

<p>SESSIONE D MECCANICA DEI MATERIALI</p>
---

**ANALISI F.E.M. DEL RITORNO ELASTICO DI COMPONENTI IN  
LAMIERA STAMPATA**

F. Campana<sup>a</sup>, G. Santucci<sup>a</sup>, M. Sasso<sup>b</sup>

*<sup>a</sup> Dipartimento di Meccanica e Aeronautica,  
Università di Roma “La Sapienza”,  
via Eudossiana 18 – 00184 Roma  
e-mail: francesca.campana@uniroma1.it*

*<sup>b</sup> Dipartimento di Meccanica, Università di Ancona,  
via Brezze Bianche – 60100 Ancona*

La messa a punto e la validazione del calcolo agli elementi finiti del ritorno elastico di componenti in lamiera sottile rappresenta un importante obiettivo per l'industria dello stampaggio per ridurre l'elevata incidenza economica delle conseguenze che esso implica e per esaminare in maniera efficace il progetto di componenti realizzati con materiali altoresistenziali, particolarmente critici da questo punto di vista.

Il presente lavoro si prefigge lo scopo di analizzare attraverso la simulazione agli elementi finiti il comportamento di un pannello idroformato, soggetto ad un macroscopico problema di ritorno elastico in virtù della scarsa deformazione del bordo esterno. Simulando le condizioni di carico sperimentali si procede ad una prima analisi dell'attendibilità dei risultati numerici confrontando la forma finale del pezzo così ottenuto con quella sperimentale acquisita mediante un sistema di analisi di immagine.

---

## 1. INTRODUZIONE

Nello stampaggio di lamiere sottili il ritorno elastico rappresenta uno dei maggiori difetti che affliggono la messa a punto degli stampi. Esso si manifesta attraverso una deviazione dalla forma nominale causata dal recupero della deformazione elastica che avviene dopo la rimozione degli stampi. Le variabili che lo influenzano maggiormente sono le caratteristiche del materiale, quali la tensione di snervamento ed il coefficiente di incrudimento, lo spessore della lamiera e la geometria finale del componente.

La deviazione finale può assumere forme diverse in base alla sua localizzazione ed al disegno dello stampo. In linea generale si distingue tra deviazioni globali tipiche delle piegature ad ampio raggio, grinzosità regolari (ondulazioni) localizzate in prossimità di angoli con piccolo raggio di imbocco, e piccoli sporadici avvallamenti o sporgenze (bolli). Le ondulazioni e le deviazioni globali possono creare ostacoli nelle operazioni di assemblaggio mentre i cosiddetti bolli sono la causa principale dei difetti estetici, la cui entità è generalmente amplificata dalla verniciatura. Il più delle volte entrambi i problemi richiedono lo scarto del pezzo, aumentando i costi di produzione.

Data quindi la rilevante incidenza economica del problema, l'industria dello stampaggio, in particolare quella legata al settore automobilistico, richiede metodi di progettazione per la prevenzione di questi difetti per ridurre gli scarti e per assicurare l'impiego di nuovi materiali come gli acciai altoresistenziali o l'alluminio, che presentano problemi di ritorno elastico più accentuati rispetto agli altri materiali comunemente adottati nello stampaggio.

L'adozione della simulazione agli elementi finiti (FEM) nell'ambito della previsione del ritorno elastico sembra una soluzione auspicabile in considerazione del fatto che questo tipo di analisi rappresenta uno degli strumenti di maggior impiego per il progetto e la messa a punto della formatura di componenti stampati. Uno dei mezzi di simulazione FEM più diffusi per l'analisi dello stampaggio è il ricorso ai codici espliciti quali LS-DYNA e PAM-STAMP. Questi solutori, basati sull'integrazione nel tempo delle equazioni di equilibrio dinamico, permettono di valutare con particolare efficacia le grandi deformazioni che si verificano nel caso di sollecitazioni dinamiche ma sono poco indicati nei calcoli elastici in campo statico, anche se caratterizzati da grandi spostamenti come generalmente accade nel ritorno elastico, poiché introducono oscillazioni spurie di carattere numerico. Per questo motivo nell'analisi di lamiere stampate l'approccio usualmente seguito si basa sull'adozione di una seconda fase di calcolo statico a carattere implicito in cui si segue la deformazione subita dalla lamiera dopo la rimozione degli stampi, partendo dallo stato di tensione prodotto nella simulazione della fase di formatura [1,2].

