



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale INGEGNERIA MECCANICA

PROCESSO DI FORMATURA INCREMENTALE: SVILUPPI E TREND

INCREMENTAL FORMING PROCESS: DEVELOPMENTS AND TRENDS

Relatore: Chiar.mo

Prof. Ing. **ARCHIMEDE FORCELLESE**

Tesi di Laurea di:

VENERA PIETRINI

A.A. 2023 / 2024

*Vorrei innanzitutto ringraziare il Prof. Ing. Archimede Forcellese,
mio relatore, per l'incoraggiamento, il supporto, la disponibilità e
la professionalità dimostratami.*

*Sono pochi i traguardi che tenacia e perizia non possono raggiungere;
le grandi conquiste non si realizzano con la forza, ma con la perseveranza.”*
SAMUEL JOHNSON

INDICE

Sommario	1
Definizioni e storia.....	3
Caratteristiche principali	8
Capitolo 1: Introduzione.....	11
1.2 Ambito ed obiettivo della tesi	16
Capitolo 2: Stato dell'arte.....	19
2.1 Metodo di formatura.....	20
2.2 Spinning	29
2.3 Two sided incremental forming	34
2.4 Roller hemming	37
2.5 Piegatura delle lamiere.....	39
2.6 Stato tensionale	41
2.7 Teoria delle piastre.....	44
2.8 Teoria delle piastre inflesse.....	44
Capitolo 3: Apparato sperimentale.....	52
Capitolo 4: Realizzazione del processo	60
4.1 Approccio metodologico.....	60
Capitolo 5: Conclusioni.....	71
Bibliografia	76

*A chi ha attraversato il dolore
oltre i confini dell'esistenza.
A chi nella sofferenza ha trovato
la via verso la luce.
A chi c'è sempre stato.
A chi se n'è andato.
A chi ha creduto in me fin dall'inizio ...
e fino alla fine.
A chi mi ha spronato a puntare in alto e
a non mollare mai.*

Sommario

Le tecnologie di lavorazione delle lamiere metalliche rivestono un ruolo chiave nell'industria odierna in quanto trovano applicazione nei più diversi settori, come ad esempio quelli altamente specializzati quali il biomedicale, l'aerospaziale, l'automobilistico, metalmeccanico come elettrodomestico, ecc...

Le esigenze di un mercato sempre più veloce verso il cambiamento rendono necessarie determinate scelte in ambito tecnologico come, ad esempio, l'impiego di processi snelli per realizzare determinati componenti meccanici.

Pertanto si presenta la necessità di produrre componenti metallici su scala industriale, **minimizzando i costi in termini di attrezzature, manodopera e tempo**, tali da imporre lo studio di tecnologie innovative rispetto a quelle tradizionali.

Gli ultimi decenni pertanto hanno visto un notevole interesse per i processi di formatura flessibili.

La formatura incrementale della lamiera, in generale, e la **formatura incrementale a punto singolo (SPIF)**, in particolare, hanno attraversato un periodo di sviluppo intensivo con crescente attenzione da parte degli istituti di ricerca in tutto il mondo.

La formatura incrementale a punto singolo (SPIF) è stata oggetto di una ricerca intensiva, con una crescente comprensione dei meccanismi di formatura e delle capacità di processo come risultato.

Il risultato di questi studi è un significativo progresso nella comprensione dei meccanismi di formatura delle lamiere e delle opportunità, nonché delle limitazioni, associate a questa categoria di processi di formatura flessibili fornendo una soluzione in termini di processo di produzione rapida e di piccole serie di parti o di prototipi.

Inoltre, gli sforzi di progettazione creativa del processo hanno migliorato le capacità del procedimento e i metodi di pianificazione del processo stesso, inoltre anche le capacità di simulazione si sono evolute in maniera sostanziale.

Tra le tecniche di formatura flessibili, come detto, una che ha suscitato notevole interesse è la formatura incrementale a punto singolo (SPIF), dove un **foglio di lamiera piano viene deformato in modo incrementale nella forma desiderata mediante**

l'azione di un utensile che segue un percorso definito conforme alla geometria del pezzo finale che si vuole realizzare.

La ricerca sullo SPIF negli ultimi decenni si è concentrata sulla definizione dei limiti di questo processo, sulla comprensione della meccanica della deformazione e del comportamento del materiale e ridurre i limiti del processo utilizzando varie strategie.

In questo caso il processo di formatura incrementale della lamiera risulta essere una valida alternativa ai processi che prevedono la deformazione di quest'ultima in un singolo step.

Il processo di formatura incrementale si rivela competitivo rispetto alle altre lavorazioni dei materiali metallici per la produzione di piccoli lotti, per quanto riguarda il settore aerospaziale, biomedicale, metalmeccanico e automotive.

La famiglia dei processi incrementali prevede la deformazione della lamiera tramite il movimento di utensili gestito da una macchina a controllo numerico (CNC) o robot, per questa ragione si possono realizzare geometrie complesse a seguito di differenti percorsi degli utensili senza l'impiego di numerosi, e soprattutto costosi, stampi.

La formatura incrementale multi-step permette di limitare notevolmente le forze in gioco rispetto al caso a singolo step e, inoltre, permette di avere un maggior controllo sull'andamento della deformazione del materiale stesso limitando al massimo la formazione di difetti sul prodotto finito.

La macchina profilatrice permette di eseguire vari prodotti finiti di diverse forme mediante la movimentazione lungo gli assi X, Y e Z degli utensili, grazie ai quali viene impressa sulla lamiera metallica di partenza una deformazione localizzata.

Inoltre l'ottimizzazione del percorso degli utensili permette la realizzazione di componenti dalla geometria complessa, caratterizzati da una successione di varie pieghe anche con caratteristiche differenti.

Definizioni e storia

Il nome formatura incrementale è utilizzato per una diversa varietà di processi, tutti caratterizzati dal fatto che solo una piccola parte del prodotto viene effettivamente formata e che l'area di deformazione locale si sposta sull'intero prodotto.

Questo lavoro si concentra su ciò che oggi è generalmente noto come Incremental Sheet Forming (ISF) o Asymmetric Incremental Sheet Forming (AISF), in particolare in questa parte si intende evidenziare un aspetto peculiare, concentrandosi sugli sviluppi tecnologici nel corso degli anni facendo una panoramica storica.

Si può partire citando i brevetti, poiché essi forniscono una panoramica più o meno completa, essendo pubblicazioni aperte, relativamente facili da accedere e spesso l'unica fonte di informazioni sugli sviluppi tecnologici.

Molti brevetti sono stati rilasciati in Europa, in USA ma anche, ed in particolare, in Giappone.

La storia ha dimostrato che gli sviluppi o le richieste dell'industria spesso portano a nuove evoluzioni nella lavorazione della lamiera.

Il processo di formatura incrementale è una tecnologia di formatura multi-step della lamiera senza l'utilizzo di stampi, che nasce già nel 1967 e negli ultimi anni svariati articoli specialistici hanno esaminato le sue potenzialità nell'applicazione ad un'ampia gamma di materiali.

La storia può essere divisa in tre ere, che si basano più sul carattere degli sviluppi che su una rigida divisione cronologica. Pertanto i periodi possono sovrapporsi.

- periodo 1: fino al 1996; questo periodo può essere considerato come la storia iniziale, sebbene in quel periodo siano stati rilasciati brevetti che possono essere considerati ISF, questi non hanno portato agli sviluppi attuali;
- periodo 2: 1993–2000: questo periodo ha mostrato molti sviluppi verso l'ISF 'moderno', comprese altre varianti come TPIF, ma esclusivamente nell'Estremo Oriente, e i brevetti sono stati rilasciati soprattutto in Giappone;
- periodo 3: 2000-presente: questi brevetti hanno mostrato un aumento delle attività nel mondo occidentale, dove sono stati rilasciati ulteriori brevetti.

Solo nel 2008 è stata presentata in letteratura una teoria analitica per quanto riguarda lo SPIF, permettendo di individuare, anche dal punto di vista analitico-fisico, quale sia lo stato di tensione indotto istantaneamente durante la deformazione localizzata, e di quantificare il livello di deformazione possibile in funzione, ad esempio, dell'angolo di lavorazione.

In particolare gli sforzi di ricerca sono stati orientati a risolvere, o quantomeno a ridurre, gli svantaggi del tipo di lavorazione, quali lentezza e la scarsa accuratezza geometrica (spesso dovuta al ritorno elastico).

Il foglio di lamiera è formato facendo seguire ad un utensile la forma richiesta nello spazio, principalmente tramite una successione di contorni "planari" o un singolo contorno "a spirale", con conseguente riduzione dello spessore della parete. L'assenza di rotazione del pezzo consente un controllo indipendente di X e Y, che consente la produzione di forme asimmetriche, da cui il nome Asymmetric Incremental Sheet Forming (AISF), sebbene la sua applicazione includa ovviamente anche forme simmetriche.

L'aspetto fondamentale è la forma finale, che è determinata dal movimento dell'utensile e non dallo stampo. Quindi il bordo grezzo viene bloccato principalmente per dargli un supporto, poiché c'è poca tendenza a tirare il bordo verso l'interno.

Il grezzo può essere lasciato senza ulteriore supporto (Single Point Incremental Forming, SPIF), oppure può esserci un semplice supporto o una matrice parziale o completa (Two-Point Incremental Forming, TPIF), quest'ultima principalmente per aiutare nella creazione di forme complesse.

In ISF è importante il movimento relativo tra utensile e foglio di lamiera piana, quale si muove e quale è tenuto fermo.

Di conseguenza, l'ISF è definito come: una famiglia di processi di formatura di lamiere in cui la deformazione è altamente localizzata, senza assorbimento di materiale da un'area circostante e, utilizzando un pezzo grezzo completamente bloccato, la forma finale è determinata dal movimento lungo gli assi X, Y e Z dell'utensile senza la necessità di una matrice.

Ad oggi tuttavia lo SPIF, Single Point Incremental Forming, è ancora rivolto ad **applicazioni di piccoli lotti o prototipi**, soprattutto a causa di due limiti: la lentezza del processo e l'inaccuratezza geometrica.

Tuttavia lo SPIF mostra delle grandi potenzialità per applicazioni industriali sistematiche vista la **semplicità del processo**, la **necessità di macchinari semplici**, l'**assenza di stampi** e la sua intrinseca **flessibilità**, poiché la macchina può essere adattata alla produzione di prodotti diversi semplicemente cambiando le funzioni implementate per la definizione della traiettoria dell'utensile.

Di seguito l'elenco di alcuni termini spesso impiegati quando si parla di lamiera.

Matrice: è uno dei componenti della pressa piegatrice, che si interfaccia con la lamiera e presenta una forma complementare a quella del punzone, attraverso la loro interazione si ottengono le forme desiderate.(Fig.1)

Punzone: fa parte della pressa piegatrice e partecipa al processo di piegatura interfacciandosi con lamiera e matrice, in riferimento alla quale possiede una forma complementare. Il “gioco” tra matrice e punzone determina il grado di uniformità della lamiera. (Fig.1)

Premilamiera: è un componente essenziale in molte lavorazioni plastiche di lamiera (Fig.1). Il suo utilizzo è necessario laddove si voglia evitare la formazione di grinze, spesso presenti a causa di una forte anisotropia delle lamiere: questo aspetto diviene particolarmente rilevante a causa del precedente processo di laminazione con cui si ottengono le lamiere. Il premilamiera ha la funzione di bloccare la lamiera contro la matrice, evita il suo trascinamento da parte del punzone nel caso di lavorazioni di tranciatura, o ne consente il trascinamento.

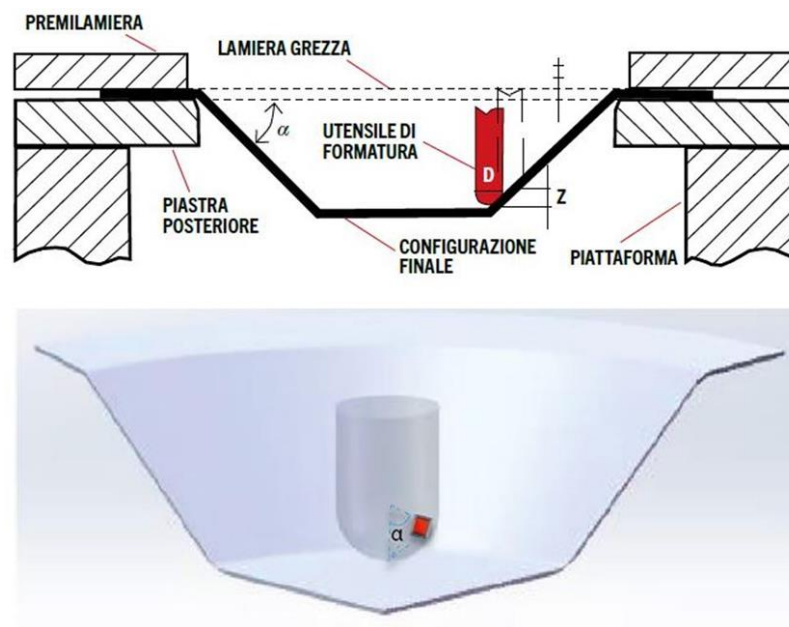


Fig. 1 Panoramica schematica dei componenti SPIF convenzionale

Ritorno elastico: fenomeno naturale derivante dalla specifica elasticità residua di un determinato materiale trattato. Assieme “fase elastica” e “fase plastica” fanno parte delle dinamiche comportamentali del cosiddetto modello elasto-plastico.

Limite di snervamento del materiale: valore per il quale la somma delle forze che producono tensione su un determinato materiale, sottoposto a deformazione, giunge al limite. Segna in pratica il limite massimo di carico che un determinato oggetto è in grado di sopportare.

Velocità di deformazione: è caratteristica dei materiali duttili e viene influenzata dalle peculiarità dello specifico materiale, dalla temperatura e dal grado di applicazione del carico. Più alta sarà la temperatura e più intenso sarà la sollecitazione, maggiore sarà la velocità di deformazione plastica della lamiera.

Raggio di curvatura: consente di misurare l'effettivo livello di deformazione della lamiera sottoposta a piegatura e, attraverso vari parametri, di definire il punto limite oltre il quale l'oggetto rischierebbe la rottura.

Lamiera: la lamiera è un metallo trasformato in pezzi sottili e piatti, solitamente mediante un processo industriale.

Gli spessori possono variare notevolmente: i fogli estremamente sottili sono considerati fogli o lamine, mentre i pezzi più spessi di 6 mm (0,25 pollici) sono considerati lamiere. La lamiera è disponibile in pezzi piatti o in strisce arrotolate.

Esistono molti metalli diversi che possono essere trasformati in lamiera, come ad esempio alluminio, ottone, rame, acciaio, stagno, nichel e titanio. Per usi decorativi, alcune lamiere importanti includono argento, oro e platino (la lamiera di platino è anche utilizzata come catalizzatore).

La formatura incrementale della lamiera ISF è fondamentalmente una lavorazione della lamiera. In questo caso, la lamiera viene formata nella forma finale tramite una serie di processi in cui è possibile effettuare piccole deformazioni incrementali.

Deformazione plastica: è la distorsione permanente che si verifica quando un materiale è sottoposto a sollecitazioni di trazione, compressione, flessione o torsione, che superano il suo limite di snervamento e ne causano l'allungamento, la compressione, la deformazione, la piegatura o la torsione. Se la sollecitazione applicata è sufficientemente elevata, la deformazione continuerà fino a quando non inizieranno a formarsi delle crepe. Queste crepe si propagano quindi fino a quando il materiale non si frattura completamente.

La deformazione plastica è una parte intrinseca della lavorazione della maggior parte dei metalli. L'obiettivo è ottenere un cambiamento di forma mediante sollecitazioni applicate esternamente, mentre allo stesso tempo si provoca un'alterazione controllata delle proprietà meccaniche del materiale.

La deformazione plastica dei metalli comporta cambiamenti macroscopici nella forma geometrica di campioni e strutture. Il modo in cui il materiale risponde alle sollecitazioni e alle deformazioni imposte è determinato dalla sua microstruttura e consistenza.

La deformazione plastica avviene prevalentemente tramite il movimento delle dislocazioni all'interno del materiale, accompagnato da un progressivo raffinamento della microstruttura visto come riduzione delle dimensioni dei sottogranì e dei grani. Questa è una conseguenza della rotazione del materiale in modo eterogeneo. L'analisi delle strutture di deformazione richiede quindi dati non solo sulla spaziatura tra le caratteristiche microstrutturali, ma anche sugli orientamenti cristallografici all'interno della struttura.

Tensione: la tensione meccanica è una forza esercitata su una unità di superficie. La tensione meccanica generica è formata da componenti normali e tangenziali alla superficie (ad esempio quando parliamo di taglio e/o torsione).

La tensione interna (o sollecitazione interna o sforzo) è una misura delle forze di contatto esercitate tra le parti interne di un corpo continuo tridimensionale attraverso la relativa superficie di separazione. Essa è definita come la forza di contatto per unità di area, cioè è il limite del rapporto tra la forza agente e l'area della superficie su cui agisce.

Essa è una quantità vettoriale e la sua unità di misura è il pascal (simbolo Pa). Nella pratica tecnica si fa uso più comunemente del megapascal (MPa) o del gigapascal (GPa).

Il concetto di tensione è basato sul concetto di continuo e riveste un ruolo fondamentale in tutta la meccanica del continuo in quanto caratterizza lo stato delle sollecitazioni interne di un corpo e, di conseguenza, il comportamento del materiale costituente il corpo, cioè come questo si deforma sotto l'azione di forze applicate.

Caratteristiche principali

Oggigiorno, molti settori dell'industria utilizzano processi convenzionali di formatura della lamiera (SMF), come stampaggio e imbutitura profonda, per produrre componenti in lamiera con elevata produttività.

I metodi convenzionali di stampaggio della lamiera vengono solitamente eseguiti in condizioni di lavorazione a freddo con l'uso di utensili chiamati stampi per stampaggio a pressione. Durante lo stampaggio, la lamiera viene deformata superando il punto di snervamento del suo materiale. L'aumento della resistenza del materiale del pezzo stampato è correlato all'incrudimento del materiale della lamiera.

A volte, i rivestimenti vengono utilizzati come ultima operazione, il che richiede che venga garantita un'adeguata rugosità della superficie del pezzo stampato.

Lo svantaggio di metodi tradizionali di SMF è la necessità di produrre utensili speciali adattati alla forma dell'elemento. L'elevato costo del processo SMF è correlato all'elevata complessità degli stampi, che richiedono l'uso di macchine utensili precise per la loro produzione e l'uso di materiali costosi per utensili. Pertanto, l'uso di metodi SMF convenzionali è adatto per la produzione su media e larga scala.

È possibile **ridurre i tempi di funzionamento e ridurre i costi di produzione** in piccoli lotti o persino nella produzione di pezzi utilizzando metodi di formatura incrementale della lamiera (ISF).

La diffusione di **macchine utensili a controllo numerico (CNC)** ha permesso lo sviluppo di metodi di profilatura, consentendo la produzione di forme non assialsimmetriche.

La necessità di una tecnologia flessibile relativamente veloce per le piccole e medie imprese ha portato allo sviluppo della tecnologia di formatura incrementale a punto singolo (SPIF), nota anche come formatura NC senza matrice, introdotta in Giappone da Matsubara [5] sulla base di un concetto di Leszak [6]. Queste possono essere eseguite sia a freddo che a temperature elevate [13,14]. L'uso di varianti moderne di SPIF consente una significativa riduzione del tempo di preparazione per la produzione di un nuovo prodotto e la riduzione dei costi di produzione.

Grazie al contatto localizzato dell'utensile con il pezzo in lavorazione con SPIF, ci sono forze di formatura inferiori e le deformazioni limite sono maggiori rispetto allo stampaggio convenzionale. Gli svantaggi sono la riduzione della precisione geometrica dei prodotti, soprattutto in punti con piccoli raggi di arrotondamento, e il verificarsi di un

significativo ritorno elastico del materiale; tuttavia, questi possono essere ridotti al minimo utilizzando algoritmi appropriati che correggono il percorso utensile.

Nel processo SPIF, l'utensile di formatura ha una forma arrotondata che deforma gradualmente una lamiera eseguendo un movimento integrato attorno al bordo bloccato del pezzo in lavorazione sagomato e un movimento di immersione.

Pertanto, una macchina utensile CNC deve essere controllata in almeno tre assi.

L'essenza del processo è il contatto localizzato dell'utensile di formatura con la lamiera e la capacità di controllare il grado di deformazione della lamiera in punti esposti a movimenti di formatura che superano i valori limite di formatura.

L'uso di **sistemi CAD/CAM integrati** consente una progettazione efficace della traiettoria dell'utensile su una macchina CNC basata su un modello computerizzato del prodotto. La velocità di rotazione dell'utensile di formatura può raggiungere i 20.000 giri/min [17]; tuttavia, nella maggior parte dei metodi SPIF, l'utensile esegue un movimento rotatorio forzato con una velocità di rotazione compresa tra 200 e 800 giri/min.

La **velocità di avanzamento dell'utensile**, simile alla velocità di rotazione, dipende dalla specificità geometrica e tecnologica del processo [18]. Un valore troppo elevato della dimensione del passo in relazione alla dimensione della punta dell'utensile può causare la formazione di scanalature cicliche nella superficie del pezzo stampato, il che aumenta la rugosità superficiale. La finitura superficiale del prodotto è influenzata anche dalla direzione di rotazione dell'utensile di formatura in relazione alla direzione del movimento dell'utensile [18].

Tra i numerosi fattori che influenzano l'applicabilità del metodo ISF e la precisione della parte formata, devono essere indicati i parametri tecnologici (tra cui le dimensioni dell'utensile, il valore della dimensione del passo, la velocità di rotazione dell'utensile, il lubrificante utilizzato), i parametri del materiale del pezzo (incrudimento, anisotropia del materiale, modulo di Young) e i fattori derivanti dal processo di progettazione (spessore della lamiera, geometria della parte finale).

Nel processo di formatura incrementale delle lamiere la superficie posteriore della lamiera che viene deformata è in effetti una superficie non supportata. Questa **mancanza di una matrice parziale o completa assicura la flessibilità del processo rispetto ai requisiti trascurabili degli utensili**, ma pone anche una sfida in termini di controllo del processo e garanzia di accuratezza.

Per piccoli lotti produttivi sono pertanto fondamentali: la riduzione del tempo di esecuzione e di changeover tra prodotti, la riduzione del costo degli utensili e l'avere linee produttive flessibili. Per questo lo ISF potrebbe porsi come valida alternativa per varie applicazioni, sia per piccoli lotti produttivi, ma teoricamente anche per applicazioni su più vasta scala.

