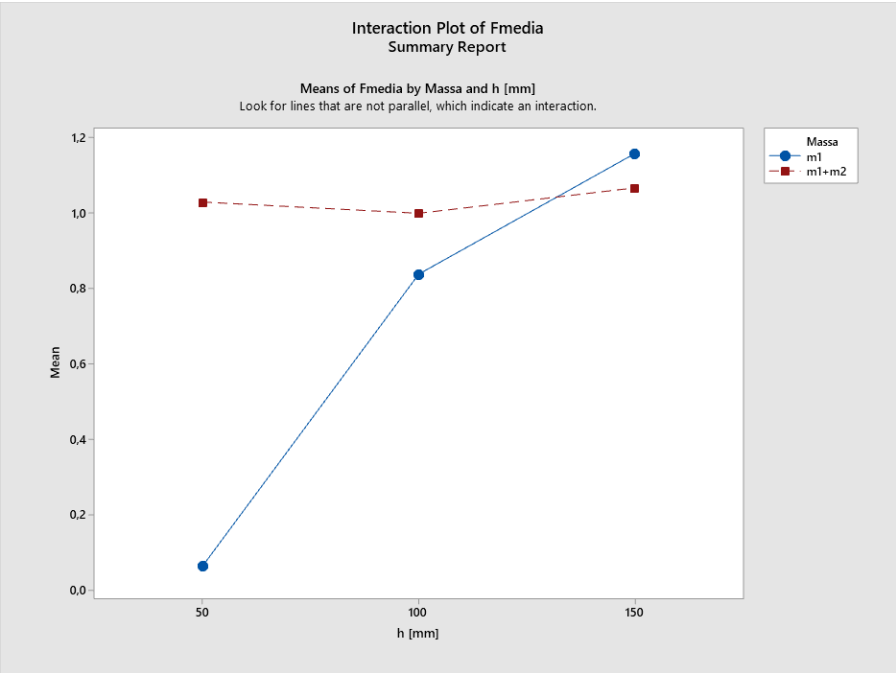
Da tali grandezze poi, tramite ricorso al software Minitab, è stato possibile valutare gli andamenti risultanti al variare dei diversi parametri di processo.

I trend ottenuti sono stati:

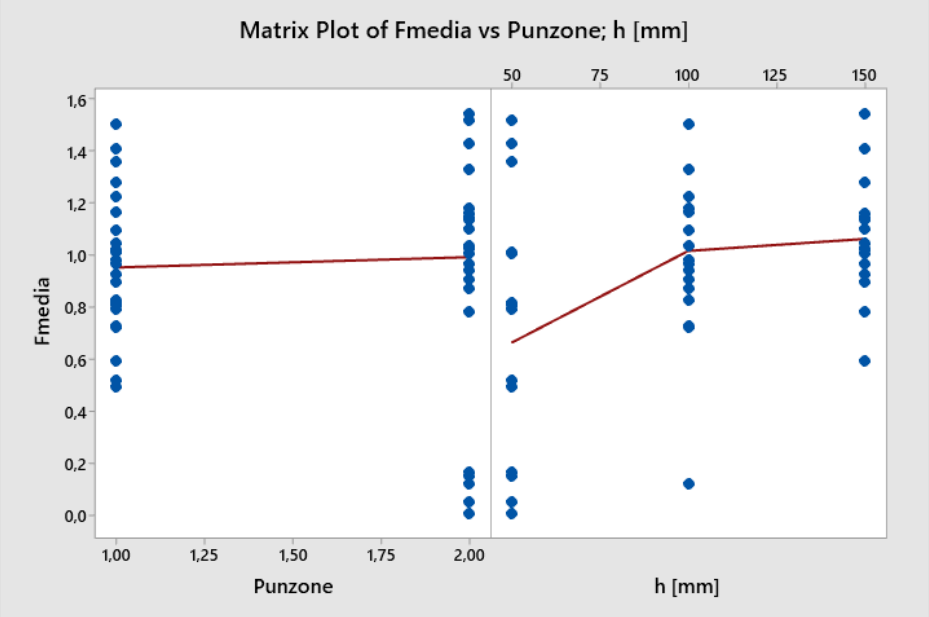
- Andamento della forza media per il punzone 1 al variare dell'altezza e della massa (Fig. 5.18 a);
- Andamento della forza media per il punzone 2 al variare dell'altezza e della massa (Fig. 5.18 b);
- Andamento della forza media al variare dell'altezza di caduta e del tipo di punzone (Fig. 5.18 c).




a)




b)




c)

**Figura 5.18**: Andamento della Fmedia al variare dei parametri di processo

Dai grafici ottenuti si evince rispettivamente che:

- La forza media necessaria alla rottura del giunto saldato del primo punzone tende ad essere decrescente all'aumentare della massa, se non per il caso ad h=50 mm.

Tale fenomeno è giustificato dal fatto che all'aumentare del carico impulsivo il materiale tende a rompersi. (Fig. 5.19)

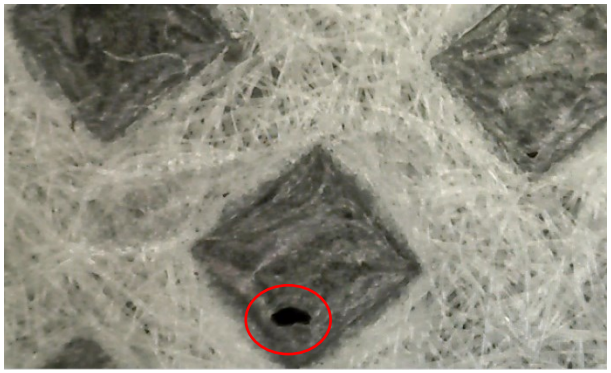


**Figura 5.19**: Rottura del materiale ad h=150 mm e doppia massa

- La forza media del punzone 1 a massa singola tende a decrescere ad un'altezza di caduta pari a 150 mm. Questo fenomeno, come già detto per il caso della massa, è dovuto alla rottura del materiale.
- La forza media relativa al secondo punzone tende a crescere all'aumentare dell'altezza di caduta. Per quanto riguarda la massa, anche in questo caso l'andamento è crescente, a parte in corrispondenza dell'altezza h=150 mm. Ciò implica che con doppia massa alla quota di caduta maggiore il materiale tenda a rompersi. (Fig. 5.20)

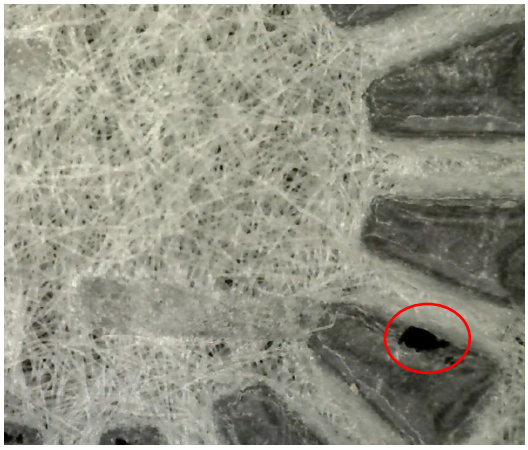


**Figura 5.20**: Micrografia saldatura con punzone 2 a h=150 mm e doppia massa

- La forza media tende ad essere in generale leggermente più elevata nelle giunzioni ottenute tramite il secondo punzone. Questo sembrerebbe implicare che l'utilizzo di pin più piccoli, così come evidenziato anche dalle precedenti simulazioni rotative, determini una saldatura migliore (i pin del secondo punzone hanno un'area di contatto minore rispetto al primo).
- La forza media tende in generale ad aumentare all'incrementare dell'altezza di caduta. Ciò implica che aumentando la forza di saldatura la giunzione venga meglio, sebbene questo, come visto, non è valido per i singoli punzoni.

