



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA

Studio numerico e sperimentale di un bulge test circolare su leghe di alluminio

**Numerical and experimental study on a circular bulge test performed on
aluminum alloys**

Candidato:
Marco Monti

Relatore:
Prof. Marco Rossi

Correlatore:
Prof. Gianluca Chiappini

Anno Accademico 2023-2024



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA

Studio numerico e sperimentale di un bulge test circolare su leghe di alluminio

**Numerical and experimental study on a circular bulge test performed on
aluminum alloys**

Candidato:
Marco Monti

Relatore:
Prof. Marco Rossi

Correlatore:
Prof. Gianluca Chiappini

Anno Accademico 2023-2024

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA
Via Brezze Bianche – 60131 Ancona (AN), Italy

Indice

Abstract	1
1 Introduzione	3
1.1 Formatura di lamiere	3
1.2 Metodi per testare la formabilità di lamiere	5
1.2.1 Risultati del Bulge test	9
1.3 Obiettivi dello studio	10
2 Test sperimentale	11
2.1 Campione	11
2.2 Acquisizione dei dati	13
2.2.1 Setup sperimentale	13
2.2.2 Preparazione e serraggio del campione	14
2.2.3 Regolazione delle telecamere	16
2.2.4 Esecuzione prova e acquisizione dati	18
3 Elaborazione dei dati sperimentali	19
3.1 Digital Image Correlation (DIC)	19
3.1.1 Preparazione dei dati acquisiti	20
3.1.2 Configurazione delle opzioni di elaborazione	21
3.1.3 Avvio della correlazione e calcolo delle deformazioni	23
3.1.4 Esportazione dei dati	24
3.2 Elaborazione dei risultati con MATLAB:	25
4 Analisi agli elementi finiti (FEM)	29
4.1 Introduzione al FEM	29
4.2 Modello FEM	31
4.2.1 Geometrie	33
4.2.2 Proprietà del materiale	35
4.2.3 Condizioni al contorno	35
4.2.4 Generazione delle Mesh	36
4.3 Risultati FEM	39
5 Conclusioni	45
Bibliografia	49

Elenco delle figure

1.1	<i>Esempio di stampaggio di lamiera nel settore automobilistico</i>	3
1.2	<i>Tensioni e deformazioni principali per elementi che si deformano in (a) trazione uniassiale e (b) in un processo generale di tensione piana su una lamiera</i>	5
1.3	<i>Prova di Erichsen</i>	6
1.4	<i>Prova di Nakajima</i>	7
1.5	<i>Provini da testare nella prova di Nakajima</i>	7
1.6	<i>Diagramma limite di formabilità (FLD)</i>	7
1.7	<i>Bulge test idraulico</i>	8
1.8	<i>Diagramma limite di formatura per un materiale a basso incrudimento mostrando i punti di rottura nella prova di trazione e nel bulge test</i>	8
1.9	<i>Stato tensionale Bulge test</i>	9
2.1	<i>Geometria lamiera</i>	12
2.2	<i>Setup sperimentale Bulge test: (A) foto, (B) schema</i>	14
2.3	<i>Tecnica dello Speckle</i>	15
2.4	<i>Serraggio della lamiera</i>	15
2.5	<i>Foto acquisita da MatchID durante la calibrazione delle telecamere</i>	17
3.1	<i>Immagini acquisite durante il test tramite MatchID: la prima mostra il campione nello stato iniziale, mentre la seconda alla fine della prova</i>	20
3.2	<i>Regione d'interesse (ROI) utilizzata sul provino</i>	21
3.3	<i>Dimensioni del subset impostato sulla lamiera</i>	22
3.4	<i>Immagine dello spostamento w elaborato da MatchID</i>	23
3.5	<i>Grafico pressione-deformazione $E1$ elaborato con Matlab</i>	25
3.6	<i>Grafico pressione-spostamento w elaborato con Matlab</i>	26
3.7	<i>Mappa tridimensionale spostamento w</i>	27
3.8	<i>Mappa tridimensionale deformazione principale ε_1</i>	27
3.9	<i>Mappa tridimensionale deformazione principale ε_2</i>	28
4.1	<i>Geometria modello FEM: (A) flangia base, (B) premilamiera</i>	33
4.2	<i>Geometria lamiera modello FEM</i>	34
4.3	<i>Assieme modello FEM</i>	34
4.4	<i>Generazione mesh modello FEM: (A) flangia base, (B) premilamiera</i>	37
4.5	<i>Generazione mesh lamiera: (A) ben strutturata, (B) cattiva</i>	38
4.6	<i>Mappa degli spostamenti $U2$ nel modello FEM</i>	39

Elenco delle figure

4.7	<i>Grafico Spostamento-Tempo</i>	40
4.8	<i>Grafico Pressione-Spostamento elaborato con MATLAB</i>	41
4.9	<i>Mappa delle deformazioni LE_{max} principali</i>	41
4.10	<i>Grafico Deformazione-Tempo</i>	42
4.11	<i>Grafico Pressione-Deformazione elaborato con MATLAB</i>	42
4.12	<i>Mappa tensione equivalente Von Mises</i>	43
5.1	<i>Confronto tra grafici ottenuti dai test sperimentali e il modello FEM: (A) spostamento w, (B) deformazione $E1$</i>	45

Abstract

La tesi analizza la formabilità delle lamiere in lega di alluminio AA 5182-T0 mediante il bulge test idraulico, combinando prove sperimentali e simulazioni numeriche agli elementi finiti (FEM). L'obiettivo è caratterizzare il comportamento plastico del materiale in condizioni di tensione bilanciata equiassiale e validare un modello numerico per simulazioni future.

La parte sperimentale prevede l'esecuzione del bulge test, con un setup che include il monitoraggio della deformazione tramite tecniche di correlazione digitale delle immagini (DIC) e l'elaborazione dei dati tramite MATLAB. Le prove hanno consentito di ottenere curve pressione-deformazione e mappe tridimensionali di spostamenti e deformazioni, sebbene la limitata entità delle deformazioni raggiunte abbia rappresentato una criticità per una caratterizzazione completa del materiale.

Nella parte numerica, è stato sviluppato un modello FEM con Abaqus, utilizzando la modalità dinamica esplicita per simulare il comportamento del bulge test. Il modello considera proprietà del materiale, anisotropia e condizioni al contorno, concentrandosi su un quarto di simmetria per ottimizzare i tempi di calcolo. I risultati numerici sono stati confrontati con i dati sperimentali, mostrando una buona corrispondenza, pur evidenziando la necessità di ulteriori miglioramenti.

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Formatura di lamiere

Nella formatura delle lamiere, una parte inizialmente semplice, viene deformata plasticamente tra utensili (o stampi) per ottenere la configurazione finale desiderata. Quindi, una geometria semplice viene trasformata in una complessa, in cui gli utensili conservano la geometria desiderata e applicano pressione sul materiale deformante attraverso l'interfaccia utensile-materiale. I processi di formatura delle lamiere solitamente producono pochi scarti e generano la geometria finale della parte in un tempo relativamente molto breve, solitamente con uno o pochi colpi di una pressa. Di conseguenza, la formatura delle lamiere offre potenziali risparmi in termini di energia e materiali, specialmente per le produzioni di medie e grandi quantità, dove i costi degli utensili possono essere facilmente ammortizzati. Inoltre, per determinate geometrie, le parti prodotte tramite la formatura delle lamiere presentano proprietà meccaniche e metallurgiche migliori e una maggiore affidabilità rispetto a quelle fabbricate tramite altri processi come la fonderia o la fabbricazione per asportazione di truciolo. Nel corso degli anni, si è accumulata una grande quantità di competenze e conoscenze in questo campo, per lo più tramite il metodo "learning by doing". Ad oggi, però, è presente un altro strumento fondamentale, che permette la simulazione di lavorazioni o test sperimentali che poi andranno effettuati concretamente, ovvero l'analisi agli elementi finiti assistita da computer (FEA), la quale ha permesso un design quantitativo dei processi di formatura delle lamiere e degli utensili. In questo modo, l'industria della formatura delle lamiere è ora in grado di fornire prodotti sofisticati e realizzati per soddisfare requisiti molto rigidi provenienti da leghe di nuova concezione, difficili da formare, come nel caso delle applicazioni aerospaziali [1].



Figura 1.1: *Esempio di stampaggio di lamiera nel settore automobilistico*

In questo studio, l'attenzione è rivolta esclusivamente ai metodi per testare la formabilità della lamiera a trazione (stretching), in quanto i test condotti riguarderanno questa specifica modalità. Prima di analizzare tali metodi, però è necessario definire il concetto di formabilità della lamiera, e da quali parametri dipende.

Formabilità

La formabilità di una lamiera rappresenta la capacità del materiale di subire deformazioni permanenti senza rompersi o presentare difetti, adattandosi alla forma desiderata durante i processi di lavorazione. Questo concetto è cruciale in operazioni come lo stampaggio, l'imbutitura e il bulging, dove la lamiera deve rispondere a sollecitazioni complesse mantenendo integrità e qualità. I fattori che influenzano questa proprietà sono moltissimi, ma vengono suddivisi in quattro macrocategorie, che sono:

- **Proprietà meccaniche del materiale:** Caratteristiche come il modulo di elasticità, la duttilità e l'indice di incrudimento influenzano profondamente il comportamento della lamiera. Materiali con elevata duttilità e moderata resistenza alla trazione sono generalmente più formabili, poiché riescono a deformarsi in modo più uniforme.
- **Anisotropia:** Molte lamiere presentano proprietà direzionali (anisotropiche) dovute al processo di laminazione, che influenza la distribuzione delle deformazioni durante la lavorazione. L'anisotropia influenza la direzione di stiramento e la resistenza alle sollecitazioni, fattori che determinano la capacità della lamiera di adattarsi senza deformazioni indesiderate.
- **Spessore e qualità superficiale:** Lo spessore della lamiera influisce sia sulla distribuzione degli sforzi sia sulla stabilità durante la formatura. Lamine più sottili sono spesso più facili da modellare, ma possono essere più suscettibili a instabilità come piegature o strappi. Anche la qualità superficiale è importante: superfici lisce e prive di difetti minimizzano l'attrito e consentono deformazioni più omogenee.
- **Condizioni di lavorazione:** Temperatura, velocità di deformazione e lubrificazione influenzano la formabilità.

In sintesi, la formabilità di una lamiera è il risultato di un'interazione complessa tra proprietà intrinseche del materiale e condizioni esterne di lavorazione, determinando così la capacità del materiale di adattarsi alle geometrie richieste senza compromettere la sua integrità strutturale.

1.2 Metodi per testare la formabilità di lamiera

Il metodo più semplice e comune per valutare la formabilità di una lamiera è la **prova di trazione**, che consiste nell'applicare un carico lungo una sola direzione per misurare la risposta del materiale a una deformazione monoassiale. Questa prova fornisce numerosi parametri essenziali, come il modulo di Young (E), il limite di snervamento (σ_s), il carico di rottura (σ_r), la curva sforzo-deformazione, ecc. Questi parametri sono fondamentali per caratterizzare le proprietà meccaniche del materiale, ma generalmente la lamiera è sottoposta a condizioni di carico più complesse, caratterizzate da sollecitazioni multiassiali e deformazioni distribuite in più direzioni. In tali situazioni, le proprietà misurate mediante il test di trazione uniassiale non sono sufficienti per valutare accuratamente la resistenza e la stabilità del materiale. Per questo motivo, i test di formabilità in condizioni di stato piano di tensione (*plane stress*), sono più rappresentativi delle condizioni operative reali rispetto alla prova di trazione uniassiale.

Infatti nei processi tipici di lavorazione della lamiera, la maggior parte degli elementi si deforma sotto l'azione delle tensioni principali (σ_1, σ_2), entrambe diverse da zero, mentre la terza tensione (σ_3) ovvero quella perpendicolare alla superficie della lamiera, risulta generalmente trascurabile, questo perché la pressione di contatto tra la lamiera e l'attrezzatura è di solito molto inferiore al limite di snervamento del materiale. Per questa ragione, si adotta l'assunzione semplificativa di considerare questa tensione pari a zero, trattando il processo come uno stato di tensione piana [2].



Figura 1.2: *Tensioni e deformazioni principali per elementi che si deformano in (a) trazione uniassiale e (b) in un processo generale di tensione piana su una lamiera*

I test più diffusi per valutare la formabilità in condizioni di trazione bilanciata equiassiale sono:

Prova di Erichsen

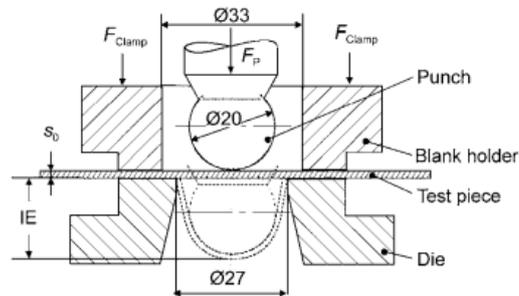


Figura 1.3: Prova di Erichsen

Nella prova di Erichsen, la lamiera, serrata ai bordi (in modo da impedire il flusso radiale), viene deformata contro una matrice a cavità circolare utilizzando un punzone sferico. Durante il test, la lamiera viene stirata in modo biassiale e si deforma fino a formare una coppa emisferica, per poi fratturarsi. La profondità di penetrazione della sfera prima del cedimento, chiamata indice di Erichsen (IE), rappresenta l'indice di deformabilità del materiale in questo test: maggiore è l'IE, migliore è la capacità del materiale di allungarsi [1]. Tuttavia, il test di Erichsen ha un'applicazione pratica limitata poiché:

- solo una piccola area della lamiera è soggetta a deformazione, quindi lo spessore della lamiera influenza significativamente i limiti di deformabilità del materiale;
- l'area deformata è troppo piccola per rappresentare adeguatamente un qualsiasi processo industriale di formatura delle lamiere;
- l'attrito tra il campione di lamiera e l'utensile sferico influisce sui risultati del test.

Prova di Nakajima

Questo test a differenza della prova di Erichsen utilizza un punzone con una geometria a cupola che spinge una sezione più ampia della lamiera, consentendo una deformazione biassiale su una superficie maggiore. In questo test possono anche essere previste lubrificazioni per ridurre l'attrito tra punzone e lamiera, rendendo la prova molto più efficace.