Le caratteristiche principali di questo tipo di lavorazione delle lamiere sono:

- **Deformazione incrementale:** l'utensile di formatura si muove sulla superficie della lamiera, deformandola gradualmente, solitamente tramite un mandrino controllato da una macchina a controllo numerico, CNC, o un braccio robotico.
- **Applicazione della forza localizzata:** l'ISF applica la forza localmente, consentendo di realizzare forme più complesse senza dover ricorrere a stampi complessi e costosi.
- **Flessibilità nella progettazione:** poiché ISF non richiede stampi fissi, offre flessibilità nella produzione di prototipi, piccoli lotti o parti personalizzate con tempi di installazione rapidi.
- **Efficienza nell'utilizzo dei materiali:** può essere più efficiente nell'utilizzo dei materiali rispetto ai metodi di formatura tradizionali poiché non richiede di lavorare l'intero foglio di lamiera contemporaneamente.
- **Idoneità per forme complesse:** l'ISF è particolarmente adatto per la formatura di forme complesse e parti con spessori di parete variabili.
- **Controllo del processo:** il processo in genere prevede il controllo computerizzato, consentendo regolazioni precise e una produzione potenzialmente automatizzata.
- **Applicazioni:** ISF trova applicazione in settori quali l'aerospaziale, l'automotive, la produzione, l'architettura e l'interior design, dove geometrie complesse e produzioni in piccoli volumi sono requisiti comuni.

Capitolo 1: Introduzione

I rapidi progressi nell'uso dei **computer** nei processi di produzione di lamiere hanno portato a diversi nuovi processi di formatura flessibile che si sono evoluti dalle tecniche convenzionali.

Uno di questi processi imminenti è la formatura incrementale a punto singolo (SPIF). SPIF è un processo di produzione di parti in lamiera in cui una parte viene formata in modo graduale e incrementale da uno strumento controllato da CNC, che di solito è di forma emisferica [1], come illustrato nello schema mostrato in Fig. 1.

Il processo fornisce un grado di flessibilità superiore rispetto ad altri processi di formatura in quanto non richiede uno stampo dedicato per funzionare, che si traduce in tempi di consegna e costi di utensili ridotti. Però d'altro canto, il processo è di per sé piuttosto lento rispetto ai tradizionali processi di formatura come lo stampaggio e l'imbutitura profonda, ed inoltre non ha la capacità di formare parti con angoli di parete ripidi in un'unica passata e si scontra con limiti di formatura e precisione dimensionale limitati.

La formatura incrementale si è evoluta da una mera idea tecnica senza una reale implementazione, come illustrato in un brevetto di Leszak [2] a diverse implementazioni in hardware e software in diversi laboratori di ricerca e nell'industria.

I progressi nella metrologia dimensionale e negli strumenti di progettazione assistita da computer hanno portato a un migliore controllo della qualità del processo [10,20]. Sebbene vi siano state molte ricerche su questo processo nel corso degli anni, attualmente vi è una mancanza di standardizzazione negli approcci adottati per realizzare una produzione di parti ottimizzata.

Quindi, c'è la necessità di stabilire parametri di riferimento che consentano l'industrializzazione su larga scala di questo processo.

La lavorazione della lamiera tradizionale rappresenta un pilastro nell'industria manifatturiera, contribuendo alla creazione di una vasta gamma di prodotti che spaziano dai componenti automobilistici alle apparecchiature elettroniche.

La trasformazione della lamiera ha una lunga storia ed è globalmente apprezzata per la capacità di produrre grandi volumi riuscendo a limitare i costi per componente.

Tuttavia l'ostacolo principale, per rendere economicamente vantaggiosa una produzione, è l'ammortamento degli stampi. Questo aspetto sottolinea il fatto che uno dei limiti principali sia la flessibilità. La capacità di adattarsi rapidamente alle richieste dei clienti

o alla modifica delle specifiche è un punto chiave per il successo in questo settore.

La flessibilità è una caratteristica fondamentale per un'azienda in quanto risulta importante riuscire a rispondere tempestivamente alle richieste del cliente passando da una produzione all'altra senza incidere eccessivamente su costi e qualità.

Fortunatamente nuove soluzioni e tecniche permettono di rimanere al passo con questo sfidante contesto, permettendo di offrire risposte alle diverse esigenze dei clienti.

Le richieste dei clienti sono sempre più esigenti anche dal punto di vista qualitativo. È infatti necessario riuscire ad offrire lavorati in grado di resistere alle sollecitazioni previste e, anche dal punto di vista estetico, devono risultare adeguati ai requisiti.

Infatti, la **qualità superficiale** è una caratteristica chiave per quanto riguarda le applicazioni industriali e conseguentemente è anche un tema centrale per gli studi di formatura incrementale.

Dato che non è prevista la presenza di stampi, è possibile realizzare differenti geometrie andando a variare il percorso degli utensili senza la necessità di dover eseguire un cambio utensile o la realizzazione di costosi stampi, come nel caso dello stampaggio tradizionale.

L'obiettivo, dunque, risulta essere quello di riuscire ad implementare un **percorso utensili** che permetta di ottenere componenti che soddisfino determinati standard qualitativi senza l'impiego di tempi eccessivamente lunghi, e soprattutto risparmiando notevolmente sul materiale di scarto.

L'approccio della formatura incrementale consiste nella **deformazione progressiva** della lamiera per poter limitare notevolmente le forze di processo e per poter controllare la deformazione plastica del materiale.

La formatura incrementale della lamiera (ISF) è un processo di formatura in cui una lamiera viene modellata nella forma finale applicando progressivamente piccoli incrementi di deformazioni utilizzando uno strumento a testa semisferica o a punta arrotondata, in genere di diametro compreso tra 5 e 20 mm.

Lo strumento è montato su una **macchina CNC o un braccio robotico** e il suo movimento è controllato da un programma per computer che genera il percorso dello strumento.

Le macchine CNC funzionano controllando il movimento degli utensili di formatura con elevata precisione e flessibilità, seguono istruzioni programmate per modellare

gradualmente la lamiera nelle geometrie 3D desiderate tramite deformazione incrementale.

Il processo inizia con il software CAD/CAM, in cui i modelli digitali vengono tradotti in percorsi utensile e istruzioni di lavorazione. Durante il funzionamento, il sistema CNC posiziona con precisione l'utensile di formatura sulla lamiera, regolando velocità di avanzamento e profondità utensile in base a parametri programmati. Questa automazione garantisce una qualità costante delle parti e una precisione dimensionale nei lotti di produzione.

La tecnologia CNC in ISF consente una produzione efficiente di forme complesse, supporta la prototipazione rapida e facilita la personalizzazione adattandosi a vari materiali e spessori di lamiera.

La lamiera viene bloccata nel suo piano (il piano orizzontale) e lo strumento viene spostato sia orizzontalmente che verticalmente per seguire il contorno della parte in fase di formatura, Fig.1.1. Mentre lo strumento si muove, si incide nella lamiera di piccole quantità (in genere, 1 mm di profondità) a ogni passaggio e crea la forma desiderata.

Il processo ISF può essere condotto con o senza matrice. Il primo è chiamato formatura incrementale a due punti (TPIF) e il secondo è chiamato formatura incrementale a punto singolo (SPIF).

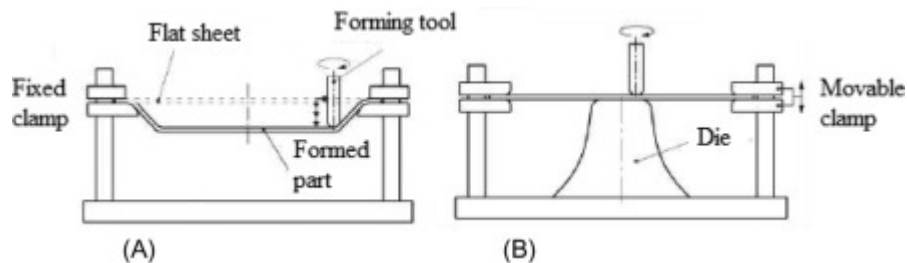


Figura 1.1. Schema dei processi di formatura incrementale a punto singolo e a due punti.

Il prelamiera mantiene in posizione la lamiera durante il processo. Il piatto di appoggio supporta la lamiera e definisce l'area di lavoro dell'utensile. Si osserva l'assenza di uno stampo che sostenga la faccia inferiore della lamiera.

Quindi i supporti rigidi per lamiera vengono utilizzati per bloccare la lamiera. Spesso questi dispositivi di bloccaggio generici consentono l'incorporazione di diversi supporti (dedicati) o piastre di supporto che aiutano a limitare la deformazione indesiderata della lamiera in una fase iniziale del processo di formatura (vedere Fig. 1 e 1.1). Un supporto rigido nelle immediate vicinanze della zona di formatura assicura una maggiore precisione e riduce il materiale di scarto associato alle aree di transizione estese tra la geometria effettiva della parte e il bordo del pezzo bloccato. La lamiera viene in genere bloccata sul supporto per

lamiera utilizzando bulloni e piastre di bloccaggio lungo il bordo della lamiera, e la coppia applicata a ciascun bullone di serraggio deve quindi essere costante e sufficientemente elevata per impedire lo scorrimento.

Molti metalli devono essere sottoposti a distensione termica prima di sbloccare la parte per ridurre la deformazione indesiderata [22]. Quando questa distensione viene eseguita utilizzando un forno, vengono solitamente imposti vincoli logistici sulle dimensioni e sul peso dell'attrezzatura di serraggio, anche per quanto riguarda le opzioni di movimentazione.

Quando il foglio di lamiera viene deformato dalla pressione dell'utensile sulla sua superficie, il materiale del foglio stesso si indurisce e la sua formabilità si riduce. Poiché ciò può causare problemi di formatura nelle fasi successive, in particolare per le leghe di alluminio, che sono meno formabili degli acciai, si suggerisce che la formabilità possa essere ripristinata in modo significativo utilizzando trattamenti termici intermedi da 30 a 120 secondi tra le fasi.

Il vantaggio dell'ISF, rispetto alla formatura convenzionale di fogli di lamiera, è che, se si utilizza SPIF, è un **processo senza matrice**. L'eliminazione della matrice riduce il costo degli utensili e aumenta i tempi di consegna per le parti a basso volume di produzione. Anche se si utilizza il processo TPIF, il costo degli utensili può essere basso, poiché la matrice può essere realizzata in materiale a basso costo, come il legno.

Tuttavia, per natura, è un processo lento e può anche esserci una perdita di precisione dimensionale, in particolare per le parti complesse.

In generale, l'ISF è un processo adatto ed economico per la costruzione di prototipi e la produzione a basso volume di parti automobilistiche,

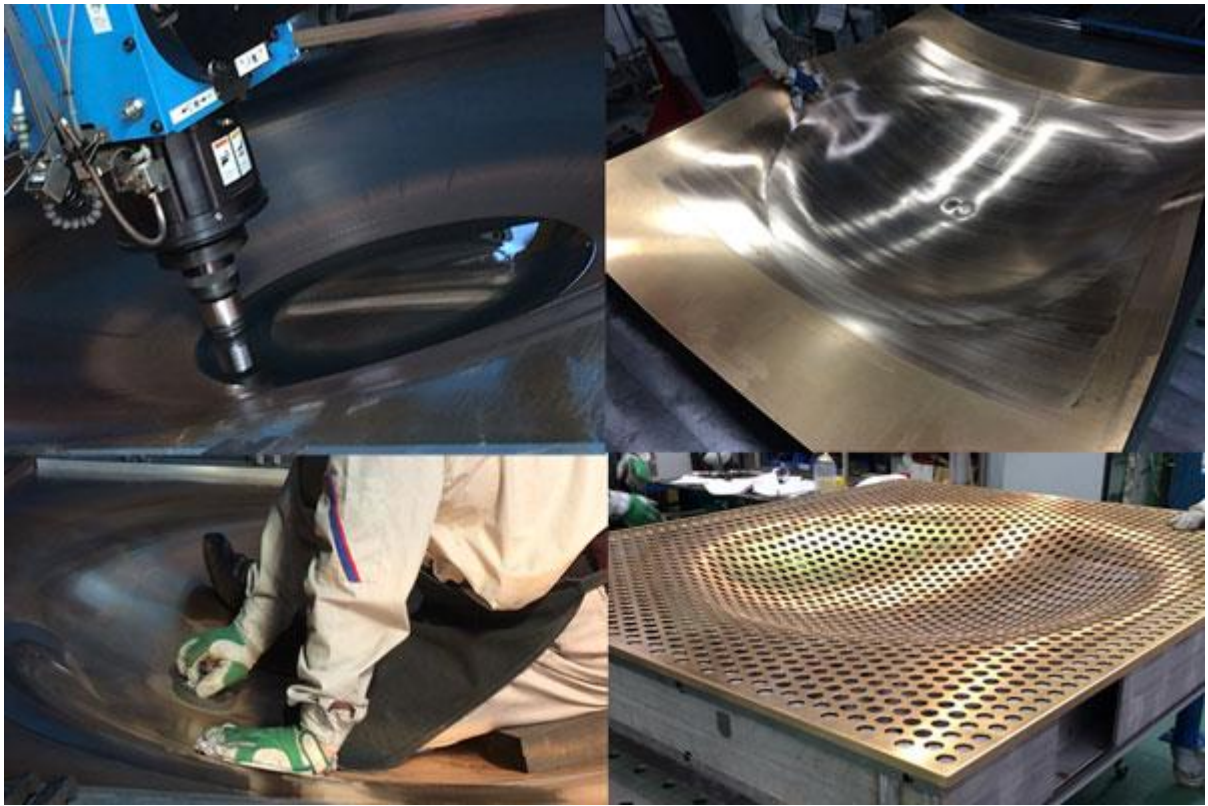


Figura 1.2. Esempi di prodotti ottenuti attraverso SPIF

1.2: Ambito ed obiettivo della tesi

Questo lavoro costituisce un'analisi sui vantaggi della formatura incrementale rispetto ai processi di formatura convenzionale di lamiera dal punto di vista delle forze di processo, della complessità del processo stesso e sotto il punto di vista dei costi.

Il presente elaborato tratta, tra i diversi aspetti, la determinazione del percorso utensile passando da misure di forza e deformazione in un processo di formatura incrementale. In questo caso, diversamente dalle lavorazioni convenzionali, la deformazione viene applicata localmente e questo fattore implica un maggior controllo sull'andamento delle forze che si manifestano durante il processo, ma anche l'insorgenza di difetti geometrici, per esempio la contropiega, che non sono frequenti applicando le lavorazioni convenzionali.

La formatura incrementale permette la realizzazione di geometrie attraverso una logica incrementale basata sull'implementazione di un percorso utensili che consente di **ottenere un profilato senza l'impiego di alcuno stampo**.

La formatura incrementale della lamiera (o ISF , nota anche come formatura a punto singolo) è una tecnica di formatura della lamiera in cui una lamiera viene formata nel pezzo finale tramite una serie di piccole deformazioni incrementali.

Poiché il processo può essere controllato interamente da processi CNC, non è richiesta alcuna matrice come nella tradizionale formatura della lamiera.

L'eliminazione della matrice nel processo di produzione riduce il costo per pezzo e diminuisce i tempi di consegna per basse tirature di produzione.

Quindi si incide ulteriormente e disegna il contorno successivo per la parte nella lamiera e continua a farlo fino a quando la parte completa non viene formata.

L'ISF può essere suddivisa in varianti a seconda del numero di punti di contatto tra utensile, lamiera e matrice (nel caso ce ne siano). La formatura incrementale a punto singolo (SPIF) e la formatura incrementale a due lati (DSIF) sono due delle varianti del processo IF.

Nel processo DSIF, vengono utilizzati due utensili per formare il foglio di lamiera su entrambi i lati, mentre il processo SPIF utilizza un solo utensile su un lato del foglio di lamiera.

Il termine formatura incrementale a punto singolo (SPIF) viene utilizzato quando il lato opposto della lamiera è supportato da una piastra frontale e formatura incrementale a due punti (TPIF) quando una matrice completa o parziale supporta la lamiera.

Nel caso delle macchine profilatrici vengono utilizzati degli utensili semplici, che vengono **movimentati lungo i tre assi principali X, Y e Z**.

Il percorso utensile risulta essere un aspetto chiave nel processo incrementale, infatti, se si vanno a confrontare le forze che si manifestano nel caso della piegatura convenzionale eseguita con un singolo step e le forze che si generano nell'ambito del processo incrementale multi-step, si nota come nel secondo caso vi sia una notevole riduzione di quest'ultime.

Allo stesso modo però, l'impiego di differenti gradi di libertà comporta la necessità di porre maggior attenzione allo studio e all'ottimizzazione del percorso utensili e nello specifico alla particolare geometria atta alla movimentazione.

L'elaborato di tesi si concentra sull'analisi del processo di formatura tramite l'impiego di una macchina per la profilatura di lamiere metalliche.

Tale processo consiste nella deformazione della lamiera in modo progressivo per poter limitare notevolmente le forze di processo e poter controllare la deformazione plastica del materiale. In genere, la lamiera viene formata da un utensile a punta rotonda, in genere di diametro compreso tra 5 e 20 mm.

L'utensile, che può essere collegato a una macchina CNC , un braccio robotico o simili, si incide nella lamiera di circa 1 mm e segue un contorno per la parte desiderata.

La configurazione della macchina non prevede la presenza di alcuno stampo, bensì la forma viene realizzata tramite lo spostamento degli utensili lungo le tre direzioni principali X, Y e Z.

Nella prima parte dell'elaborato trovano spazio le maggiori tecnologie nell'ambito della deformazione incrementale della lamiera.

Oltre al percorso utensile particolare attenzione è stata indirizzata verso l'andamento del materiale in funzione del tipo di processo scelto dato che si possono trovare elementi contraddistintivi comuni a differenti tecnologie nell'ambito dei processi di formatura incrementale della lamiera.

La macchina profilatrice presenta una ridotta velocità di movimentazione rispetto al caso della flangiatura convenzionale e quindi per questa ragione sono stati proposti una serie di confronti fra differenti percorsi utensili che prevedevano strategie multi-step.

Dalla letteratura è stato possibile ricavare un modello analitico, a partire dalla teoria delle piastre inflesse, che permettesse di ricavare le forze che si manifestano nel processo di

piega tramite l'ausilio di determinate condizioni al contorno, quali il modulo di Young E , lo spessore della lamiera e la deformazione impressa.

Possono essere realizzati una serie di profilati dalle caratteristiche geometriche più complesse per andare a dimostrare le reali potenzialità della macchina profilatrice e i notevoli miglioramenti raggiunti nell'ambito del percorso utensili.

La formatura incrementale (IF) è un processo di produzione abbastanza recente che ha un'ampia gamma di applicazioni nei seguenti settori:

- Impianto biomedico
- Automobile
- Aerospaziale
- Reattori nucleari
- Difesa

Capitolo 2: Stato dell'arte

Esistono molti studi di ricerca che si occupano della formatura di componenti realizzati in lamiera di acciaio e leghe di rame e alluminio facilmente deformabili. Questi processi non richiedono trattamenti tecnologici speciali e, pertanto, vengono solitamente eseguiti in condizioni di lavorazione a freddo.

L'SPIF dei materiali difficili da formare, che include, ad esempio, le leghe di alluminio serie 5000 e 7000, leghe di titanio e leghe di magnesio, richiede molta più attenzione. Queste leghe sono spesso considerate più difficili da formare e generalmente hanno caratteristiche di formatura meno prevedibili rispetto ad altre leghe strutturali come l'acciaio[23–26].

La formatura incrementale a punto singolo nella sua forma più elementare è caratterizzata dalla sovrapposizione continua di deformazioni locali di un foglio di lamiera fino al raggiungimento di una forma finale.

Queste deformazioni sono indotte da uno strumento relativamente piccolo che si muove lungo un percorso predefinito, descrivendo la superficie della geometria desiderata (Fig. 2.1) e alla fine si ottiene la forma di destinazione.

La natura localizzata della zona di deformazione attorno allo strumento determina basse forze di formatura rispetto ai processi di formatura di fogli di lamiera convenzionali.

I componenti hardware tipicamente utilizzati in SPIF sono illustrati nella Fig. 2.1.

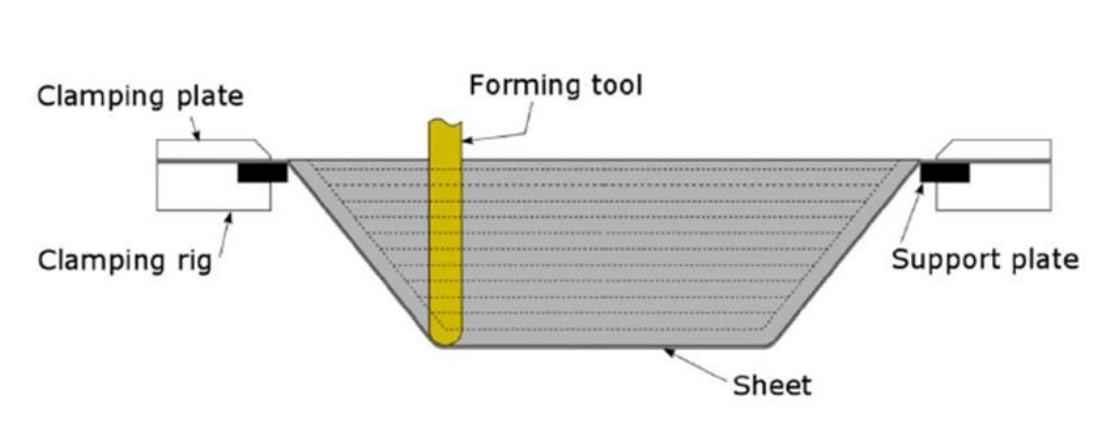


Fig. 2.1 Panoramica schematica dei componenti hardware per SPIF convenzionale

2.1. Metodi di formatura

Il processo di formatura incrementale della lamiera consiste nel modellare il componente con uno strumento con estremità sferiche che si muove lungo una traiettoria specifica utilizzando una macchina CNC o un braccio robotico [30]. Il metodo non richiede strumenti speciali e non sono necessarie matrici.

I processi di formatura della lamiera convenzionali richiedono strumenti costosi (punzone e matrice), che, per motivi economici, sono fattibili solo quando è coinvolta la produzione di massa [31,32]. Distribuire il costo del punzone e della matrice su molti prodotti riduce significativamente i costi degli utensili.

Altrimenti, in ISF, uno strumento semplice si muove su un percorso controllato con una strategia diversa per deformare progressivamente una lamiera bloccata per produrre una nuova parte [33,34].

Solo uno strumento a geometria semplice viene utilizzato nella formatura incrementale della lamiera a punto singolo (SPIF) e due strumenti indipendenti vengono utilizzati nella formatura incrementale della lamiera a due lati (DSIF), nota anche come formatura incrementale a due punti (TPIF) (Figura 1.1).

Nella formatura incrementale di fogli a punto singolo (SPIF) viene utilizzato solo uno strumento di geometria semplice, mentre nella formatura incrementale di fogli a due lati vengono utilizzati due strumenti indipendenti. La formatura incrementale a punto singolo nella sua forma più elementare è caratterizzata dalla sovrapposizione continua di deformazioni locali in un foglio di lamiera fino al raggiungimento di una forma finale. Queste deformazioni sono indotte da uno strumento relativamente piccolo che si muove lungo un percorso predefinito, descrivendo la superficie della geometria desiderata (Fig. 1) o qualsiasi percorso utensile corretto che alla fine cede alla forma di destinazione.