Attualmente questo approccio ha visto un'ampia fioritura di studi ed analisi dettagliate sulla discussione degli algoritmi di calcolo, tuttavia gli studi applicativi si limitano per lo più a geometrie di prova bidimensionali basate su lamierini piegati in uno o più punti ("v-bending" ed "u-bending test"). La causa di ciò è da ricondurre alla necessità di appurare l'affidabilità dei risultati nei confronti delle grandezze di controllo del processo di formatura e la loro stabilità al variare dei parametri di simulazione.

Nei paragrafi successivi dopo una breve discussione delle problematiche generali sulla messa a punto del calcolo si esaminano i risultati ottenuti simulando con il codice LS-DYNA960 un componente idroformato che attraverso prove sperimentali ha rivelato una forte attitudine al ritorno elastico a causa della scarsa deformazione dei lembi più esterni. Avvalendosi di

acquisizioni sperimentali delle geometrie, le deformate numeriche vengono discusse in funzione delle condizioni di carico, del tipo di materiale e del modello costitutivo adottato.

## 2. DEFINIZIONE DELLA SIMULAZIONE FEM

La simulazione del ritorno elastico di lamiere stampate può essere considerata un calcolo di *restart* basato sui risultati della fase di calcolo esplicito in cui si riproduce la fase di formatura. Nel caso di LSDYNA il solutore implicito è di tipo incrementale iterativo ed è stato sviluppato per analisi che prevedono grandi spostamenti. Gli schemi di iterazione disponibili sono dodici e si basano sul principio del *line search*, l'algoritmo di default è il cosiddetto BFGS. Il passaggio tra la fase di stampaggio e quella di ritorno elastico può avvenire in maniera automatica attivando il comando \*INTERFACE\_SPRINGBACK\_SEAMLESS, altrimenti si procede tramite un normale *restart*.

Il calcolo implicito può essere di tipo lineare oppure non lineare, a passo singolo o multiplo. A causa dei grandi spostamenti che possono verificarsi nel caso di lamiere stampate, l'opzione più appropriata è quella di calcolo non lineare con passo automatico in cui si lascia al solutore la scelta del *timestep* più opportuno in base all'analisi degli andamenti dei parametri di convergenza.

Nel caso di simulazione *multistep* il solutore in esame richiede l'attivazione della cosiddetta "stabilizzazione artificiale" (*artificial stabilization*). Essa consiste in un rilascio graduale dell'energia elastica presente nel modello al fine di controllare l'entità degli spostamenti realizzati per ciascun passo temporale. In questo modo aumentano le garanzie di convergenza del calcolo anche in presenza di grandi spostamenti. La sua applicazione è riassumibile nell'adozione di molle che contrastano il naturale spostamento dei nodi in base ad un fattore di scala impostato dall'utente. Valori maggiori di 1 corrispondono ad un iniziale irrigidimento del modello che ritarda la sua massima deformazione di ritorno elastico fino agli ultimi *timestep*. Al contrario valori minori dell'unità consentono un'ampia deformazione già nelle prime fasi di calcolo. In studi presenti in bibliografia [3] è stata documentata una sensibile variazione del campo di spostamento finale al variare di tale fattore, nel caso di componenti molto flessibili il suo valore ottimale è 0.001.

Per garantire la precisione del calcolo è necessario non trascurare (I) la dimensione ed il tipo di elemento adottati, (II) le modalità di applicazione dei carichi nella fase dinamica di formatura e, per finire, (III) il modello costitutivo prescelto per descrivere il comportamento del materiale. Questi tre fattori agiscono direttamente sull'accuratezza del campo di tensione e di conseguenza sulla qualità del risultato.

Nei calcoli di stampaggio l'elemento si basa sulle formulazioni shell di Belitschko e Tsai oppure di Hughes e Liu, in grado di fornire un buon compromesso tra la precisione del risultato ed i costi di simulazione. Nel calcolo di ritorno elastico è preferibile adottare elementi ad integrazione completa per assicurare una migliore accuratezza nel calcolo delle tensioni. In aggiunta, la modellazione della lamiera con elementi di piccole dimensioni garantisce una più esauriente valutazione dei gradienti di spostamento, ed in particolare, si sottolinea l'importanza della corretta modellazione dei raggi di raccordo dove un eccessivo diradarsi può compromettere l'analisi degli angoli di deviazione finale, come provato in bibliografia nel caso di test basati su pieghe ad U.