Per quanto riguarda l'analisi della saldatura con materiale 16 GSM, non sono stati effettuati ulteriori casi di studio. Questo in quanto tale non woven risulta essere molto disuniforme e quindi anche la qualità della saldatura tende a modificarsi in base alla zona di materiale considerata.

#### 5.2.2.2 Prove di saldatura sul 18 GSM

Successivamente a quanto descritto, le medesime prove di saldatura e peel test precedenti sono state realizzate anche su un materiale a grammatura più elevata, ossia il 18 GSM. Stavolta, essendo il tessuto più omogeneo e quindi la giunzione più uniforme, i casi di studio considerati sono stati decisamente più numerosi.
Escludendo il punzone denominato nell'analisi precedente come 1 (poiché di scarso interesse), le configurazioni analizzate sono state: (Fig. 5.21)

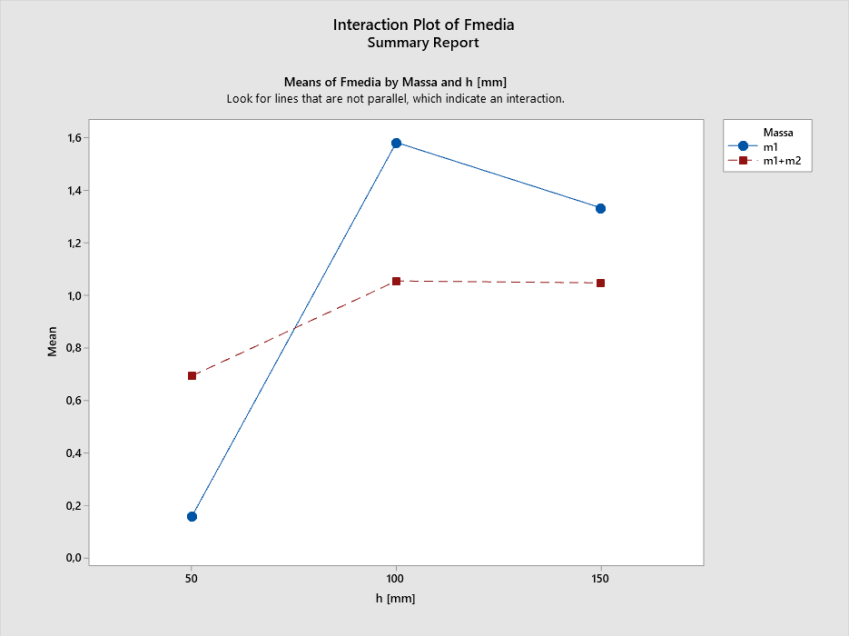
| Massa | Materiale | Punzone | h [mm] |
|---|---|---|---|
| m1 | 18 GSM | 2 | 50 |
| m1 | 18 GSM | 2 | 50 |
| m1 | 18 GSM | 2 | 50 |
| m1 | 18 GSM | 2 | 50 |
| m1+m2 | 18 GSM | 2 | 50 |
| m1+m2 | 18 GSM | 2 | 50 |
| m1+m2 | 18 GSM | 2 | 50 |
| m1+m2 | 18 GSM | 2 | 50 |
| m1 | 18 GSM | 2 | 100 |
| m1 | 18 GSM | 2 | 100 |
| m1 | 18 GSM | 2 | 100 |
| m1 | 18 GSM | 2 | 100 |
| m1+m2 | 18 GSM | 2 | 100 |
| m1+m2 | 18 GSM | 2 | 100 |
| m1+m2 | 18 GSM | 2 | 100 |
| m1+m2 | 18 GSM | 2 | 100 |
| m1 | 18 GSM | 2 | 150 |
| m1 | 18 GSM | 2 | 150 |
| m1 | 18 GSM | 2 | 150 |
| m1 | 18 GSM | 2 | 150 |
| m1+m2 | 18 GSM | 2 | 150 |
| m1+m2 | 18 GSM | 2 | 150 |
| m1+m2 | 18 GSM | 2 | 150 |
| m1+m2 | 18 GSM | 2 | 150 |
| m1 | 18 GSM | 3 | 50 |
| m1 | 18 GSM | 3 | 50 |
| m1 | 18 GSM | 3 | 50 |
| m1 | 18 GSM | 3 | 50 |
| m1+m2 | 18 GSM | 3 | 50 |
| m1+m2 | 18 GSM | 3 | 50 |
| m1+m2 | 18 GSM | 3 | 50 |
| m1+m2 | 18 GSM | 3 | 50 |
| m1 | 18 GSM | 3 | 100 |
| m1 | 18 GSM | 3 | 100 |
| m1 | 18 GSM | 3 | 100 |
| m1 | 18 GSM | 3 | 100 |
| m1+m2 | 18 GSM | 3 | 100 |
| m1+m2 | 18 GSM | 3 | 100 |
| m1+m2 | 18 GSM | 3 | 100 |
| m1 | 18 GSM | 3 | 150 |
| m1 | 18 GSM | 3 | 150 |
| m1 | 18 GSM | 3 | 150 |
| m1 | 18 GSM | 4 | 50 |
| m1 | 18 GSM | 4 | 50 |
| m1 | 18 GSM | 4 | 50 |

| Massa | Materiale | Punzone | h [mm] |
|---|---|---|---|
| m1 | 18 GSM | 4 | 50 |
| m1 | 18 GSM | 4 | 50 |
| m1 | 18 GSM | 4 | 50 |
| m1 | 18 GSM | 4 | 50 |
| m1+m2 | 18 GSM | 4 | 50 |
| m1+m2 | 18 GSM | 4 | 50 |
| m1+m2 | 18 GSM | 4 | 50 |
| m1+m2 | 18 GSM | 4 | 50 |
| m1 | 18 GSM | 4 | 100 |
| m1 | 18 GSM | 4 | 100 |
| m1 | 18 GSM | 4 | 100 |
| m1 | 18 GSM | 4 | 100 |
| m1+m2 | 18 GSM | 4 | 100 |
| m1+m2 | 18 GSM | 4 | 100 |
| m1+m2 | 18 GSM | 4 | 100 |
| m1+m2 | 18 GSM | 4 | 100 |
| m1 | 18 GSM | 4 | 150 |
| m1 | 18 GSM | 4 | 150 |
| m1 | 18 GSM | 4 | 150 |
| m1 | 18 GSM | 4 | 150 |
| m1+m2 | 18 GSM | 4 | 150 |
| m1+m2 | 18 GSM | 4 | 150 |
| m1+m2 | 18 GSM | 4 | 150 |
| m1+m2 | 18 GSM | 4 | 150 |
| m1 | 18 GSM | 5 | 50 |
| m1 | 18 GSM | 5 | 50 |
| m1 | 18 GSM | 5 | 50 |
| m1 | 18 GSM | 5 | 50 |
| m1+m2 | 18 GSM | 5 | 50 |
| m1+m2 | 18 GSM | 5 | 50 |
| m1+m2 | 18 GSM | 5 | 50 |
| m1+m2 | 18 GSM | 5 | 50 |
| m1 | 18 GSM | 5 | 100 |
| m1 | 18 GSM | 5 | 100 |
| m1 | 18 GSM | 5 | 100 |
| m1 | 18 GSM | 5 | 100 |
| m1+m2 | 18 GSM | 5 | 100 |
| m1+m2 | 18 GSM | 5 | 100 |
| m1+m2 | 18 GSM | 5 | 100 |
| m1+m2 | 18 GSM | 5 | 100 |
| m1 | 18 GSM | 5 | 150 |
| m1 | 18 GSM | 5 | 150 |
| m1 | 18 GSM | 5 | 150 |
| m1 | 18 GSM | 5 | 150 |
| m1+m2 | 18 GSM | 5 | 150 |