La natura localizzata della zona di deformazione attorno allo strumento determina basse forze di formatura rispetto ai processi di formatura di fogli convenzionali. Ciò mantiene i requisiti di resistenza del sistema di posizionamento che aziona lo strumento piuttosto modesti.

La formatura di fogli di lamiera è una categoria di processi di produzione che comportano la deformazione di fogli di materiale (solitamente metallo) utilizzando forze controllate. Il principio alla base della formatura di fogli è che il processo forma il materiale oltre il suo limite plastico, il che ne modifica la forma in modo permanente.

La proprietà che definisce la formatura di fogli di lamiera è che viene applicata a materiali sottili con una grande area superficiale. È distinta dalla formatura per deformazione di massa (ad esempio forgiatura, estrusione, laminazione) che utilizza materiali con una piccola area superficiale e un grande volume.

Le tecniche di formatura delle lamiere sono solitamente definite dal tipo di forza che viene utilizzata per deformare il materiale. Secondo lo standard globale per i processi di fabbricazione (DIN 8582) ci sono cinque categorie di forza che vengono utilizzate nella formatura massiva di lamiere:

- **Forze di compressione**, ad esempio laminazione, estrusione, forgiatura. Si noti che queste sono tutte tecniche di deformazione massiva.
- **Forze di trazione**, ad esempio stiramento, stiramento, espansione.
- **Forze combinate di compressione e trazione**, ad esempio imbutitura profonda, filatura, spogliatura.
- **Forze di flessione**, ad esempio flessione.
- **Forze di taglio**, ad esempio tranciatura, punzonatura, tranciatura.

La formatura incrementale della lamiera è un processo di formatura della lamiera senza matrice che comporta la deformazione del materiale in strati progressivi. La forza, come descritto, viene applicata al materiale utilizzando un utensile a punto singolo.

L'enorme vantaggio della formatura incrementale è che può essere conveniente anche per produzioni a basso volume. Le modifiche possono essere apportate al design del prodotto molto rapidamente e facilmente, con costi minimi.

La meccanica del processo è influenzata da molti parametri, tra cui:

- la velocità di avanzamento trasversale XY,
- la velocità di avanzamento verticale Z o il passo,

- la rotazione dello strumento (facoltativa),
- il coefficiente di attrito,
- la forma dell'utensile (raggio),
- la temperatura del foglio di lamiera

La mancanza di stampi opportunamente sagomati si riflette su un percorso utensili più complesso che, rispetto alla piega convenzionale, che vede coinvolto generalmente un punzone che va ad applicare una deformazione muovendosi lungo l'asse Z, in questo caso la deformazione viene impressa attraverso il movimento di un utensile lungo gli assi X, Y e Z.

Esistono due metodi principali per ottenere la formatura incrementale:

1. Formatura incrementale con una macchina CNC modificata

Un metodo diffuso di formatura incrementale è quello di modificare una macchina CNC per contenere una sfera a punto singolo. Questo strumento viene quindi utilizzato per applicare forza e "disegnare" la forma desiderata sul materiale in fogli.

Lo svantaggio principale di questo metodo è che limita la dimensione del pezzo finale alle dimensioni del letto della macchina CNC. Le macchine CNC con letto grande sono molto costose.

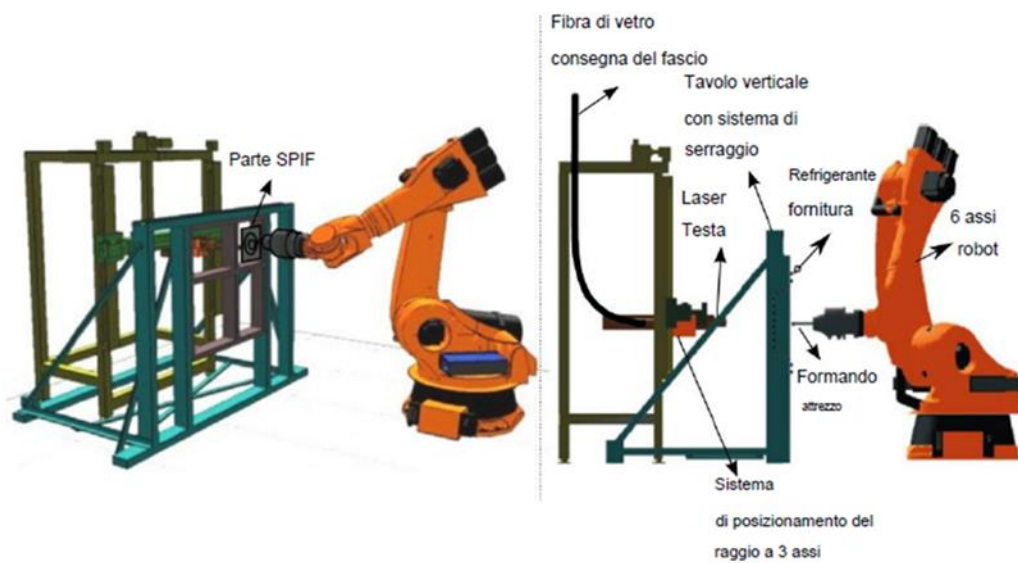
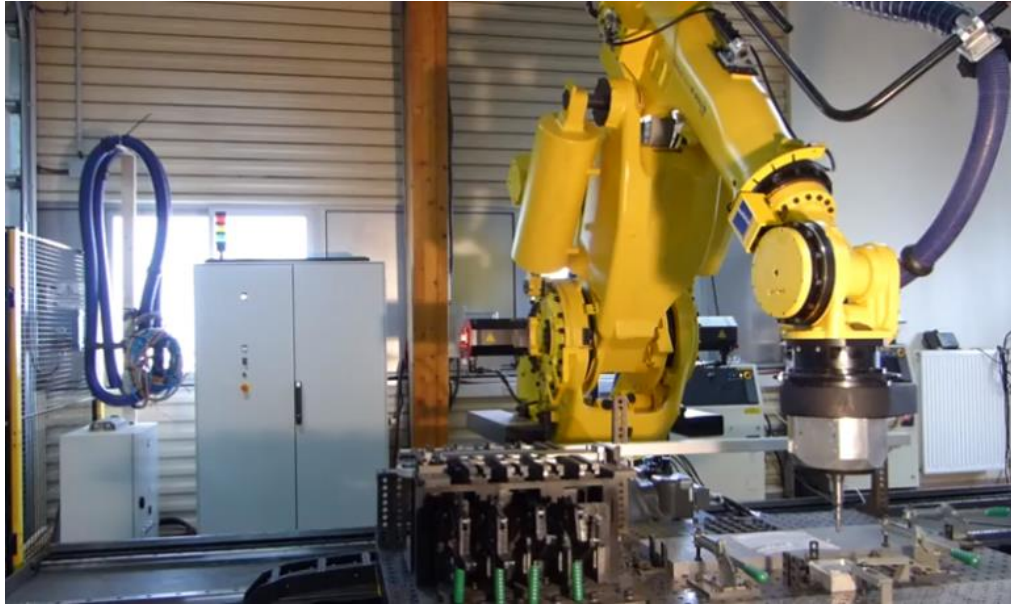
2. Formatura incrementale robotica

I progressi nella robotica hanno permesso di utilizzare i robot come uno strumento programmabile per la formatura incrementale. La formatura incrementale robotica comporta l'aggiunta di una sfera a punto singolo come effetto finale al robot. Il robot viene quindi programmato per "disegnare" la forma desiderata nel materiale.

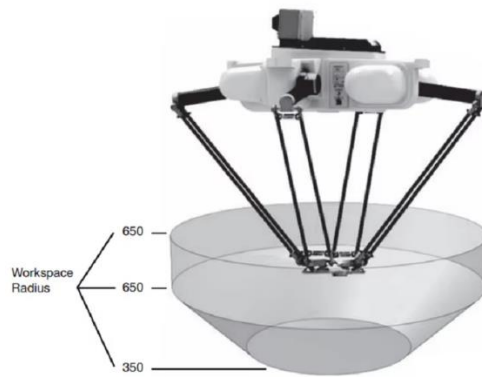
Questo è un metodo molto promettente con molti vantaggi. È più flessibile del metodo della macchina CNC, più conveniente per le parti di grandi dimensioni e facile da realizzare quando vengono utilizzati gli strumenti giusti. Poiché lo spazio di lavoro di un robot è molto più grande di quello di una macchina CNC, è possibile creare parti di grandi dimensioni con questo metodo. Ciò rende la formatura incrementale robotica una proposta molto attraente, presentando i seguenti vantaggi:

- tecniche di simulazione numerica più rapide per la previsione delle forze [8], guasti e accuratezza [9],

- una migliore accuratezza dimensionale nelle parti [10–12],
- strumenti di pianificazione dei processi assistiti da computer sotto forma di pacchetti software con algoritmi avanzati che consentono livelli più elevati di automazione [14,15].



a) seriale o a catena cinematica aperta



b) parallelo o a catena cinematica chiusa

Figura 2.2: Macchina a formatura incrementale robotica: a) seriale o a catena cinematica aperta b) parallelo o a catena cinematica chiusa

I robot utilizzati possono essere:

- **seriale o a catena cinematica aperta** è un modello di robot industriale progettato come una serie di collegamenti uniti da giunzioni, azionate da un motore che si estendono da una base a un terminale. Spesso hanno la struttura del braccio antropomorfo avente una "spalla", un "gomito", e un "polso". I robot seriali hanno solitamente sei articolazioni, poiché richiedono almeno sei gradi di libertà per posizionare un oggetto manipolato in una posizione ed un orientamento arbitrari nello spazio di lavoro del robot.
- **robot parallelo o a catena cinematica chiusa** è un sistema meccanico che utilizza dei bracci meccanici controllati da un computer per supportare una piattaforma, o "end-effector". Il robot parallelo più conosciuto è formato da sei pistoni (o attuatori) che sostengono una piattaforma mobile, fondamentale per numerose apparecchiature.

Come descritto, SPIF deforma la lamiera attraverso il movimento relativo tra utensile e foglio di lamiera, consentendo di eseguire la formatura incrementale sulla maggior parte dei sistemi di posizionamento multiasse.

I tre assi ortogonali utilizzati per la maggior parte delle macchine SPIF servono come una buona base per un'ampia varietà di parti. Tuttavia, per prevenire le collisioni, utilizzare in modo ottimale la rigidità dell'utensile e ottimizzare i parametri di processo può essere richiesto un sistema a cinque o più assi. L'aggiunta di due assi consente di orientare l'utensile in condizioni più favorevoli per la formatura.

Il movimento relativo dell'utensile rispetto al foglio di lamiera può essere ottenuto spostando l'utensile, il foglio di lamiera o una combinazione di entrambi.

Oltre alla scelta del numero di assi, la resistenza e la rigidità del sistema di posizionamento sono un fattore chiave.

In generale, SPIF ha forze di processo abbastanza limitate rispetto ai processi convenzionali a causa della piccola zona di deformazione.

Studi sperimentali [5] hanno creato un modello fattoriale per la previsione della forza: si è concluso che il materiale, le dimensioni dell'utensile, la dimensione del passo incrementale e l'angolo della parete della parte sono i principali parametri influenti.

Inoltre vari studi di diversi istituti di ricerca [6] hanno fornito una panoramica delle forze di formatura ottenute su una varietà di materiali e spessori e hanno concluso che 13 kN lungo l'asse principale dell'utensile e 6,5 kN di forza perpendicolare all'asse dell'utensile sono sufficienti per la maggior parte di materiali per la formatura delle parti rilevanti a livello industriale.

Poiché l'utensile SPIF esegue un'operazione di contornatura, i percorsi dell'utensile crescono rapidamente con l'aumento delle dimensioni della parte e rendono il processo dispendioso in termini di tempo.

Alcuni istituti di ricerca [7, 8] hanno sperimentato una variante ad alta velocità di SPIF su un tornio per la produzione di parti assialsimmetriche, mostrando che questa tecnologia non comporta alcun effetto negativo in termini di deformazione in SPIF. Inoltre, per alcuni materiali, è stato osservato un aumento della formabilità ad alte velocità di deformazione.

In questi studi, le velocità di formatura sono state aumentate dai convenzionali 2 m/min fino a estremi di 600 m/min. Ciò sembra giustificare la richiesta di macchine altamente dinamiche. Tuttavia, un aumento della velocità di formatura può influire negativamente sulla formabilità, come dimostrato da alcuni esperimenti condotti [9] su lamiere spesse 1 mm, che coprono una velocità di avanzamento da 1,5 a 12 m/min.

L'aumento della velocità di avanzamento ha ridotto la formabilità e deteriorato la finitura superficiale per alcuni materiali, come gli acciai, mentre l'alluminio sembrava essere insensibile alle variazioni della velocità di avanzamento.

Per ragioni pragmatiche, molti istituti di ricerca hanno scelto di adattare le fresatrici convenzionali come piattaforma sperimentale SPIF, dimostrando la fattibilità di queste modifiche e la facilità di adozione da parte dell'industria e delle officine meccaniche. Sebbene

rigide, queste macchine spesso non sono ottimizzate per un comportamento dinamico elevato e forze assiali elevate.

I robot articolati sono la seconda attrezzatura più utilizzata per la loro versatilità e il basso costo [10]. Tuttavia, la bassa rigidità e la precisione assoluta sono un grande svantaggio di queste piattaforme [11].

L'ultima categoria comprende macchine costruite appositamente costituite da una combinazione di assi lineari o cinematica parallela [12], principalmente la cinematica parallela fornisce una rigidità superiore e consente un comportamento dinamico elevato, ma è limitata nell'intervallo di lavoro [6].

In una variante strettamente correlata a SPIF, viene utilizzato un doppio set di utensili dinamici. Un utensile su ciascun lato del foglio di lamiera può fungere sia da utensile di formatura che da utensile di supporto. Ciò consente la formazione di forme con maggiore precisione e complessità. I requisiti hardware per queste piattaforme sono simili a quelli di SPIF, a condizione che il sistema sia raddoppiato e che i sistemi di posizionamento su entrambi i lati del foglio di lamiera siano sincronizzati introducendo l'utilizzo di due robot articolati che consentono all'utensile secondario di supportare la parte sia localmente che lungo la sua periferia. In particolare è stato introdotto un sistema che utilizza un robot come utensile primario e un dispositivo di copiatura meccanica come utensile di supporto secondario come mostrato in figura 6:

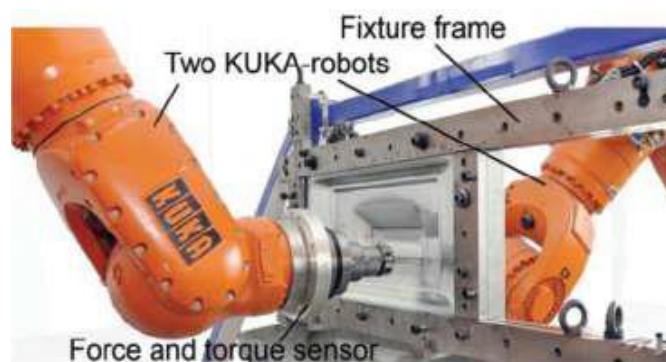


Figura 2.3. Macchina profilatrice con 2 robot

In un processo TPIF, ci sono due contatti, vale a dire, un contatto tra l'utensile di formatura e la lamiera, e l'altro contatto tra la lamiera e un elemento di supporto come una matrice o un utensile ausiliario. TPIF può essere eseguito con l'uso di una matrice parziale (Figura 7b) e una matrice completa (Figura 7c). Rispetto a SPIF (Figura 7a), l'uso di TPIF aumenta la precisione geometrica degli elementi formati. Nei metodi di formatura a due punti, c'è un movimento aggiuntivo dell'assemblaggio che fissa i bordi della lamiera sagomata

(Figura 7b,c), che si traduce in una maggiore precisione geometrica dei componenti ottenuti e consente di controllare lo spessore della parete.

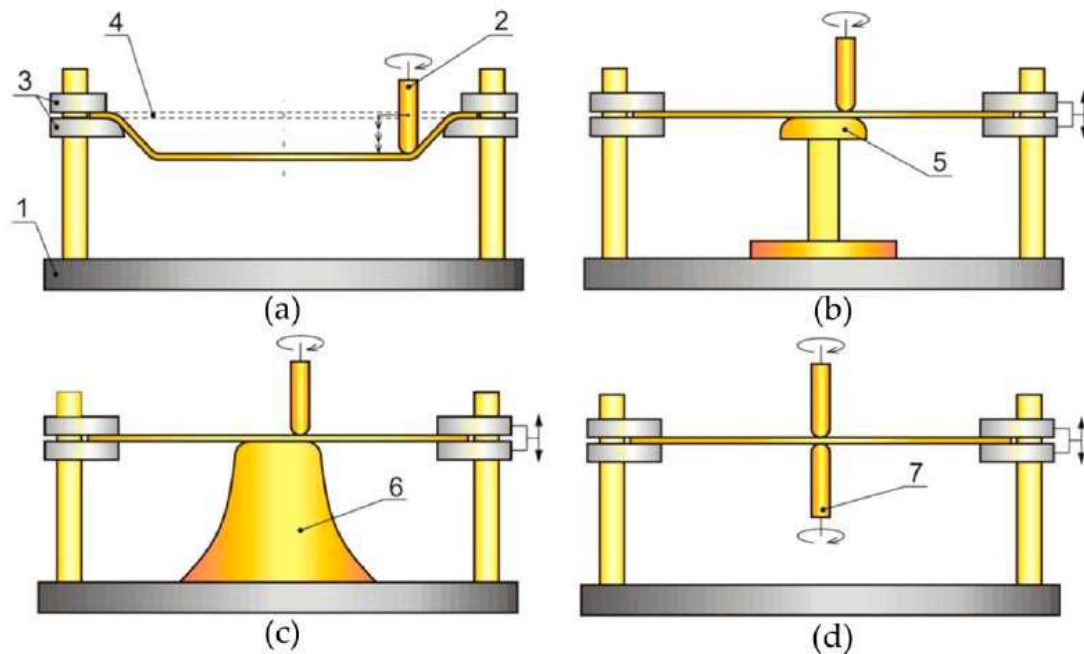


Figura 2.4. Processi di formatura incrementale: (a) SPIF, (b) TPIF con matrice parziale, (c) TPIF con matrice completa, (d) TPIF con controutensile: 1—telaio, 2—utensile di formatura, 3—dispositivo di fissaggio, 4—pezzo (posizione di partenza), 5—matrice parziale, 6—matrice completa, 7—controutensile.

In SPIF con un **controutensile**, un mandrino aggiuntivo posizionato di fronte al mandrino di formatura e spostato dallo spessore del foglio di lamiera si muove lungo una traiettoria opportunamente corretta in relazione all'utensile principale (Figura 7d). Tra i metodi menzionati, TPIF con una matrice completa è chiamato formatura incrementale positiva, mentre gli altri metodi sono chiamati formatura incrementale negativa.

Riassumendo la formatura incrementale della lamiera è una macrocategoria di lavorazioni che raggruppa dentro sé diversi processi di formatura mediante i quali si vanno ad ottenere dei componenti desiderati tramite l'implementazione di un determinato percorso utensile.

Generalmente la deformazione, in questo tipo di processi, è localizzata e quindi la distribuzione del materiale a valle dei singoli step di formatura risulta essere differente rispetto al caso convenzionale.

La tecnologia, quindi, ricade sul percorso utensili dato che non sono previsti costosi stampi, opportunamente sagomati, per la realizzazione di una predefinita geometria.

Nello specifico, successivamente verranno citati vari processi di formatura incrementale della lamiera, quali ad esempio lo spinning, il two sided incremental forming e i roller hemming, ovvero tutti processi nei quali vi è un utensile movimentato da un controllo numerico che esegue la formatura.

L'obiettivo di tale confronto è quello di andare a valutare le varie soluzioni presenti in letteratura per limitare i difetti geometrici che sono comuni a tutti questi processi incrementali attraverso definite accortezze per l'ottimizzazione del percorso utensile.

2.2 Spinning

Lo spinning è quel processo di formatura incrementale mediante il quale si riescono a creare componenti assialsimmetrici, partendo generalmente da lamiere circolari di spessore noto.

I processi ISF e Spinning sono strettamente correlati. Entrambi sono processi di formatura incrementale di fogli con aspetti in comune, ma ci sono alcune differenze fondamentali.

La lamiera viene fissata ad un mandrino rotante (Fig.2.5) e mediante l'utilizzo di uno o più rulli essa viene deformata tramite un percorso utensile predeterminato.

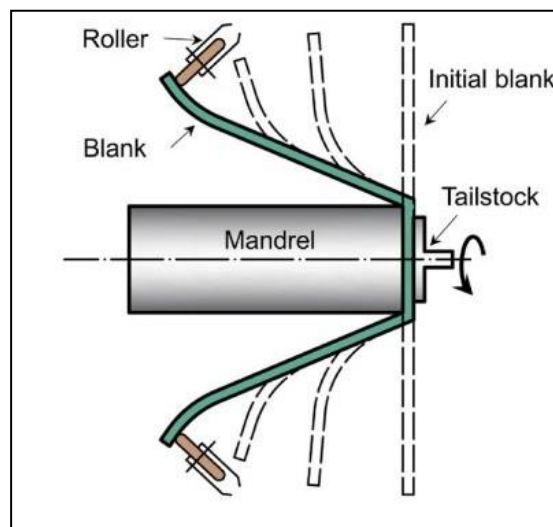


Figura 2.5: Conventional Spinning [3]

Il problema della contropiega si manifesta anche nel processo dello spinning dato che la deformazione risulta essere applicata localmente in un punto specifico, mentre la restante parte di materiale inizialmente rimane indeformata e quindi tende a modificare la piega raggiunta.