1.2 Metodi per testare la formabilità di lamiera

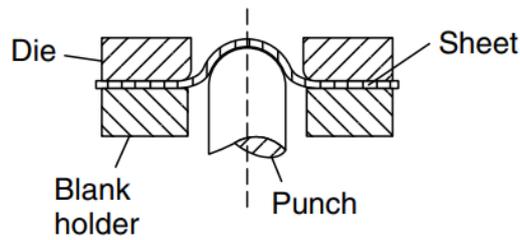


Figura 1.4: Prova di Nakajima

Questa prova ha un ulteriore vantaggio, ossia ci permette di testare più provini con geometrie diverse ma comunque assialsimmetriche (come in figura 1.5), passando quindi attraverso più stati tensionali partendo dallo stato di stretching biassiale bilanciato, ad uno stato di deformazione piana, fino ad uno stato di trazione monoassiale.



Figura 1.5: Provini da testare nella prova di Nakajima

Grazie a ciò si può ricavare il diagramma limite di formabilità (FLD), il quale rappresenta la deformazione massima sopportabile dalla lamiera prima del cedimento in funzione dello stato tensionale. Le deformazioni sono riportate su un grafico, in cui l'asse orizzontale rappresenta la deformazione principale (ϵ_1) e l'asse verticale la deformazione secondaria (ϵ_2). Il punto di ciascuna prova in cui si verifica la frattura consente di tracciare una curva, chiamata curva limite di formabilità (FLC), che divide l'area delle deformazioni ammissibili, dove il materiale può deformarsi senza rompersi (zona verde), dall'area in cui il materiale tende a fratturarsi (zona rossa).

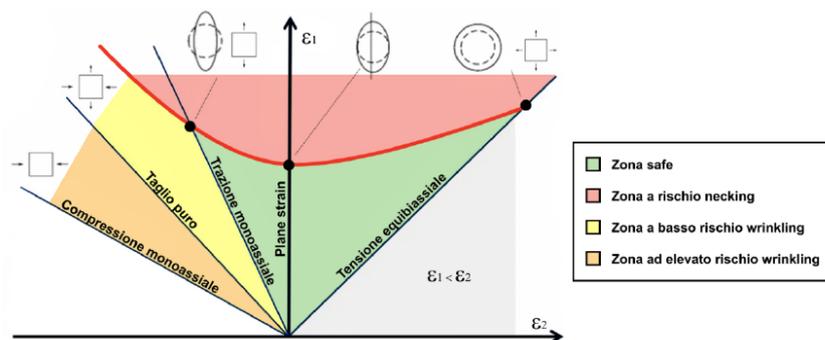


Figura 1.6: Diagramma limite di formabilità (FLD)

Bulge Test idraulico

A differenza dei due test precedenti, il bulge test idraulico non utilizza un punzone per deformare la lamiera. Invece, si avvale di un sistema idraulico che mette in pressione un fluido viscoso, generalmente olio, il quale, tramite un pistone, esercita una pressione uniforme sulla superficie inferiore della lamiera, deformandola in modo simile alla prova di Erichsen. Il principale vantaggio di questo metodo risiede proprio nell'assenza di un contatto diretto con un punzone, eliminando così completamente il problema dell'attrito tra punzone e lamiera. Tuttavia, a differenza della prova di Nakajima, il bulge test idraulico non consente l'utilizzo di provini con geometrie differenti, pertanto permette di valutare esclusivamente lo stato tensionale di trazione biassiale bilanciata, il che limita leggermente l'utilizzo di questo metodo.

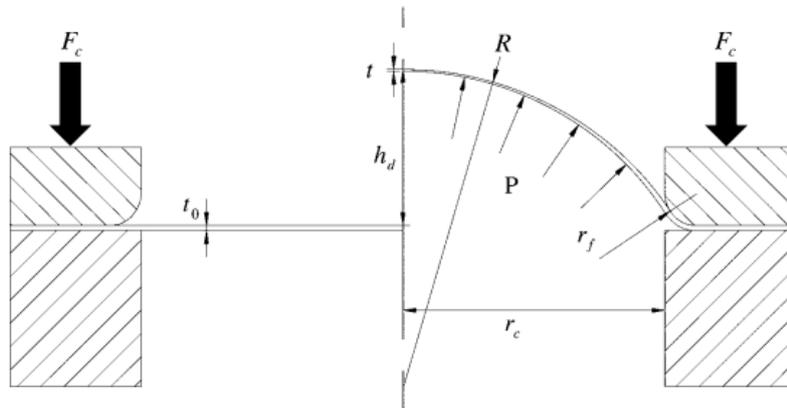


Figura 1.7: *Bulge test idraulico*

Ma la ragione principale per l'utilizzo di questo test è che si possono ottenere deformazioni relativamente grandi prima della rottura, anche in materiali con un basso indurimento per deformazione, infatti la deformazione della lamiera al momento della rottura in condizioni di tensione biassiale è maggiore della deformazione alla formazione di strizione nel test di trazione monoassiale [2].

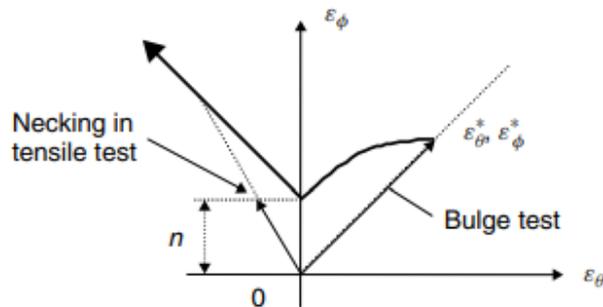


Figura 1.8: *Diagramma limite di formatura per un materiale a basso incrudimento mostrando i punti di rottura nella prova di trazione e nel bulge test*

Dopo aver approfondito i principali test utilizzati per valutare la formabilità di un materiale in condizioni di "stretching", l'attenzione si sposta ora sul bulge test, la prova che verrà sperimentalmente condotta in questa tesi. Nel seguente paragrafo si analizzeranno i risultati che si ottengono da questa prova.

1.2.1 Risultati del Bulge test

Il Bulge test può avere come scopo quello di ricavare uno o più dei seguenti risultati sperimentali:

1. **Tensione di flusso (flow stress):** Il test consente di calcolare la tensione di flusso del materiale, che è la tensione necessaria per mantenere il flusso plastico durante la deformazione. Poiché la sommità della cupola è quasi sferica, lo stato tensionale può essere determinato utilizzando un sistema di riferimento con coordinate sferiche (ϕ, θ, t) , nel quale ϕ sta ad indicare la direzione circonferenziale, θ quella meridionale e t quella radiale. Si può assumere quindi che la lamiera sia soggetta a uno stato di tensione biassiale pura, dove le tensioni principali $(\sigma_\theta, \sigma_\phi)$ agiscono lungo due direzioni principali della superficie, mentre la tensione radiale (σ_t) risulta nulla, poiché il materiale non subisce forze in direzione dello spessore nella sommità.

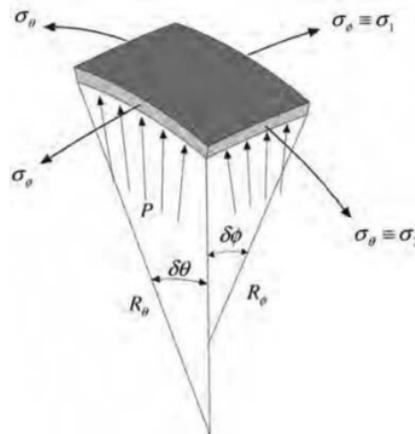


Figura 1.9: Stato tensionale Bulge test

Si possono quindi definire le tensioni lungo i 3 assi principali:

$$\sigma_\phi = \frac{PR}{2t}, \sigma_\theta = \frac{PR}{2t}, \sigma_t = 0 \quad (1.1)$$

dove:

- P è la **pressione del fluido** applicata sulla superficie;
- R è il **raggio di curvatura** alla sommità della cupola;
- t è lo **spessore istantaneo** del materiale in quella regione.

2. **Limiti di formabilità:** Alla fine della prova, il provino assume la forma di una cupola, la cui altezza massima raggiunta alla rottura del provino ne indica l'indice di formabilità;
3. **Curva sforzo-deformazione:** A differenza di un semplice test di trazione uniassiale, il bulge test permette di tracciare una curva sforzo-deformazione rappresentativa della deformazione in due direzioni principali, fornendo una caratterizzazione più realistica.

1.3 Obiettivi dello studio

Gli obiettivi di questo studio riguardano lo sviluppo di un modello agli elementi finiti (FEM) in grado di riprodurre fedelmente il comportamento del bulge test idraulico applicato a lamiere metalliche, rendendolo più veritiero possibile tramite l'inserimento dei parametri del materiale, mesh adeguate, vincoli necessari, ecc. Questo modello FEM verrà confrontato con i dati ottenuti sperimentalmente attraverso prove condotte in laboratorio, in cui il comportamento del materiale sarà misurato e documentato in dettaglio tramite un software DIC (Digital Image Correlation). L'obiettivo primario è quello di verificare che il modello numerico mostri un comportamento analogo a quello osservato sperimentalmente, al fine di validarlo come strumento accurato per effettuare simulazioni in futuro. Un modello FEM validato potrà fornire previsioni affidabili sul comportamento del materiale in condizioni di formatura simili, permettendo ottimizzazioni nella progettazione e nella caratterizzazione dei materiali utilizzati.

Capitolo 2

Test sperimentale

2.1 Campione

Materiale

La lamiera impiegata per il test è realizzata in una lega di alluminio denominata AA 5182-T0, conforme al sistema di designazione standardizzato delle leghe di alluminio stabilito dall'Aluminum Association. Questa nomenclatura si compone del prefisso AA, seguito da una sequenza di quattro cifre numeriche, le quali identificano:

- **Prima cifra:** indica il costituente principale della lega, in questo caso il gruppo 5000 corrisponde a leghe alluminio-magnesio (Al-Mg);
- **Seconda e terza cifra:** corrisponde alla designazione specifica della lega (il numero non ha significato);
- **Quarta cifra:** designazione per le fusioni (0) o per lingotti (1,2).

Inoltre nelle leghe di alluminio, alle quattro cifre che identificano la composizione della lega può seguire una lettera, che indica il tipo di trattamento termico a cui è stato sottoposto il materiale, seguita da un numero associato che specifica ulteriormente la tempra o il processo di invecchiamento. Nel caso specifico, la sigla **T0** identifica un trattamento termico di ricottura completa.

La composizione chimica di questa lega è generalmente costituita da:

- Alluminio (Al): 94.2-96.8%
- Magnesio (Mg): 4.0-5.0%
- Manganese (Mn): 0.20-0.50%
- Ferro (Fe): $\leq 0.35\%$
- Silicio (Si): $\leq 0.20\%$
- Zinco (Zn): $\leq 0.25\%$
- Cromo (Cr): $\leq 0.10\%$

Caratteristiche principali

- **Eccellente Duttilità:** il trattamento termico T0 conferisce alla lega una struttura ricotta che riduce le tensioni interne, migliorandone la capacità di allungamento e deformazione plastica senza rischio di rottura;
- **Resistenza alla Corrosione:** grazie all'elevato contenuto di magnesio, la lega è molto resistente alla corrosione, specialmente in ambienti marini o esposti ad agenti atmosferici;
- **Resistenza Meccanica:** pur avendo una resistenza meccanica inferiore rispetto ad altre leghe trattate termicamente, è sufficiente per molte applicazioni di formatura e stampaggio;
- **Elevata Formabilità:** la combinazione di bassa resistenza e alta duttilità rende questa lega particolarmente adatta a processi di imbutitura e formatura complessa;
- **Leggerezza:** come tutte le leghe di alluminio anche questa è caratterizzata da un basso peso specifico, che la rende ideale per applicazioni dove è richiesta una riduzione della massa complessiva.

Geometria lamiera

La geometria della lamiera utilizzata nel bulge test è generalmente circolare sia per le caratteristiche del test, che prevedono di ottenere uno stato di stretching biassiale, ma anche per ragioni legate alla configurazione del banco prova. Nel caso specifico di questo studio, la lamiera ha uno spessore di **1,5 mm** e un diametro di **320 mm**. Queste dimensioni sono selezionate in modo da adattarsi al banco prova, il quale è dotato di anelli di serraggio progettati per campioni di questa forma e dimensione. La scelta del diametro garantisce che la lamiera sia adeguatamente fissata, evitando scivolamenti o deformazioni indesiderate al bordo.



Figura 2.1: *Geometria lamiera*

2.2 Acquisizione dei dati

Il processo di acquisizione dei dati sperimentali in laboratorio si articola attraverso una serie di passaggi chiave, che possono essere sintetizzati in 4 punti:

1. Setup sperimentale
2. Preparazione e serraggio della lamiera
3. Regolazione delle telecamere
4. Esecuzione prova e acquisizione dati

Adesso si analizzerà in maniera approfondita ciascuno step del test sperimentale di Bulge test.

2.2.1 Setup sperimentale

La fase di setup sperimentale, preliminare all'avvio dell'esperimento, è fondamentale per allestire una postazione di lavoro adeguata, completa di tutti gli strumenti e componenti necessari per il corretto svolgimento della prova. Gli elementi che compongono questa postazione sono i seguenti:

- **Macchina Bulge test:** Questa macchina è costituita da una struttura progettata per l'esecuzione del test, dotata di flangie in acciaio che serrano saldamente la lamiera durante l'esperimento. Integra un sistema idraulico per mettere in pressione il fluido, il quale viene immesso in una camera di pressione dedicata per deformare la lamiera. Sopra la postazione è presente un coperchio protettivo, dotato di un vetro trasparente per l'osservazione e di illuminazione LED interna, che serve a prevenire la fuoriuscita di olio in caso di rottura del provino, garantendo sicurezza e visibilità durante il test;
- **Sensore di pressione:** Consente di monitorare e registrare con precisione la pressione applicata alla lamiera durante il test;
- **2x Telecamere Blackfly S BFS-U3-88S6M + Obiettivi Fujifilm CF25ZA-1S f1.8/25mm**
- **PC con software DIC MatchID:** Necessario per acquisire ed elaborare le immagini per calcolare le deformazioni e spostamenti;
- **PC con software Labview:** Fondamentale per determinare la curva pressione-tempo tramite il sensore;
- **Campione:** Lamiera circolare.