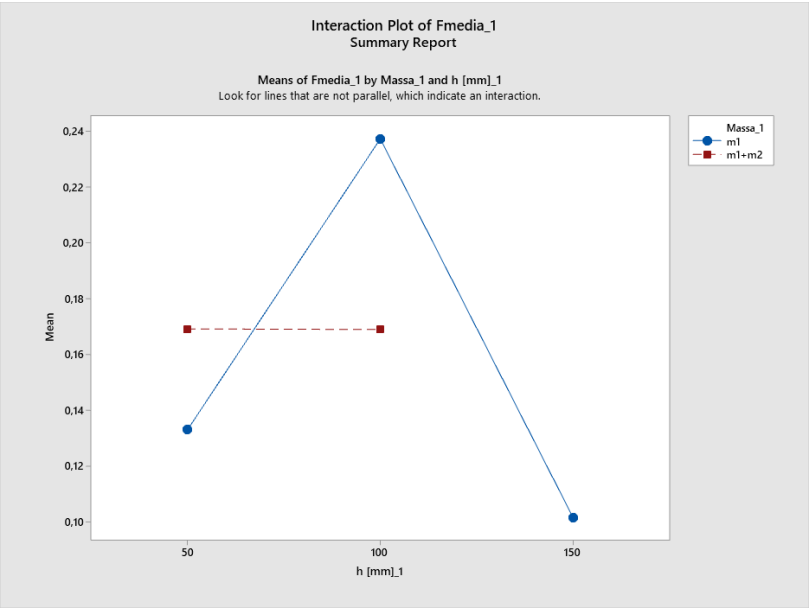
**Figura 5.21**: casi di studio analizzati

Utilizzando la medesima procedura del caso precedente, gli andamenti ottenuti stavolta sono stati:

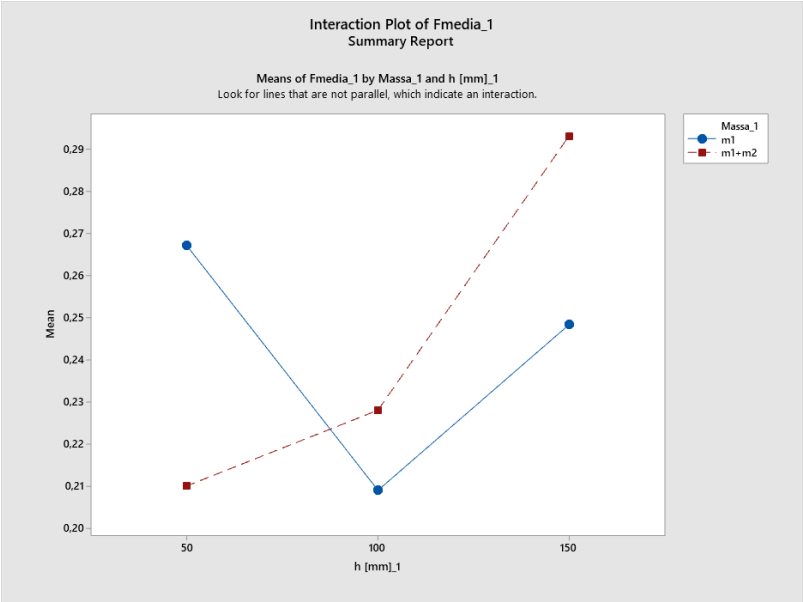
- Andamento della forza media per il punzone 2 al variare dell'altezza e della massa (Fig. 5.22 a);
- Andamento della forza media per il punzone 3 al variare dell'altezza e della massa (Fig. 5.22 b);
- Andamento della forza media per il punzone 4 al variare dell'altezza e della massa (Fig. 5.22 c);
- Andamento della forza media per il punzone 5 al variare dell'altezza e della massa (Fig. 5.22 d);
- Andamento della forza media al variare del punzone (escludendo il punzone due perché ha un pattern con un'area molto maggiore rispetto agli altri casi) e dell'altezza di caduta. (Fig. 5.22 e)



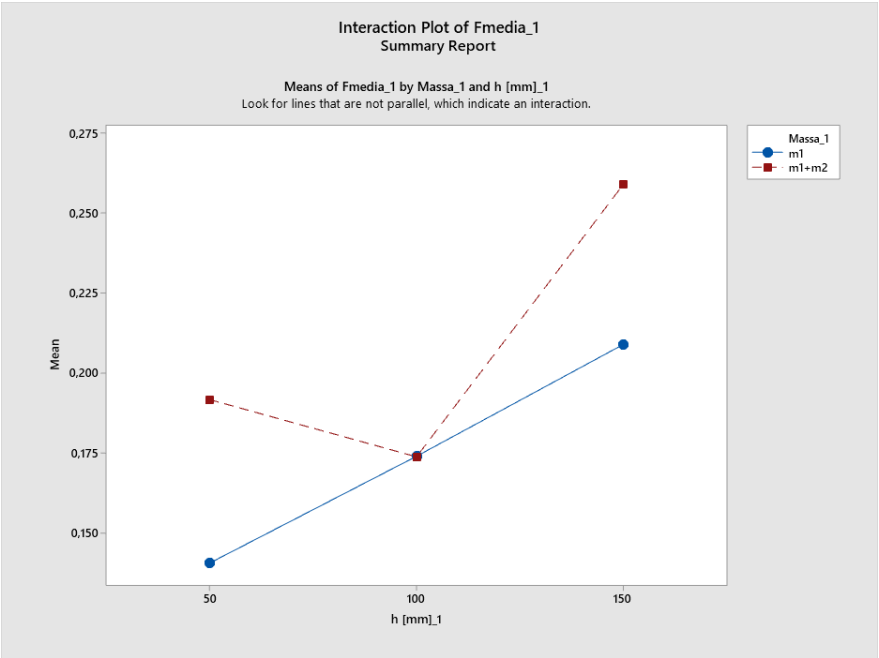

a)


Interaction Plot of Fmedia_1
Summary Report
Means of Fmedia_1 by Massa_1 and h [mm]_1
Look for lines that are not parallel, which indicate an interaction.
Massa_1
m1
m1+m2
Mean
0,24
0,22
0,20
0,18
0,16
0,14
0,12
0,10
50
100
150
h [mm]_1