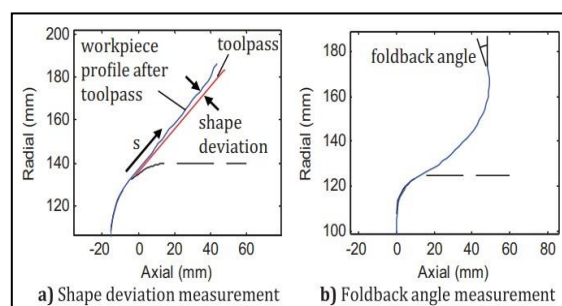


Figura 2.6: Foldback angle [4]

Andando ad analizzare la differenza fra il profilo ottenuto e il percorso utensile come funzione della distanza meridiana s , è possibile evidenziare la deviazione di forma e il foldback angle [4]. È possibile parametrizzare il percorso utensile tramite una curva quadratica di Bezier caratterizzata dai seguenti parametri principali:

- P_0 = ultimo punto di contatto fra il componente e il mandrino
- P_2 = punto più esterno del lembo deformato
- P_1 = punto intermedio fra P_0 e P_2

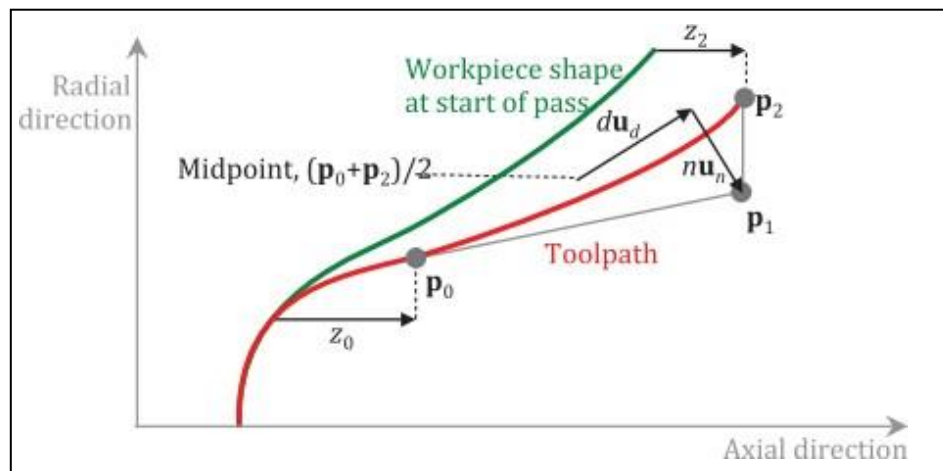


Figura 2.7: Parametrizzazione del percorso utensile [4]

Altri parametri caratterizzanti sono il numero di punti n che caratterizza la concavità o meno del percorso utensile ($n = 0$ percorso utensile lineare; più n aumenta più aumenta la concavità) e il parametro d che permette di creare un offset del centro della concavità.

Proprio l'aumento della concavità del percorso utensile e il controllo della deformazione, soprattutto nei primi step della lavorazione, permettono di controllare il foldback e quindi di limitare successive lavorazioni per la risoluzione del difetto.

Un'ulteriore configurazione possibile nel caso dello spinning risulta essere quella secondo la quale vi sono due rulli contrapposti: uno che funge da supporto e uno che esegue realmente la lavorazione sul componente precedentemente posto in rotazione.

In questo caso la deformazione viene impressa attraverso il movimento di due rulli lungo gli assi X , Y e Z . Tale movimento consiste nella traslazione orizzontale lungo l'asse Y del rullo superiore, che ha la funzione di sostegno alla piega, mentre il rullo inferiore segue una logica a gradini incrementali tramite movimenti in X e Z .

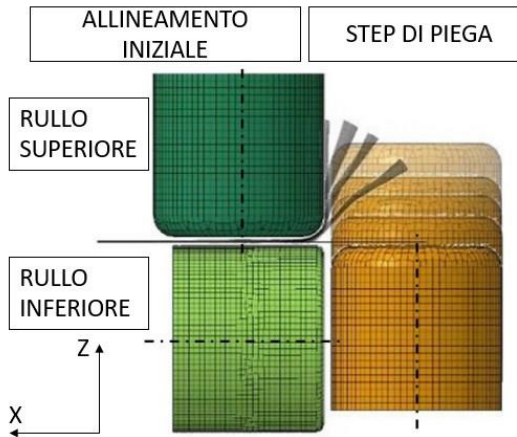


Figura 2.8: Percorso utensili

In questo caso interviene un ulteriore parametro fondamentale, ovvero la distanza d fra i due utensili.

Nello specifico in Fig. 2.9 viene proposto il confronto fra due configurazioni in cui viene fatto variare il parametro d rispetto al caso dello spinning convenzionale sopracitato.

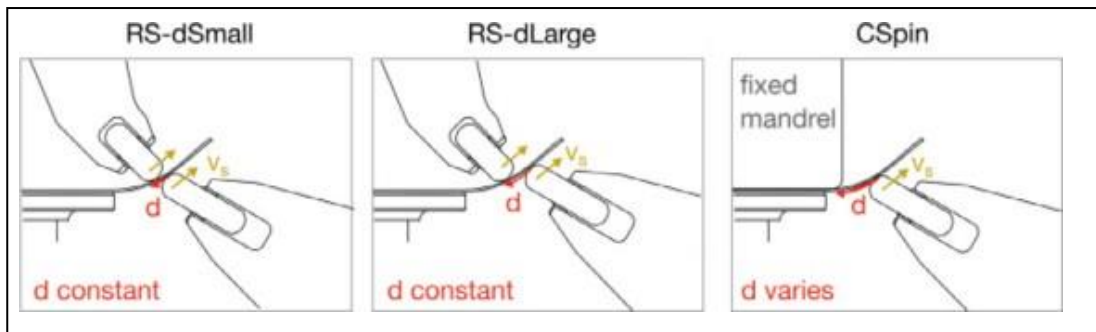


Figura 2.9: Confronto processo di spinning [5]

Nello specifico quindi si ha la possibilità di impostare i seguenti parametri:

- Angolo iniziale
- Angolo finale
- Numero di step

Il processo completo comprendente allineamento iniziale e percorso a gradini per la profilatura incrementale viene schematizzato nella seguente Fig. 2.10.

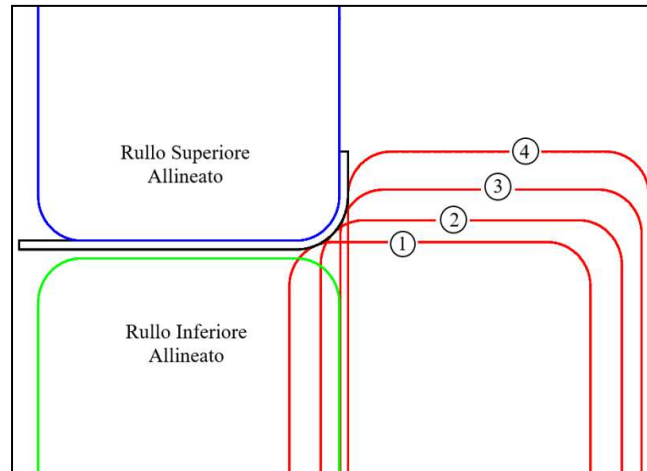


Figura 2.10: Processo di piega completo [2]

Andando a seguire tale percorso utensili la qualità del componente realizzato non risulta essere elevata per il fatto che la porzione di materiale indeformato, che attribuisce maggior rigidità al tratto di lamiera effettivamente coinvolto nella deformazione, porta il lembo più esterno, non coinvolto nella deformazione, a generare una contropiega (Fig.2.11).

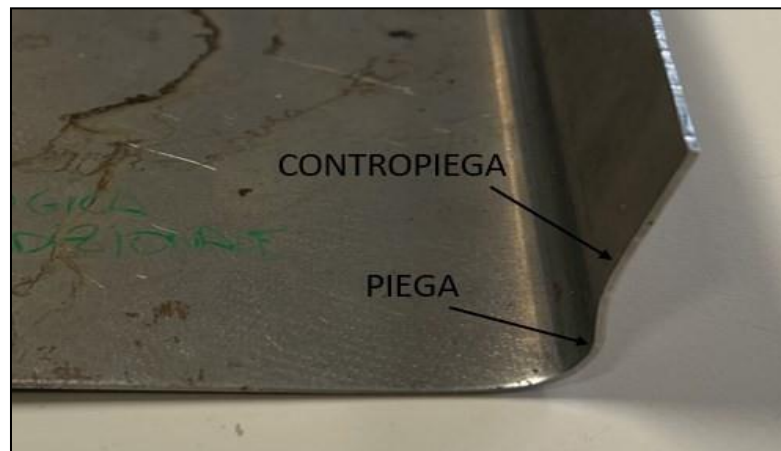


Figura 2.11: Confronto piega-contropiega a seguito del processo di profilatura

Tale criticità, oltre a non permettere la realizzazione di un profilo avente le caratteristiche geometriche desiderate, obbliga l'operatore ad eseguire una serie di step aggiuntivi per cercare di limitare tale problema.

La contropiega risulta difficile da correggere anche per il fatto che il materiale, avendo subito una piega, risulta essere incrudito e dunque sarà necessaria l'applicazione di una forza più elevata per l'esecuzione della sovra piegatura rispetto alla condizione iniziale.

La presenza della contropiega impedisce anche la realizzazione di componenti dalla geometria più complessa per il fatto che, dato i ridotti spazi d'azione degli utensili, non sono permesse ampie correzioni.

Tale difetto necessita di essere risolto anche nell'ottica di un'applicazione industriale, poiché porterebbe necessariamente all'allungamento del tempo ciclo necessario per la produzione del pezzo.

L'obiettivo è quello di realizzare un componente privo di difetti superficiali, quali ad esempio grinze, ondulazioni o orecchie, per questo motivo, anche in questo caso, il percorso utensili ricopre un ruolo fondamentale dato che influenza la distribuzione del materiale.

Nello specifico di seguito viene proposto l'andamento della distribuzione del materiale a seguito dell'applicazione di un determinato percorso utensili rispetto ad un profilo cilindrico a 90° (Fig.2.12).

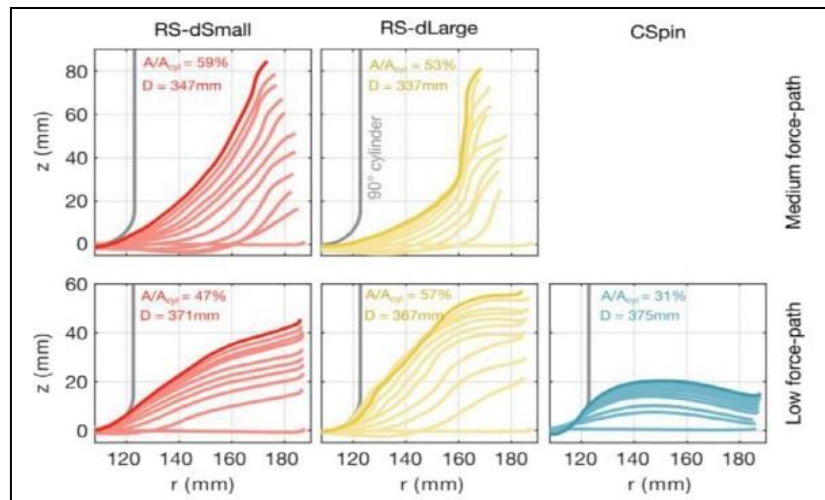


Figura 2.12: Distribuzione materiale al variare del parametro d [5]

Come evidenziato in Fig. 2.12 il caso ottimale risulta essere quello in cui il percorso utensili, e quindi di conseguenza la distribuzione del materiale, ha un andamento concavo e il parametro d, ovvero la distanza che intercorre fra i due utensili, risulta essere uguale alla distanza alla quale i due utensili non collidono quando si va ad imprimere una deformazione al componente ovvero il caso RS-dLarge [5].

Tramite tale modalità d'esecuzione si ha la minimizzazione della riduzione del diametro nominale di partenza della lamiera circolare e l'ottimizzazione della distribuzione del materiale durante i vari step del processo stesso.

2.3 Two sided incremental forming

Un ulteriore processo di formatura incrementale della lamiera risulta essere il two sided incremental forming (TSIF) secondo il quale la lamiera viene inizialmente bloccata attraverso l'uso di piccole morse per il clampaggio e l'utensile esegue la formatura tramite un percorso a gradini.

Nello specifico nel TSIF vi è un duplice contatto fra utensili e lamiera, ovvero il primo contatto è quello che si verifica fra l'utensile di formatura e la lamiera e il secondo risulta essere quello fra la lamiera e un supporto alla deformazione, tale supporto può essere un controstampo oppure un ulteriore utensile in caso di geometrie particolarmente complesse (Fig.2.1316).

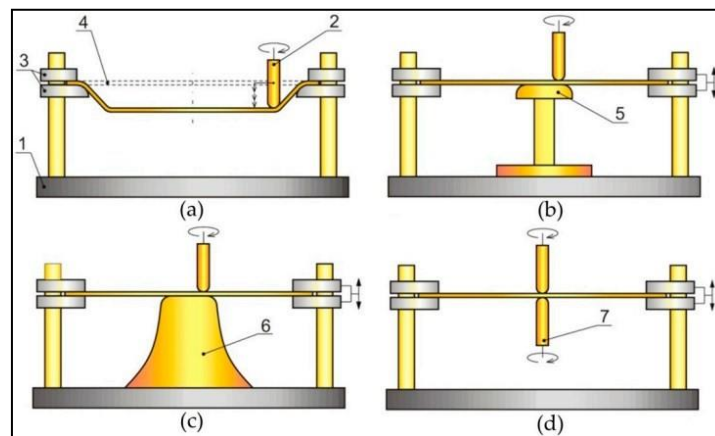


Figura 2.13: (a) SPIF; (b) TSIF con controstampo parziale; (c) TSIF con controstampo completo; (d) TSIF con utensile controrotante [6]

Dato che anche in questo caso la deformazione è localizzata in un punto specifico, vi è il resto di materiale che, non essendo deformato, conferisce maggior rigidità al tratto coinvolto andando a generare una contropiegia (Fig.2.14).

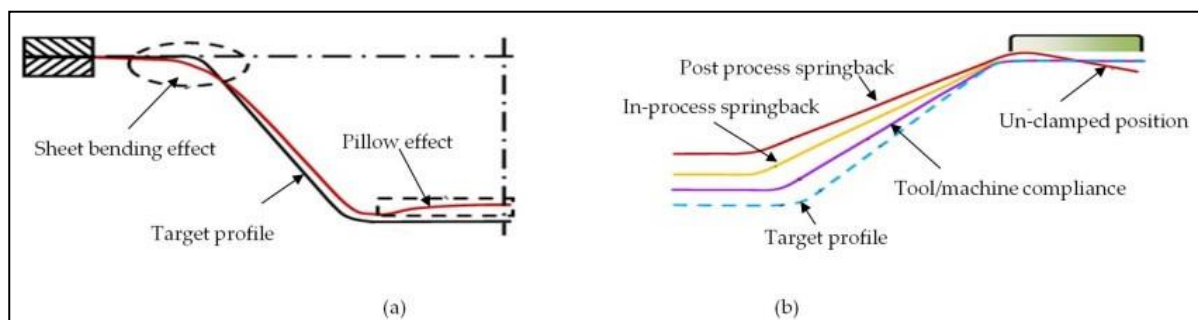


Figura 2.14: TSIF; (a) Errore geometrico nella parte finale (Effetto cuscino); (b) Errore geometrico nella parete verticale [7]

Analizzando in primis il ‘Pillow effect’ [7] ovvero l’effetto cuscino, Fig. 2.14 (a), si nota come nella parte centrale del componente il profilo ottenuto si discosta da quello target, questo perché vi è la presenza della porzione di lamiera indeformata che provoca l’insorgenza della contropiegatura.

Per quanto riguarda invece i difetti che si generano nella parete laterale del componente formato, Fig. 2.14 (b), essi sono dovuti inizialmente al ritorno elastico proprio del materiale deformato e successivamente al fatto che si può manifestare un ulteriore ritorno elastico a seguito del processo soprattutto quando avviene lo sbloccaggio della lamiera rispetto all’afferraggio iniziale.

Per andare a eliminare tali difetti è possibile implementare un percorso utensile che preveda la compensazione di alcuni parametri fondamentali quali:

- Correzione del gap fra utensile e componente
- Compensazione della deflessione dell’utensile, della macchina e della lamiera metallica

Un ulteriore difetto che si verifica in questo processo risulta essere l’assottigliamento dello spessore nei pressi della parete verticale del componente, per questa ragione infatti si passa dalla caratterizzazione sinusoidale dello spessore a quella sinusoidale modificata (Fig. 2.15)

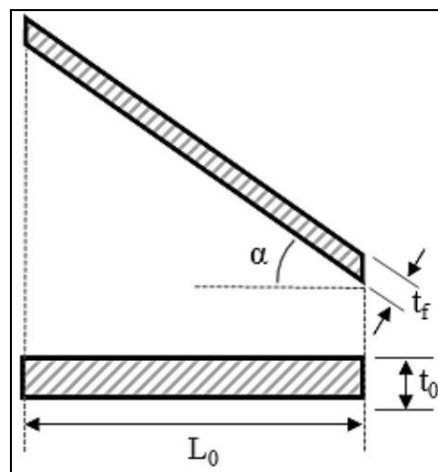


Figura 2.15: Schematizzazione legge sinusoidale [8]

Nello specifico, secondo la legge sinusoidale, lo spessore con il progredire del processo seguirà l'andamento schematizzato dalla seguente legge:

$$t_f = t_0 \sin (90^\circ - \alpha) = t_0 \cos (\alpha)$$

nella quale α risulta essere l'angolo di parete.

Quest'ultima relazione risulta valida per valori $0^\circ < \alpha < 45^\circ$, mentre quando $45^\circ < \alpha < 90^\circ$ viene applicata la seguente formula:

$$t_f = t_0 (A \alpha^3 + B \alpha^2 + C \alpha + D)$$

con A, B, C e D costanti necessarie per il fitting. [9]

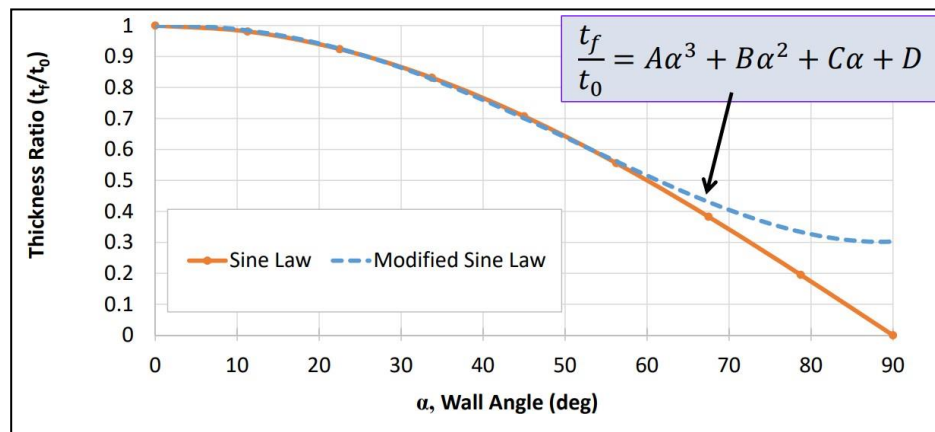


Figura 2.16: Legge sinusoidale modificata [9]

2.4 Roller hemming

Nel processo di hemming convenzionale si esegue una piega della lamiera metallica da 90° a 180° attraverso varie fasi.

Nello specifico inizialmente si piega la lamiera fino a 90° tramite il processo di flangiatura, successivamente inizia la fase cosiddetta prehemming, ovvero nella quale si raggiungono i 135° di piega e infine l'ultima fase di hemming vero e proprio ovvero quella nella quale si ottengono i 180° [10] (Fig. 2.17).

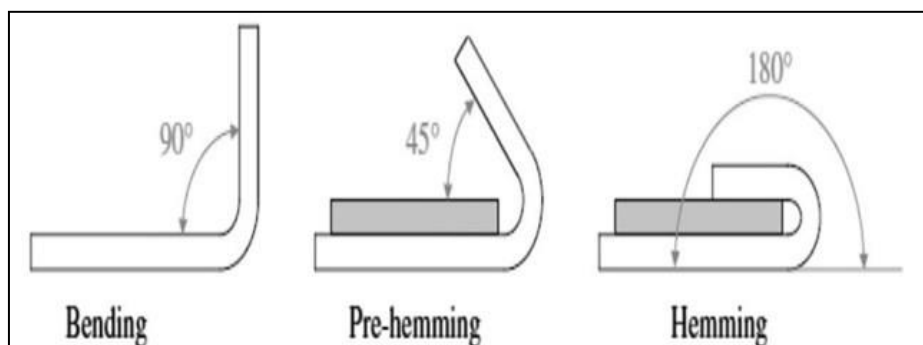


Figura 2.17: Hemming steps [10]

Nello specifico due difetti comuni al processo di hemming convenzionale e all'esecuzione della piega a partire da 90° per arrivare a 180° attraverso l'impiego della profilatrice incrementale sono il Recoil, il Wrap e il Roll-in come indicato nella figura 2.18.

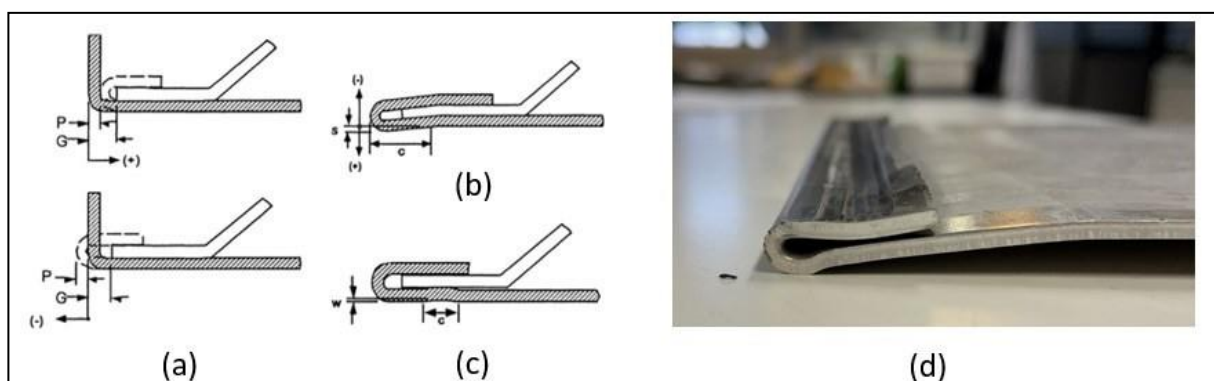


Figura 2.18: Difetti processo di Hemming: (a) Roll-In e Roll-Out; (b) Recoil; (c) Warp; [9]; (d) Difetti profilato FlexRoll

I difetti di Recoil e Wrap, ovvero quelli per cui vi è il cedimento del materiale di supporto alla piega, che si verifica con uno spostamento del centro di piega e di conseguenza il materiale viene piegato in un punto differente rispetto al precedente, sono una diretta

conseguenza del difetto di Roll-in che consiste nello scorrimento in avanti della porzione di materiale deformato rispetto al profilo precedentemente flangiato a 90° .

Per sopperire a queste criticità viene adottato il processo di Roller hemming ovvero un processo incrementale attraverso cui si va ad eseguire la piega da 90° a 180° di una porzione di materiale mediante l'utilizzo di una serie di rulli opportunamente sagomati e inclinati per la realizzazione di una geometria definita (Fig. 2.19).