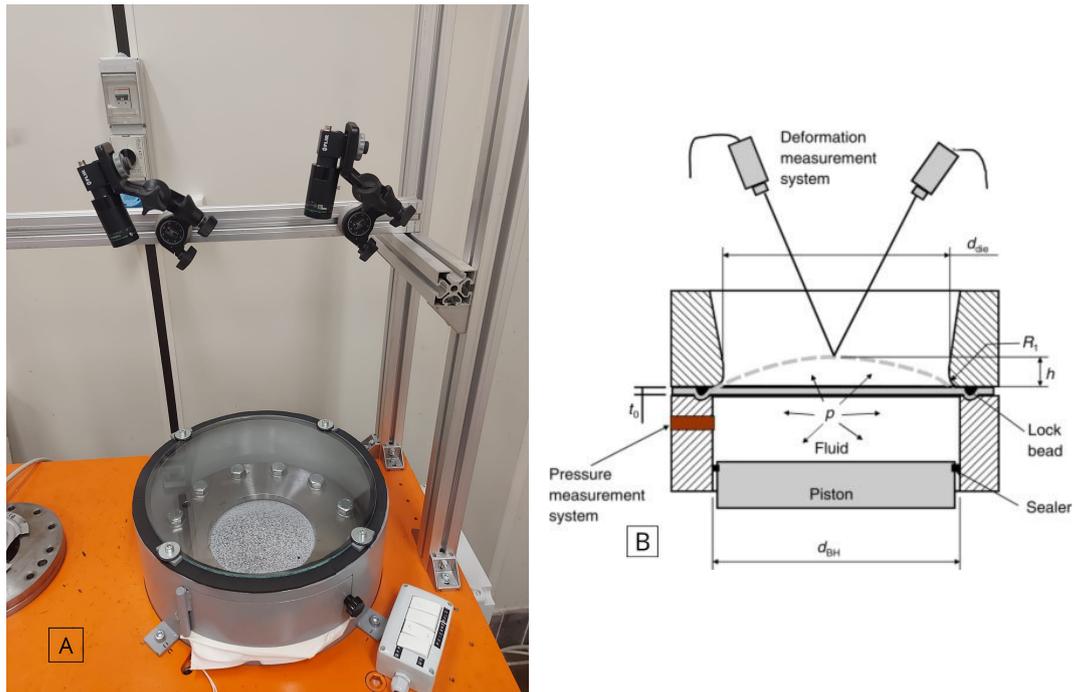


Figura 2.2: *Setup sperimentale Bulge test: (A) foto, (B) schema*

2.2.2 Preparazione e serraggio del campione

Preparazione del campione

Per facilitare l'analisi con il software Match ID, è necessario apportare opportune modifiche alla superficie del provino da esaminare. Queste modifiche mirano a creare un elevato contrasto visivo, consentendo al software di seguire con maggiore precisione gli spostamenti del materiale durante il test, senza introdurre effetti di concentrazione degli sforzi o alterazioni della microstruttura. In questo caso è stata utilizzata la tecnica più semplice ed efficace, ovvero:

- **Speckle:** Consiste nell'applicare un pattern sulla superficie del provino, la cui preparazione inizia con l'applicazione di uno strato di base sottile e opaco di colore bianco, il cui scopo è ridurre i riflessi e migliorare il contrasto visivo. Successivamente, viene spruzzata sulla superficie una nuvola di punti neri distribuiti casualmente, utilizzando vernice spray nera o grafite. La distribuzione casuale dei punti genera una superficie ad alto contrasto, che rappresenta una griglia virtuale sulla superficie del provino, questo consente al sistema ottico di analizzare in dettaglio ogni punto della superficie. Inoltre è fondamentale che l'area presenti una densità sufficiente di punti bianchi e neri, con dimensioni adeguate a soddisfare i requisiti del sistema di acquisizione utilizzato, garantendo così una rilevazione accurata delle deformazioni [3].



Figura 2.3: *Tecnica dello Speckle*

Serraggio campione

Dopo la verniciatura, la lamiera deve essere posizionata il più possibile in modo concentrico rispetto alla flangia di base. Successivamente, viene collocata la flangia superiore, detta prelamiera, sopra il provino, assicurandosi che i fori delle due flangie siano perfettamente allineati. A questo punto, si procede al posizionamento delle 12 viti M20 di classe 10.9 nei fori e al loro serraggio seguendo uno schema a croce. Questo metodo consente di evitare deformazioni indesiderate, come il bombaggio, e di garantire un serraggio uniforme, quest'ultimo viene eseguito fino a eliminare ogni spazio tra le due flangie. Tale operazione è necessaria anche per attivare il dispositivo rompigrinze presente nelle flangie, il quale ha il compito di mantenere la lamiera in posizione durante il test, impedendone il flusso radiale e garantendo una corretta deformazione del materiale.

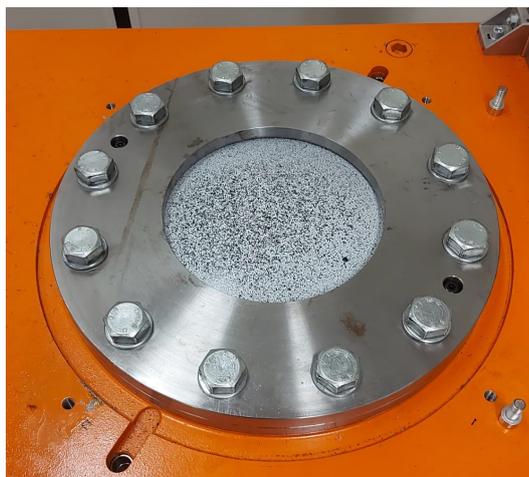


Figura 2.4: *Serraggio della lamiera*

2.2.3 Regolazione delle telecamere

Posizionamento delle telecamere

Per garantire il corretto posizionamento delle telecamere, schematizzato nella Figura, è essenziale rispettare alcune regole fondamentali che permettano una misurazione accurata durante la prova. L'obiettivo principale è ottenere una visione ottimale dell'area del campione, definita comunemente come Field of View (FOV). Nel caso specifico, le telecamere sono state montate su una guida lineare posizionata sopra il centro della postazione di prova, consentendo lo spostamento e la regolazione della loro posizione in modo preciso. Di seguito, le regole adottate per il corretto posizionamento delle telecamere:

- **Distanza dal campione:** come regola generale, le telecamere devono essere posizionate a un'altezza tale da garantire che l'intera superficie della lamiera sia visibile nel FOV. Questa distanza è approssimativamente pari a 20 volte la lunghezza focale dell'obiettivo utilizzato;
- **Angolo tra le telecamere:** secondo le specifiche del manuale tecnico, per obiettivi con una lunghezza focale di 25 mm, è raccomandato un angolo di circa 20° tra le telecamere per assicurare una visione stereoscopica adeguata. Nel setup utilizzato, è stato raggiunto un angolo di $25,22^\circ$.

Regolazione delle telecamere

Dopo il posizionamento iniziale, è necessario regolare le telecamere per ottimizzare la qualità delle immagini acquisite, utilizzando il confronto visivo fornito da un monitor collegato e il software DIC. Queste regolazioni sono essenziali per garantire una corretta acquisizione dei dati e un'analisi precisa della prova. Le regolazioni principali includono:

- **Messa a fuoco:** È fondamentale per ottenere immagini chiare e ben definite. Una messa a fuoco non corretta può compromettere l'accuratezza delle misurazioni DIC, introducendo errori nella rilevazione degli spostamenti del campione;
- **Apertura del diaframma:** Regola la quantità di luce che entra nell'obiettivo della telecamera. Un'apertura più ampia consente una maggiore illuminazione, ma riduce la profondità di campo, mentre un'apertura più ridotta aumenta la profondità di campo a discapito della quantità di luce disponibile. La regolazione deve essere adattata alle condizioni di illuminazione e alla necessità di mantenere una profondità di campo adeguata.
- **Tempo di esposizione:** Controlla il periodo in cui il sensore della telecamera rimane esposto alla luce durante l'acquisizione. Un'esposizione più lunga

consente di acquisire maggiori dettagli in ambienti scarsamente illuminati, ma può causare immagini mosse se vi sono movimenti. Al contrario, un'esposizione breve riduce questo rischio ma richiede una luminosità maggiore per produrre immagini di qualità.

I passaggi da seguire per ottenere una buona regolazione delle telecamere sono:

1. **Apertura massima del diaframma:** mettendo il sistema quindi nella condizione più sfavorevole possibile per la profondità di campo;
2. **Ottimizzazione della messa a fuoco:** osservando il pattern dello speckle finchè non si ottengono immagini nitide;
3. **Impostazione del tempo di esposizione:** si configura un valore di esposizione, scelto come ottimale per la prova;
4. **Chiusura del diaframma:** una volta ottimizzata la messa a fuoco, il diaframma viene gradualmente chiuso per migliorare la profondità di campo garantendo una distribuzione uniforme della luce.

Calibrazione delle telecamere

Prima di avviare l'acquisizione dei dati, è essenziale effettuare una calibrazione accurata delle telecamere per garantire la precisione delle misurazioni DIC. Questo processo prevede la cattura di 50 immagini utilizzando entrambe le telecamere, avvalendosi di un campione di calibrazione specifico, mostrato nella Figura. Il campione di calibrazione è caratterizzato da una griglia in acciaio composta da 9 x 12 punti, con una distanza di 5 mm tra ciascun punto. Durante la calibrazione, il campione viene spostato leggermente in diverse posizioni, e questo permette di acquisire riferimenti dimensionali affidabili e precisi, fondamentali per la correlazione tra le immagini registrate dalle due telecamere e l'analisi successiva. Questo processo assicura che il sistema ottico sia correttamente configurato per l'acquisizione delle immagini, migliorando la qualità e l'affidabilità delle misurazioni.

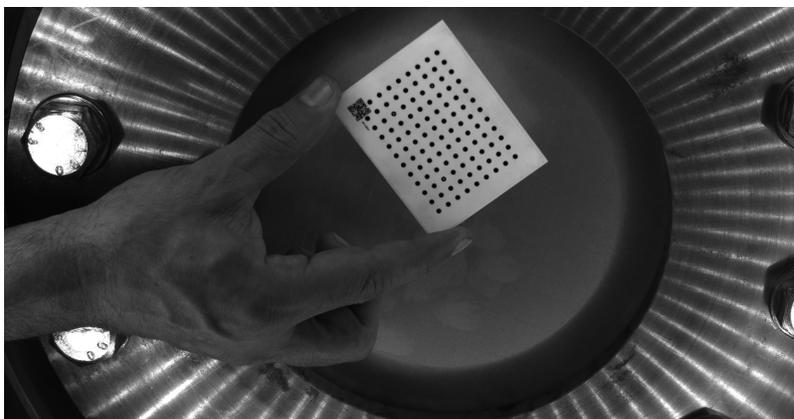


Figura 2.5: Foto acquisita da MatchID durante la calibrazione delle telecamere

2.2.4 Esecuzione prova e acquisizione dati

Una volta terminate le operazioni di preparazione della prova, si procede con l'esecuzione del Bulge test. L'esperimento viene condotto in conformità con la normativa UNI EN ISO 16808 la quale prevede:

- temperatura di esecuzione della prova di 23 ± 5 °C per permettere la replicabilità;
- tempo di esecuzione del test compreso tra 2 e 4 minuti garantendo velocità di deformazione lente e accettabili e tempi dei test economicamente vantaggiosi;
- che pressione del fluido e i dati relativi alla formatura vengano registrati e salvati utilizzando una scala temporale comune. Per garantire una documentazione adeguata e dettagliata del processo, si raccomanda di acquisire almeno 100 valori o immagini durante l'esecuzione del test;

I dati vengono acquisiti e registrati tramite l'utilizzo di 2 computer:

- il **primo computer** è dedicato alla gestione del software di acquisizione DIC (Digital Image Correlation). Per l'acquisizione dei dati è stata impostata una frequenza di campionamento pari a 1 Hz, corrispondente alla registrazione di un'immagine al secondo. Sebbene tale frequenza possa sembrare ridotta, risulta adeguata considerando la natura relativamente lenta della prova. Questo valore garantisce un'acquisizione adeguata per monitorare in modo efficace le variazioni significative dei parametri di interesse;
- il **secondo computer** è collegato al software LabVIEW, utilizzato per interfacciarsi con il sensore di pressione. Questo sistema registra la pressione del fluido con una frequenza di campionamento molto elevata, assicurando un'elevata precisione nelle misurazioni. Inoltre, il software permette di generare in tempo reale la curva pressione-tempo, fornendo un monitoraggio diretto e immediato dell'andamento del test.

L'avvio della prova è gestito tramite l'attivazione di un interruttore che mette in moto il sistema idraulico, consentendo l'aumento di pressione graduale nella camera. Contemporaneamente, viene avviata l'acquisizione dei dati sui due computer dedicati, garantendo una sincronizzazione accurata tra le diverse misurazioni e una correlazione più precisa tra i parametri registrati.

Capitolo 3

Elaborazione dei dati sperimentali

L'elaborazione dei dati derivanti dal bulge test idraulico può essere suddivisa in due fasi principali, ciascuna caratterizzata da un approccio e strumenti specifici:

1. **Digital Image Currelation (DIC):** Questa fase rappresenta il punto di partenza per l'analisi. Attraverso l'utilizzo del software *MatchID Stereo*, è possibile ottenere i campi di spostamento della superficie della lamiera durante il test. Questi spostamenti, acquisiti con tecniche di correlazione digitale delle immagini, costituiscono la base per il calcolo di parametri fondamentali, come le deformazioni principali ed altri parametri;
2. **Elaborazione dei risultati con MATLAB:** La seconda fase prevede l'analisi dettagliata dei dati ottenuti dalla DIC utilizzando MATLAB. Attraverso strumenti avanzati di elaborazione, è possibile:
 - Analizzare i dati sperimentali per estrarre informazioni utili o calcolare nuovi parametri tramite l'elaborazione dei dati con MATLAB;
 - Creare grafici, come curve pressione-deformazione o pressione-spostamento, che descrivono il comportamento meccanico del campione;
 - Generare mappe rappresentative, utili per confrontare i risultati sperimentali con quelli del modello FEM.

3.1 Digital Image Correlation (DIC)

Durante il bulge test è stata utilizzata la tecnica della Digital Image Correlation (DIC), un metodo avanzato che permette di misurare con precisione gli spostamenti e di calcolare le deformazioni delle superfici del campione. Questo è reso possibile attraverso l'acquisizione di immagini durante le diverse fasi della prova. Per l'implementazione della DIC è stato impiegato il software MatchID Stereo.

Il procedimento della Digital Image Correlation si articola nei seguenti passaggi:

- Preparazione dei dati acquisiti;
- Configurazione delle opzioni di elaborazione;
- Avvio della correlazione e calcolo delle deformazioni;
- Esportazione dei dati ricavati.

3.1.1 Preparazione dei dati acquisiti

Caricamento e selezione delle immagini

La prima fase di questo metodo prevede il caricamento di tutte le immagini acquisite dalle due telecamere. Come mostrato in figura 3.3, si può osservare che la lamiera presenta una leggera deformazione rispetto alla configurazione iniziale. Per ottimizzare l'analisi, si procede selezionando una foto ogni tre. Questo approccio è giustificato dal fatto che, data la lentezza della prova, le differenze di spostamenti tra immagini consecutive risultano trascurabili. Pertanto, riducendo il numero di immagini da analizzare, si semplifica il processo senza compromettere l'accuratezza dei risultati. Su un totale di 489 immagini acquisite, verranno quindi analizzate soltanto 163.