Le modalità di applicazione dei carichi nella fase di stampaggio possono influenzare la precisione del risultato nel caso in cui la loro applicazione avvenga in un lasso di tempo così

breve da innescare oscillazioni inerziali spurie che possono inficiare la stabilità del campo di tensione della lamiera. Per ovviare tale inconveniente è possibile calibrare i tempi di calcolo in modo che le velocità non superino i 5 m/s, oppure ridurre la densità dei corpi rigidi per attutire gli effetti inerziali o applicare, nell'ambito del contatto con tali corpi, un fattore di smorzamento.

Il modello costitutivo è essenziale per la corretta previsione delle caratteristiche del materiale e delle sue modalità di incrudimento e rilascio. La sua definizione ottimale per la previsione del ritorno elastico è uno degli argomenti maggiormente discussi in questi ultimi anni [4,5]. In particolare è stata dimostrata un'ampia sensibilità dei risultati nei confronti dell'adozione di modelli ciclici di incrudimento cinematico ed isotropo. Nel caso di materiali alto resistenziali la definizione di un modello costitutivo adeguato sembra rappresentare il problema maggiore per la precisione dei risultati.

### 3. DESCRIZIONE DEL COMPONENTE

La geometria in esame consiste in un pannello di lamiera sottile realizzato per idroformatura con punzone ad acqua (figura 1). La dimensione complessiva dei fogli di lamiera è 200 mm x 360 mm (con uno smusso di 45° in corrispondenza degli spigoli). La forma finale presenta un'imbutitura longitudinale nella zona centrale del foglio profonda circa 10 mm.

Per ottenere un riscontro oggettivo tra la deformazione numerica e quella sperimentale le condizioni di formatura sono state simulate in conformità con i dati forniti da un sistema di acquisizione che equipaggia il banco di prova sperimentale.

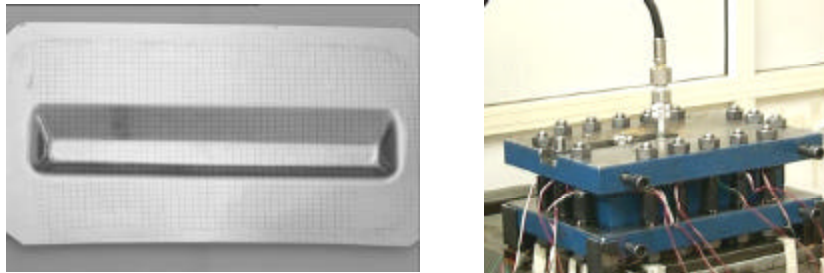


Figura 1 – A sinistra: componente in esame; a destra: banco di prova per idroformatura

#### 3.1 Il banco di prova

Il banco consiste in uno stampo corrispondente alla matrice del pezzo su cui si posiziona la lamiera indeformata, che viene stampata tramite acqua in pressione, immessa da una piastra di mandata che ha anche il compito di trattenere i bordi della lamiera ed offrire tenuta attraverso una guarnizione posta come cornice esterna. La tenuta e la forza di premilamiera sono garantite da sedici bulloni.

Le condizioni di stampaggio sono registrate da un sistema di acquisizione in grado di misurare la pressione di formatura e la deformazione a trazione dei bulloni durante il serraggio iniziale e la successiva mandata. In questo modo si è in grado di risalire al precarico iniziale delle viti ed all'andamento delle forze di premilamiera in funzione della pressione di stampaggio. Per verificare il comportamento della piastra di adduzione durante la formatura, i quattro bulloni posti all'esterno dei lati lunghi sono stati predisposti per realizzare all'occorrenza anche delle misure di flessione. In figura 2 per evidenziare la ripetibilità delle misure e del comportamento

del banco si riportano gli andamenti delle deformazioni a flessione degli estremi della piastra ottenuti in caso di prove cicliche consecutive.