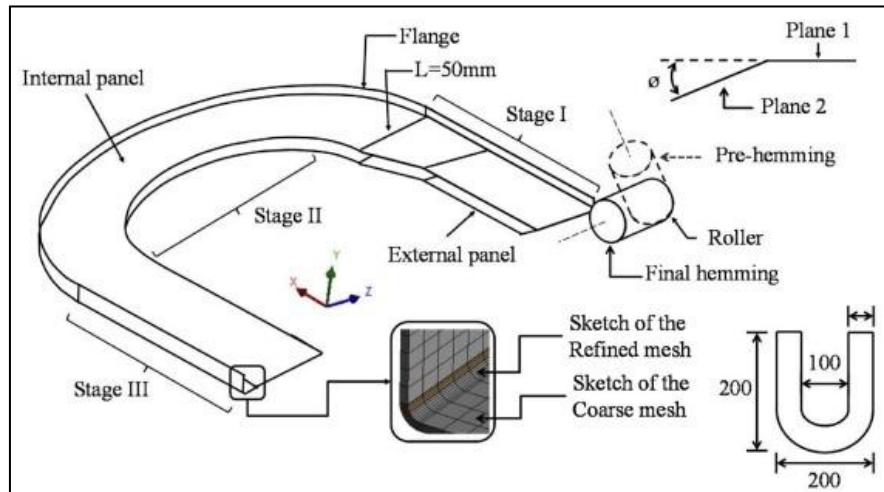


Figura 2.19: Roller Hemming [11]

Il percorso utensile, dunque, ricopre un ruolo fondamentale nel processo e in particolare dalla Fig. 2.20 si può osservare come nel hemming classico vi sia un notevole Roll-In nei primi step del processo, mentre nel caso del Roller hemming, la linea media del profilato risulta essere in accordo con la teoria classica della piegatura.

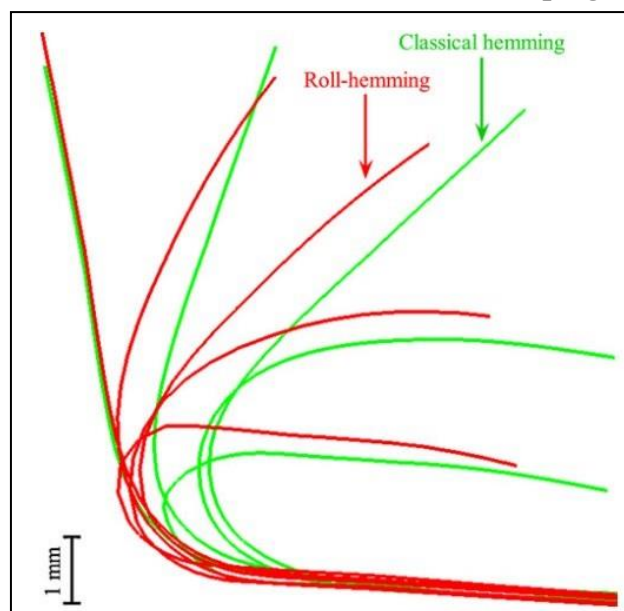


Figura 2.20: Confronto Classical hemming e Roller hemming [12]

2.5 Piegatura della lamiera

Considerando una sezione di un continuo sottile di larghezza unitaria è possibile schematizzare i parametri fondamentali del processo di piega di una lamiera metallica a partire dalla condizione indeformata.

Nello specifico in questo caso la larghezza viene considerata unitaria, α risulta essere l'angolo di piega, R il raggio di piegatura mentre con il termine Bend allowance si intende la lunghezza dell'asse neutro (Fig.2.21).

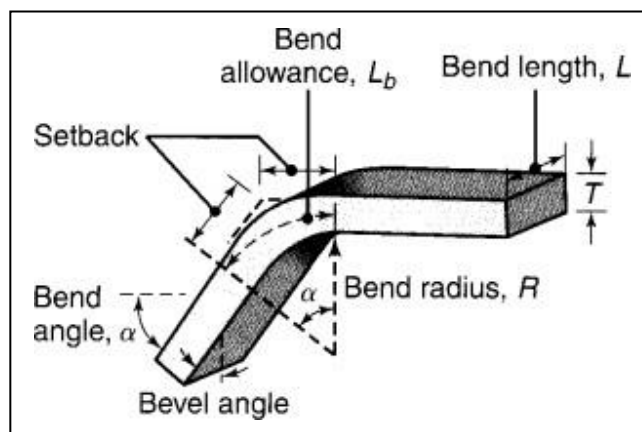


Figura 2.21: Parametri processo piegatura [13]

Prendendo in esame il caso in cui il raggio interno di piega sia maggiore o uguale a tre volte lo spessore di un foglio sottile di lamiera si può assumere che sezioni piane rimangano piane anche dopo la deformazione (Fig.2.22).

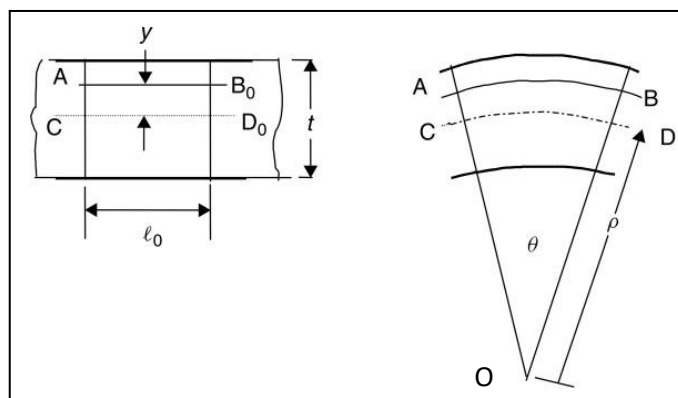


Figura 2.22: Parametri geometrici e stato deformativo [14]

In questo caso la piega viene eseguita prendendo come centro di piega il punto O che rimane fisso durante il processo (Fig.2.22).

Il tratto AB in Fig. 2.22 risulta essere la deformazione assiale, mentre il tratto CD rappresenta l'asse neutro ovvero la zona non sottoposta a deformazione che rimane posizionata nel mezzo della sezione.

Se, durante la piega, la lamiera fosse soggetta a forze assiali, la posizione dell'asse neutro varierebbe e quindi il tratto CD risulterebbe essere la deformazione di una generica sezione di centro O e raggio di curvatura ρ . Secondo tale teoria il tratto CD varia la sua lunghezza da l_0 a l_s secondo la seguente legge:

$$l_s = \rho \theta$$

Per quanto riguarda invece una sezione posta a distanza y rispetto all'asse neutro l'andamento della deformazione sarà il seguente:

$$l = \theta (\rho + y) = \rho \theta \left(1 + \frac{y}{\rho}\right) = l_s \left(1 + \frac{y}{\rho}\right)$$

La caratterizzazione della deformazione assiale nella sezione AB risulta essere:

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{l}{l_0} + \ln \left(1 + \frac{y}{\rho}\right) = \varepsilon_a + \varepsilon_b$$

dove ε_a è la deformazione dovuta allo sforzo assiale T , mentre ε_b è la componente legata al momento di piega M (Fig.2.23).

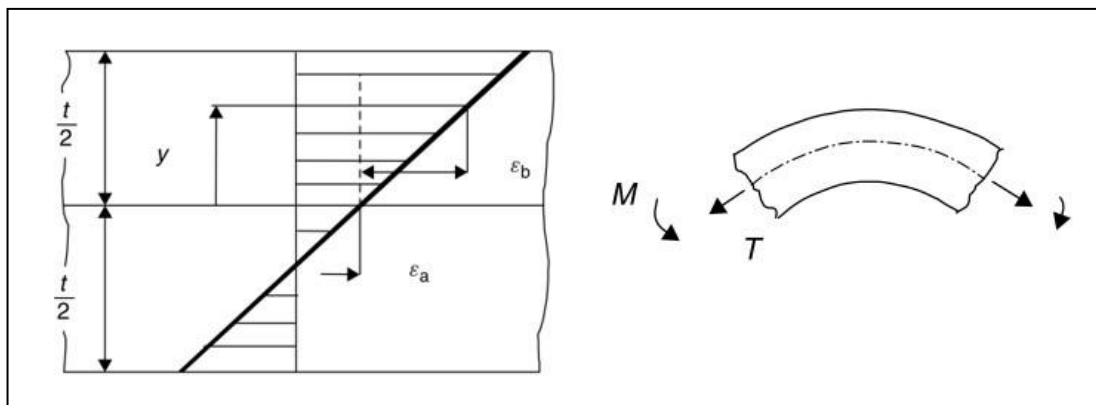


Figura 2.23: Stato deformativo nel processo di piega [14]

2.6 Stato tensionale

Nello SPIF il singolo elemento della lamiera è soggetto a forze normali, di taglio e a momenti flettenti che lo fanno adattare alla forma emisferica imposta dall'utensile come mostrato in figura 2.24.

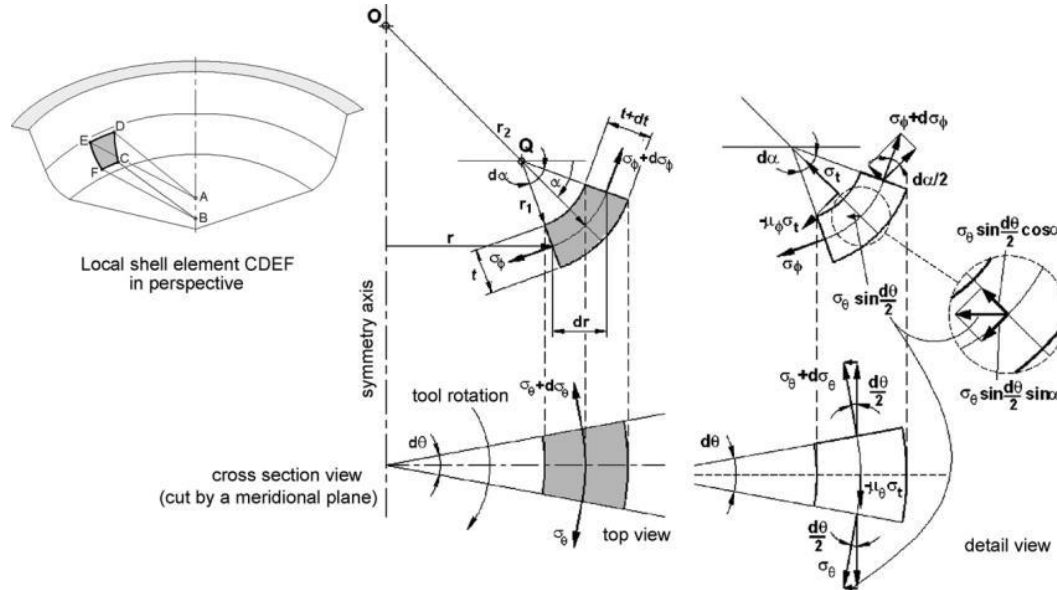


Figura 2.24 Forze agenti durante lo SPIF nel singolo elemento [9]

Considerando, come in precedenza, una lamiera sottile sottoposta a sforzo normale T e momento di piega M , si vanno a calcolare la forza infinitesima agente sulla sezione infinitesima e il conseguente momento generato nel seguente modo:

$$dF = \sigma_1 dA$$

$$dM = dF y.$$

Caratterizzando le precedenti formule al caso specifico di una sezione infinitesima di lunghezza dy e larghezza unitaria si ottiene:

$$dF = \sigma_1 dy$$

$$dM = \sigma_1 dy y.$$

Passando ora alle condizioni di equilibrio la forza normale T viene ricavata sommando i vari contributi di forza esercitati lungo lo spessore tramite la seguente relazione:

$$T = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma_1 dy$$

Analogamente viene ricavato il momento di piega M sommando i vari contributi di momento tramite la seguente relazione numerica (Fig.2.25 e 2.26):

$$M = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma_1 y dy$$

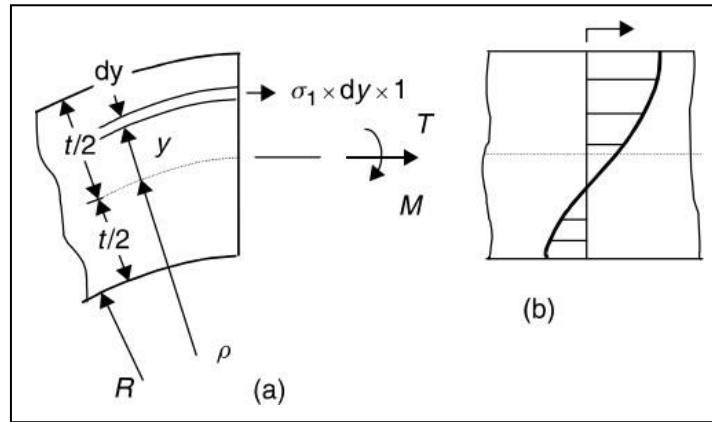


Figura 2.25: Stato tensionale processo di piega [14]

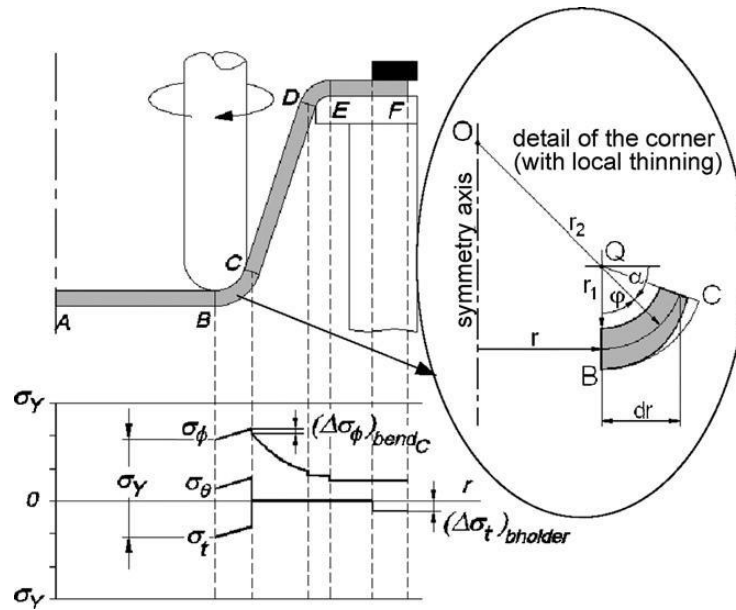


Figura 2.26: Stato di tensione in corrispondenza della zona deformata [9]

Si deduce quindi come la tensione trasversale aumenterà col raggio dell'utensile a causa del maggiore attrito che si instaura tra utensile e lamiera che è maggiore in corrispondenza di superfici curve piuttosto che su superfici piane.

Nello stesso articolo è stato inoltre segnalato come l'utilizzo di una "dummy sheet", ovvero di un'altra lamiera al di sopra di quella da formare, riduce la rigatura della lamiera da parte di frammenti che rimangono attaccati all'utensile; tuttavia la presenza di una seconda lamiera influisce inevitabilmente in modo negativo sulla formabilità aumentando fittiziamente il raggio dell'utensile in movimento.

2.7 Teoria delle piastre

Con il termine piastra si intende un elemento strutturale, inizialmente piano, che presenta uno spessore decisamente inferiore rispetto alle altre dimensioni.

Successivamente si andrà a considerare il caso di piastra inflessa, ovvero quando il carico risulta essere orientato in direzione normale al piano medio della sezione.

2.8 Teoria delle piastre inflesse

Di seguito viene riportata una schematizzazione di una piastra rettangolare, inizialmente piana, nella quale il sistema di riferimento presenta l'asse z orientato verso il basso.

Si definiscono le componenti degli spostamenti lungo le tre direzioni rispettivamente mediante le lettere u , v e w (Fig.2.27).

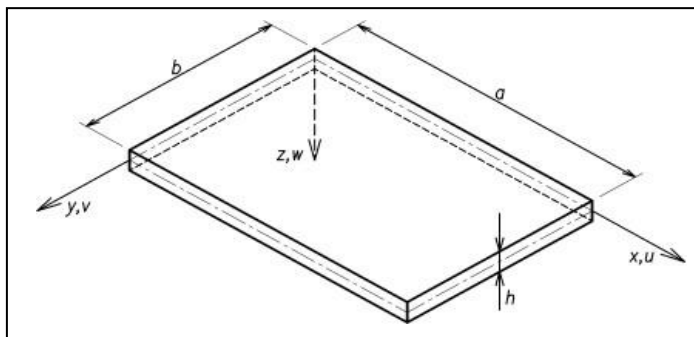


Figura 2.27: Sistema di riferimento teoria delle piastre [15]

Considerando gli spostamenti w piccoli rispetto allo spessore h è possibile assumere gli angoli di inclinazione φ comparabili con la $\tan(\varphi)$ e la curvatura della superficie elastica χ con la derivata seconda di w ottenendo:

$$\varphi_x = \tan(\varphi_x) = - \frac{\partial w}{\partial x}$$

$$\varphi_y = \tan(\varphi_y) = - \frac{\partial w}{\partial y}$$

$$\chi_x = \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$

$$\chi_y = \frac{\partial \varphi_y}{\partial y} = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$$

Tale piastra viene caricata tramite l'applicazione di una forza diretta lungo z e applicata in un punto P qualsiasi della piastra.

In Fig. 2.28 sono rappresentate le componenti di spostamento del punto P rispetto ad una sezione nel piano XZ.

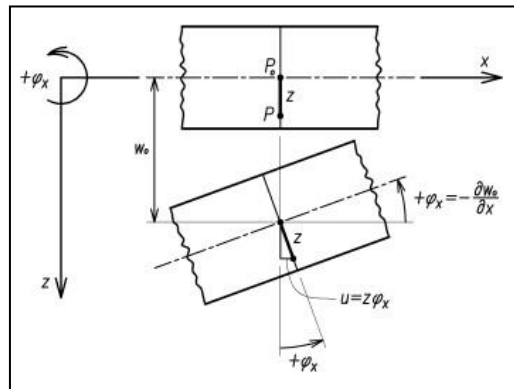


Figura 2.28: Componenti spostamento piano XZ [15]

Se si considera che la lunghezza di un segmento ortogonale al piano medio rimanga inalterata a seguito della deformazione, ciò comporta il fatto dell'indipendenza da z dello spostamento w (x, y, z) di un generico punto P ottenendo quindi w (x, y, z) = w_0 (x, y). A questo punto è possibile andare a scrivere le componenti di spostamento in funzione delle rotazioni tramite le seguenti relazioni:

$$u = z \varphi_x = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$

$$v = z \varphi_y = -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$$

$$w = w_0$$

Tali espressioni rispecchiano il caso di soli carichi in direzione z cioè i punti del piano medio subiscono inflessioni w_0 (x, y), mentre u_0 (x, y) e v_0 (x, y) risultano essere trascurabili.

Il campo delle deformazioni potrà quindi essere definito a partire dalle considerazioni eseguite per gli spostamenti u, v e w nel seguente modo:

$$\varepsilon_x = z \chi_x = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$

$$\varepsilon_y = z \chi_y = -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$$

$$\gamma_{xy} = 2z \chi_{xy} = -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

Noto il campo delle deformazioni è possibile andare a ricavare il corrispondente stato tensionale attraverso le relazioni costitutive del materiale ottenendo nel caso di una piastra inflessa sottile le seguenti equazioni:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x)$$

$$\tau_{xy} = G \gamma_{xy}$$

Per valutare le risultanti delle tensioni su di un elemento di controllo estratto dalla piastra avente facce parallele ai piani coordinati, con base quadrata e altezza pari ad h si ottengono i seguenti risultati:

$$M_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x z \, dz$$

$$M_y = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_y z \, dz$$

$$M_{xy} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{xy} z \, dz$$

con M_x e M_y momenti flettenti per unità di larghezza, mentre M_{xy} è un momento torcente.

Sulle facce trasversali del volume di controllo agiscono le forze di taglio T_x e T_y schematizzate attraverso le seguenti relazioni:

$$T_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{xz} dz$$

$$T_y = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{yz} dz$$

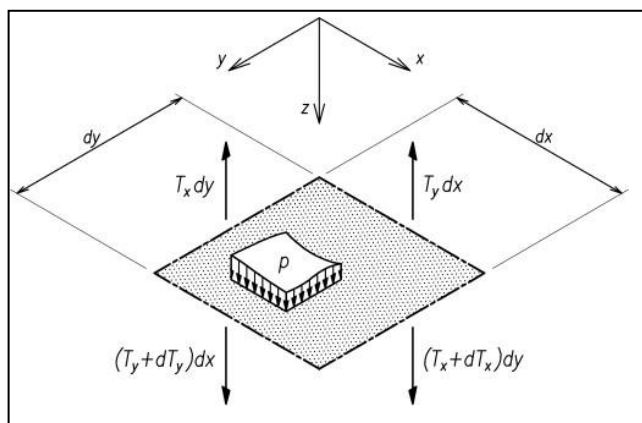


Figura 2.29: Equilibrio volume di controllo secondo z [15]

Considerando un carico distribuito $p(x, y)$ normale al piano medio della piastra è possibile scrivere la seguente equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse z :

$$p dx dy - T_x dy + (T_x + dT_x) dy - T_y dx + (T_y + dT_y) dx = 0$$

Da cui semplificando si ottiene:

$$dT_x dy + dT_y dx = -p dx dy$$

$$\frac{\partial T_x}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} = -p$$

che espressa in funzione dei momenti flettenti e torcenti risulta:

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = -p$$

Tenendo conto delle relazioni che legano le grandezze cinematiche e le caratteristiche unitarie di momento è possibile scrivere l'equazione differenziale della superficie elastica o equazione di Lagrange.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{2 \partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = -p$$

nella quale p rappresenta il carico $p(x; y)$ applicato in direzione z , mentre D risulta essere il modulo di rigidezza flessionale di una piastra ovvero $D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}$ con h spessore della piastra, E modulo di Young e ν coefficiente di Poisson.

Andando a particularizzare l'equazione di Lagrange con le condizioni al contorno si può andare a considerare una piastra con un estremo incastrato con la presenza di un carico concentrato in uno spigolo.

Piastra con un estremo incastrato e con carico concentrato su uno spigolo

Nella seguente Fig. 2.30 tratta dalla letteratura [16] viene schematizzata una piastra con tre estremi liberi e uno incastrato con un carico concentrato P in uno spigolo libero.

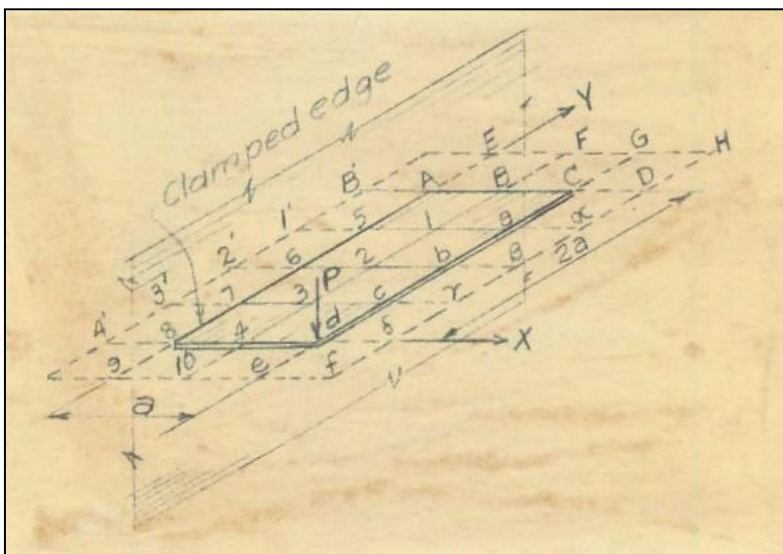


Figura 2.30: Piastra incastrata con carico concentrato su uno spigolo libero [16]

Grandezze principali coinvolte nella trattazione:

- X, Y : coordinate piano orizzontale
- w : spostamento verticale del piano medio

- h : spessore della piastra
- E : modulo di Young
- ν : coefficiente di Poisson
- $N = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}$: modulo di rigidezza flessionale della piastra
- P : carico concentrato
- V_x, V_y : taglio per unità di larghezza
- M_x, M_y : momento flettente
- R_x, R_y : reazioni vincolari per unità di larghezza
- $U = \frac{M_x + M_y}{1 + \nu}$

Andando a risolvere l'equazione di Lagrange particularizzata al caso specifico è possibile ricavare le varie grandezze nei differenti punti di interesse.