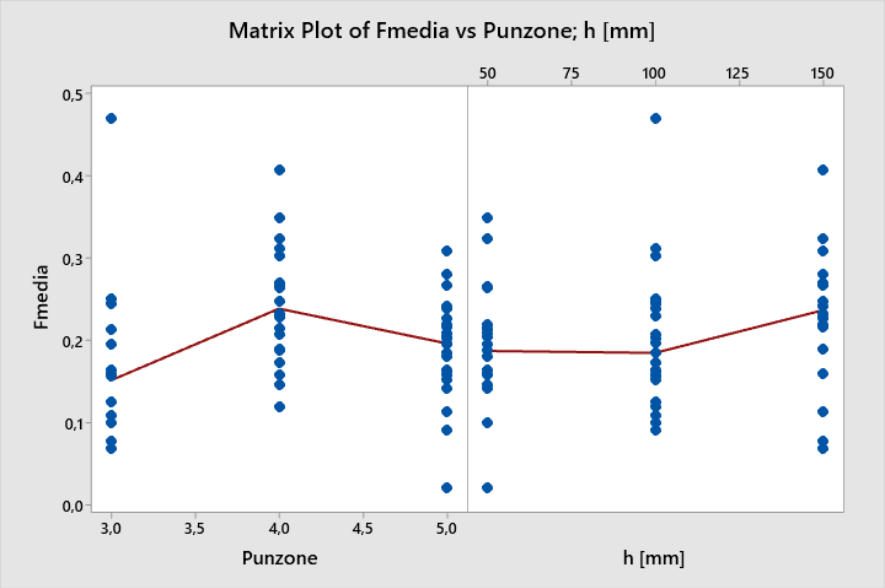
b)


Interaction Plot of Fmedia_1
Summary Report
Means of Fmedia_1 by Massa_1 and h [mm]_1
Look for lines that are not parallel, which indicate an interaction.
Massa_1
m1
m1+m2
Mean
0,29
0,28
0,27
0,26
0,25
0,24
0,23
0,22
0,21
0,20
50
100
150
h [mm]_1

c)




d)




e)

**Figura 5.22**: Andamento della Fmedia al variare dei parametri di processo

Dai grafici ottenuti si evince rispettivamente che:

- La forza media necessaria alla rottura del giunto saldato del punzone 2 tende ad essere crescente con la massa a 50 mm, mentre decrescente alle restanti due quote. Tale fenomeno è giustificato dal fatto che a 100 mm e a 150 mm il maggiore carico impulsivo ha determinato la rottura del materiale. (Fig. 5.23)

**Figura 5.23**: Rottura del materiale ad h=100 mm e doppia massa con punzone 2

- La forza media nel caso di punzone 2, sia a massa singola che a massa doppia, tende dapprima a determinare un picco a 100 mm e poi decresce. Tale fenomeno, così come il precedente, è legato alla rottura.
- La forza media relativa al punzone 3 aumenta con la massa a 50 mm, mentre decresce con la stessa a 100. Anche in questo caso significa che aumentando la massa a 100 mm si raggiunge un valore di forza troppo elevato, per cui il materiale si rompe.
- La forza media con il punzone 3 cresce inizialmente con l'altezza, per poi decrescere una volta raggiunta la quota di 150 mm. Ciò è dovuto alla rottura del materiale. (Fig. 5.24)

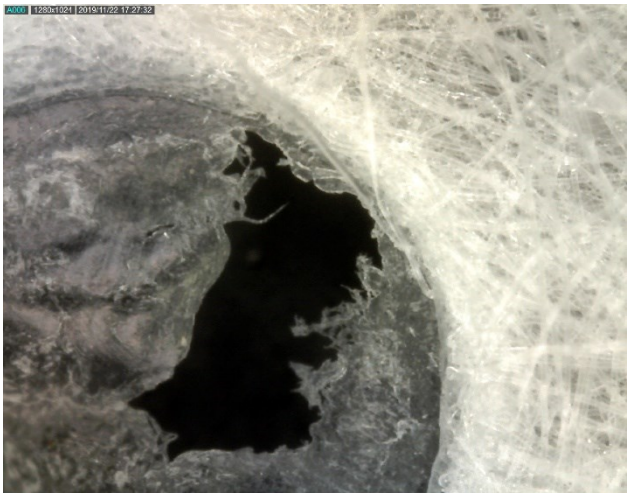
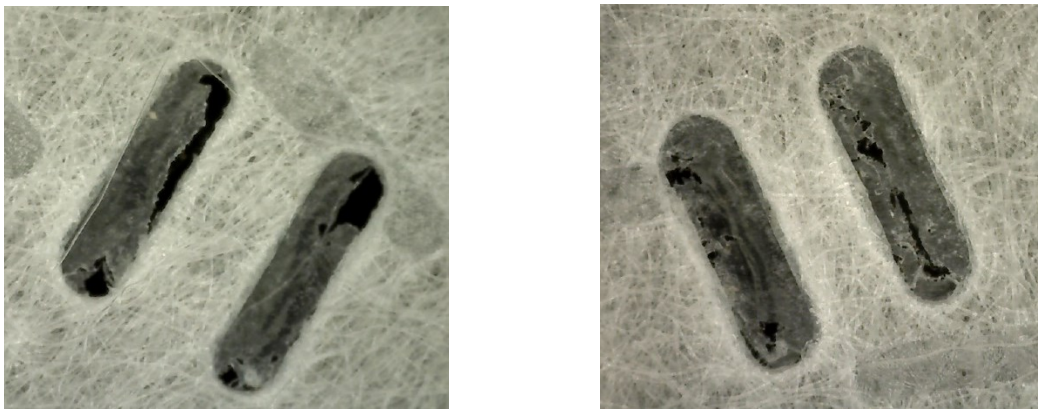



**Figura 5.24**: Rottura del materiale ad h=150 mm e doppia massa con punzone 3

- La forza media del punzone 4 cresce all'aumentare della massa, a parte nel caso a 50 mm di altezza.
- Nel caso di punzone 4, la configurazione a massa singola presenta una forza media che all'aumentare dell'altezza prima decresce e poi aumenta, mentre il caso a massa doppia risulta sempre crescente.
- La forza media del punzone 5 tende a crescere con la massa. Per quanto riguarda il trend al variare dell'altezza invece, a massa singola l'andamento è crescente, mentre a doppia massa tende ad abbassarsi leggermente a 100 mm. Peculiarità di tale caso è che a 100 mm la forza media necessaria con una e due masse risulta essere la medesima.
- Il punzone 4 tende, nel caso a massa singola, ad avere un abbassamento di forza in corrispondenza di h=100 mm. Ciò è dovuto al fatto che:
    - A 100 mm il cordone di saldatura è poco resistente e presenta delle rotture nella zona laterale del pin (Fig. 5.25 a).
    - A 50 mm non si ha un buon cordone di saldatura ma non si hanno rotture, per cui il cordone resiste di più che a 100 mm.
    - A 150 mm il cordone è netto, sebbene con rotture nella zona centrale, per cui esso resiste di più rispetto a 100 mm. (Fig. 5.25 b).



a) b)

**Figura 5.25**: Micrografia a massa singola a 100 mm a) e 150 mm b) con punzone 4

- Confrontando la forza media necessaria a rompere il giunto saldato per i punzoni 3, 4 e 5, si evince che il punzone che salda meglio è quello con larghezza 0.5 (il 4). Così come visto nel caso di materiale 16 GSM, anche stavolta il pattern con area di contatto minore risulta essere quella che in generale determina una saldatura di migliore qualità.
- La forza media tende in generale ad aumentare all'incrementare dell'altezza di caduta. La quota a cui si determina l'aumento principale di bontà della saldatura corrisponde a 150 mm.

