



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**Determinazione della Curva Limite di Formabilità (FLC)
di una lamiera in lega di alluminio AA5182
e analisi dei risultati mediante simulazioni FEM**

**Determination of the Forming Limit Curve (FLC) of an AA5182 aluminum
alloy sheet and analysis of the results through FEM simulations**

Relatore:

Prof. Ing. Marco Rossi

Tesi di laurea di:

Marco Romano

Correlatori:

Prof. Ing. Gianluca Chiappini

Dott. Luca Morichelli

Ai miei genitori

I. Ringraziamenti

Essendo arrivato alla fine di questo percorso, ritengo sia doveroso esprimere la mia gratitudine a tutte quelle persone che facendo parte della mia vita, in un modo o nell'altro, hanno condiviso con me gioie e sacrifici, sostenendomi in questi anni di università.

Il grazie più grande va a voi famiglia, che avete creduto in me sin dal momento in cui con stupore avete accolto la mia decisione di intraprendere questo percorso universitario. Grazie a voi, standomi accanto, ho sentito sempre di potercela fare. Avete condiviso con me i momenti belli e brutti, le ansie e le soddisfazioni di questo cammino. Vi sono profondamente grato per tutto, e sappiate che questa laurea è anche un po' vostra.

Un ringraziamento dal cuore va a te, Chiara, per essermi stata accanto nonostante i miei numerosi difetti. Per tutto il tempo che mi hai dedicato con il tuo insostituibile affetto e i tuoi preziosi consigli. Grazie perché con il tuo amore, la pazienza e la fiducia, mi hai sostenuto in questi anni credendo in me, con la speranza che continuerai a farlo.

Ai miei amici, voi che avete deciso di camminare al mio fianco e di portarmi fino a qui, a tutti voi, così diversi ma così importanti. A tutte le volte che ho dovuto rifiutare i vostri inviti a causa di impegni universitari. A tutte le volte in cui mi avete chiamato "ingegnere", riempiendomi il cuore di orgoglio, ora lo sono un po' di più.

Un ringraziamento particolare va ai relatori di questa tesi, i professori Marco Rossi e Gianluca Chiappini, e il dottorando Luca Morichelli, che hanno dimostrato infinita disponibilità, fiducia e gentilezza fin dall'inizio. Sono grato per le loro conoscenze messe a disposizione attraverso preziosi consigli e l'interesse personale trasmesso con passione verso il mio lavoro.

Infine, desidero ringraziare soprattutto me stesso, per averci provato ed esserci riuscito. Al mio impegno e alla mia determinazione che hanno reso possibile la trasformazione di un sogno in realtà.

Marco

II. Sommario

1	Abstract	7
1.1	Premessa	7
1.2	Obiettivi	8
1.3	Riepilogo della ricerca	9
1.3.1	Introduzione	9
1.3.2	Test sperimentali	9
1.3.3	Elaborazione dei dati	9
1.3.4	Analisi agli Elementi Finiti (FEM)	10
1.3.5	Conclusioni	10
2	Introduzione	11
2.1	Formatura a freddo delle lamiere	11
2.2	Diagramma Limite di Formabilità (FLD)	13
2.2.1	Prevenzione del comportamento di formatura	13
2.2.2	Descrizione del Diagramma Limite di Formabilità (FLD)	14
2.2.3	Costruzione della Curva Limite di Formabilità (FLC)	16
3	Test sperimentali	17
3.1	Campioni	17
3.1.1	Materiale: alluminio AA5182	17
3.1.2	Geometrie	19
3.2	Acquisizione dei dati	20
3.2.1	Setup sperimentale	20
3.2.2	Regolazione delle telecamere	23
3.2.3	Preparazione del campione	26
3.2.4	Esecuzione della prova e acquisizione dei dati	29
4	Elaborazione dei dati	33
4.1	Digital Image Correlation (DIC)	33
4.1.1	Preparazione dei dati	34
4.1.2	Configurazione delle opzioni di elaborazione	36
4.1.3	Verifica ed avvio della correlazione	38
4.1.4	Calcolo delle deformazioni	39
4.1.5	Esportazione dei dati	41
4.2	Verifica della velocità del punzone: prove Nakajima	42

4.3	Proprietà meccaniche	46
4.3.1	Diagramma Tensione - Deformazione ($\sigma - \epsilon$)	47
4.3.2	Modulo di Young (E)	50
4.3.3	Tensione di snervamento (σ_s) e tensione di rottura (σ_R)	53
4.3.4	Modello di incrudimento	54
4.3.5	Coefficiente di Poisson (ν)	57
4.3.6	Parametro di anisotropia di Lankford (R_0)	59
4.4	Diagramma Limite di Formabilità (FLD)	61
4.4.1	Metodo dipendente dalla posizione: valutazione mediante sezioni trasversali alla frattura	62
4.4.2	Metodo dipendente dal tempo: valutazione mediante Thickness Ratio	70
5	Analisi agli Elementi finiti (FEM)	78
5.1	Introduzione al FEM	78
5.1.1	Il concetto di Analisi agli Elementi Finiti (FEM)	78
5.1.2	Obiettivi delle simulazioni FEM in questo studio	79
5.1.3	Integrazione del diagramma FLD nel FEM per la prevenzione della strizione	79
5.2	Modello FEM	80
5.2.1	Geometrie	81
5.2.2	Mesh	83
5.2.3	Materiale	86
5.2.4	Condizioni al contorno	87
5.3	Risultati FEM	89
5.3.1	Curve delle deformazioni principali ($\epsilon - dist$)	89
5.3.2	Curva della forza del punzone ($F_p - w_p$)	92
5.3.3	Tensione equivalente di Von Mises (σ_{vm})	94
5.4	Influenza delle variabili sui risultati FEM	95
5.4.1	Mesh-indipendenza (N_{el})	96
5.4.2	Anisotropia (R)	98
5.4.3	Attrito Punzone - Campione (μ_p)	100
5.4.4	Attrito Flange - Campione (μ_f)	102
5.4.5	Forza di serraggio (F_s)	104
6	Conclusioni	106
6.1	Obiettivi	106
6.2	Risultati	107
6.3	Sviluppi futuri	112
7	Bibliografia	113