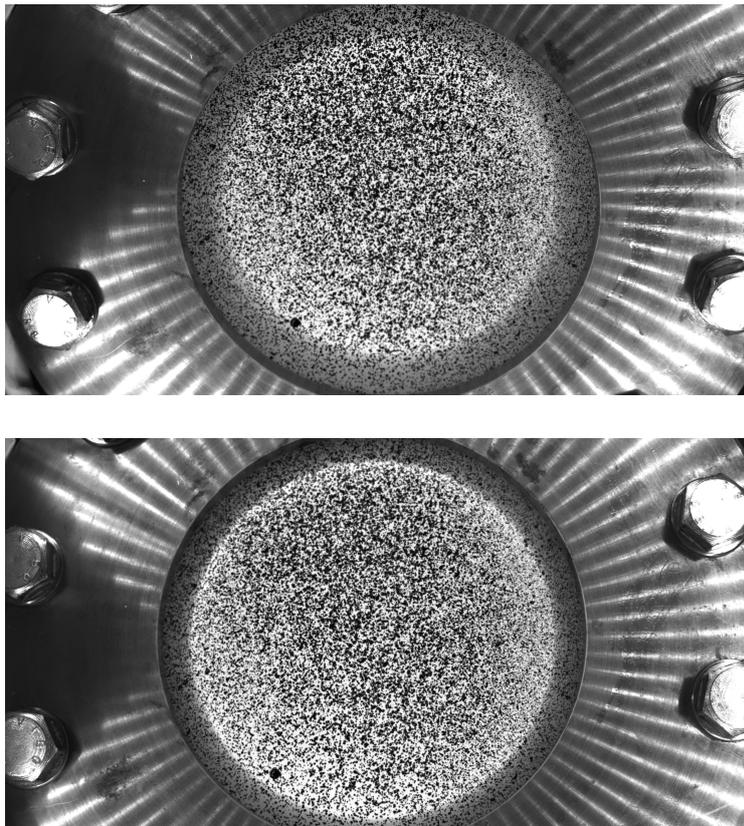


Figura 3.1: Immagini acquisite durante il test tramite MatchID: la prima mostra il campione nello stato iniziale, mentre la seconda alla fine della prova

Definizione della regione d'interesse (ROI)

In questa fase viene definita manualmente la regione di interesse (ROI) sulla prima immagine, ovvero l'area in cui il software eseguirà l'analisi. La regione selezionata deve essere più piccola rispetto all'area complessiva dello speckle per due motivi principali: innanzitutto, i bordi presentano zone d'ombra che potrebbero compromettere l'elaborazione dei dati; in secondo luogo, è presente una macchia nera nello speckle, di dimensioni significative, che potrebbe influenzare negativamente i risultati. La figura seguente illustra la regione di interesse adottata per questa analisi.

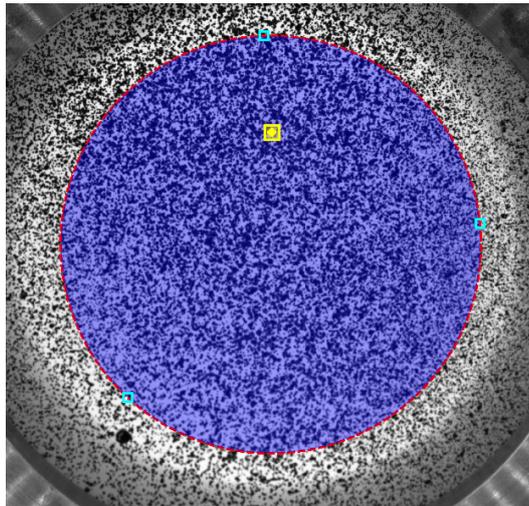


Figura 3.2: Regione d'interesse (ROI) utilizzata sul provino

Calibrazione sistema

Il passo successivo consiste nel caricare nel software il file generato dalla fase di calibrazione. Questa operazione permette al programma di associare correttamente le immagini in coppie, basandosi sulle acquisizioni delle due telecamere, e di eseguire una triangolazione accurata. Grazie a questo processo, è possibile ottenere una valutazione tridimensionale precisa degli spostamenti e delle deformazioni del campione durante le prove sperimentali.

3.1.2 Configurazione delle opzioni di elaborazione

Nella definizione dei parametri di analisi, è fondamentale prestare particolare attenzione a due aspetti principali:

Scelta dei parametri di Subset e Stepsize

- **Subset:** Rappresenta la dimensione (in pixel) della finestra quadrata utilizzata dal software per identificare e tracciare il pattern speckle nelle immagini. Durante l'analisi, il software confronta il pattern contenuto in questa finestra

tra le immagini successive per calcolare spostamenti e deformazioni. In questo caso è stato selezionato un subset con una dimensione di 53 pixel;

- **Stepsize:** È la distanza (in pixel) tra i centri dei subset successivi analizzati nella regione di interesse, la quale serve a controllare la densità dei punti su cui vengono calcolati gli spostamenti e le deformazioni.

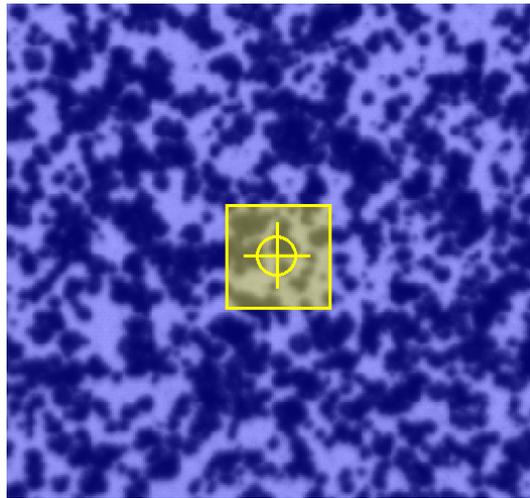


Figura 3.3: Dimensioni del subset impostato sulla lamiera

Configurazione parametri di correlazione

Durante il processo di deformazione plastica, si verificano cambiamenti significativi che possono generare discrepanze rilevanti tra le immagini iniziali e quelle delle fasi finali. Tali differenze possono rappresentare una problematica per il software nel mantenere una correlazione accurata. Per ridurre al minimo questo problema, si interviene configurando opportunamente i parametri disponibili nelle Opzioni di Correlazione:

- **Spostamenti rigidi iniziali:** Questo parametro è fondamentale per gestire variazioni significative di spostamento che possono verificarsi tra le immagini iniziali, spesso causate da movimenti rigidi del corpo. In questo caso si applica un valore di 100 pixel;
- **Deformazione tra due immagini consecutive:** Questa opzione consente di definire l'entità della deformazione attesa tra due immagini successive, ed è strettamente legato alle proprietà del materiale analizzato. Nel caso in esame, trattandosi di una lega di alluminio altamente duttile, ci si aspetta che le deformazioni tra un'immagine e l'altra siano piccole.

Successivamente, è necessario configurare il comportamento della correlazione all'interno delle immagini utilizzando la modalità "Progress History".

In questo caso, si seleziona l'opzione **Spatial**, che consente a ciascun punto dati di adottare il risultato del punto più vicino come ipotesi iniziale per il proprio processo di ottimizzazione, garantendo una correlazione più coerente e precisa tra le immagini.

3.1.3 Avvio della correlazione e calcolo delle deformazioni

In questa fase, si procede con la correlazione utilizzando il comando "Initial Guess", che permette una prima verifica della qualità della correlazione tra le immagini acquisite. Successivamente, si avvia il processo definitivo tramite la funzione "Start Correlation", che opera sulla base dei parametri precedentemente definiti. Nella figura 3.6 sono riportati gli spostamenti della lamiera nella direzione w all'interno della regione di interesse precedentemente definita.

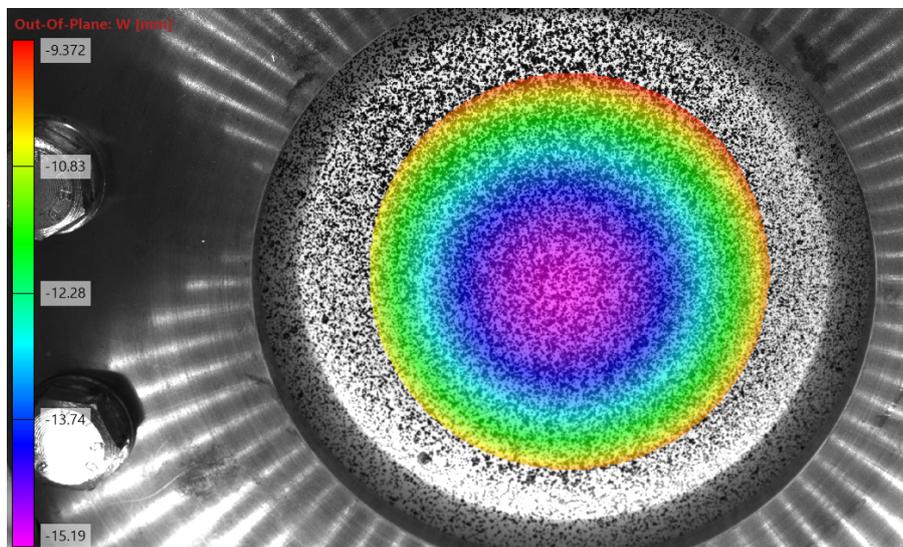


Figura 3.4: Immagine dello spostamento w elaborato da MatchID

Una volta completato il calcolo degli spostamenti, il passo successivo consiste nel determinare i campi di deformazione, operazione che viene effettuata tramite il comando "Strain calculation" in MatchID. Durante questa fase, il software esegue un adattamento polinomiale locale sui dati di spostamento, per derivare i campi di deformazione relativi. Le deformazioni vengono quindi calcolate in un sistema di coordinate locale. Si procede quindi con la definizione delle impostazioni necessarie per ottenere i risultati relativi alle deformazioni:

- **Strain window: 5**

Rappresenta le dimensioni utilizzate per l'adattamento polinomiale locale, ovvero il numero di punti dei dati di spostamento considerati per il calcolo del campo di deformazione. La combinazione tra le dimensioni della finestra di deformazione, il passo scelto (step size) e il sottoinsieme (subset) utilizzato nella valutazione degli spostamenti determina la dimensione finale della gabbia virtuale, ossia l'area su cui vengono calcolate le deformazioni;

- **Point tolerance: 0%**

Se si imposta la tolleranza del punto al valore 0%, significa che il software considererà ogni finestra di deformazione, anche quelle che contengono un numero minimo di punti dati (meno di NxN), per il calcolo delle deformazioni. In altre parole, il processo di calcolo procederà anche nelle aree vicine ai bordi o in zone problematiche con finestre parzialmente popolate;

- **Tensor: Logarithmic Euler - Almansi:** $\varepsilon^{\text{LEA}} = \ln(\sqrt{F \cdot F^T})$

È spesso utilizzato per rappresentare la deformazione in un sistema tridimensionale in cui sono richieste analisi di grandi spostamenti e deformazioni;

- **Interpolation: Bilinear Quadrilateral (Q4)**

È un metodo utilizzato in MatchID Stereo per ottenere un'approssimazione continua dei dati di spostamento su una superficie. In particolare, questa interpolazione è applicata a elementi finiti quadrilaterali (Q4), dove ogni elemento è definito da quattro nodi [4].

3.1.4 Esportazione dei dati

Per facilitare l'analisi e l'interpretazione dei dati con MATLAB, è opportuno esportarli in formato .csv, in questo modo, possiamo manipolare facilmente le informazioni per ulteriori elaborazioni. I dati esportati comprendono:

- **posizioni (x,y,z):** rappresentano le coordinate spaziali tridimensionali dei punti selezionati sulla superficie della lamiera, permettendo di descrivere la forma geometrica della superficie deformata nel suo insieme;
- **spostamenti (u,v,w):** indicano le traslazioni del materiale lungo i tre assi spaziali. Le componenti u e v corrispondono agli spostamenti nel piano della lamiera, mentre w rappresenta lo spostamento perpendicolare al piano della lamiera;
- **deformazioni ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{xy}$):** comprendono le deformazioni lungo le direzioni cartesiane ($\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{xy}$) e quelle lungo le direzioni principali ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) che riflettono la deformazione effettiva del materiale nelle direzioni di massimo e minimo allungamento.

Tutti questi dati sono rappresentati attraverso matrici tridimensionali, in cui le prime 2 dimensioni definiscono una griglia spaziale bidimensionale sulla superficie della lamiera, mentre la terza dimensione rappresenta l'istante temporale in cui i dati sono stati acquisiti (t).

3.2 Elaborazione dei risultati con MATLAB:

Con i dati disponibili, possiamo utilizzare MATLAB per analizzare i risultati della prova sperimentale. Ad esempio, w e ε_1 vengono elaborati per individuare i valori massimi in ogni matrice per ciascun istante temporale, generando valori da confrontare con i risultati del modello FEM. Invece le coordinate spaziali (x, y, z) sono fondamentali per ricostruire superfici che rappresentano la geometria della lamiera, le quali vengono arricchite da una scala cromatica che riflette i valori di un quarto parametro, come lo spostamento (u, v, w) o una deformazione caratteristica lungo una direzione specifica $(\varepsilon_1, \varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy})$.

Grafico Pressione-Deformazione

Per ottenere il grafico, è stato necessario interpolare i dati acquisiti della pressione rispetto a quelli della deformazione. Questo processo si è reso indispensabile poiché la pressione è stata registrata con una frequenza molto più elevata rispetto alle deformazioni. Nella figura sottostante, la curva rossa rappresenta i dati sperimentali acquisiti, caratterizzati da elevate oscillazioni dovute allo svolgimento della prova. Al contrario, la curva blu è il risultato di un'interpolazione che approssima al meglio il comportamento reale, riducendo le fluttuazioni attraverso l'uso di 10 punti selezionati per minimizzare gli scarti rispetto alla curva originale.