### 5.2.2.3 Confronto tra prove di saldatura con materiali differenti

A partire dai risultati delle analisi precedenti, è stato possibile effettuare un confronto diretto tra la qualità della saldatura con il 16 GSM e la stessa a 18 GSM. L'unico caso che è stato realizzato con entrambi i non woven è stato quello con il punzone 2, ossia la corona circolare.

Riportando la forza media ricavata dal peel test in funzione del tipo di materiale si è ottenuto: (Fig. 5.26)

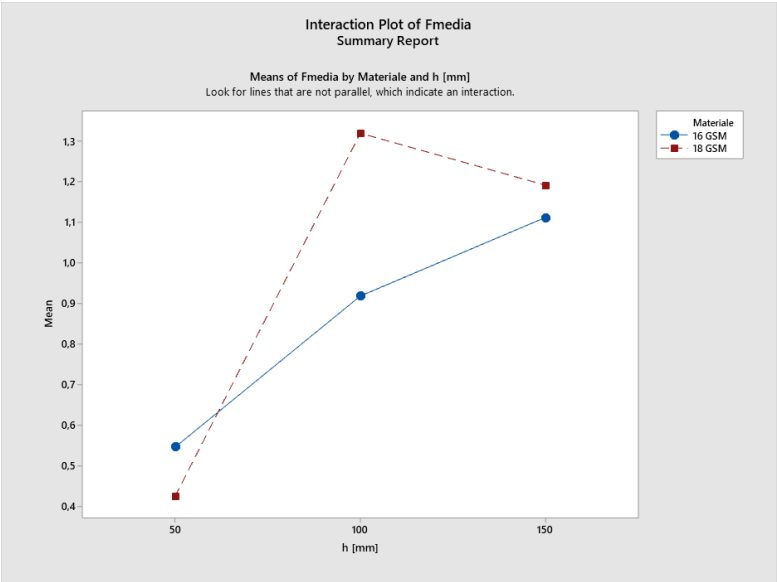
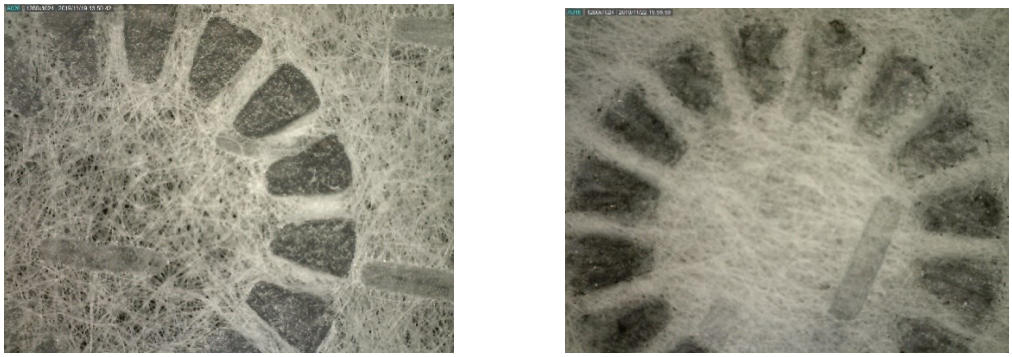



**Figura 5.26**: Andamento della Fmedia al variare del materiale e dell'altezza di caduta.

Dal grafico definito si possono evincere i seguenti aspetti:

- Ad un'altezza di caduta pari a 50 mm il materiale con grammatura più bassa tende a saldarsi meglio rispetto a quello a grammatura più elevata. Tale aspetto è dovuto al fatto che, come visto dalle micrografie effettuate, in tali condizioni la saldatura sul 18 GSM è molto meno definita rispetto a quella sul 16. (Fig. 5.27 a, b)



a) b)

**Figura 5.27**: Confronto tra saldatura a h=50 mm e massa singola a 16 GSM a) e 18 GSM b)

- Ad h=100 mm il 18 GSM determina una giunzione decisamente migliore rispetto a quella con materiale a bassa grammatura.

- Alla quota di caduta più alta, sebbene per entrambi i materiali ci sia una perdita di qualità a causa delle lacerazioni, permane il fatto che il 18 GSM generi una saldatura migliore.

Alla luce dei risultati ottenuti, si può affermare che:

- Per poter saldare correttamente un materiale più grammato è necessario un livello di forza più alto.
- All'aumentare della grammatura del tessuto la qualità della saldatura tende ad aumentare.

### 5.2.2.4 Prove di saldatura al variare della temperatura

Per valutare l'influenza della temperatura sulla qualità del giunto saldato, sono stati realizzati ulteriori test di saldatura al variare di tale grandezza. Queste prove, eseguite con l'utilizzo del contro saldante riscaldabile progettato, sono state svolte considerando come unico materiale il non woven 18 GSM.

Definendo come temperature di riferimento T1= 80 °C e T2= 140 °C, i casi analizzati sono stati i seguenti: (Tab. 5.28)

| Run | Massa | Materiale | Punzone | h [mm] | T |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | m1 | 18 GSM | 4 | 50 | 80 |
| 2 | m1 | 18 GSM | 4 | 50 | 80 |
| 3 | m1 | 18 GSM | 4 | 50 | 80 |
| 4 | m1 | 18 GSM | 4 | 50 | 80 |
| 5 | m1+m2 | 18 GSM | 4 | 50 | 80 |
| 6 | m1+m2 | 18 GSM | 4 | 50 | 80 |
| 7 | m1+m2 | 18 GSM | 4 | 50 | 80 |
| 8 | m1+m2 | 18 GSM | 4 | 50 | 80 |
| 9 | m1 | 18 GSM | 4 | 100 | 80 |
| 10 | m1 | 18 GSM | 4 | 100 | 80 |
| 11 | m1 | 18 GSM | 4 | 100 | 80 |
| 12 | m1 | 18 GSM | 4 | 100 | 80 |
| 13 | m1+m2 | 18 GSM | 4 | 100 | 80 |
| 14 | m1+m2 | 18 GSM | 4 | 100 | 80 |
| 15 | m1+m2 | 18 GSM | 4 | 100 | 80 |
| 16 | m1+m2 | 18 GSM | 4 | 100 | 80 |
| 17 | m1 | 18 GSM | 4 | 50 | 140 |
| 18 | m1 | 18 GSM | 4 | 50 | 140 |
| 19 | m1 | 18 GSM | 4 | 50 | 140 |
| 20 | m1 | 18 GSM | 4 | 50 | 140 |
| 21 | m1+m2 | 18 GSM | 4 | 50 | 140 |
| 22 | m1+m2 | 18 GSM | 4 | 50 | 140 |
| 23 | m1+m2 | 18 GSM | 4 | 50 | 140 |
| 24 | m1+m2 | 18 GSM | 4 | 50 | 140 |