Di seguito viene riportata una schematizzazione grafica di tali grandezze e una tabella riassuntiva dei punti di maggior interesse.

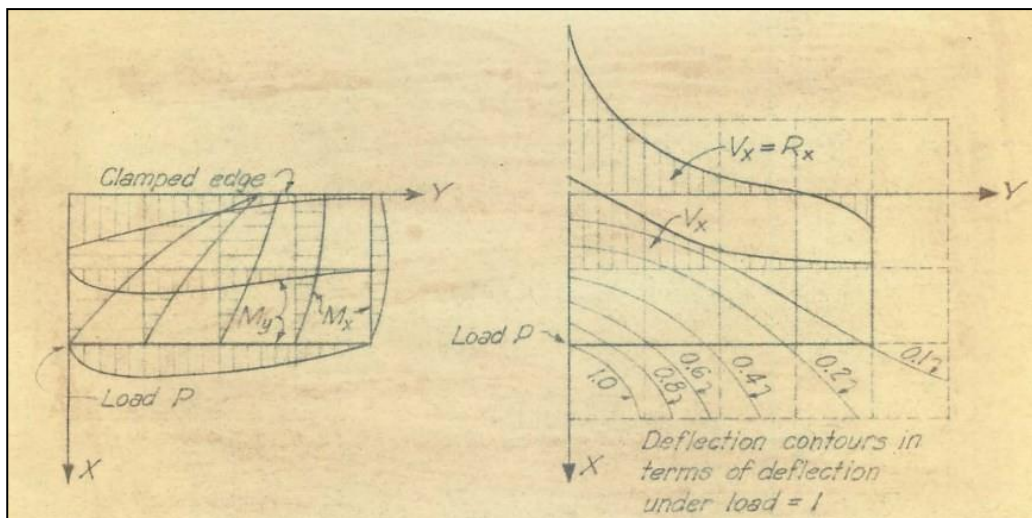


Figura 2.31: Rappresentazione grafica Momenti risultanti e deflessioni [16]

Net Points	U	M_x	M_y	V_x	W
8	-1.2498 P	-1.2498 P	-0.3749 P	+2.23 P/a	0
7	-0.7528 P	-0.7528 P	-0.2258 P	+0.75 P/a	0
6	-0.3978 P	-0.3978 P	-0.1193 P	+0.25 P/a	0
5	-0.1988 P	-0.1988 P	-0.0596 P	+0.04 P/a	0
A	-0.0595 P	-0.0595 P	-0.0178 P	-0.44 P/a	0
4	-0.3758 P	-0.4885 P	0	+1.25 P/a	0.1561 Pa ² /N
3	-0.3916 P	-0.3416 P	-0.1675 P	+0.70 P/a	0.0940 Pa ² /N
2	-0.2739 P	-0.2244 P	-0.1317 P	+0.25 P/a	0.0497 Pa ² /N
1	-0.1599 P	-0.1388 P	-0.0691 P	+0.12 P/a	0.0248 Pa ² /N
B	-0.0848 P	-0.1102 P	0	+0.06 P/a	0.0074 Pa ² /N
d	0	0	0	$R_x = P/8$	0.4464 Pa ² /N
e	-0.1628 P	0	-0.2116 P	0	0.2681 Pa ² /N
b	-0.1500 P	0	-0.1950 P	0	0.1484 Pa ² /N
a	-0.0818 P	0	-0.1063 P	0	0.0821 Pa ² /N
c	0	0	0	0	0.0451 Pa ² /N

Tabella 2.32: Relazioni analitiche grandezze di interesse [16]

Tramite la relazione numerica per lo spostamento verticale w del piano medio, espressa in Tabella 2.32, è possibile correlare lo spostamento w con il carico concentrato in quel punto.

Dalla relazione evidenziata in Tab. 2.32 è possibile ricavare il valore di forza P necessario per andare ad imprimere una deformazione caratterizzata da uno spostamento w tramite la seguente relazione:

$$P = \frac{wN}{0,4464 a^2}$$

Evidenziando la correlazione che sussiste fra la precedente teoria delle piastre contestualizzata e il comportamento della lamiera metallica soggetta a profilatura è possibile utilizzare tali relazioni analitiche per prevedere le forze di processo e quindi poter ottimizzare il percorso utensili.

Capitolo 3: Apparato sperimentale

La formatura incrementale è un processo di lavorazione dei metalli senza stampo che si basa sullo strumento di deformazione per applicare pressione alla deformazione locale per ottenere la forma desiderata del processo, noto anche come formatura incrementale della lamiera (ISF).

Come detto, essendo una delle più recenti tecnologie di lavorazione della lamiera, è stata un tema di ricerca negli ultimi anni e la tecnologia è attualmente utilizzata in diversi settori come quello aerospaziale, automobilistico, biomedicale e della produzione di prodotti personalizzati.

Pertanto la tecnologia di formatura incrementale presenta i vantaggi di stampi a basso costo (o assenza di stampi), formatura a risposta rapida, limiti di formatura elevati, traiettoria può essere modificata in tempo reale, basso consumo energetico e formatura ecologica.

Formatura incrementale in base alla presenza o assenza di stampi e al numero di utensili in movimento suddivisa in:

- formatura incrementale a punto singolo (Single Point Incremental Forming, SPIF),
- formatura incrementale a doppio punto (Two Point Incremental Forming, TPIF),
- formatura incrementale su due lati (formatura incrementale a due lati, DSIF), come mostrato nella Figura 3.1, 3.2, 3.3.



Figure 3.1



Figure 3.2

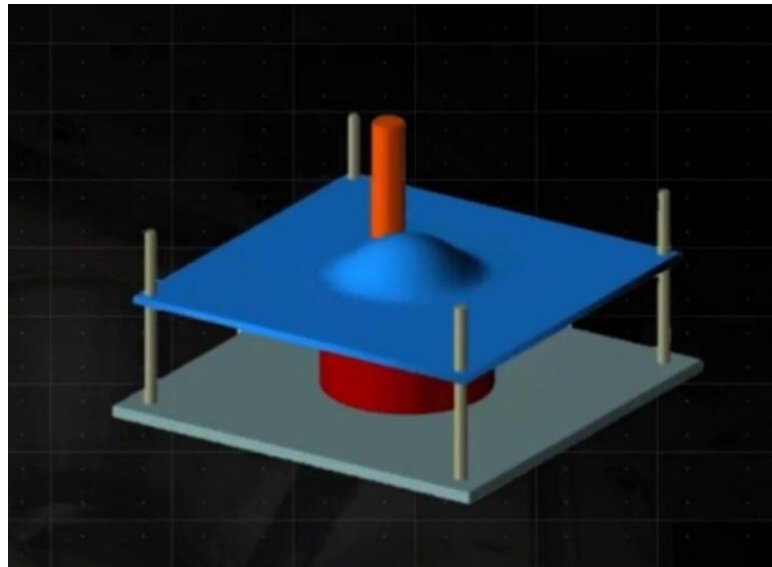


Figure 3.3

Il processo di formatura incrementale a singolo punto (in inglese “Single Point Incremental Forming” o abbreviato “SPIF”) è una soluzione altamente flessibile a controllo numerico. Questa soluzione può trasformare lamiera rapidamente in geometrie anche complesse, senza necessitare di stampi dedicati. Si tratta infatti di una metodologia che ben si adatta alle produzioni di componenti speciali, per prototipi o per piccoli lotti. Nel processo di formatura incrementale “SPIF” (Figura 1), la lamiera è a contatto con l’utensile, mentre quest’ultimo viene movimentato provocando una deformazione plastica continua.

La movimentazione dell’utensile è comandata da un sistema di controllo numerico e, solitamente, il movimento procede dall’esterno verso il centro della lamiera in diversi passaggi. I diversi passaggi di lavorazione vengono chiamati strati (o “layer”) analogamente a quanto accade nel processo di stampa 3D. Tale soluzione permette di preparare componenti, anche complessi, nel giro di ore o giorni, senza dover attendere per la preparazione di stampi dedicati e senza la necessità di onerosi investimenti.

Quindi con la formatura incrementale la lamiera viene progressivamente deformata con una serie di piccole deformazioni progressive localizzate. Di norma l’utensile usato per la deformazione è controllato da una macchina a controllo numerico (CNC) che gli fa seguire il percorso desiderato. La figura sottostante (Fig. 3.4) illustrano schematicamente il processo:

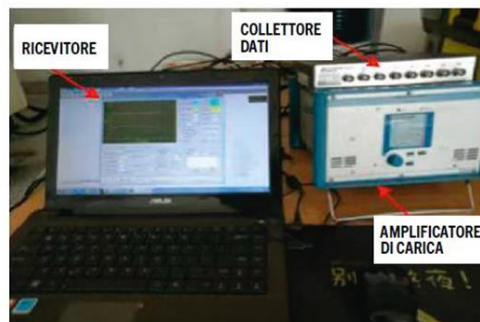


Figura 3.4: Profilatrice

Il premilamiera mantiene in posizione la lamiera durante il processo. Il piatto di appoggio supporta la lamiera e definisce l'area di lavoro dell'utensile. Si osserva l'assenza di uno stampo che sostenga la faccia inferiore della lamiera.

La macchina utilizzata per eseguire la lavorazione su lamiere metalliche di differente materiale è impiegata per la formatura di profilati metallici. Per il controllo della macchina è installata una console di comando che permette di azionare la profilatrice secondo le varie modalità di utilizzo disponibili.

Nelle condizioni di normale funzionamento della macchina la traversa superiore (premilamiera) si abbassa andando a bloccare la lamiera da piegare e successivamente l'utensile di formatura viene portato a contatto per eseguire la formatura.

Le due traverse alloggiano gli utensili e i sistemi di movimentazione di quest'ultimi.

Nell'esempio in Fig. 3.5 viene proposta una schematizzazione del montaggio del carro inferiore attraverso l'uso di guide e di una cremagliera per lo scorrimento lungo l'asse del premilamiera.

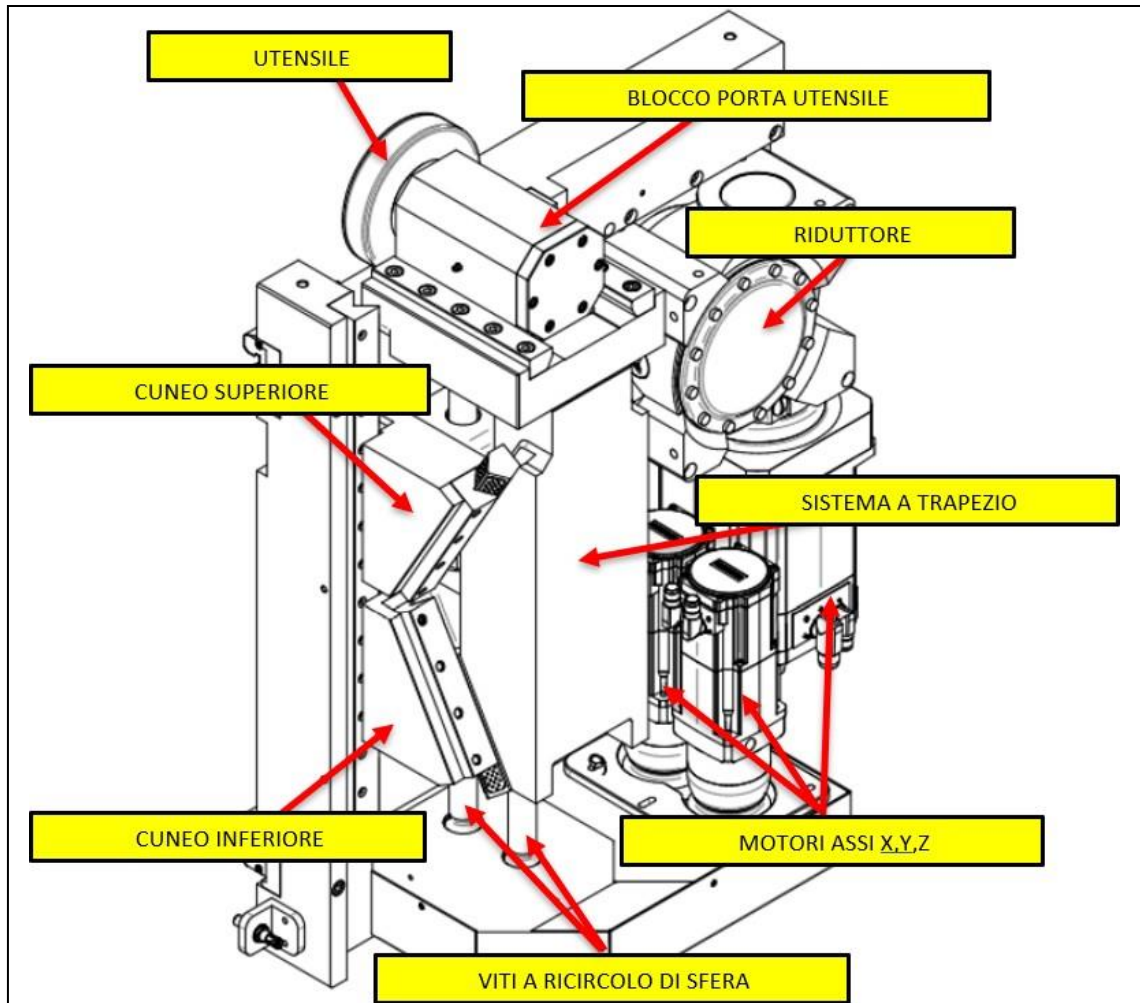


Figura 3.5: Sistema di movimentazione inferiore

In Fig. 3.6 sono riportate le componenti principali del carro inferiore, per quanto riguarda quello superiore risulta essere identico ma ruotato di 180° per poter essere installato in modo speculare. Nello specifico il sistema a trapezio, solidale all'utensile, è calettato al cuneo inferiore e a quello superiore tramite quattro pattini solidali al trapezio nei quali sono inserite delle lamelle in bronzo con inserti in grafite che permettono la lubrificazione solida. Nei cunei allo stesso modo vi sono quattro guide che permettono l'accoppiamento fra pattini e guide stesse per consentire di movimentare il sistema. Tale sistema di movimentazione è accoppiato con una coppia di viti a ricircolo di sfera collegate ai motori elettrici.

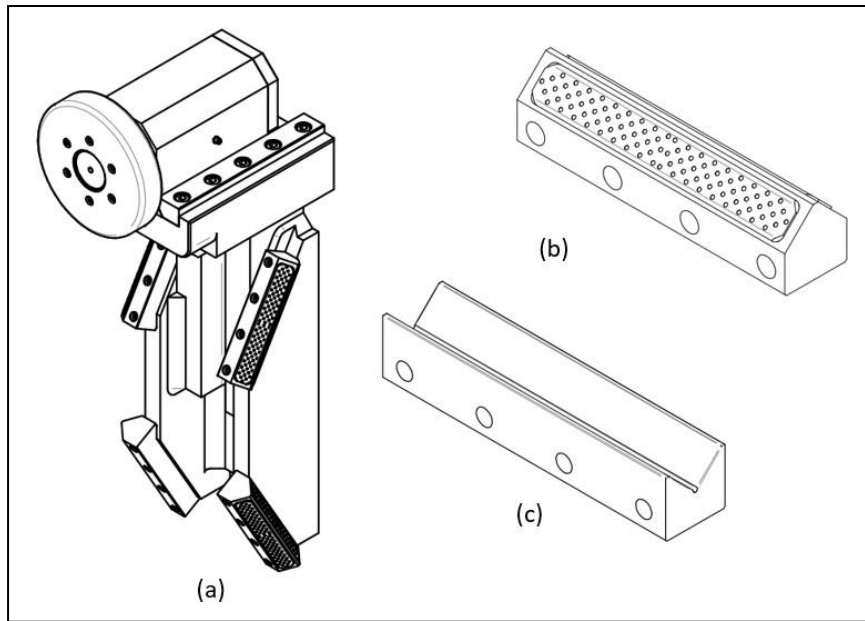


Figura 3.6: (a) Trapezio; (b) pattino con placchetta in bronzo; (c) Guida di scorrimento

Si passa ora alla definizione del sistema di riferimento, nello specifico bisogna distinguere fra:

- Sistema di riferimento Assoluto
- Sistema di riferimento in Assi Macchina (AM).

Il sistema di riferimento assoluto risulta essere individuato dalle coordinate (X,Y,Z) e indica la posizione degli utensili.

Gli assi macchina permettono la definizione dei moti relativi che vi sono affinché il sistema possa essere messo in movimento.

Per quanto riguarda la movimentazione lungo l'asse Z , anche in questo caso l'orientamento delle Z nei due sistemi di riferimento coincide, quindi i due cunei vengono alzati, o abbassati, in base alle esigenze simultaneamente della stessa quota per portare gli utensili nella posizione desiderata.

Per riportare nel sistema di riferimento assoluto uno spostamento in X nel sistema di riferimento assi macchina bisogna tener conto del fatto che la geometria dei cunei presenta un angolo e quindi bisogna risolvere un semplice problema geometrico.

I parametri di processo con più influenza sono il diametro dell'utensile e la velocità di rotazione di esso. Infatti una combinazione di utensile di maggior diametro e alta velocità di rotazione può portare a bassi coefficienti d'attrito e, di conseguenza, ad un miglior risultato

sul componente finale. Seppure con influenza minore sul risultato, anche i parametri di velocità verticale, orizzontale e angolo di formatura impattano sull'attrito a causa di un aumento della forza di contatto tra utensile e lamiera.

Per quanto riguarda la qualità superficiale interna ed esterna delle lamiere lavorate mediante SPIF, si osserva come i vari parametri di processo (spessore, raggio dell'utensile, velocità e passo) influenzino notevolmente la rugosità finale. Si è osservato come la rugosità esterna dipenda particolarmente dal fattore di forma (rapporto tra angolo di lavorazione e raggio dell'utensile) e uno degli effetti più indesiderati è l'aspetto “a buccia d'arancia” che può instaurarsi sulla faccia esterna della lamiera (Fig. 3.7):

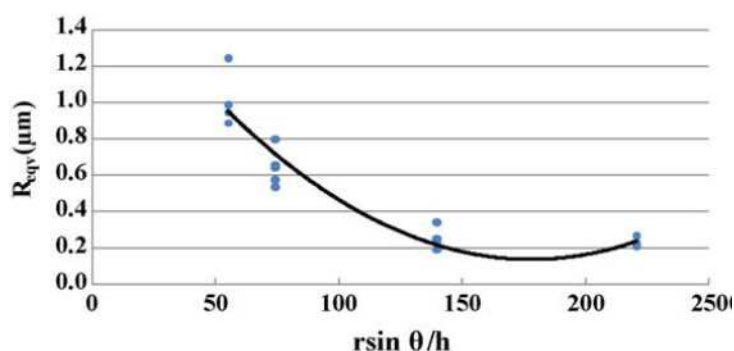


Figura 3.7: Dipendenza del parametro di rugosità R_a rispetto al fattore di forma [10]

Come già accennato, uno dei problemi maggiori dello SPIF riguarda l'accuratezza geometrica. Anche per configurazioni semplici il ritorno elastico può portare a difetti, e l'assenza di un supporto può determinare la piegatura della lamiera in corrispondenza dei bordi (tale effetto può essere tuttavia ridotto utilizzando un piano d'appoggio). Inoltre bisogna considerare che all'estrazione del prodotto, la lamiera tende a ricercare un nuovo equilibrio nelle tensioni che può portare ad ulteriori errori geometrici. È facile intuire che, come spesso accade in ambito ingegneristico, è necessario trovare un compromesso tra qualità del prodotto e tempi e costi di produzione.

Micari et al. in [8] osservano come il metodo migliore per ottenere una buona accuratezza geometrica sia l'utilizzo di opportune traiettorie ottimizzate dell'utensile.

Secondo questo approccio la traiettoria che deve seguire l'utensile non deve corrispondere propriamente al profilo CAD del prodotto finale, ma deve essere in grado di ottenere tale profilo a seguito della rimozione dei vincoli, tenendo presente quindi ritorno elastico, piegatura ecc... Si vuole cioè applicare una deformazione maggiore di quella voluta, in modo che dopo la rimozione del punzone e dei vincoli il componente assuma effettivamente le dimensioni come da progetto. A questo punto chiaramente il problema si

sposta sulla efficace predizione degli errori cui sarà soggetto il pezzo. Tenendo conto della varietà dei parametri in gioco e della risposta, di norma non lineare, dei materiali, il problema non è di facile soluzione ed è tuttora oggetto di ricerca.

Per quanto riguarda la formabilità mediante SPIF di lamiere di Titanio, si sono ottenuti risultati interessanti in “On the High Speed Single Point Incremental Forming of Titanium Alloys” [3] . Nell’articolo si osserva come sia per le lamiere di Titanio puro (grado 2) che per quelle in lega Ti6Al4V (grado 5) a seguito della lavorazione, la microstruttura non cambia significativamente se non per un leggero affinamento dei grani. Questo risultato fa dedurre come non vi sia stato un superamento del β -transus (neppure localmente). Inoltre mentre per le lamiere di grado 2 si osserva che a velocità elevate i grani si ingrossano, probabilmente a causa del surriscaldamento cui è soggetto il materiale in queste circostanze, ciò non accade per le lamiere di grado 5. Allo stesso modo si osserva come la velocità non influisca significativamente sulla microdurezza sia nel caso del Titanio puro, che della lega Ti6Al4V (solo alla velocità maggiore pari a 500m/min si è osservato un aumento della microdurezza del 20%).

Per lamiere in lega di Alluminio non sono presenti articoli sperimentali significativi che possano fungere da punto di riferimento.

Tali risultati sono particolarmente significativi se si considera come uno dei maggiori ostacoli allo sviluppo dello SPIF sono stati finora i lunghi tempi di lavorazione che non permettevano la produzione di grandi lotti, tenendo altresì presente il costo delle apparecchiature.