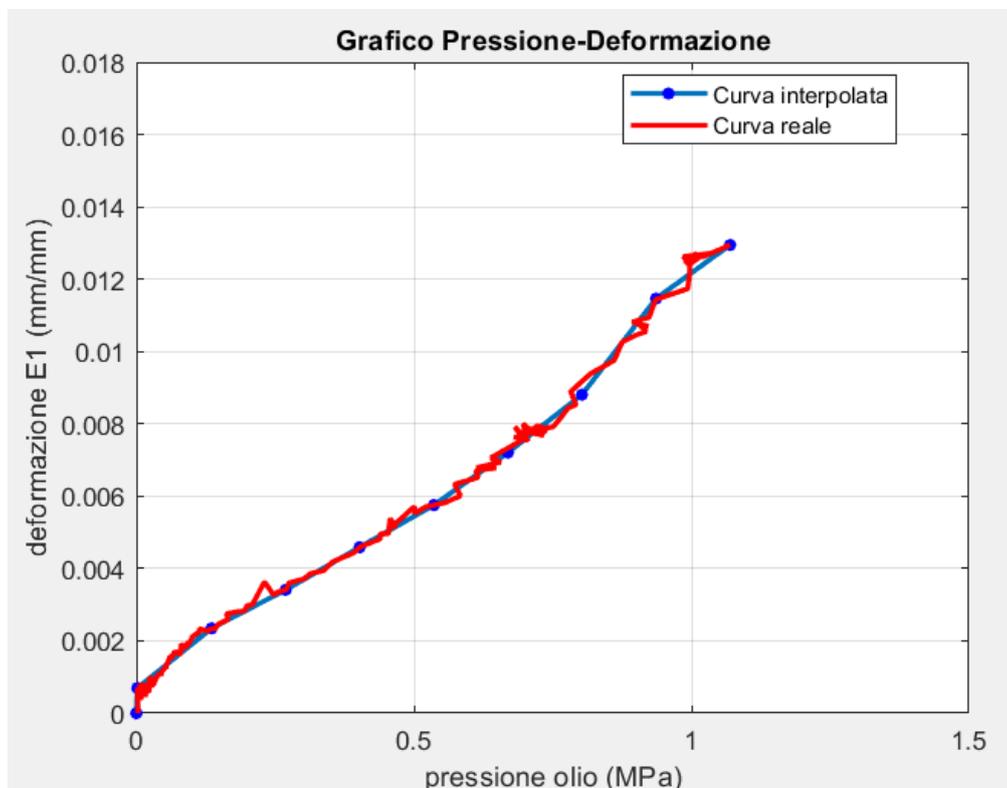


Figura 3.5: Grafico pressione-deformazione $E1$ elaborato con Matlab

Grafico Pressione-Spostamento

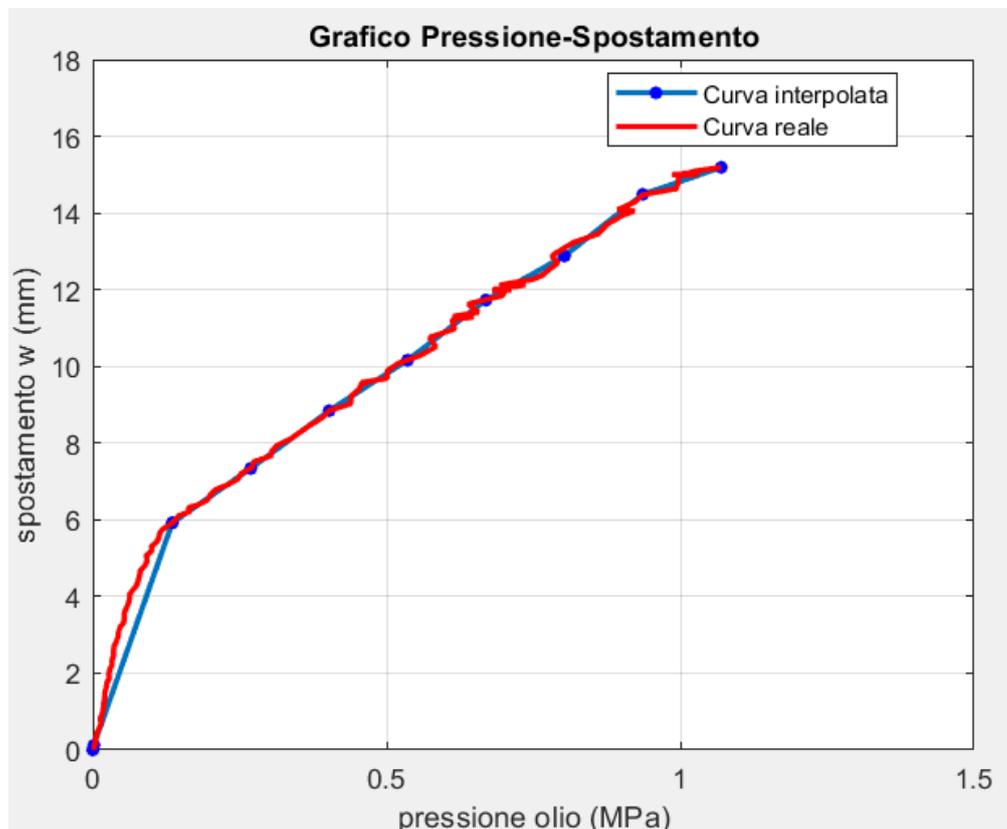


Figura 3.6: Grafico pressione-spostamento w elaborato con Matlab

Anche in questo caso, nonostante il grafico reale appaia più uniforme rispetto a quello relativo alla deformazione, è stato necessario interpolare una curva per approssimare al meglio l'andamento dei dati sperimentali. Questo perché, sebbene le oscillazioni siano meno evidenti, sono comunque presenti e potrebbero influenzare l'analisi quantitativa. Diversamente dal caso precedente, in cui la curva mostrava un comportamento quasi lineare, qui si osserva un andamento bilineare.

Mappe 3D

Nella figure sono rappresentate le mappe relative all'ultimo istante della prova, ottenute utilizzando le coordinate spaziali (x, y, z) per ricostruire la superficie della lamiera. Grazie a una scala cromatica, queste mappe consentono di analizzare visivamente l'entità dello spostamento normale (w) e della deformazioni lungo le direzioni principali $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$.

3.2 Elaborazione dei risultati con MATLAB:

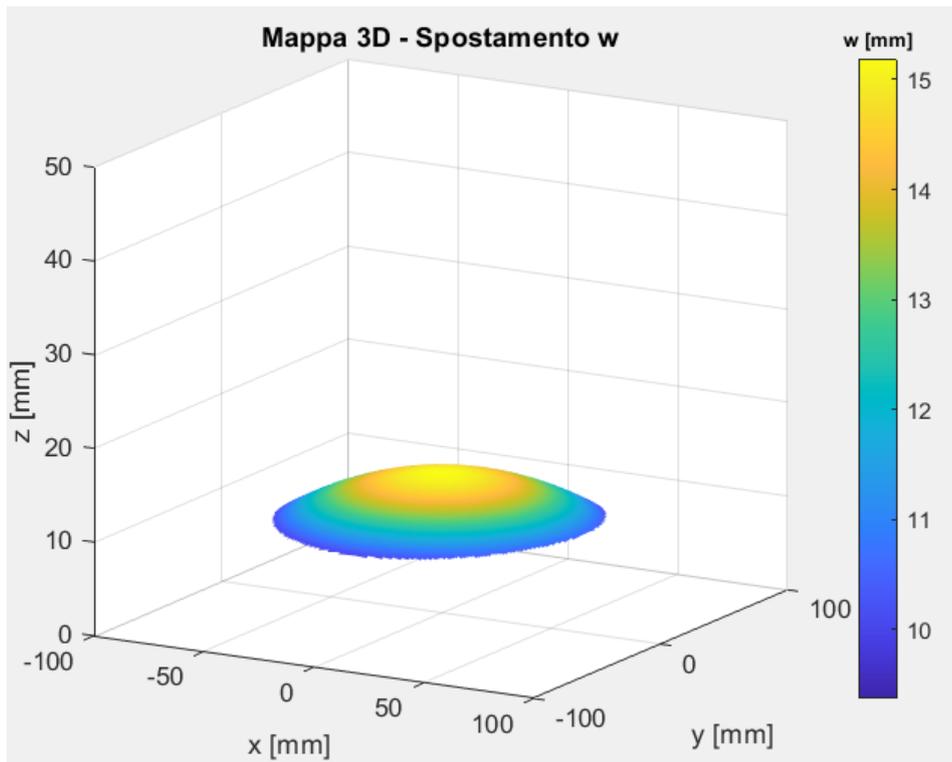


Figura 3.7: Mappa tridimensionale spostamento w

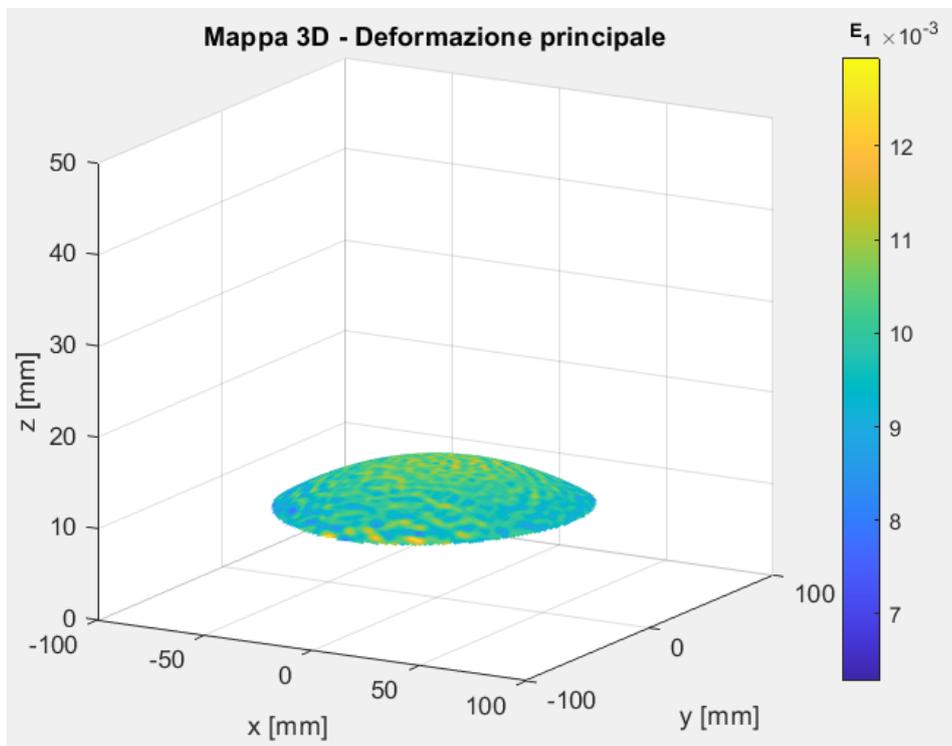


Figura 3.8: Mappa tridimensionale deformazione principale ϵ_1

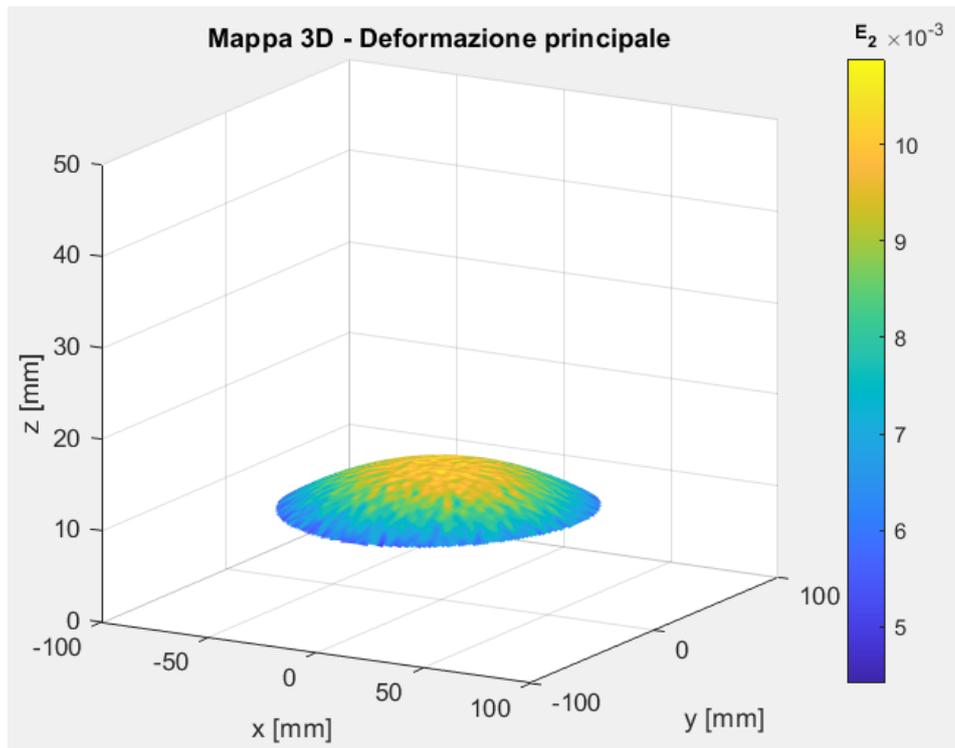


Figura 3.9: Mappa tridimensionale deformazione principale ϵ_2

Capitolo 4

Analisi agli elementi finiti (FEM)

4.1 Introduzione al FEM

Nato inizialmente negli anni '50 per risolvere problemi strutturali nell'ingegneria aerospaziale, il FEM (Finite Element Method) si è rapidamente diffuso in molteplici settori grazie alla sua versatilità e capacità di adattarsi a geometrie complesse, materiali non lineari e condizioni di carico sofisticate.

Il metodo si basa su principi fondamentali della fisica, come l'equilibrio delle forze, la conservazione dell'energia e la congruenza degli spostamenti, per costruire un modello matematico in grado di approssimare il comportamento reale del sistema studiato quando è sottoposto a una combinazione definita di carichi e vincoli. Questo approccio consente di rappresentare e analizzare diversi tipi di fenomeni, come problemi statici e dinamici, tensioni, deformazioni e molto altro. Il FEM si fonda sulla suddivisione della struttura complessiva in un sistema discreto equivalente, costituito da sottostrutture elastiche chiamate elementi. Questi elementi, di dimensioni finite e opportunamente ridotte, sono caratterizzati da un comportamento meccanico noto, consentendo una modellazione accurata della struttura nel suo insieme. Gli elementi hanno una propria individualità e sono connessi tra loro tramite un insieme discreto di punti chiamati nodi. Attraverso l'uso di funzioni di approssimazione polinomiale del campo degli spostamenti, è possibile descrivere il comportamento elastico continuo di ogni elemento in relazione alle sue proprietà geometriche e al materiale di cui è composto. I carichi possono essere applicati all'interno dell'elemento, sulla sua superficie o direttamente sui nodi. I nodi rappresentano le entità fondamentali che caratterizzano gli elementi, poiché è attraverso di essi che avviene il collegamento tra gli elementi, garantendo la congruenza del continuo elastico. Inoltre, ai nodi vengono assegnate le condizioni al contorno o di vincolo, e su di essi vengono effettivamente applicate tutte le forze[5].