| Run | Massa | Materiale | Punzone | h [mm] | T |
|---|---|---|---|---|---|
| 26 | m1 | 18 GSM | 4 | 100 | 140 |
| 27 | m1 | 18 GSM | 4 | 100 | 140 |
| 28 | m1 | 18 GSM | 4 | 100 | 140 |
| 29 | m1 | 18 GSM | 4 | 100 | 140 |
| 30 | m1+m2 | 18 GSM | 4 | 100 | 140 |
| 31 | m1+m2 | 18 GSM | 4 | 100 | 140 |
| 32 | m1+m2 | 18 GSM | 4 | 100 | 140 |
| 33 | m1+m2 | 18 GSM | 4 | 100 | 140 |
| 34 | m1 | 18 GSM | 5 | 50 | 140 |
| 35 | m1 | 18 GSM | 5 | 50 | 140 |
| 36 | m1 | 18 GSM | 5 | 50 | 140 |
| 37 | m1 | 18 GSM | 5 | 50 | 140 |
| 38 | m1+m2 | 18 GSM | 5 | 50 | 140 |
| 39 | m1+m2 | 18 GSM | 5 | 50 | 140 |
| 40 | m1+m2 | 18 GSM | 5 | 50 | 140 |
| 41 | m1+m2 | 18 GSM | 5 | 50 | 140 |
| 42 | m1 | 18 GSM | 5 | 100 | 140 |
| 43 | m1 | 18 GSM | 5 | 100 | 140 |
| 44 | m1 | 18 GSM | 5 | 100 | 140 |
| 45 | m1 | 18 GSM | 5 | 100 | 140 |
| 46 | m1+m2 | 18 GSM | 5 | 100 | 140 |
| 47 | m1+m2 | 18 GSM | 5 | 100 | 140 |
| 48 | m1+m2 | 18 GSM | 5 | 100 | 140 |
| 49 | m1+m2 | 18 GSM | 5 | 100 | 140 |

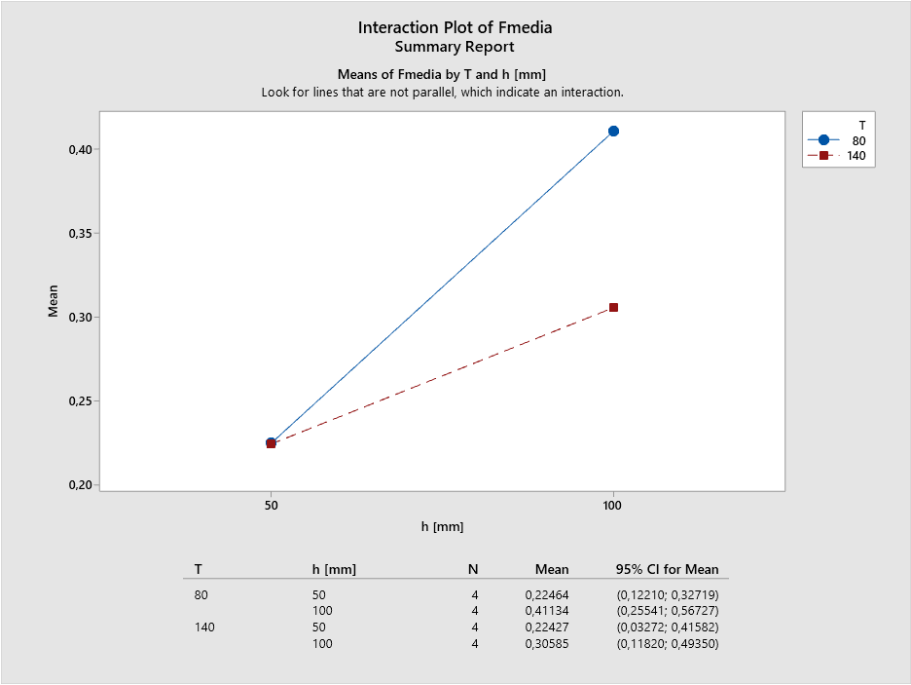
**Tabella 5.28**: casi studiati

Come è possibile osservare dalle tabelle, stavolta, gli unici due punzoni considerati sono stati: quello con larghezza 0.5 mm e quello con larghezza 0.8 m.

Per poter raggiungere le temperature stabilite, come già detto in precedenza, all'interno del contro saldante sono state inserite sia due resistenze, sia una sonda con funzione di termostato.

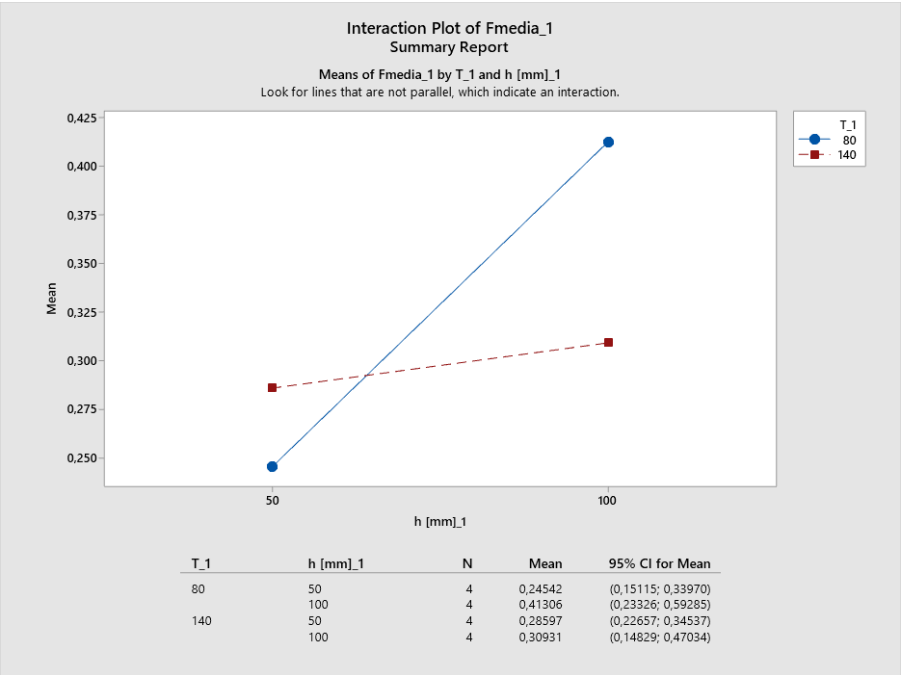
A seguito della realizzazione dei peel test anche per questi campioni, gli andamenti ottenuti sono stati:

- Andamento della forza media con punzone 4 al variare dell'altezza e della temperatura a parità di massa singola (Fig. 5.30 a)
- Andamento della forza media con punzone 4 al variare dell'altezza e della temperatura a parità di massa doppia (Fig. 5.30 b)
- Andamento della forza media con punzone 5 al variare dell'altezza e della massa a parità di T=140 °C (Fig. 5.29 c)