Capitolo 4: Realizzazione del processo

4.1 Approccio metodologico

Pertanto la formatura incrementale a punto singolo nella sua forma più elementare è caratterizzata dalla sovrapposizione continua di deformazioni locali in un foglio di lamiera fino al raggiungimento di una forma finale. Queste deformazioni sono indotte da uno strumento relativamente piccolo che si muove lungo un percorso predefinito, descrivendo la superficie della geometria desiderata (Fig. 1) o qualsiasi percorso utensile corretto che alla fine cede alla forma di destinazione.

La natura localizzata della zona di deformazione attorno allo strumento, determina basse forze di formatura rispetto ai processi di formatura di fogli convenzionali. Ciò mantiene i requisiti di resistenza del sistema di posizionamento, che guida lo strumento, abbastanza modesti, inoltre un migliore controllo del bordo del pezzo è determinato da un inserto 2D nel sistema di serraggio.

Come descritto in precedenza, SPIF deforma un foglio di lamiera attraverso il movimento relativo tra utensile e foglio stesso, consentendo di eseguire la formatura incrementale sulla maggior parte dei sistemi di posizionamento multiasse. I tre assi ortogonali utilizzati per la maggior parte delle macchine SPIF servono come una buona base per un'ampia varietà di parti. Tuttavia, per prevenire le collisioni, utilizzare in modo ottimale la rigidità dell'utensile e ottimizzare i parametri di processo, come discusso in questo documento, può essere richiesto un sistema a cinque o più assi.

L'aggiunta di due assi consente di orientare l'utensile in condizioni più favorevoli per la formatura. Il movimento relativo dell'utensile rispetto al foglio di lamiera può essere ottenuto spostando l'utensile, il foglio di lamiera o una combinazione di entrambi.

Oltre alla scelta del numero di assi, la forza e la rigidità del sistema di posizionamento sono un fattore chiave. In generale, SPIF ha forze di processo abbastanza limitate rispetto ai processi convenzionali a causa della piccola zona di deformazione.

L'assenza dello stampo distingue lo SPIF dal processo TPIF, Two Point Incremental Forming, che invece prevede l'utilizzo di una matrice parziale o completa.

I parametri che maggiormente influenzano il processo sono:

- **lo spessore della lamiera:** un suo aumento migliora la formabilità e la sua influenza è descritta con una legge sinusoidale

- **il valore di pitch**, ovvero dell'abbassamento verticale dell'utensile: al suo aumento la lamiera si deforma di più
- **la velocità del mandrino**: al suo aumento avviene riscaldamento locale e calo dell'attrito tra utensile e lamiera, entrambi fattori positivi per la formabilità
- **il diametro dell'utensile**: più è piccolo, più la deformazione rimarrà localizzata, al contrario se è grande la deformazione sarà più estesa e il processo tenderà al più tradizionale stampaggio.

Si osserva come questo tipo di processo non è applicabile a materiali compositi a fibre continue, perché di per sé la deformazione è localizzata e nel suo intorno il materiale rimane plasticamente indeformato.

Le potenzialità dello SPIF sono molte tenendo conto di svariati vantaggi: i costi di set-up sono praticamente nulli; per produrre un prodotto diverso è sufficiente settare diversamente il programma che comanda la macchina a controllo numerico; la formabilità risulta maggiore rispetto ad altri processi grazie alla deformazione locale indotta dall'utensile.

Nel presente elaborato di tesi si è andati a valutare l'influenza del percorso utensili sull'andamento delle forze del processo di profilatura e sulla qualità geometrica del componente realizzato.

In particolare, inizialmente ci si è concentrati sulla verifica e sull'ottimizzazione del sistema di movimentazione della macchina attraverso ottimizzazione del percorso utensili. Successivamente si sono analizzate, come descritto sopra, l'andamento delle forze e della deformazione durante il processo di piega.

Pertanto i parametri fondamentali nelle lavorazioni di formatura incrementale a singolo punto risultano essere (Fig. 4.1):

- Larghezza lamiera b = variabile
- Lunghezza lamiera l = variabile
- Spessore lamiera h = variabile
- Modulo di elasticità E = variabile
- Punto di applicazione della forza a = costante

- Forza applicata $F = \text{costante}$

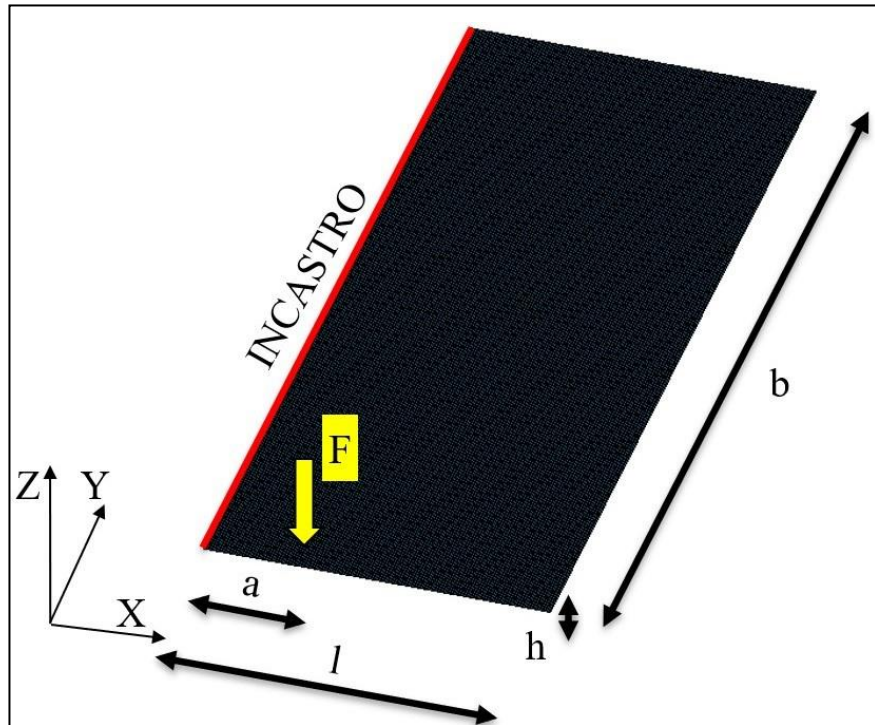


Figura 4.1: Parametri fondamentali

L'obiettivo era quello di andare a caratterizzare la deformazione a seguito dell'applicazione di una forza costante in una determinata zona ed analizzare il prodotto finito.

La formabilità rappresenta la capacità, da parte del materiale, di subire deformazioni permanenti senza arrivare alla frattura: si tratta quindi di un aspetto di fondamentale importanza per la scelta del materiale da utilizzare per una particolare applicazione.

È necessario far rilevare che la formabilità non è soltanto funzione delle caratteristiche del materiale (in primo luogo dal coefficiente di incrudimento e dell'indice di anisotropia normale), bensì anche delle condizioni nelle quali il processo si evolve e, in particolare, del meccanismo di deformazione che il materiale subisce.

Nella formatura in un unico passaggio mediante SPIF, l'assottigliamento della lamiera risultante si manifesta come un angolo di parete massimo raggiungibile. Questo angolo di parete massimo può essere aggirato utilizzando il materiale disponibile in modo più efficiente. Mentre angoli di parete elevati assottigliano il materiale in modo estremo, angoli di parete

bassi determinano spessori finali più elevati della parte. Per la SPIF in un unico passaggio convenzionale, questo spessore finale può essere approssimato dalla legge sinusoidale, gli angoli delle pareti sono inerenti alla natura localizzata delle deformazioni.

Quando l'utensile SPIF esegue un'operazione di profilatura, i percorsi dell'utensile crescono rapidamente con l'aumento delle dimensioni delle parti e rendono il processo difficile. Ricercatori [7, 8] hanno sperimentato una variante ad alta velocità di SPIF su un tornio per la produzione di parti assialsimmetriche, non mostrando alcun effetto negativo dell'aumento della velocità di deformazione in SPIF.

Inoltre, per alcuni materiali, come l'alluminio, è stato osservato un aumento della formabilità a velocità di deformazione elevate. In questi studi, le velocità di formatura sono state aumentate dai convenzionali 2 m/min fino a estremi di 600 m/min. Ciò dimostra la richiesta di macchine altamente dinamiche. Tuttavia, un aumento della velocità di formatura può influire negativamente sulla formabilità, deteriorando la finitura superficiale di alcuni metalli, tipo gli acciai.

I robot articolati sono la seconda attrezzatura più utilizzata per la loro versatilità e il basso costo [10]. Tuttavia, la bassa rigidità e l'assoluta precisione sono un grande svantaggio di queste attrezzature [11]. Un'ulteriore categoria comprende macchine progettate appositamente costituite da combinazioni di assi lineari o cinematica parallela (ad esempio [12]). Principalmente la cinematica parallela fornisce una rigidità superiore e consente un comportamento dinamico elevato, ma è limitata nell'intervallo di lavoro [6].

In una variante strettamente correlata a SPIF, viene utilizzato un doppio set di utensili dinamici. Un utensile su ciascun lato del foglio di lamiera può fungere sia da utensile di formatura che da utensile di supporto. Ciò consente la formazione di forme con maggiore precisione e complessità. I requisiti hardware per queste piattaforme sono simili a quelli di SPIF a condizione che il sistema sia raddoppiato e che i sistemi di posizionamento su entrambi i lati del foglio di lamiera siano sincronizzati, inoltre lo strumento secondario consente di supportare la parte sia localmente che lungo la sua periferia.

L'eliminazione di utensili dedicati rende SPIF un processo versatile, ed economicamente fattibile per piccole serie di parti. La forma finale in SPIF, come descritto, è imposta da deformazioni locali lungo la traiettoria dell'utensile al contrario delle deformazioni globali imposte dalla geometria dell'utensile che avvengono nello stampaggio convenzionale o nell'imbutitura profonda. Ciò limita l'influenza della geometria dell'utensile sulla precisione finale e consente l'uso di geometrie di utensili generiche per un'ampia varietà di parti. Un semplice utensile con punta emisferica è l'utensile di scelta per la maggior parte

delle parti. Le variazioni alla geometria dell'utensile possono essere trovate solo per superare limiti specifici in SPIF.

Sebbene le parti possano essere realizzate utilizzando un singolo utensile generico, la dimensione dell'utensile è un fattore influente nel processo SPIF. Aerens et al. [5] hanno segnalato l'aumento delle forze di processo quando si aumenta la dimensione dell'utensile. Allo stesso modo, è stata osservata una diminuzione della formabilità durante l'aumento delle dimensioni dell'utensile [17].

Nella pratica quotidiana, la dimensione dell'utensile è limitata da forze elevate e dal più piccolo dettaglio da produrre e/o dai limiti della macchina. La piccola area di contatto tra utensile e lamiera determina un'elevata pressione di contatto e un notevole attrito superficiale [18]. Il deterioramento della superficie e la ridotta formabilità dovuta all'attrito possono essere contrastati al meglio utilizzando la lubrificazione e una rotazione dell'utensile sulla lamiera. Gli studi [1] hanno fornito una panoramica completa considerando la velocità di rotazione assiale ottimale di un utensile azionato rispetto all'angolo della parete del pezzo, mentre un utensile a rotazione libera del mandrino ruoterà automaticamente alla velocità ottimale, consentendo alla punta dell'utensile di ruotare in tutte le direzioni [19].

L'uso di **lubrificazione** riduce ulteriormente l'attrito tra l'utensile e il foglio di lamiera. Il lavaggio della lamiera con lubrificante durante la lavorazione consente la rimozione sia di eventuali detriti derivanti dall'interazione utensile-lamiera durante la formatura ed ad evitare danni superficiali eccessivi. Nel processo di formatura incrementale vengono utilizzati un'ampia varietà di oli, grassi e cere. Ricerche [20] hanno concluso che, all'aumentare della durezza del materiale del foglio di lamiera, la viscosità richiesta della lubrificazione diminuisce.

Oltre agli effetti sulla superficie e sulla formabilità della parte finale, l'attrito significativo in SPIF ha anche un effetto sull'usura dell'utensile e sulla scelta del materiale dell'utensile. Naturalmente l'utensile deve essere duro, il che si traduce nell'uso di materiali come acciaio per utensili (HSS) e utensili in carburo [22]. Per aumentare ulteriormente la durezza, questi utensili vengono spesso temprati (in superficie) e/o rivestiti con rivestimenti convenzionali come quelli utilizzati sugli utensili da taglio (TiN, CrN).

Con usura si identifica “la perdita o rimozione progressiva di materiale superficiale” [5]. L'**usura** degli utensili durante i processi di lavorazione è estremamente significativa dato che va ad interferire con la qualità superficiale del prodotto ottenuto.

In particolar modo si distingue tra usura adesiva e abrasiva.

L'usura adesiva è una forma di usura severa caratterizzata da elevate velocità di usura ed un coefficiente di attrito instabile, per cui si ha adesione di materiale tra un corpo e l'altro, essa caratterizza in particolar modo i metalli spesso anche a causa della scarsa efficacia del lubrificante interposto.

Di norma due superfici semplicemente a contatto non aderiscono in quanto intervengono vari agenti contaminanti quali ossigeno, acqua o oli (a parte i metalli nobili, tutti i metalli sono ricoperti da uno strato di ossido che previene il contatto diretto tra pezzo e utensile).

I lubrificanti utilizzati in SPIF corrispondono a quelli utilizzati nello stampaggio convenzionale e sono principalmente adattati ai valori delle pressioni, al tipo di materiali della coppia di attrito, alla temperatura di formatura e alla velocità di lavoro dell'utensile.

In particolare è stato osservato che i metalli a struttura HCP hanno minore adesione rispetto alle altre forme cristalline. Infatti essi hanno meno sistemi di scorrimento e sono pertanto meno duttili.

Inoltre elevata durezza, rugosità superficiale, modulo elastico ed energia superficiale fanno calare l'adesione. Tuttavia bisogna considerare che se una maggior rugosità superficiale aumenta l'usura adesiva, una superficie troppo liscia riduce la capacità di trattenere detriti e lubrificanti e fa aumentare le forze d'interazione molecolare. Infine anche una microstruttura complessa (costituita da due o più fasi) riduce la saldabilità a freddo e l'usura adesiva.

L'azione combinata di adesione tra asperità e moto di scorrimento causa una notevole deformazione plastica delle asperità, la frattura avviene dalla parte del componente più debole che richiede meno energia. Il frammento di usura che viene così a formarsi può rimanere attaccato al materiale più duro formando un "transfer film" oppure diventare un frammento libero. In quest'ultimo caso però la velocità d'usura aumenta drammaticamente.

Il secondo tipo di usura, quella abrasiva, consiste nella perdita di materiale a causa dello strofinamento di particelle di durezza maggiore o uguale a quella della superficie opposta. Particelle possono rimuovere del materiale attraverso micro tagli, microfratture, pull-out di singoli grani o fatica accentuata da deformazioni ripetute. Di solito la durezza del materiale deve essere < 0.8 della durezza della particella per avere rapida abrasione. Il modello classico è quello del taglio in cui un'asperità dura taglia una superficie più soffice. Il materiale tagliato viene rimosso come detrito d'usura. Se si ha a che fare con un materiale duttile, la superficie usurata viene deformata ripetutamente, per cui il detrito è originato dal fenomeno di fatica.

Sono state studiate, sviluppate e verificate nel corso degli anni anche le curve di formabilità/frattura per SPIF (Fig. 4.2).

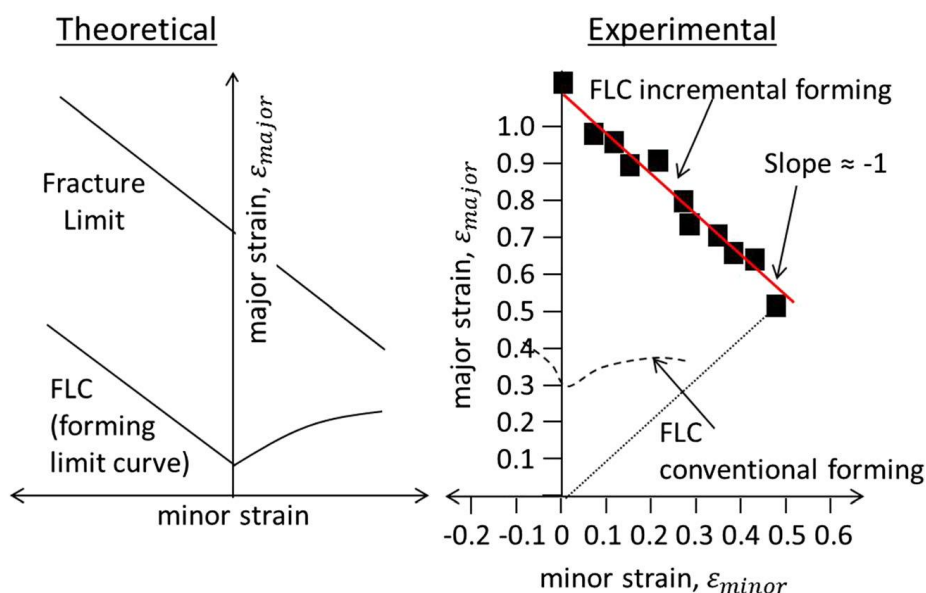


Figura 4.2: Illustrazione del limite di restringimento (FLC) e del limite di frattura (sinistra); FLC misurato in SPIF per AA 1050-O spesso 1,21 mm utilizzando parti piramidali (destra)

Sebbene sia chiaro che il cedimento del materiale in SPIF dipenda in modo significativo dal modo in cui lo stress viene imposto al materiale. Come accennato in precedenza, sono stati sviluppati diagrammi di limite di formatura empirici. Questa indagine ha portato alla conclusione che una probabile modalità di rottura del materiale in SPIF è coerente con lo stiramento, piuttosto che con il solo taglio.

È stato proposto che la flessione, il taglio, la deformazione ciclica e lo stress idrostatico siano i meccanismi di deformazione dominanti nell'SPIF, sebbene sia difficile individuare i fattori significativi relativi alla frattura [26].

La conclusione è che gli effetti ciclici aumentano effettivamente la formabilità, ma la giustificazione completa richiede una modellazione e un'indagine costitutive migliorate.

Una scuola di pensiero è che la formabilità in SPIF è limitata dalla strizione e che esiste un effetto stabilizzante causato da un taglio significativo attraverso lo spessore o da percorsi di deformazione dentellati derivanti da una deformazione plastica ciclica locale [27–30].

La diffusione della deformazione localizzata porta quindi il materiale ad avvicinarsi al limite di **frattura prima della rottura localizzata**.

I parametri di processo che influenzano direttamente i **meccanismi di guasto** dominanti in SPIF sono, tra cui, ma non solo, spessore della lamiera, raggio dell'utensile, velocità di formatura, condizioni di lubrificazione e strategie del percorso utensile.

Bhattacharya et al. [17] hanno notato che l'angolo massimo di formatura o di imbutitura in SPIF aumenta con la diminuzione del diametro dell'utensile, la diminuzione della profondità incrementale e l'aumento dello spessore della lamiera.

I tipi di guasto e le posizioni in SPIF possono anche variare a seconda dei percorsi utensile e del diametro dell'utensile di formatura. I profili di guasto comuni e le rispettive posizioni per SPIF sono forniti dalla Fig. 4.3.



Figura 4.3: Crepa circonferenziale in deformazione piana, condizioni di simmetria rotazionale che può anche propagarsi a zig-zag; b Crepa in stiramento biassiale, condizioni di simmetria rotazionale; c Inizio della crepa dopo la strizione sotto stiramento biassiale, condizioni di simmetria rotazionale dovute all'uso di un utensile di grandi dimensioni (ad es. diametro dell'utensile > 20 mm).

All'aumentare del diametro dell'utensile, il rapporto di triassialità dello stress è aumentato mentre l'angolo di formatura massimo è diminuito. Inoltre, è stata osservata una maggiore formabilità quando si utilizzavano diametri dell'utensile più piccoli.

L'efficacia di vari effetti stabilizzanti rispetto alla strizione localizzata, nonché i meccanismi di deformazione prominenti in SPIF, dipendono in larga misura dal rapporto tra lo spessore iniziale della lamiera e il diametro dell'utensile. In sintesi, il limite di frattura del materiale osservato in SPIF è notevolmente più elevato delle tradizionali curve limite di formatura utilizzate nei processi di stampaggio.

La maggior parte dei limiti di rottura è approssimata nello spazio di deformazione principale da una linea retta con una pendenza negativa. Le ragioni proposte per la maggiore formabilità rientrano in genere in una delle due categorie:

(1) la rottura è limitata dalla strizione, che è prolungata da vari effetti stabilizzanti come il taglio nel piano o la pressione idrostatica;

(2) che un assottigliamento eccessivo porta direttamente alla frattura senza una precedente strozzatura localizzata.

L'instabilità del processo nella formatura di lamiera si riferisce solitamente a strizioni localizzate che portano a rotture da strappo, a grinze (piccole deformazioni di lunghezza d'onda che emergono in presenza di normale pressione di contatto) o a fenomeni di deformazione (che si verificano in assenza di normale contatto da entrambi i lati del foglio di lamiera).

È stato anche osservato che l'instabilità si è verificata prevalentemente nella direzione di laminazione della lamiera, la direzione allungata dei grani, indicando possibili effetti di anisotropia e microstruttura per l'instabilità nell'instabilità nel micro-SPIF.

Il metodo di formatura multi-stadio prevede che la parte veniva ridimensionata verticalmente, aumentando ogni volta la profondità.

La traiettoria è il principale fattore di influenza, che determina la geometria finale. Sebbene apparentemente semplice all'inizio, molte variabili diventano critiche quando si progetta un percorso utensile di successo. Alcuni dei parametri di processo stabiliti in SPIF sono correlati al tipo e allo spessore del materiale, alla profondità incrementale, alla velocità dell'utensile, al diametro dell'utensile, alla forma del percorso utensile, alla compensazione delle caratteristiche, alla compensazione del ritorno elastico e alla formatura multistadio [1, 7, 31, 84–85, 86]. Le scelte relative alle strategie del percorso utensile influiscono sul risultato di SPIF, in particolare sulla precisione geometrica, lo stress residuo, la finitura superficiale, la distribuzione dello spessore della lamiera e la formabilità del materiale. (Figura 4.4)

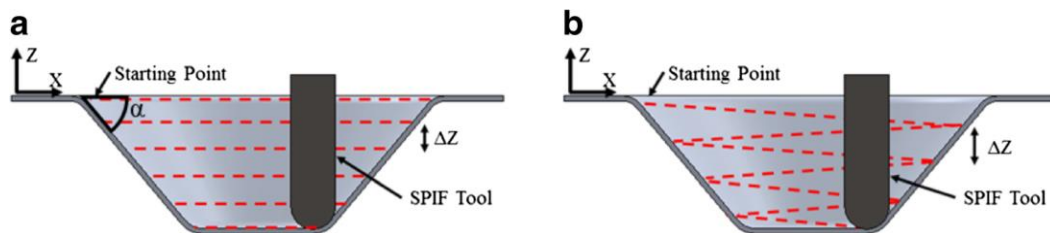


Figura 4.4: Le linee tratteggiate corrispondono a un percorso utensile proposto per una singola parte di feature dove (a) è la vista della sezione trasversale di un cono con angolo di parete γ formato utilizzando un percorso utensile a livello Z e (b) è un cono formato utilizzando un percorso utensile a spirale. L'incremento γZ è stato esagerato per chiarimento

I layout di percorso utensile di contorno più utilizzati sono percorsi utensile a livello z e a spirale, come illustrato concettualmente nella Fig. 4.4. In genere, i percorsi utensile a spirale forniscono una finitura superficiale migliore rispetto ai percorsi a livello Z, grazie alla

transizione istantanea verso il basso tra i contorni successivi in questi ultimi. Tuttavia, i percorsi utensile a spirale possono essere difficili da implementare su geometrie complesse. Gli studi [24] hanno dimostrato che elevate velocità utensile (ovvero superiori a 5 m/min) possono essere utilizzate in SPIF senza compromettere in modo significativo la finitura superficiale o l'integrità strutturale della parte risultante, il che implica che il tempo di formatura può essere ridotto rispetto alle comuni applicazioni di ricerca.