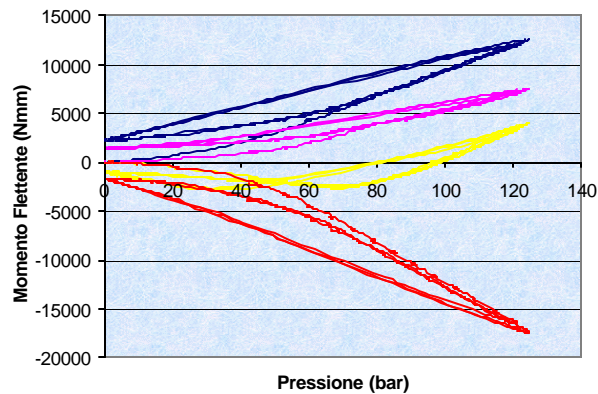


Figura 2 – Momento flettente su prove di formatura cicliche

Il banco è stato provato in un campo di precarichi iniziali per bullone che va da 6000 N a 20000 N, senza rivelare perdite di tenuta o strappi lungo i lembi della lamiera. Le statistiche relative all'uniformità ed alla ripetibilità della distribuzione dei carichi sui quattro lati del premilamiera rivelano uno scarto percentuale dai valori nominali sotto l'1% ed una deviazione standard tra i 16 bulloni di circa 40 N.

La catena di misura è stata realizzata senza l'adozione di una centralina estensimetrica portando tutti i segnali in uscita dai ponti e dal trasduttore di pressione direttamente ad una scheda di acquisizione a 64 canali con 2 uscite analogiche (PCI 6031E della National Instruments), passando attraverso una morsettiera ed un cavo a 100 poli. La misura è eseguita in modalità differenziale, utilizzando i ponti di Wheastone in modo non bilanciato. In tali condizioni sia l'errore di non linearità che di sfalsamento del fondo scala sono stati accuratamente vagliati e costantemente esaminati. Il trasduttore di pressione presenta una risoluzione dei 14.64 mV/bar equivalente a  $5.2 \times 10^{-3}$  bar, gli estensimetri invece permettono di valutare variazioni di almeno  $30.37 \mu\text{V}/\mu\epsilon$  pari a 2.32 N. L'acquisizione è controllata tramite PC mediante un programma sviluppato in LabView suddiviso in due parti una relativa alla fase di chiusura dello stampo e messa in tiro dei bulloni (fase di precarico), l'altra di stampaggio vero e proprio in cui si registrano i carichi sui bulloni e l'andamento della pressione.

### 3.2 Descrizione del modello

Il modello agli elementi finiti su cui si basano i calcoli è composto da tre parti distinte: la matrice ed il premilamiera definiti come corpi rigidi e la lamiera, realizzata da 3118 elementi shell a quattro nodi (formulazione di Belitschko e Tsai, nella fase di calcolo esplicito). La dimensione minima degli elementi è stata dettata dalla dimensione dei raccordi più piccoli, mentre quella maggiore, relativa alla parte in prossimità dei bordi esterni è stata scelta in modo tale da permettere alla lamiera eventuali ondulazioni sia nella fase di stampaggio che in quella di ritorno elastico.

I materiali analizzati sono l'alluminio 5754 e l'acciaio da stampaggio FeP05, modellati tramite la legge di incrudimento esponenziale ed il modello di incrudimento cinematico secondo i valori riportati in tabella 1. I parametri relativi al modello di incrudimento cinematico sono stati definiti

mediante regressione dei dati del modello esponenziale nell'intento di riprodurre il comportamento del materiale nell'intero campo di definizione.

Il modello si riferisce alla superficie media della lamiera e gli spessori considerati sono pari a 0.8 mm.

Tabella 1 - Caratteristiche dei materiali esaminati

	MODELLO DI INCRUDIMENTO CINEMATICO			MODELLO DI INCRUDIMENTO ESPONENZIALE		ANISOTROPIA
	$\sigma_Y$ (MPa)	$E_T$ (MPa)	$\sigma_{TS}$ (MPa)	K (MPa)	n	r
ALLUMINIO	170	370	245	400	0.26	0.6
ACCIAIO	250	380	350	500	0.21	1.6

Il contatto tra le parti è stato realizzato mediante l'algoritmo \*CONTACT\_SURFACE\_TO\_SURFACE definito tra lamiera e matrice e tra lamiera e prenilamiera. Il valore dell'attrito è stato scelto con valori equivalenti alle condizioni di buona lubrificazione realizzati durante le prove sperimentali.