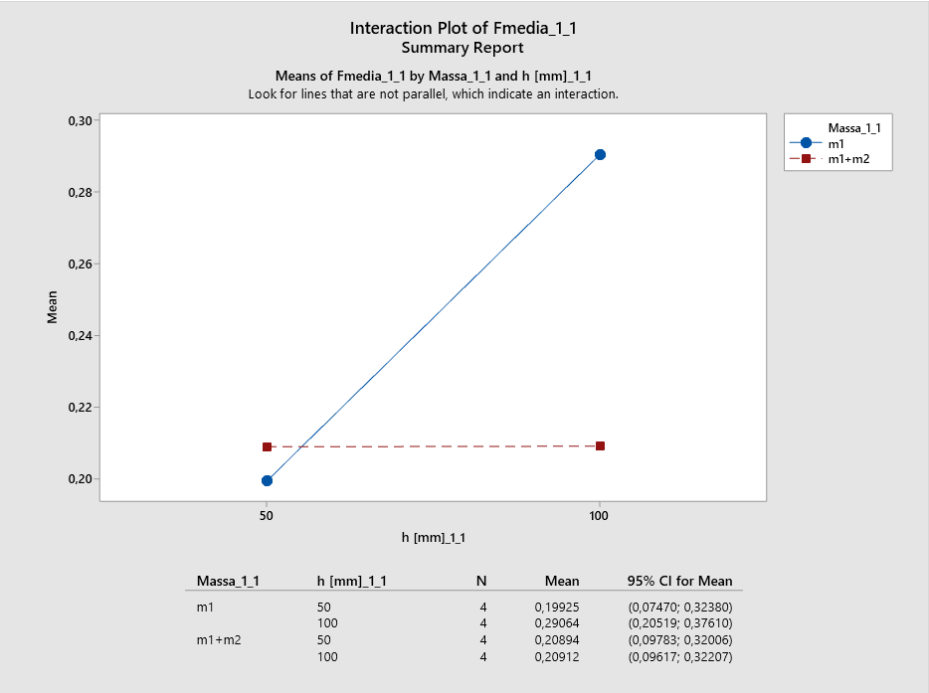

| T | h [mm] | N | Mean | 95% CI for Mean |
|---|---|---|---|---|
| 80 | 50 | 4 | 0,22464 | (0,12210; 0,32719) |
| | 100 | 4 | 0,41134 | (0,25541; 0,56727) |
| 140 | 50 | 4 | 0,22427 | (0,03272; 0,41582) |
| | 100 | 4 | 0,30585 | (0,11820; 0,49350) |

a)




| T_1 | h [mm]_1 | N | Mean | 95% CI for Mean |
|---|---|---|---|---|
| 80 | 50 | 4 | 0,24542 | (0,15115; 0,33970) |
| | 100 | 4 | 0,41306 | (0,23326; 0,59285) |
| 140 | 50 | 4 | 0,28597 | (0,22657; 0,34537) |
| | 100 | 4 | 0,30931 | (0,14829; 0,47034) |

b)




| Massa_1_1 | h [mm]_1_1 | N | Mean | 95% CI for Mean |
|---|---|---|---|---|
| m1 | 50 | 4 | 0,19925 | (0,07470; 0,32380) |
| | 100 | 4 | 0,29064 | (0,20519; 0,37610) |
| m1+m2 | 50 | 4 | 0,20894 | (0,09783; 0,32006) |
| | 100 | 4 | 0,20912 | (0,09617; 0,32207) |

c)

**Figura 5.29**: andamenti della Fmedia al variare dei parametri di processo.

Dai grafici precedenti è stato possibile definire che:

- La saldatura definita con il punzone 4 a massa singola tende a crescere con l'altezza e a decrescere all'aumentare della temperatura. Quest'ultimo aspetto è dovuto al fatto che raggiunti i 140 °C il materiale tende a rompersi. (Fig.5.30)

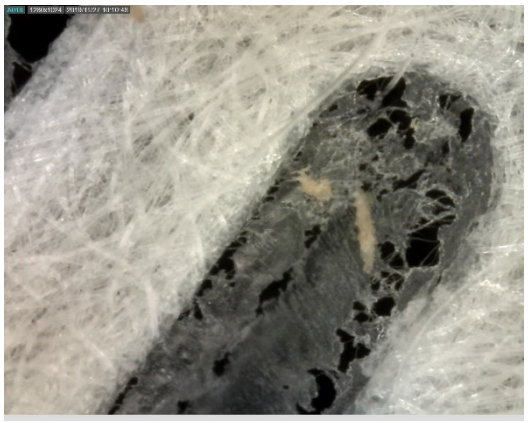


**Figura 5.30**: Micrografia del giunto saldato lacerato

- La saldatura definita con il punzone 4 a massa doppia tende a crescere con l'altezza e a decrescere all'aumentare della temperatura (a parte per h=50 mm)
- L'andamento della forza media per il punzone 5 a 140 °C tende ad essere:
  - Crescente al variare delle altezze a parità di massa singola;
  - Costante al variare delle altezze a parità di massa doppia.

### 5.2.2.5 Confronto tra prove di saldatura a temperature differenti

A partire dai risultati ottenuti, è stato possibile effettuare un confronto diretto tra la qualità delle saldature a T ambiente e quelle realizzate all'aumentare di temperatura.
Prendendo in considerazione solo i casi con il punzone 4, quanto ottenuto è stato: (Fig. 5.31)

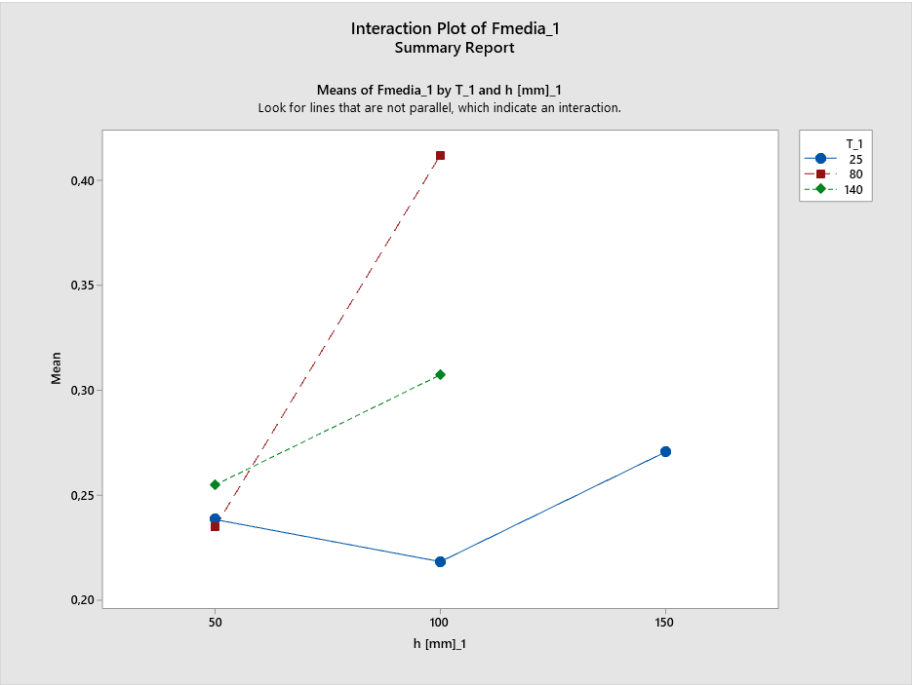



**Figura 5.31**: Andamento Fmedia con punzone 4 al variare dell'altezza e della temperatura

Come visibile dall'immagine precedente, i risultati ottenuti sono stati:

- Incrementando la temperatura da 25 a 80 °C si ha un aumento notevole della qualità della saldatura. (ad h=100 mm)
- Andando ad una temperatura di 140 °C, nonostante si mantenga il beneficio rispetto al caso a T ambiente, rispetto alla temperatura intermedia c'è una perdita di qualità. Tale fenomeno è dovuto all'evidente rottura che si genera nel materiale quando la grandezza in esame è troppo elevata.
- Con l'apporto della temperatura la perdita di qualità del giunto verificata ad un'altezza di 100 mm tende a scomparire. Ciò significa che con la temperatura il punzone 4 tende a lavorare molto meglio.