Tuttavia, la finitura superficiale risultante è direttamente correlata alla profondità incrementale, che può essere chiaramente osservata quando si considera che l'altezza della smeratura risultante lungo la superficie del foglio di lamiera formato è correlata al diametro dell'utensile e alla profondità incrementale.

In genere, i fattori più significativi che influenzano la formabilità, la precisione geometrica e la finitura superficiale sono il diametro dell'utensile, la profondità incrementale e il tipo/spessore del materiale.

Per superare la bassa accuratezza geometrica e gli angoli di formatura limitati ottenibili, una variante di processo è quella supportata dal calore di SPIF. I processi di formatura incrementale a caldo sono utili per la formatura di materiali che mostrano una scarsa duttilità complessiva a temperatura ambiente. Tra i materiali testati, le leghe leggere di Mg e Ti sono interessanti da utilizzare in applicazioni aerospaziali, biomediche e automotive grazie alla loro resistenza superiore ad apporto di peso. Aumentando la temperatura di formatura vengono attivati più piani di scorrimento, il che porta a migliori proprietà di duttilità per queste leghe [43, 44].

Inoltre, la formatura a temperature elevate determina anche una riduzione del ritorno elastico e delle forze di formatura [46]. Questi effetti sono stati segnalati anche per SPIF supportato dal calore [22] e possono aiutare a superare le limitazioni di formatura nella formatura incrementale a punto singolo, almeno in una certa misura.

Nell'ambito degli sviluppi della tecnologia di formatura incrementale a caldo, si possono distinguere fondamentalmente due tipi di strategie di riscaldamento: riscaldamento localizzato e globale. Mentre il riscaldamento localizzato offre il vantaggio di limitare la deformazione indesiderata all'esterno della zona di contatto tra utensile e lamiera, il maggior numero di variabili che determinano i parametri di processo ottimali è molto più complesso rispetto al caso del riscaldamento globale, comunque l'aumento della temperatura determina lievi miglioramenti della formabilità del materiale.

Il **riscaldamento locale** del foglio di lamiera può essere eseguito mediante l'utilizzo di:

- **Lampade alogene:** a causa della progettazione della sorgente di riscaldamento alogena, una gran parte dell'area riscaldata è posizionata all'esterno della zona di contatto tra utensile e lamiera e il riscaldamento non può essere considerato completamente localizzato.
- **Assistito da laser:** consente di generare campi di temperatura dinamici adatti a supporto dell'ottimizzazione del processo SPIF. La configurazione LASPIF consente solo il riscaldamento della parte in un'area scelta strategicamente nelle immediate vicinanze dell'area di contatto dell'utensile e può seguire dinamicamente il movimento dell'utensile di formatura, offrendo così vantaggi significativi. Anche una migliore precisione, ottenuta riducendo il ritorno elastico, è stata segnalata come un vantaggio del forte gradiente di temperatura dinamico derivante dal riscaldamento localizzato [36].
- **Corrente elettrica:** sulla base della legge del riscaldamento resistivo, una corrente elettrica passa dall'utensile attraverso il foglio di lamiera cosicché la lamiera viene riscaldata localmente, aumentando efficacemente la formabilità della stessa.

Nello SPIF l'angolo della parete della parte deformazione e il **diametro dell'utensile** sono inversamente proporzionali al calore fornito alla lamiera. Pertanto, l'applicazione di un utensile di formatura con raggio piccolo e la formatura di parti poco inclinate potrebbero causare la bruciatura della lamiera a causa dell'accumulo di calore localizzato all'interfaccia utensile-lamiera. Inoltre, il riscaldamento non può essere localizzato completamente poiché l'applicazione del raffreddamento attivo influirà sul sistema di riscaldamento elettrico e, senza lubrificazione, la finitura superficiale è compromessa.

Inoltre, per risultati di formatura a caldo affidabili e ripetibili, lo sviluppo di un sistema di misurazione e controllo della temperatura accurato è fondamentale. Tuttavia, a causa del movimento della fonte di riscaldamento e della complessità dell'installazione dei sensori di temperatura, la maggior parte dei processi di formatura a caldo localizzati sopra menzionati soffre di una mancanza di misurazioni accurate della temperatura.

Capitolo 5: Conclusioni

Il presente elaborato di tesi si concentra sullo studio dell'influenza del percorso utensile sull'andamento delle forze che si manifestano eseguendo la formatura di profilati a partire da lamiere metalliche di diversi materiali e spessori utilizzando il processo di formatura incrementale. Nello specifico, inoltre, il percorso utensili influenza notevolmente anche la qualità geometrica e superficiale del componente che si va a realizzare dato che attraverso l'applicazione di una deformazione localizzata è possibile ridurre notevolmente la formazione di difetti superficiali, quali grinze o ondulazioni.

Come detto, tra i diversi processi di trasformazione della lamiera risulta particolarmente interessante, per le sue doti di flessibilità, il processo di formatura incrementale a singolo punto (Single Point Incremental Forming o "SPIF"). Tale processo sfrutta un punzone semisferico per compiere l'intera lavorazione. L'utensile viene movimentato nello spazio per deformare la lamiera grazie ad un sistema CNC (macchina a controllo numerico) ad almeno 3 assi o grazie a robot antropomorfi.

I principali risultati sono elencati di seguito:

- I movimenti del punzone sono complessi e progressivi, ma se opportunamente definiti permettono di ottenere una grande varietà di forme e geometrie. Il vantaggio più interessante di questo processo è proprio legato alla flessibilità.
- A differenza di altri processi tradizionali non servono costosi e complessi stampi, ma è invece necessario solamente un semplice utensile standard. In questo modo è possibile produrre componenti diversi semplicemente riprogrammando il macchinario, riducendo quindi costi e tempi di attesa. Questo processo risulta infatti di particolare successo nei settori in cui sono richieste produzioni di piccole serie di componenti.
- Durante la produzione tramite tecnica "SPIF" le forze dovute agli attriti tra l'utensile e la lamiera giocano un ruolo fondamentale per quanto riguarda la qualità del prodotto finito. Diversi studi sono già stati effettuati per approfondire l'usura, le forze in gioco e la rugosità superficiale di prodotti così ottenuti. Dallo studio della letteratura appare chiaro come, per ottenere componenti di qualità, sia necessario ridurre le forze in gioco.

- La forza che agisce sul punzone è infatti correlata all'insorgere di difetti e alla qualità superficiale. La soluzione tipicamente utilizzata per risolvere questo problema è l'impiego di lubrificanti. Essi permettono infatti di migliorare il risultato finale del processo, ma sono nocivi per l'ambiente, rischiano di influenzare la composizione chimica della lamiera lavorata e, non meno importante, richiedono risorse per la pulizia dal componente.

Per poter arrivare ad una applicazione sistematica dello SPIF è ancora necessario fare ricerca su vari aspetti, come le **forze necessarie per la deformazione**, anche in riferimento al materiale in considerazione, **le dimensioni dei macchinari**, proporzionali alle dimensioni della lamiera di partenza, nonché sulla **definizione accurata dei limiti di formabilità possibili**.

Uno dei **limiti** nell'applicazione su scala industriale del Single Point Incremental Forming è l'**imprecisione geometrica** a cui sono soggetti i componenti così prodotto a causa del ritorno elastico e plastico che si manifesta nelle zone che circondano l'area di deformazione. Gli studi propongono una nuova tecnica per ridurre significativamente l'errore su una lega di Alluminio (Al5182) e su un acciaio (65Cr2) che consiste nell'applicazione, durante la lavorazione, di un riscaldamento dinamico. Infatti tenendo conto della natura dinamica del processo, l'applicazione di calore permette di avere un controllo spaziale e temporale delle proprietà del materiale con cui viene realizzato il componente. In particolar modo si è osservata l'efficacia di un riscaldamento laser che unisce la versatilità alla controllabilità del processo. A fronte di questo studio, gli autori riportano un aumento significativo della formabilità di circa il 44.5%. La stessa qualità superficiale sembra migliorare all'aumentare della temperatura, arrivando ad un valore di Ra poco al di sotto di 2 μ m.

Per evitare le imprecisioni geometriche propongono l'utilizzo di un secondo utensile che deformi la zona esterna, in modo che il gap tra i due utensili sia inferiore allo spessore della lamiera (si parla di "squeezing toolpath"). Tuttavia questa opzione presenta alcuni inconvenienti, oltre un certo livello di deformazione si ha una perdita di contatto tra lamiera e utensile esterno, senza contare il fatto che la progettazione di una doppia traiettoria sarebbe molto più complessa e il meccanismo in sé è più difficile da mettere in pratica.

Una delle caratteristiche principali del processo di formatura incrementale è che si tratta di un **processo lento** rispetto alle tradizionali operazioni di formatura di fogli di lamiera come lo stampaggio. Quindi, un requisito tecnologico chiave per la produzione industriale massiva è quello di accelerare il processo per renderlo una soluzione competitiva.

Inoltre per riuscire a **ridurre gli attriti** senza utilizzare rischiosi lubrificanti gli autori della ricerca propongono una soluzione innovativa: eccitare la lamiera da lavorare tramite **vibrazioni ultrasoniche** così da ridurre attriti e forze durante la trasformazione. Si può utilizzare un utensile semisferico in acciaio e la lamiera è eccitata da un trasduttore piezoelettrico. Qui le vibrazioni laterali sul piano XY sono predominanti rispetto a quelle in direzione normale (asse Z) considerando il piano della lamiera. In questo modo è possibile favorire lo scorrimento dell'utensile, senza andare ad impattare negativamente sulla superficie. La diminuzione degli attriti è più che soddisfacente dato che si ottiene una riduzione superiore all'80 %. Questa soluzione permette di rimanere sempre in regime di scorrimento permettendo di ottenere un notevole incremento dell'efficienza del processo di formatura incrementale.

Le forze di attrito vengono drasticamente ridotte quando viene utilizzata una contromisura, così da efficientare il processo e migliorare la qualità finale del prodotto. L'utilizzo delle vibrazioni permette di ottenere risultati molto simili alla lubrificazione tradizionale dal punto di vista delle forze in gioco. Questa soluzione alternativa permette però di risolvere il problema ambientale evitando il problema dello smaltimento di sostanze nocive e non richiede la pulizia delle superfici.

Sono state inoltre effettuate delle misure di **rugosità superficiale** sul prodotto finale. La superficie del componente ottenuto tramite il processo con vibrazioni presenta $Ra = 0.18\text{--}0.25\ \mu\text{m}$, quindi ottimi risultati rispetto alle soluzioni alternative.

Pertanto il processo innovativo proposto dai ricercatori risulta essere particolarmente interessante. La tecnica di formatura incrementale a singolo punto, SPIF, già particolarmente interessante per la sua flessibilità, viene ulteriormente migliorata grazie, quindi, all'introduzione di un'eccitazione ultrasonica.

Per ottimizzare il problema delle forze di attrito durante la lavorazione è possibile, in alternativa alla lubrificazione tradizionale, introdurre vibrazioni ultrasoniche in grado di migliorare lo scorrimento dell'utensile sulla lamiera.

Gli autori hanno lavorato ad ottimizzare i parametri della trasformazione, ad esempio, ottimizzando il range di frequenza delle vibrazioni e hanno studiato una sperimentazione con l'obiettivo di mostrare le potenzialità di tale processo. I risultati così ottenuti sono più che soddisfacenti: le forze sono state ridotte di oltre l'80% e la finitura superficiale del componente finale risulta eccellente.

In conclusione **lo SPIF mostra elevate potenzialità sia in termini di tempo, che di semplicità ed economicità.** La qualità superficiale è assicurata soprattutto dalla lavorazione ad elevate velocità, dalle temperature di lavoro e dalla lubrificazione così come il mantenimento delle caratteristiche del materiale. Per questo lo SPIF si presenta come una **valida tecnologia per l'ottenimento di prodotti non solo in ambiti altamente specializzati** come l'aerospaziale o il biomedicale, **ma anche per prodotti industriali** “comuni” quali: pentolame, piatti-doccia, componenti automobilistici, ecc...

I vantaggi riguardano inoltre l'esclusione di lubrificanti che sono solitamente nocivi per l'ambiente e necessitano ulteriori lavorazioni per la pulizia del componente. Gli studi mostrano un'interessante integrazione di brillanti soluzioni produttive. L'innovazione è data proprio dalla combinazione di tecnologie che permettono di ottenere risultati concreti nel contesto produttivo. Questa soluzione ad oggi è ancora in fase di studio ed ottimizzazione, ma i presupposti sono ottimi per un'introduzione in ambito industriale.

Le aziende manifatturiere sono infatti sempre più alla ricerca di soluzioni flessibili ed efficienti sia dal punto di vista produttivo che energetico ed ambientale. Lo scopo della ricerca è infatti proprio quello di offrire nuove soluzioni, cercando di rimanere in linea con le attuali necessità del mondo industriale, così da sostenere una crescita produttiva sostenibile.

*Coloro che ci hanno lasciati non sono degli assenti,
sono solo degli invisibili: tengono i loro occhi pieni di
gloria puntati nei nostri pieni di lacrime
(Sant'Agostino)*

Bibliografia

- [1] E. Simonetto, A. Ghiotti, S. Bruschi, e S. Filippi, «Flexible Incremental Roller Flanging process for metal sheets profiles», in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2021, pagg. 219–224. doi: 10.1016/j.procir.2021.10.035.
- [2] A. Amore, «Modellazione del percorso utensili in processi di profilatura incrementale di lamiere metalliche», 2022.
- [3] Adams D, Jeswiet J (2014) Design rules and applications of single-point incremental forming. *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf* 229(5):754–760.
- [4] J Jeswiet J, Micari F, Hirt G, Bramley A, Duflou J, Allwood J(2005) Asymmetric single point incremental forming of sheetmetal.*CIRP Ann Manuf Technol* 54(2):88–114.
- [5] I. M. Russo, C. J. Cleaver, E. G. Loukaides, e J. M. Allwood, «Raising by spinning», *CIRP Annals*, vol. 69, n. 1, pagg. 277–280, gen. 2020, doi: 10.1016/j.cirp.2020.04.073.
- [6] T. Trzepieciński, V. Oleksik, T. Pepelnjak, S. M. Najm, I. Paniti, e K. Maji, «Emerging trends in single point incremental sheet forming of lightweight metals», *Metals*, vol. 11, n. 8. MDPI AG, 1 agosto 2021. doi: 10.3390/met11081188.
- [7] S. Ullah, P. Xu, X. Li, Y. Li, K. Han, e D. Li, «A Review on Part Geometric Precision Improvement Strategies in Double-Sided Incremental Forming», *Metals*, vol. 12, n. 1. MDPI, 1 gennaio 2022. doi: 10.3390/met12010103.
- [8] J. Cao, «Double-Sided Incremental Forming», 2019.
- [9] N. Moser, D. Leem, K. Ehmann, e J. Cao, «A high-fidelity simulation of double-sided incremental forming: Improving the accuracy by incorporating the effects of machine compliance», *J Mater Process Technol*, vol. 295, set. 2021, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117152.

- [10] Y. Dewang e V. Sharma, «A study on sheet metal hemming process», in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2019, pagg. 2091–2095. doi: 10.1016/j.matpr.2019.09.074.
- [11] P. A. Limon-Leyva, A. J. Balvantín, J. A. Diosdado-De-la-Peña, R. A. Figueroa-Díaz, E. Rojas-Mancera, e V. A. Ramirez, «Parametric optimization of roll-hemming process in oblique planes with linear and non-linear trajectories», *J Manuf Process*, vol. 50, pagg. 123–131, feb. 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.12.019.
- [12] N. Le Maoût, P. Y. Manach, e S. Thuillier, «Influence of prestrain on the numerical simulation of the roller hemming process», *J Mater Process Technol*, vol. 212, n. 2, pagg. 450–457, feb. 2012, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.10.008.
- [13] S. R. Schmid e S. Kalpakjian, «KALPAKJIAN R», 2009.
- [14] Z. Marciniak, J. L. Duncan, e S. J. Hu, *Mechanics of sheet metal forming*. Butterworth-Heinemann, 2002.
- [15] A. Marinò, «Elementi di teoria delle piastre inflesse».
- [16] C. Roberts Marks, «The Analysis of Cantilever Plates with Concentrated Loads», 1941. [Online]. Disponibile su: https://trace.tennessee.edu/utk_gradthes
- [17] «Sensori di Forza Kistler». <https://www.kistler.com/IT/it/c/sensori-di-forza/CG21-force-sensors> (consultato 23 marzo 2023).
- [18] «KISTLER INSTRUMENTS 5073A311 CHARGE AMPLIFIER 18-30V». <https://www.automationrecovery.com/products/KISTLER-INSTRUMENTS-5073A311-CHARGE-AMPLIFIER-18-30V/?ProductID=30297> (consultato 23 marzo 2023).
- [19] «Aerens R, Eyckens P, Van Bael A, Duflou JR (2010) Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations. *Int J Adv Manuf Technol* 46(9–12):969–982.
- [20] Fonte: Xu, Q., & Yao, Z. (2022). Forming parameters on friction during single

- point incremental forming. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 1–14.
- [21] Fonte: Ostasevicius, V., Paleviciute, I., Paulauskaite-Taraseviciene, A., Jurenas, V., Eidukynas, D., & Kizauskiene, L. (2021). Comparative analysis of machine learning methods for predicting robotized incremental metal sheet forming force. *Sensors*, 22(1), 18.
 - [22] Leszak E (1967) Apparatus and process for incremental dieless forming. Patent US3342051A1, published 1967–09-19
 - [23] Meier H, Dewald O, Zhang J (2005) Development of a robotbased sheet metal forming process. *Steel Res Int* 76(2–3):167– 170
 - [24] Verbert J, Aerens R, Vanhove H, Aertbeliën E, Duflou J (2009) Obtainable accuracies and compensation strategies for robot supported SPIF. *Key Eng Mater* 410–411:679–687
 - [25] Alves de Sousa RJ, Ferreira JAF, Sá de Farias JB, Torrão JND, Afonso DG, Martins MABE (2014) SPIF-A: on the development of a new concept of incremental forming machine. *Struct Eng Mech* 49(5):645–660.
 - [26] Bhattacharya A, Maneesh K, Venkata Reddy N, Cao J (2011) Formability and surface finish studies in single point incremental forming. *J Manuf Sci Eng* 133:6 061020
 - [27] Eyckens P, Van Bael A, Aerens R, Duflou J, Van Houtte P (2008) Small-scale finite element modelling of the plastic deformation zone in the incremental forming process. *Int J Mater Form* 1:1159
 - [28] Marabuto SR, Afonso D, Ferreira JAF, Melo FQ, Martins MABE, de Sousa RJA (2011) Finding the best machine for SPIF operations - a brief discussion. *Key Eng Mater* 473:861–868.
 - [29] Ambrogio G, Gagliardi F, Filice L (2013) On the high-speed single point incremental forming of titanium alloys. *CIRPAnn* 62(1): 243–246.

- [30] Vanhove H, Mohammadi A, Guo Y, Duflou JR (2014) High-speed single point incremental forming of an automotive aluminium alloy. *Key Eng Mater* 622-623:433–439.
- [31] Verbert J, Aerens R, Vanhove H, Aertbeliën E, Duflou J (2009) Obtainable accuracies and compensation strategies for robot supported SPIF. *Key Eng Mater* 410–411:679–687
- [32] Alves de Sousa RJ, Ferreira JAF, Sá de Farias JB, Torráo JND, Afonso DG, Martins MABE (2014) SPIF-A: on the development of a new concept of incremental forming machine. *Struct Eng Mech* 49(5):645–660.
10.12989/sem.2014.49.5.645
- [33] Johnson CF, Kiridena VS, Ren F, Xia ZC (2012) System and method for incrementally forming a workpiece, US Patent US8322176
- [34] Meier H, Buff B, Laurischka t R, Smukala V (2009) Increasing the part accuracy in dieless robot-based incremental sheet metal forming. *CIRP Ann Manuf Technol* 58(1):233–238
- [35] Paniti I (2014) A novel, single-robot based two sided incremental sheet forming system, ISR/ROBOTIK. 41st International Symposium on Robotics, Proceedings of VDE
- [36] Duflou J, Callebaut B, Verbert J, De Baerdemaeker H (2008) Improved SPIF performance through dynamic local heating. *Int J Mach Tools Manuf* 48(5):543–549.

*Dedico con profondo affetto questo mio traguardo
alle persone a me più care:
Ai miei genitori che hanno sempre creduto in me
accompagnandomi in questi anni
con tanto amore e tanta pazienza.
Ai miei nonni, ai miei zii, ai miei angeli custodi,
guide, insegnanti dei veri valori della vita,
stimolo per la mia crescita personale e professionale.
A chi mi ha insegnato ad ascoltare i silenzi,
a guardare gli occhi,
a provare a sentirmi sicura senza chiederlo mille volte.
A chi mi ha insegnato che il silenzio è intimo e
non c'è sempre bisogno di parlarsi per capire come vanno le cose.
A chi mi ha insegnato che ci vuole pazienza e coraggio,
e che spesso le paure sono castelli immaginari.
A chi mi ha insegnato che la vita non è solo bianco o solo nero
ma che ha mille sfumature bellissime, e
che per stare bene non si ha sempre bisogno
di certezze, di grazie, di complimenti o di belle parole,
ma che bastano gli sguardi e che con gli occhi si può capire ogni cosa.
A chi mi ha insegnato che il mondo non sempre è come vorresti
e che le lacrime non servono, che bisogna lottare,
tirarsi su le maniche e provare a vincere.
A chi mi ha insegnato la filosofia del voler bene
senza darne dimostrazione e
senza lasciare che tutto sia scontato.
A chi mi ha insegnato che le persone parleranno sempre e
allora lasciamole parlare,
lasciamo a loro la convinzione di essere superiori
e di saperne di più, ridendo delle critiche,
sedendoci, riflettendo ed
imparando che da soli si può tutto
ma insieme è più bello e semplice.*