Le condizioni di carico, durante la fase di stampaggio, prevedono la formatura della lamiera mediante una pressione distribuita sugli elementi con andamento lineare a tratti che ben approssima un arco di parabola tra 0 s e 0.05 s, durata complessiva della simulazione esplicita. Il valore massimo raggiunto in conformità con le prove di riscontro sperimentale è pari a 120 bar.

La forza sul prenilamiera è stata simulata applicando nei baricentri dei quattro lati della cornice le forze equivalenti a quelle che si scaricano nel tempo sul prenilamiera, per effetto combinato del precarico iniziale e dello sforzo separatore operato dall'acqua in pressione. Le condizioni di carico esaminate sono due: la prima corrisponde ad un precarico nominale di 20.000 N (indicata in seguito come CARICO #1), mentre la seconda si riferisce ad un precarico di 15.000 N (indicata in seguito come CARICO #2). Le modalità di applicazione dei carichi non provocano oscillazioni nei grafici degli andamenti delle forze di interfaccia tra gli elementi rigidi e la lamiera a testimonianza del fatto che durante la simulazione non intervengono fenomeni dinamici spuri.

#### 4. RISULTATI

Al termine della fase di stampaggio per ogni condizione di prova il componente risulta ben formato. Dall'analisi dei diagrammi FLD al variare del carico applicato non si riscontrano variazioni sensibili del campo di deformazione. Ciò è in gran parte imputabile al fatto che la geometria in esame, in virtù della sua forma, non è fortemente sensibile allo stretching realizzato dal prenilamiera. In termini di assottigliamento massimo la diversità tra le due condizioni di carico si attesta intorno all'1.3%. Nel caso dell'alluminio si registrano per la  $\epsilon_3$  valori intorno allo -0.10 mm/mm mentre per l'acciaio l'assottigliamento è pari a -0.08 mm/mm.

Per quanto riguarda il modello costitutivo, invece, a parità di condizioni di carico è possibile riscontrare delle differenze (figura 3). In questo caso l'assottigliamento massimo registra i valori maggiori nel caso di adozione del modello di incrudimento cinematico (+10%).

Le simulazioni di ritorno elastico sono state eseguite imponendo un set di vincoli in grado di impedire spostamenti rigidi ma compatibile con i campi di spostamento ottenuti nella pratica sperimentale; l'elemento adottato è lo shell ad integrazione piena, il solutore è stato attivato

nella modalità non lineare con *timestep* automatico (valore di partenza 0.05 s) ed il parametro di stabilizzazione artificiale è stato posto pari a 0.001.

In figura 4 si riportano le linee isolivello di due componenti reali ottenute mediante l'acquisizione digitale della forme resa possibile da un sistema di reverse engineering messo a punto presso il Dipartimento di Meccanica dell'Università di Ancona [6]

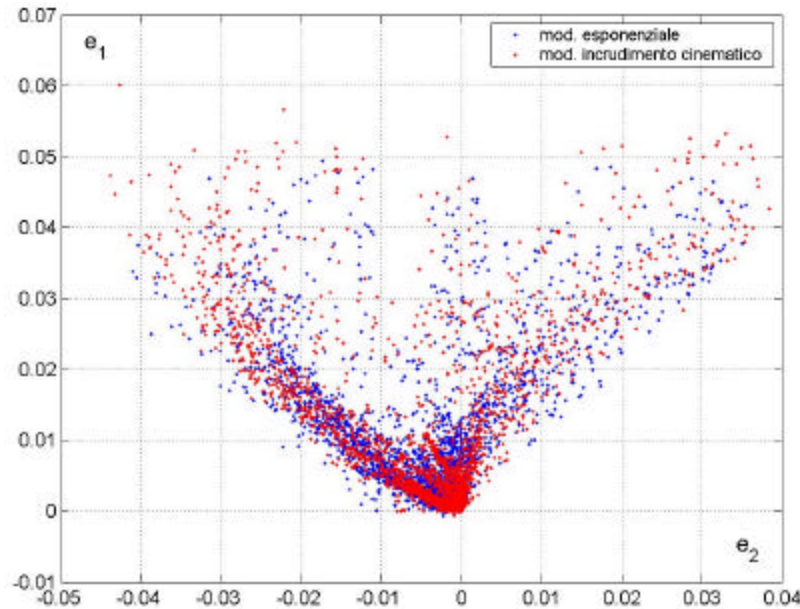


Figura 3 – Digramma FLD dalle simulazioni dell'acciaio (carico#1) al variare del modello di plasticità