Il metodo agli elementi finiti, essendo una tecnica numerica basata sulla discretizzazione di una struttura continua, introduce inevitabilmente un certo livello di approssimazione rispetto al problema reale. Gli errori principali che ne derivano possono essere classificati come segue:

- **Errori di discretizzazione:** In una struttura reale, la geometria e la distribuzione degli spostamenti variano in modo continuo. Tuttavia, la rappresentazione numerica tramite un numero finito di elementi introduce approssimazioni, poiché gli elementi discreti non possono riprodurre esattamente la geometria o gli spostamenti della struttura originale. Questo limite è intrinseco al metodo e rappresenta una conseguenza diretta della suddivisione in elementi finiti;
- **Errori di modellazione:** Sebbene la geometria venga spesso importata direttamente da sistemi CAD, garantendo una notevole aderenza al componente reale, il modello FEM richiede semplificazioni, in particolare per quanto riguarda condizioni di vincolo e di carico. Queste semplificazioni possono introdurre ulteriori approssimazioni, che si riflettono soprattutto in corrispondenza delle aree localizzate.

Questi aspetti rendono fondamentale una scelta accurata della discretizzazione e delle condizioni al contorno per ridurre al minimo l'errore complessivo e migliorare l'affidabilità dei risultati. Il FEM è alla base di numerosi software, tra cui Abaqus, ANSYS e COMSOL, che implementano l'approccio teorico in analisi pratiche, permettendo di simulare scenari complessi e di ridurre la necessità di prototipi fisici.

4.2 Modello FEM

Nell'ambito dell'analisi condotta, è stato utilizzato il software **Simulia Abaqus**, impiegato nella modalità "dinamica esplicita" per la simulazione agli Elementi Finiti. Questa scelta si è rivelata strategica per affrontare le complessità delle dinamiche coinvolte nella formatura delle lamiere, grazie alla maggiore robustezza della dinamica esplicita rispetto ai problemi di convergenza. Pur essendo generalmente meno accurata rispetto alla formulazione implicita, la dinamica esplicita offre una stabilità superiore nei processi altamente non lineari. La metodologia esplicita si basa sul calcolo diretto delle accelerazioni in un dato istante temporale, integrandole successivamente con le velocità e gli spostamenti determinati nei passi precedenti. Questo approccio permette di seguire con precisione l'evoluzione del comportamento del materiale nel tempo, rendendolo particolarmente adatto per simulazioni di processi transitori e complessi.

Un aspetto critico di questa tecnica è la gestione del **Time Period**, che definisce il tempo totale della simulazione, è fondamentale scegliere un intervallo sufficientemente breve per contenere i tempi computazionali, evitando al contempo che accelerazioni elevate portino a un'eccessiva influenza delle forze d'inerzia. Quest'ultimo aspetto è particolarmente rilevante per il confronto con i test sperimentali, dove le accelerazioni sono tipicamente basse, data la durata prolungata delle prove, solitamente nell'ordine di pochi minuti. Inizialmente, è stato sperimentato un Time Period pari a 0.1 secondi. Tuttavia, tale configurazione ha evidenziato alcune criticità, tra cui la presenza di onde di propagazione generate dalle forze d'inerzia. Queste onde hanno influenzato negativamente il comportamento del modello, causando, in alcune aree della lamiera, piccoli spostamenti retrogradi durante l'applicazione della pressione, questo fenomeno ha compromesso l'accuratezza della simulazione. Per risolvere tali problematiche, il Time Period è stato incrementato a 1 secondo. Questa modifica ha permesso di ottenere risultati significativamente più stabili e lineari, eliminando l'influenza delle forze d'inerzia e consentendo una rappresentazione più fedele della prova sperimentale. Tuttavia, l'aumento del Time Period ha comportato un inevitabile incremento dei tempi di calcolo, passati da circa 15 minuti a poco più di 3 ore. Nonostante ciò, i benefici in termini di precisione e affidabilità della simulazione hanno giustificato pienamente questa scelta.

Metodologia di sviluppo del modello FEM

La creazione di un modello agli Elementi Finiti (FEM) richiede un approccio metodico e ben strutturato per garantire una simulazione accurata e coerente con il fenomeno reale. I passaggi fondamentali possono essere descritti come segue:

1. **Definizione delle geometrie:** Il primo passo consiste nella creazione di una rappresentazione geometrica del sistema da analizzare. In questo caso, è necessario modellare sia la geometria semplificata della macchina per il Bulge sia quella del campione di lamiera sottoposto alla prova. Questa semplificazione geometrica deve mantenere gli aspetti rilevanti per la simulazione, riducendo al minimo i dettagli superflui che potrebbero aumentare inutilmente la complessità computazionale;
2. **Definizione delle proprietà del materiale:** Successivamente, vengono impostate le proprietà meccaniche del materiale in esame, queste includono il modulo di Young, il coefficiente di anisotropia, il limite elastico e la curva sforzo-deformazione, ecc;
3. **Impostazione delle condizioni al contorno:** Includono vincoli imposti, carichi applicati e interazioni descritte dall'attrito;
4. **Generazione delle Mesh:** La geometria viene quindi discretizzata in elementi finiti, un passaggio fondamentale per trasformare il sistema continuo in un sistema numericamente risolvibile.

4.2.1 Geometrie

Nel software Abaqus, le geometrie semplificate della macchina utilizzata per il Bulge Test sono state modellate attraverso il comando "Parts". Per ridurre i tempi di calcolo è stato sfruttato il carattere assialsimmetrico del problema, rappresentando soltanto un quarto del dominio. Questa scelta consente di mantenere una rappresentazione fedele delle condizioni fisiche, semplificando al contempo l'analisi numerica. Sono stati modellati i componenti principali, come la flangia base e il prelamiera (Figura 4.1), di questi elementi sono state riprodotte esclusivamente le superfici rilevanti per il fenomeno in esame. Entrambi i componenti sono stati definiti come corpi rigidi, considerando che sono realizzati in acciaio, un materiale con rigidità significativamente superiore rispetto alla lamiera di alluminio del campione. Questa assunzione semplifica ulteriormente il modello, concentrando l'analisi sulla deformazione del campione. Le flangie in questione presentano un raggio esterno di 200 mm e un raggio interno di 100 mm, dimensioni che riflettono le specifiche geometriche dell'apparato sperimentale. Inoltre, a una distanza di circa 28 mm dal bordo interno è stato incluso un dispositivo rompigrinze.

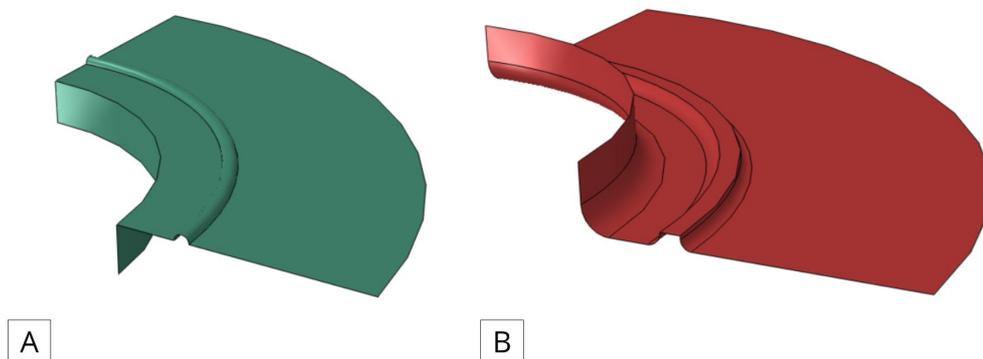


Figura 4.1: Geometria modello FEM: (A) flangia base, (B) prelamiera

Il campione di lamiera è stato modellato sfruttando la simmetria assiale del sistema, rappresentando un quarto della geometria complessiva. La sua forma è stata ottenuta tramite la rivoluzione di un rettangolo, con base pari al raggio di 160 mm e altezza corrispondente allo spessore della lamiera di 1,5 mm, valori che riproducono fedelmente le dimensioni del campione reale utilizzato nelle prove sperimentali. Per una maggiore accuratezza nell'analisi, la lamiera è stata suddivisa in tre regioni distinte, la motivazione e i dettagli relativi a questa scelta saranno approfonditi nel paragrafo dedicato alla definizione della mesh. È stata inoltre utilizzata la

funzione di orientamento delle direzioni principali della lamiera, necessaria per definire correttamente i parametri di anisotropia del materiale.

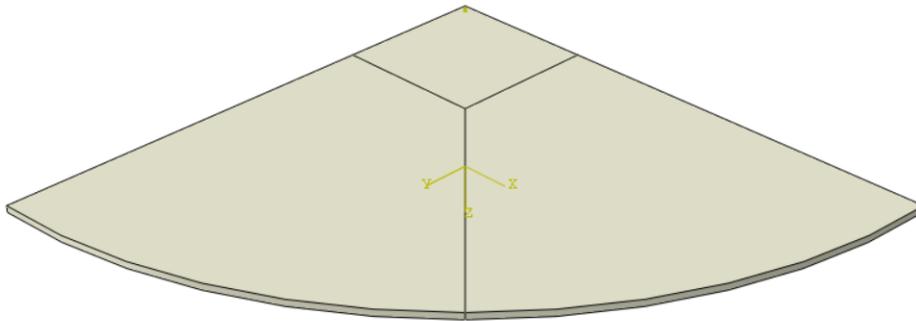


Figura 4.2: Geometria lamiera modello FEM

Infine, utilizzando il comando "Assembly", è stato creato l'assieme dei componenti, posizionando il campione in modo che fosse a contatto con la flangia inferiore e il premilamiera. Questo è stato realizzato attraverso l'uso di punti o superfici di riferimento, garantendo un allineamento accurato tra le parti.

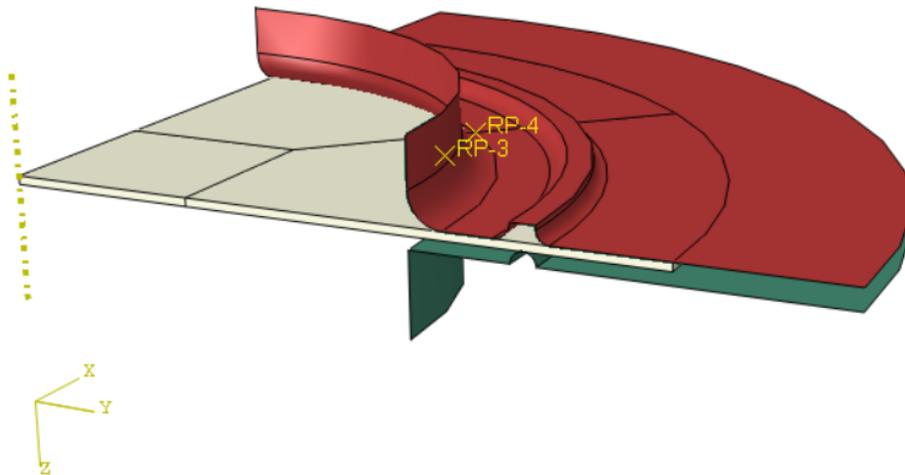


Figura 4.3: Assieme modello FEM

4.2.2 Proprietà del materiale

Questo passaggio risulta fondamentale per caratterizzare accuratamente le proprietà meccaniche del materiale, con l'obiettivo di rappresentare al meglio il comportamento della lega AA 5182-T0, oggetto principale dello studio. Poiché non è stato possibile condurre direttamente una prova di trazione sulla lega in esame, i dati utilizzati provengono da prove sperimentali effettuate su una lega strettamente correlata, l'AA 5182. È importante sottolineare che, in Abaqus, le unità di misura non sono predefinite, motivo per cui è essenziale mantenere coerenza nel sistema di unità scelto per l'intera simulazione. Le proprietà del materiale impostate includono:

- **Densità (ρ):** La densità del materiale è espressa in unità di misura [ton/mm³], con un valore nominale di $2,7E - 09$ [ton/mm³]. Tuttavia, per ottimizzare i tempi di calcolo, è stata ridotta di un fattore 1000, portandola a $2,7E - 06$ [ton/mm³]. Questa modifica verrà spiegata meglio nel paragrafo riguardante la generazione della mesh;
- **Fase elastica:**
 - **Modulo di Young (E):** 70000 [MPa];
 - **Coefficiente di Poisson (ν):** 0.33;
- **Fase plastica:**
 - **Curva ($\sigma - \epsilon$):** La curva è stata discretizzata in 100 punti utilizzando un incremento costante di deformazione plastica pari a $\Delta\epsilon_{pl} = 0.01$. Per ciascun punto sono stati registrati i corrispondenti valori della tensione vera (σ_{true}), al fine di ottenere una rappresentazione dettagliata e accurata della relazione sforzo-deformazione;
 - **Matrice anisotropia (R_0)** L'opzione Potential permette di rappresentare l'anisotropia del materiale mediante l'utilizzo di una matrice dedicata. In questo caso si ipotizza un'anisotropia trasversale e si calcolano le seguenti componenti della matrice:
 - $R_{11} = R_{12} = R_{22} = R_{13} = R_{23} = 1$
 - $R_{33} = 0.8944$

4.2.3 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno rappresentano un aspetto cruciale nella risoluzione di problemi agli Elementi Finiti, poiché una loro corretta definizione è indispensabile per riprodurre in modo accurato e realistico il comportamento strutturale del sistema. Nel presente studio, le condizioni al contorno principali sono state suddivise nelle seguenti categorie:

Vincoli:

- **Flangia base:** Questo componente è stato completamente vincolato, simulando le condizioni di incastro totale che si verificano nel contesto reale;
- **Premilamiera:** Questo componente è vincolato a un movimento esclusivamente verticale (direzione U2). Per simulare la forza di serraggio esercitata sulla lamiera, è stato applicato uno spostamento controllato di 3 mm, necessario per garantire l'adeguata conformazione della lamiera alla geometria del dispositivo rompigrinze;
- **Lamiera:** Per questo componente, sono state applicate le condizioni di simmetria sulle facce esterne del campione, utilizzando i comandi X-symmetry e Z-symmetry. Questo approccio è necessario poiché il modello rappresenta solo un quarto del problema originale.

Carichi

- **Olio in pressione:** L'unica condizione di carico applicata è la pressione uniforme esercitata sulla superficie inferiore della lamiera, impostata con un valore massimo di 1.2 MPa. Questo valore è stato scelto in quanto rappresenta il limite raggiunto durante i test sperimentali, sebbene non sufficiente per una completa caratterizzazione del materiale, tale pressione riproduce l'azione esercitata dall'olio sulla lamiera. Per garantire una simulazione più realistica, la pressione è stata applicata con un'ampiezza definita tramite una rampa, permettendo un incremento graduale nel corso del processo.