In termini generali si può affermare che la temperatura determina sul processo di saldatura un effetto decisamente benefico. Un aumento però troppo elevato di tale parametro tende a ridurre i potenziali vantaggi ottenibili.

### 5.2.3 Osservazione del comportamento del materiale all'impatto tramite uso del quarzo.

L'ultimo test realizzato è stato quello con il quarzo. Tale prova, definita allo scopo di comprendere come si comporta il materiale durante l'impatto, ha previsto la ripresa della zona d'interesse tramite l'ausilio dell'i-speed camera.

Sfruttando il sistema di specchi insito nel contro saldante precedentemente progettato (Fig. 5.32), ciò che si voleva osservare era se le fibre polimeriche presenti in prossimità del cordone di saldatura riuscissero effettivamente a spostarsi prima di fondere o viceversa.

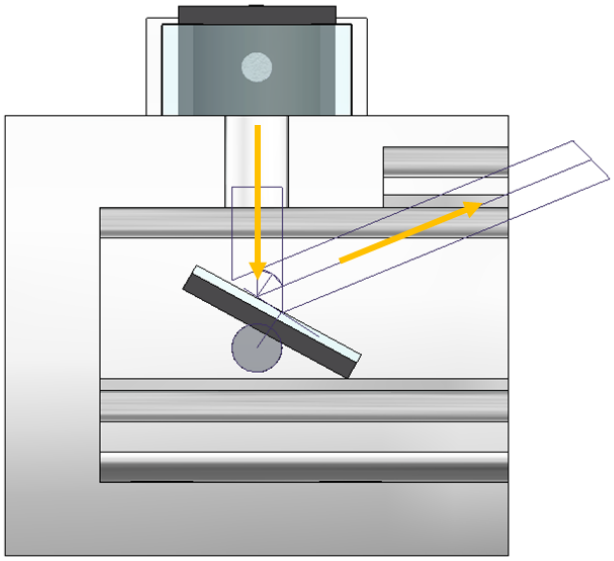


**Figura 5.32**: sezione contro saldante per osservazioni con il quarzo

La prima attività svolta è stata quella di tarare la videocamera, utilizzata con un'acquisizione a 50000 frame, tramite l'uso dei tondi in lexan. Il ricorso a tale materiale, sebbene deformabile, è stato necessario, in quanto, essendo i contro saldanti in quarzo molto costosi, ne sono state acquistate solo piccole quantità. Una volta centrato l'obiettivo della camera sulla zona d'interesse, sono stati eseguiti i test sul quarzo, al variare sia delle massa che dell'altezza di caduta.

Nonostante l'ottima funzionalità dell'attrezzatura e la capacità del quarzo di resistere, pur rompendosi in maniera localizzata, purtroppo il sistema di acquisizione utilizzato non

presenta una risoluzione e uno zoom sufficientemente elevati da poter riprendere un fenomeno così veloce.

Per uno sviluppo futuro di tale analisi, una possibilità è quella di cercare di riprendere il fenomeno tramite un sistema decisamente più preciso, capace di fornire una visione del materiale a livello microscopico.

# Conclusioni

L'obiettivo del seguente lavoro di tesi è stato quello di analizzare in maniera dettagliata il processo di saldatura meccanica e termomeccanica tra film polimerici.

Tale studio, effettuato dapprima tramite simulazioni e poi con la conduzione di prove sperimentali, ha permesso di valutare sia qual è la meccanica insita all'interno del processo, sia l'influenza dei vari parametri sulla qualità della saldatura.

A partire dalle attività realizzate, i principali risultati ottenuti sono stati:

Dalle simulazioni:

- Una saldatura con pattern a geometria più piccola tende a generare inizialmente un impatto meno intenso, aspetto vantaggioso in quanto si ha minor probabilità di rompere il materiale. Ciò è dovuto principalmente alla maggiore deformazione del pin.
- A parità di condizioni al contorno, i pin piccoli saldano di più rispetto a quelli grandi in quanto la pressione che genera la saldatura risulta maggiore. Questo significa che utilizzando pin di area più piccola si riesce ad effettuare una saldatura di buona qualità, con forze di spinta e interferenza minori rispetto ai pin con maggiore superficie di contatto.

Dai test sperimentali sulla saldatura lineare si è visto che:

- All'aumentare del carico applicato in generale la saldatura tende a migliorare. Quando però tale carico supera un certo valore di soglia, allora il materiale si rompe e la qualità della saldatura decresce.

  Segue una tabella riepilogativa dei best setting di ciascun punzone e la relativa forza media necessaria alla rottura del giunto. (Tab. 6.1)

| Best setting | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Punzone | Massa | Materiale | h [mm] | T [°C] | Fmed [N] |
| 1 | m1 | 16 GSM | 100 | 25 | 1.505674 |
| 2 | m1 | 18 GSM | 100 | 25 | 1.766821 |
| 3 | m1 | 18 GSM | 100 | 25 | 0.47021 |
| 4 | m1+m2 | 18 GSM | 150 | 25 | 0.407901 |
| 5 | m1+m2 | 18 GSM | 150 | 25 | 0.309158 |

**Tabella 6.1**: Tabella riepilogativa dei best setting

- All'incrementare della temperatura la qualità della saldatura aumenta. Se però, anche in questo caso, si supera una certa soglia, il materiale si lacera e la qualità della saldatura si riduce.

  Segue una tabella dei best setting per i punzoni 4 e 5 considerando anche i casi con incremento della temperatura. (Tab. 6.2)

| Best setting | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Punzone | Massa | Materiale | h [mm] | T [°C] | Fmed [N] |
| 4 | m1 | 18 GSM | 100 | 80 | 0.545666 |
| 5 | m1 | 18 GSM | 100 | 140 | 0.359757 |

**Tabella 6.2**: Tabella riepilogativa dei best setting con la temperatura

  Come si evince dalla tabella, per il punzone 4 la temperatura genera un incremento della forza media, rispetto ai best setting precedenti, pari al 34%, mentre per il punzone 5 del 16%.

- Dall'analisi sulla saldatura a diversi materiali sembrerebbe che all'aumentare della grammatura del materiale la saldatura migliori, sebbene in generale il carico necessario per un materiale più denso risulti più alto.

Comparazione simulazioni VS test sperimentali

- Al variare del pattern di saldatura, si è visto che tanto più piccola è l'area di contatto tanto più la qualità della saldatura è alta.
- I picchi e i tempi misurati con la cella di carico e le simulazioni coincidono.
- Il pin con larghezza 0.5 mm è quello che salda meglio, sia secondo le simulazioni che in base ai risultati dei test sperimentali.

# Bibliografia

[1] http://plasticol.it/saldatura-ad-ultrasuoni-delle-materie-plastiche/

[2] https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/597252

[3] S. Kalpakjian, S. R. Schmid ,Tecnologia Meccanica Quinta edizione.

[4] P.-G. de Gennes, J. Chern. Phys., 55,572 (1971).

[5]http://www.andreafavaliing.altervista.org/Documents/SINTESI_DI_MECCANISMI_A_CAMMA_CON_ECCENTRICITA__VARIABILE.pdf