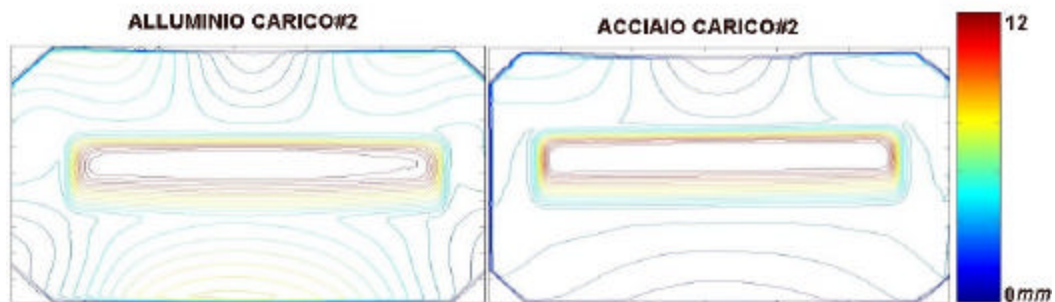


Figura 4 – Rilievo sperimentale della forma

I due lembi esterni più lunghi presentano un'ondulazione di ritorno elastico di entità variabile a seconda del materiale adottato. A questa ondulazione longitudinale si associa una rotazione trasversale tale da variare l'inclinazione finale del componente.

Dal punto di vista qualitativo il campo di spostamenti finali delle simulazioni è congruente con il risultato sperimentale, sia per quanto riguarda l'alluminio che per l'acciaio, in ciascuna delle due condizioni di carico. A titolo di esempio in figura 5 si riporta la geometria finale ottenuta nella simulazione dell'alluminio adottando la condizione di CARICO#2 ed il modello di incrudimento cinematico.

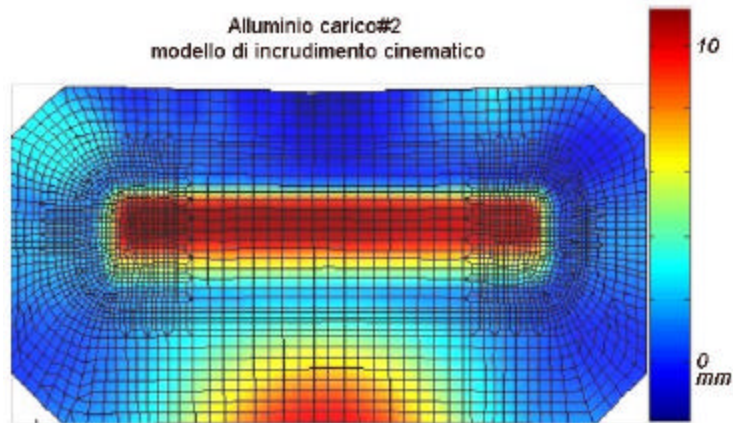


Figura 5 – Forma finale del componente simulato

Una visione sintetica dei risultati può essere fatta confrontando tra loro le sezioni trasversali del componente in corrispondenza della massima deflessione dei lembi (in mezzeria). In figura 6 si riportano le sezioni relative alle prove sperimentali, la diversità di comportamento tra i due materiali è chiaramente visibile.

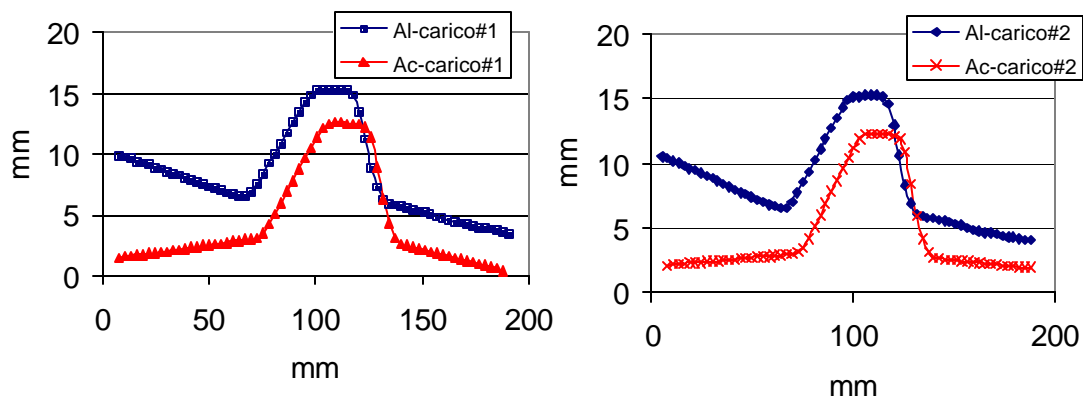


Figura 6 – Sezioni trasversali delle prove sperimentali

Per fare un confronto oggettivo sia i risultati sperimentali che quelli numerici sono stati riallineati ponendo i raccordi di base della parte imbutita alla quota  $z=0$  (figure 7 ed 8).