Interazioni

- **Contatto flangie-lamiera:** Questo è l'unico contatto del modello in cui è considerato l'attrito. È stato impostato un coefficiente di attrito pari a $\mu = 0,61$, un valore tabulato per l'interazione tra acciaio e alluminio. In direzione normale, il contatto è stato definito come "Hard Contact", rappresentando una rigida interazione tra le superfici per evitare penetrazioni fisicamente irrealistiche.

4.2.4 Generazione delle Mesh

La generazione della mesh rappresenta una fase cruciale nell'analisi agli Elementi Finiti, in quanto permette di discretizzare una struttura continua in una rete composta da piccoli elementi finiti. Poiché il metodo FEM si basa proprio su questa suddivisione, è fondamentale creare una mesh ben strutturata. Le mesh ben strutturate offrono numerosi vantaggi, tra cui una maggiore accuratezza grazie alla distribuzione regolare degli elementi, una migliore efficienza computazionale con tempi di calcolo ridotti e una facilità di controllo per gestire dimensioni e orientamenti in modo prevedibile. Tuttavia, presentano anche svantaggi, come la difficoltà di applicazione a geometrie

complesse, che richiedono suddivisioni del dominio o adattamenti più laboriosi. In generale, sono ideali per geometrie semplici e regolari, mentre risultano meno pratiche per modelli complessi o irregolari. Per la flangia base e il prelamiera è stata generata una mesh con elementi di dimensione globale pari a circa 1.5 mm. Sebbene la complessità geometrica del rompigrinze potesse rappresentare una potenziale fonte di problematiche nella discretizzazione, non sono stati riscontrati inconvenienti durante la creazione della mesh.

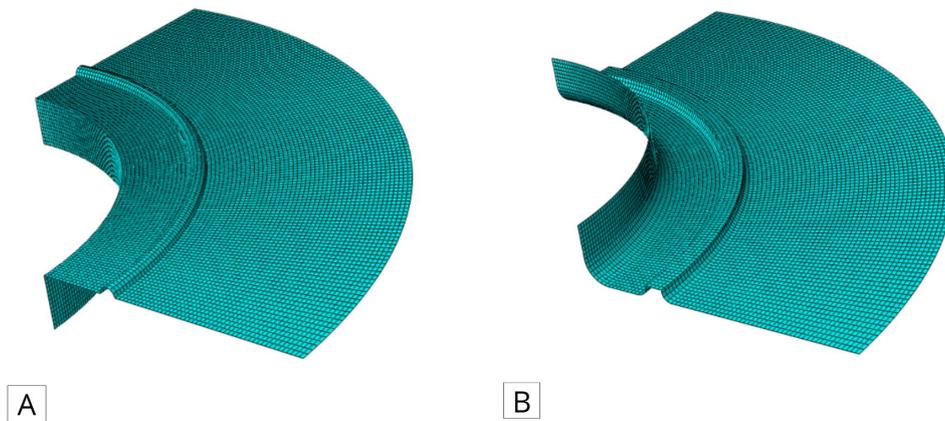


Figura 4.4: *Generazione mesh modello FEM: (A) flangia base, (B) prelamiera*

La lamiera, essendo l'oggetto principale dello studio, richiede una mesh più accurata rispetto agli altri componenti. Per garantire una discretizzazione ottimale, il quarto di geometria è stato suddiviso in tre regioni, come illustrato in figura 4.2. Questa partizione è fondamentale per evitare eccessive distorsioni degli elementi, che avrebbero potuto verificarsi con una generazione globale della mesh, compromettendo la stabilità e l'affidabilità della simulazione. La mesh è stata quindi generata con una dimensione media degli elementi di circa 1 mm sulla superficie della lamiera, risultando più densa rispetto a quella adottata per le flangie. Per rappresentare adeguatamente lo spessore della lamiera, pari a 1,5 mm, sono stati definiti 3 elementi lungo questa direzione. Di conseguenza, ogni elemento dello spessore ha una lunghezza di 0,5 mm.

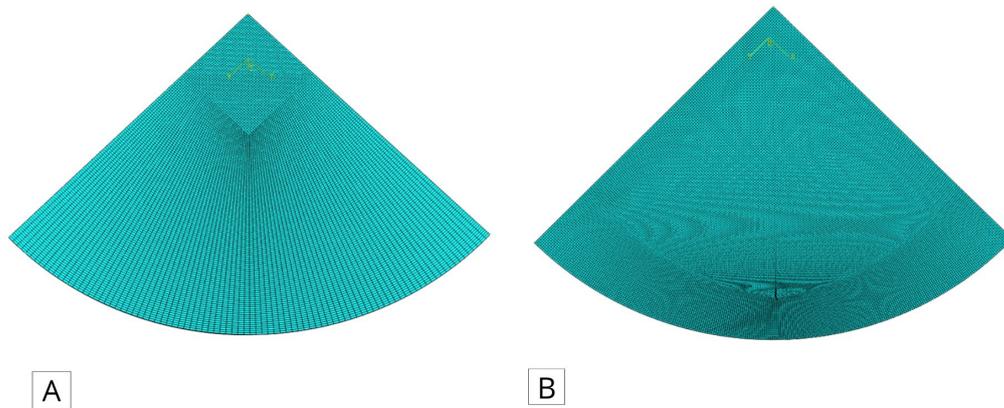


Figura 4.5: Generazione mesh lamiera: (A) ben strutturata, (B) cattiva

Un aspetto fondamentale da considerare nella simulazione agli elementi finiti è il passo temporale di incremento (Δt), calcolato secondo la formula:

$$\Delta t = \frac{L_{\min}}{c} \quad (4.1)$$

dove:

- L_{\min} rappresenta la dimensione caratteristica del più piccolo elemento della mesh;
- c è la velocità del suono nel materiale, definita dalla relazione:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4.2)$$

con E che indica il modulo di Young e ρ la densità del materiale.

Per ottimizzare i tempi di calcolo della simulazione in questo caso, è possibile intervenire su due aspetti:

- **Riduzione della densità del materiale:** diminuendo ρ in modo controllato, si incrementa il valore di Δt , senza alterare in modo significativo il comportamento globale del sistema;
- **Miglioramento della qualità della mesh:** evitando elementi eccessivamente piccoli che, oltre a rallentare il calcolo, riducono il passo temporale di incremento in modo critico.

4.3 Risultati FEM

Completata la fase di definizione e caratterizzazione del modello, la simulazione viene avviata attraverso il comando "Job", che permette di creare e gestire l'esecuzione del calcolo, includendo tutte le configurazioni impostate nelle fasi precedenti. Durante l'elaborazione, Abaqus risolve le equazioni discretizzate del modello FEM, fornendo un'ampia gamma di risultati. Tra questi, l'analisi si è focalizzata in particolare sui seguenti punti di interesse:

- Curva dello spostamento fuori dal piano della lamiera w_{\max}
- Curva della deformazione massima principale e_{\max}
- Tensione equivalente di Von Mises (σ_{vm})

Questi risultati consentono di valutare l'accuratezza del modello, fornendo elementi utili per giudicarne la validità e identificarne possibili applicazioni pratiche.

Curva Pressione-Spostamento

Attraverso l'analisi della curva ottenuta, è possibile determinare lo spostamento massimo nella direzione perpendicolare al piano (out-of-plane). Nella figura 4.6 vengono mostrati gli spostamenti di tutti gli elementi lungo la direzione U2, rappresentati mediante una scala cromatica che evidenzia le zone maggiormente sollecitate. Come previsto, trattandosi di un test di stretching biassiale bilanciato, la regione che presenta lo spostamento massimo corrisponde alla sommità della cupola.

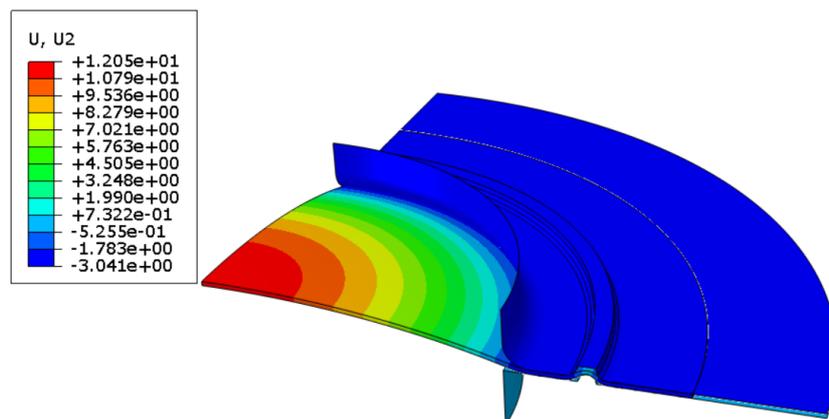


Figura 4.6: *Mappa degli spostamenti U2 nel modello FEM*

L'obiettivo principale è ottenere una curva rappresentativa dello spostamento massimo. Per questo, si seleziona come riferimento il nodo situato all'intersezione degli assi di simmetria sulla superficie superiore della lamiera. Utilizzando Abaqus, viene generato il grafico dello spostamento U2 in funzione del tempo durante lo step

di simulazione, consentendo di monitorare l'evoluzione dello spostamento nel punto di massimo interesse.

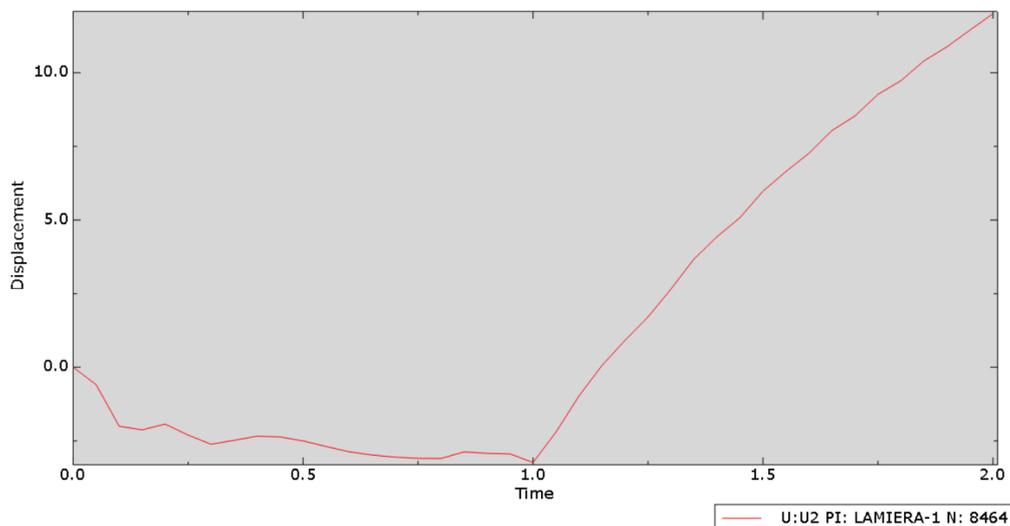


Figura 4.7: *Grafico Spostamento-Tempo*

Il grafico ottenuto può essere suddiviso in due fasi principali, corrispondenti ai due step della simulazione:

1. **Intervallo 0.0-1.0:** Durante questa fase si verifica lo spostamento del premilamiera per il serraggio del campione. Questo provoca uno spostamento negativo, coerente con l'azione di compressione esercitata sulla lamiera;
2. **Intervallo 1.0-2.0:** In questa fase, si osserva un andamento crescente e lineare dello spostamento, corrispondente alla pressione esercitata dall'olio.

Ora l'attenzione è focalizzata esclusivamente sulla seconda fase della simulazione. Tuttavia, dal grafico si osserva che i valori dello spostamento iniziano con un valore negativo, ereditato dalla fase precedente. Per correggere questa discrepanza, i dati vengono elaborati in MATLAB: lo spostamento viene riportato a zero all'inizio della seconda fase, e la scala temporale viene sostituita con i valori di pressione applicata corrispondenti a ciascun istante.

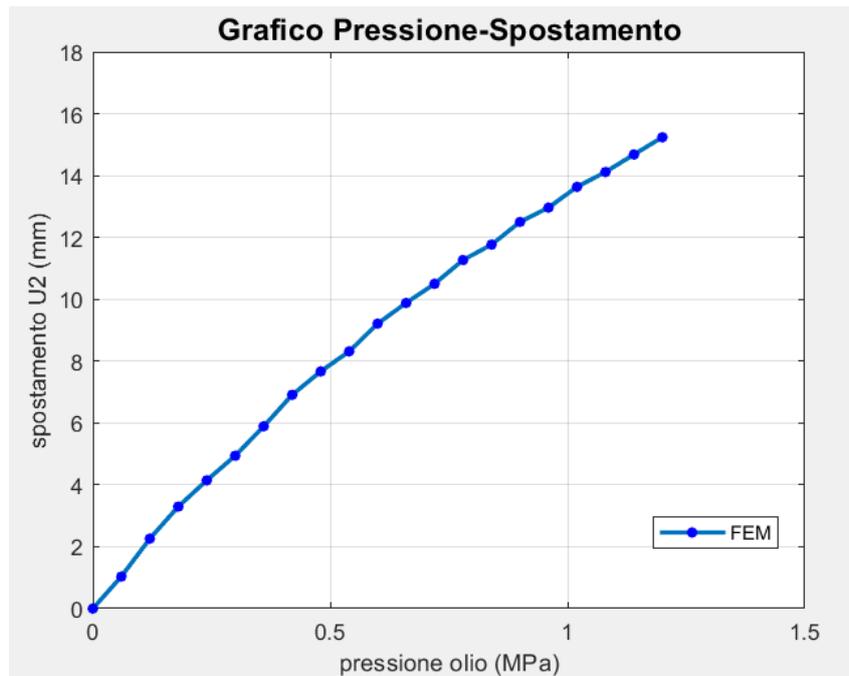


Figura 4.8: *Grafico Pressione-Spostamento elaborato con MATLAB*

Curva Pressione-Deformazione

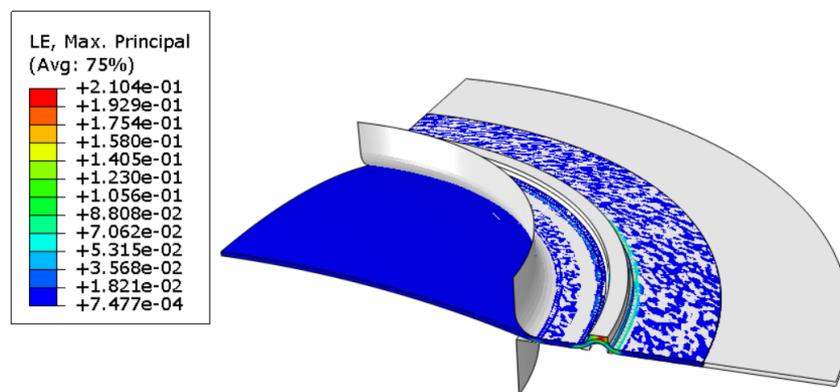


Figura 4.9: *Mappa delle deformazioni LE_{max} principali*

Per quanto riguarda l'analisi della deformazione, esaminando la componente massima principale, indicata in Abaqus come "LE Max Principal", si osserva che la scala cromatica viene influenzata dalla regione corrispondente al dispositivo rompigrinze, poiché risulta essere quella soggetta alle deformazioni più significative. Tuttavia, poiché tale area non rientra nell'oggetto di studio, viene trascurata. L'analisi si concentra quindi sul nodo precedentemente selezionato, utilizzato anche per valutare lo spostamento massimo, al fine di determinare la deformazione principale in quella specifica posizione.

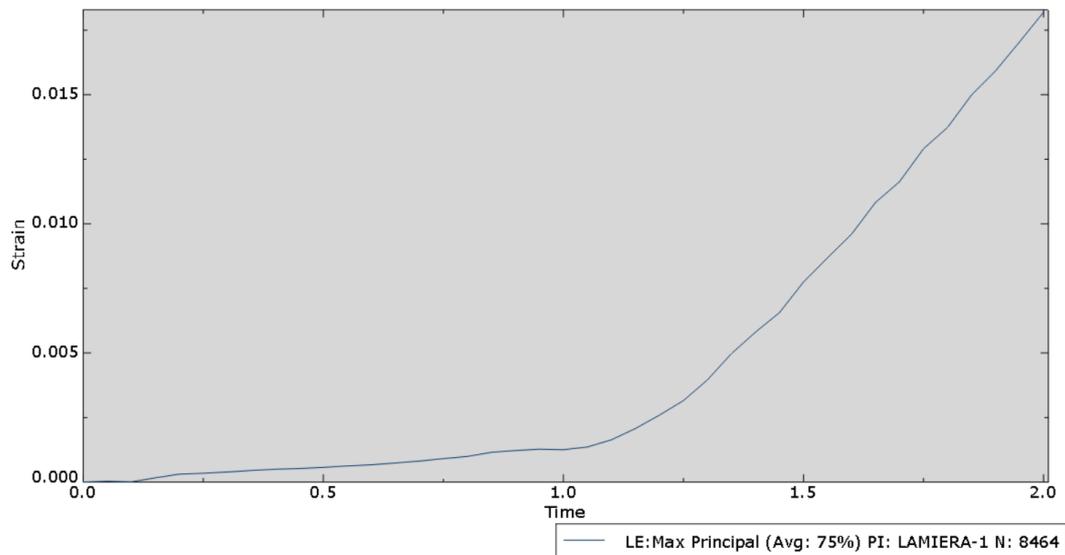


Figura 4.10: Grafico Deformazione-Tempo

Anche in questo caso è possibile distinguere chiaramente le due fasi del processo. Per ottenere il grafico Pressione-Deformazione, si applicano gli stessi procedimenti descritti in precedenza, garantendo così una rappresentazione coerente e accurata dei risultati.

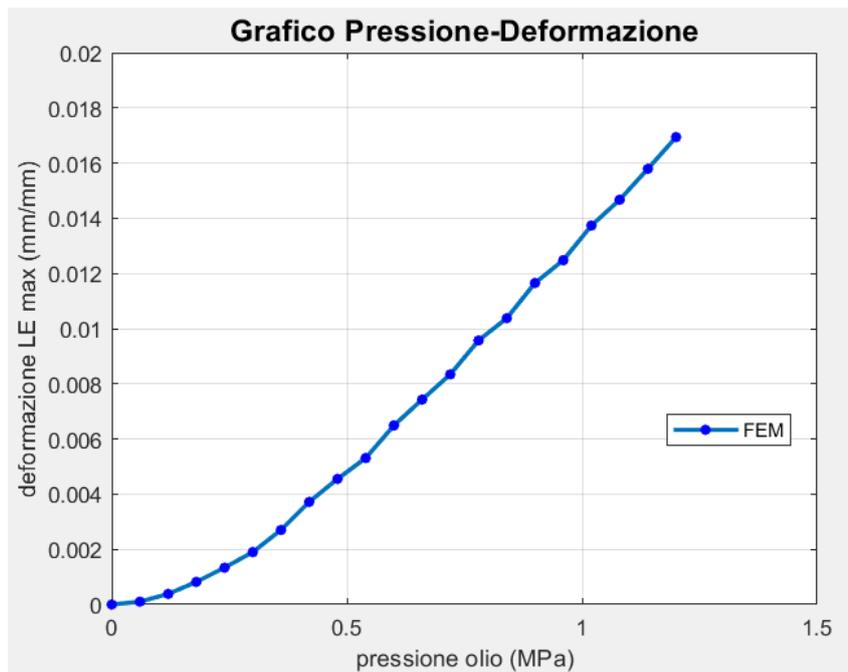


Figura 4.11: Grafico Pressione-Deformazione elaborato con MATLAB

Tensione Von Mises

La tensione equivalente di Von Mises (σ_{vm}) è un parametro fondamentale per analizzare la resistenza di un materiale sottoposto a stati di sollecitazione complessi. Questo valore combina le tensioni principali e il loro orientamento spaziale in un'unica misura scalare, rappresentando il livello di sollecitazione equivalente all'interno del materiale e fornendo un criterio efficace per valutare il rischio di cedimento. La figura (I) mostra la distribuzione delle tensioni equivalenti di Von Mises all'interno della lamiera, rappresentata tramite una mappa cromatica. Anche in questo caso, la presenza del dispositivo rompigrinze influisce significativamente sulla scala dei colori. Focalizzandosi sulla sommità della lamiera, si osserva che, in corrispondenza di una pressione massima di circa 1 MPa (raggiunta nei test sperimentali), la tensione equivalente massima (σ_{vm}) è di circa 160 MPa.

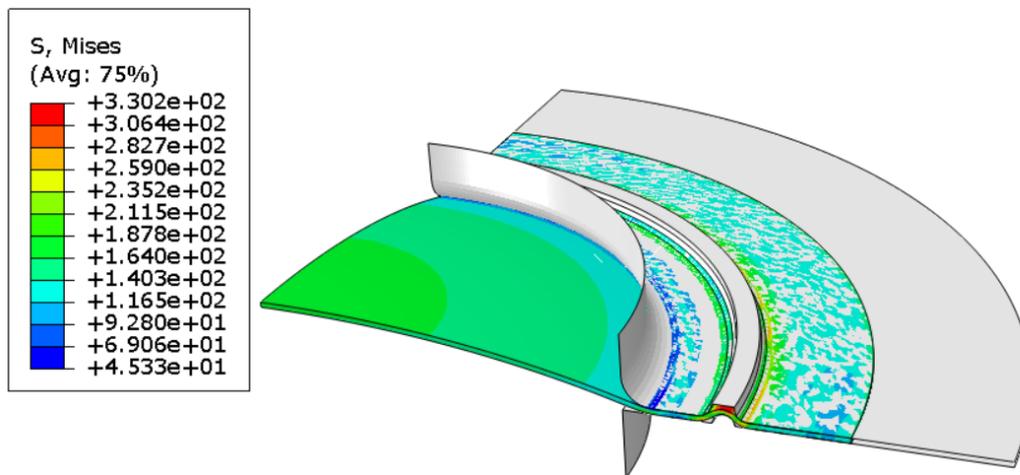


Figura 4.12: *Mappa tensione equivalente Von Mises*

Nel capitolo successivo verranno analizzati e confrontati i risultati ottenuti dal modello FEM con quelli derivati dai test sperimentali. Questo confronto consentirà di valutare la validità del modello, di identificare eventuali margini di miglioramento per futuri sviluppi e di discutere le principali problematiche riscontrate durante lo studio.

Capitolo 5

Conclusioni

In questo capitolo si confrontano i risultati ottenuti dal test sperimentale e dalla simulazione numerica mediante il modello FEM. Si analizzano i grafici generati e si forniscono spiegazioni sulle differenze riscontrate tra le mappe ottenute dai due metodi. Successivamente, vengono approfondite le principali limitazioni riscontrate durante la sperimentazione o l'elaborazione dei risultati, evidenziando i fattori che possono aver influenzato la precisione del confronto. Infine, si delineano i possibili sviluppi futuri per ampliare la ricerca su questo argomento, con particolare attenzione a potenziali miglioramenti metodologici e applicazioni pratiche.

Risultati

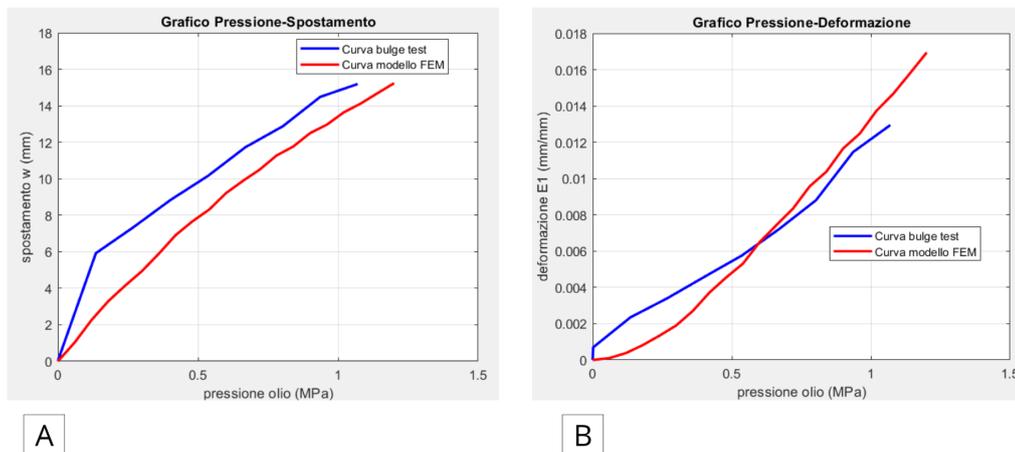


Figura 5.1: Confronto tra grafici ottenuti dai test sperimentali e il modello FEM: (A) spostamento w , (B) deformazione $E1$

Del grafico (A) si nota che nella prima fase della prova sperimentale la pendenza della curva è maggiore rispetto quello ottenuta dal FEM che invece è lineare, questo comportamento potrebbe esser dovuto a spostamenti rigidi che si verificano agli inizi della prova, dopo questo tratto le curve hanno un andamento uguale essendo

le rette quasi cuve quasi parallele. Quindi si può dire che appartiene la fase iniziale il grafico è abbastanza accurato. Nel grafico (B) emerge sempre una differenza iniziale tra i dati sperimentali e quelli ottenuti dalla simulazione, che tuttavia si riduce progressivamente all'aumentare della pressione. In particolare, oltre il valore di circa 0,6 MPa, le curve mostrano un'elevata sovrapposizione, indicando una buona corrispondenza tra i risultati sperimentali e quelli numerici.

Confrontando le mappe dello spostamento fuori dal piano (figure 3.7 e 4.6), si osserva una corrispondenza pressoché completa tra i risultati sperimentali e quelli ottenuti dal modello FEM. Tuttavia, analizzando le mappe relative alla deformazione principale ε_1 (figure 3.8 e 4.9), emergono delle differenze significative. In particolare, nel modello agli elementi finiti, la deformazione si distribuisce in maniera uniforme sul profilo, riflettendo l'approccio ideale e semplificato della simulazione. Al contrario, nella realtà sperimentale, essendo il materiale in una fase di transizione tra regime elastico e plastico, le deformazioni risultano non omogenee, mostrando una distribuzione più complessa e localizzata.

Limitazioni

- **Simulazione modello FEM**

- **proprietà del materiale:** sono state assunte da un materiale simile ma non identico a quello reale, introducendo potenziali discrepanze nei calcoli;
- **geometria:** la scelta di modellare soltanto un quarto della geometria complessiva rappresenta una semplificazione che può non catturare pienamente il comportamento globale del sistema;
- **condizioni al contorno:** contatti e vincoli sono stati semplificati rispetto alla realtà;
- **mesh:** nonostante la mesh utilizzata sia ben strutturata, la discretizzazione stessa introduce inevitabilmente approssimazioni.

- **Prova sperimentale**

La principale limitazione riscontrata nel test è stata la ridotta entità delle deformazioni ottenute, le quali si sono attestate intorno all'1 %. Tali deformazioni, sono a malapena sufficienti a raggiungere il regime plastico, risultando troppo esigue per validare il modello adottato. Questo rappresenta un aspetto critico, considerando che l'obiettivo principale della tesi era la caratterizzazione della formabilità plastica del materiale.

Sviluppi futuri

Per una maggiore completezza nell'analisi del problema, diversi aspetti possono essere approfonditi e migliorati attraverso futuri sviluppi di ricerca:

- **Caratterizzazione avanzata delle proprietà del materiale:** Condurre prove di trazione mirate per determinare con maggiore precisione i parametri meccanici e l'anisotropia del materiale, migliorando così la qualità dei dati di input per le simulazioni;
- **Esecuzione del test fino alla rottura del campione:** Completare la prova fino alla rottura consentirebbe di esplorare l'intero regime plastico del materiale, un obiettivo non raggiunto in questo studio a causa di limitazioni tecniche della macchina utilizzata per il bulge test;
- **Ottimizzazione del modello FEM:** Implementare una simulazione più complessa, includendo l'intero comportamento della macchina e superando la semplificazione geometrica. Inoltre, l'impiego della modalità implicita nella simulazione potrebbe aumentare l'affidabilità e la rappresentatività del modello numerico.

Bibliografia

- [1] Taylan Altan and A Erman Tekkaya. *Sheet metal forming: fundamentals*. Asm International, 2012.
- [2] Jack Hu, Zdzislaw Marciniak, and John Duncan. *Mechanics of sheet metal forming*. Elsevier, 2002.
- [3] Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI). Norma uni en iso 16808, 2022. Disponibile presso: <https://www.uni.com>.
- [4] MatchID NV. *MatchID Stereo, Software for Digital Image Correlation*, 2024. Version 2024₂, used for DIC image analysis.
- [5] Joseph E Shigley, Richard G Budynas, J Keith Nisbett, Giovanni B Broggiato, Gianluca Chiappini, Cortese Luca, Edoardo Mancini, Rossi Marco, Sasso Marco, et al. *SHIGLEY. PROGETTO E COSTRUZIONE DI MACCHINE*. McGraw-Hill Education (Italy) srl, 2024.