A seguito di questa elaborazione è possibile notare come l'acciaio dimostra una maggiore sensibilità alle condizioni di carico presentando, nel lembo di sinistra, una variazione di altezza (a partire dallo zero che è stato riferito sul raccordo di base della parte imbutita) da  $-2.94$  mm nel caso di forza sul premilamiera minore (CARICO#2), a  $-1.31$  mm nel caso di forza di chiusura maggiore (CARICO#1). Al contrario l'alluminio registra tra i due casi una differenza di poco inferiore al millimetro. La precisione della misura sperimentale è di  $\pm 0.05$  mm.

Nelle simulazioni l'andamento delle deflessioni al variare del tipo di materiale è rispettato, sebbene nel lembo di destra si registri sempre una minore angolazione finale dovuta con molta probabilità alla dimensione della mesh in prossimità al raccordo (dettaglio figura 7).

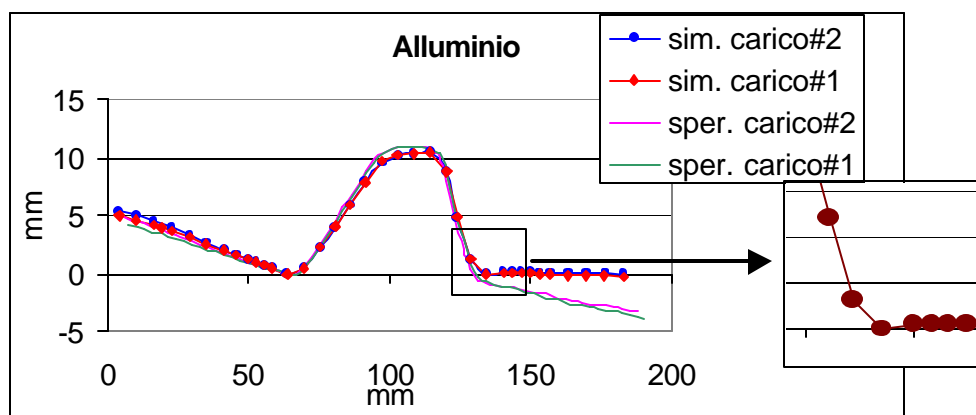


Figura 7 – Sezioni trasversali allineate: confronto tra risultati numerici e sperimentali

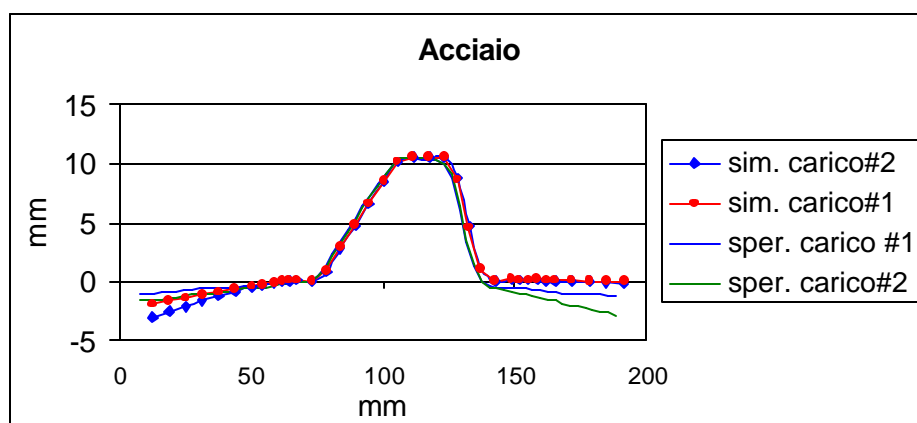


Figura 8 – Sezioni trasversali allineate: confronto tra risultati numerici e sperimentali

Il modello di incrudimento cinematico risulta il più prossimo ai risultati sperimentali producendo in media (a prescindere dalle condizioni di carico) una differenza di previsione sulla freccia massima del lembo di sinistra di circa il 18% nel caso dell'acciaio e del 13% nel caso dell'alluminio (tabella 2).

Tabella 2 – Sezioni trasversali: deflessione massima nel lembo di sinistra

	SPERIMENTALE		MOD. INCRUDIMENTO CINEMATICO		MOD. INCRUDIMENTO ESPONENZIALE	
	CARICO #1 (mm)	CARICO #2 (mm)	CARICO #1 (mm)	CARICO #2 (mm)	CARICO #1 (mm)	CARICO #2 (mm)
Alluminio	4.21	5.00	5.02	5.39	5.52	6.02
Acciaio	-1.31	-2.94	-3.05	-1.97	-3.89	-4.89

Facendo ricorso a questo modello di incrudimento, nel caso dell'acciaio, la previsione del ritorno elastico al variare delle condizioni di carico non conferma la maggiore deformabilità della lamiera in corrispondenza del carico inferiore, mentre, nel caso dell'alluminio, le attese sono rispettate a prescindere dal modello adottato. Per concludere, l'indagine sulla sensibilità

dei risultati al fattore di stabilizzazione artificiale ha dimostrato, a seguito di variazioni secondo i valori [0.0001, 0.001, 0.01, 1], una scarsa influenza sullo spostamento finale.

## 5. CONCLUSIONI

In questo lavoro si presenta la messa a punto della simulazione del ritorno elastico di un componente in lamiera sottile attraverso il calcolo agli elementi finiti. Le simulazioni sono state condotte su due materiali differenti (acciaio ed alluminio) in due condizioni di carico. I risultati sono stati confrontati con le acquisizioni sperimentali di analoghi componenti ottenuti mediante un banco di prova opportunamente realizzato.

Il campo di spostamenti finale ottenuto nelle simulazioni rispecchia la realtà sperimentale. Analizzando e confrontando le sezioni trasversali del componente corrispondenti alle diverse condizioni esaminate è possibile dedurre le seguenti conclusioni:

- la simulazione è in grado di riprodurre il differente comportamento di ritorno elastico che si verifica sperimentalmente al variare del materiale;
- confrontando le simulazioni con le acquisizioni sperimentali si riscontra che l'adozione del modello di incrudimento cinematico permette, quantitativamente, risultati più precisi;
- la previsione della deformata finale comporta sulla freccia massima un errore del 18% nel caso dell'acciaio e del 13% nel caso dell'alluminio;
- la dimensione della mesh in corrispondenza degli angoli di piegatura del componente è fondamentale per una corretta analisi del fenomeno;
- al contrario, in questo caso specifico, il fattore di scala della stabilizzazione artificiale non influenza in maniera sensibile i risultati.

In conclusione i risultati raggiunti nella messa a punto sono incoraggianti e testimoniano l'affidabilità del mezzo di calcolo. Allo stato attuale dell'arte gli aspetti chiave necessari per lo sviluppo di calcoli precisi sembrano essere fondamentalmente la dimensione della mesh in corrispondenza dei raccordi soggetti a ritorno elastico e la messa a punto di modelli di comportamento del materiale.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Finn et al., "Use of a coupled explicit-implicit solver for calculating springback in automotive body panels", *Journal of Material Processing Technology*, vol. 50, pp395-409, 1995.
- [2] Zhang et al., "Spring-back prediction in sheet forming simulation", *SAE technical paper series n° 940937*, vol. 103, section 5, pp.707-717.
- [3] Zhongqin Lin et al., "Study on the effects of Numerical parameters on the precision of springback prediction", *Proceeding of the 6th International LS-DYNA Users Conference – Simulation 2000*, Michigan April. 2000.
- [4] Takeshi Uemori et al., "FE analysis of springback in hat bending with consideration of initial anisotropy and the Bauschinger effect", *Key Engineering Materials Vols. 177-180 (2000)*, pp.497-502.
- [5] Cleveland et al., "Inelastic effects on springback in metals", *Proceedings of IDDRG2000*, Ann Arbor, Michigan, USA, Giugno 2000.
- [6] D. Amodio et al., "Automated defect detection on stamped panels by strain analysis and shape assessment", *Congresso ATA*, Ancona 2001