III. Elenco delle figure

Figura 2.1: Esempio di formatura a freddo delle lamiere nel settore automobilistico.....	11
Figura 2.2: Diagramma Limite di Formabilità (FLD).....	15
Figura 3.1: Geometrie dei campioni A, B, C, D, E.....	19
Figura 3.2: Setup sperimentale della prova Nakajima: (a) schema; (b) foto.....	21
Figura 3.3: Setup sperimentale della prova di trazione: (a) schema; (b) foto.....	22
Figura 3.4: Regolazione delle telecamere: (a) posizionamento delle telecamere per le prove Nakajima; (b) posizionamento delle telecamere per le prove di trazione; (c) campione di calibrazione.....	25
Figura 3.5: Speckle sulla superficie dei campioni D ed E.....	26
Figura 3.6: Lubrificazione tra punzone e campione nelle prove Nakajima: (a) schema del sistema tribologico; (b) foto dei fogli di PTFE e grasso applicati sul campione.....	27
Figura 3.7: Serraggio del campione: (a) sulla macchina Nakajima; (b) sulla macchina di trazione.....	28
Figura 3.8: Campioni indeformati e campioni testati.....	32
Figura 4.1: Immagini acquisite dalle telecamere nell'istante della rottura del campione C3: (a) camera 1; (b) camera 2.....	34
Figura 4.2: Regione di Interesse (ROI) nella DIC applicata sul campione C3.....	35
Figura 4.3: Dimensione del subset del campione C3 in relazione allo speckle.....	36
Figura 4.4: Evoluzione temporale dello spostamento fuori dal piano (w) nel campione C3: (a) istante iniziale; (b) istante intermedio; (c) istante finale.....	38
Figura 4.5: Interpretazione grafica della Polar Decomposition del Deformation Gradient (F).....	40
Figura 4.6: Struttura matrice tridimensionale.....	41
Figura 4.7: Curva Spostamento - Tempo ($w - t$) dei campioni C2, C3 e C4.....	43
Figura 4.8: Curva Velocità - Tempo ($V - t$) dei campioni C2, C3 e C4: (a) velocità media approssimante; (b) andamento delle velocità.....	44
Figura 4.9: Fasi nel diagramma Tensione - Deformazione ($\sigma - \epsilon$).....	48
Figura 4.10: Dati acquisiti dalle prove di trazione E1, E2 ed E3: (a) cella di carico; (b) Digital Image Correlation.....	49
Figura 4.11: Diagramma Tensione - Deformazione ($\sigma - \epsilon$) delle prove di trazione E1, E2 ed E3.....	49
Figura 4.12: Campo elastico nel diagramma Tensione - Deformazione ($\sigma - \epsilon$) delle prove di trazione E1, E2 ed E3.....	51
Figura 4.13: Modulo di Young (E) per le prove di trazione E1, E2 ed E3: (a) valori del modulo di Young; (b) fase lineare elastica del diagramma $\sigma - \epsilon$	52

Figura 4.14: Modello di incrudimento di tipo Voce Law a 3 parametri per le prove di trazione E1, E2 ed E3.	56
Figura 4.15: Schema sollecitazione monodirezionale.	57
Figura 4.16: Coefficienti di Poisson (ν) per le prove di trazione E1, E2 ed E3.	58
Figura 4.17: Parametri di Lankford (R_0) per le prove di trazione E1, E2 ed E3.	60
Figura 4.18: Grandezze principali del campione C3: (a) spostamento fuori dal piano (w); (b) deformazione principale maggiore (ϵ_1); (c) deformazione principale minore (ϵ_2).	61
Figura 4.19: Posizionamento delle sezioni trasversali alla frattura sul campione C3.	63
Figura 4.20: Calcolo della derivata seconda del profilo di deformazione ϵ_1	64
Figura 4.21: Determinazione dei confini interni ed esterni della finestra di adattamento del campione C3.	65
Figura 4.22: Determinazione dei punti limite di formabilità del campione C3: (a) ϵ_{1L} ; (b) ϵ_{3L}	67
Figura 4.23: Diagramma Limite di Formabilità (FLD) ottenuto attraverso il metodo dipendente dalla posizione.	69
Figura 4.24: Definizione della Regione di Interesse (ROI) del metodo dipendente dal tempo applicata sul campione C3: (a) confine; (b) grandezze ϵ_1 ed ϵ_2 mediate.	72
Figura 4.25: Thickness Ratio (TR) del campione C3: (a) calcolo della deformazione principale lungo lo spessore mediata (ϵ_3); (b) calcolo del Thickness Ratio.	73
Figura 4.26: Definizione dell'istante di inizio della strizione del campione C3: (a) curva del Thickness Ratio; (b) approssimazione della curva del Thickness Ratio.	74
Figura 4.27: Determinazione dei punti limite di formabilità del campione C3: (a) istante di inizio della strizione; (b) determinazione dei punti limite di formabilità (coppia $\epsilon_1 - \epsilon_2$).	75
Figura 4.28: Diagramma Limite di Formabilità (FLD) ottenuto attraverso il metodo dipendente dal tempo.	77
Figura 5.1: Disegni tridimensionali nel modello FEM dei componenti semplificati della macchina Nakajima: (a) punzone; (b) flangia inferiore; (c) premilamiera.	81
Figura 5.2: Disegni tridimensionali nel modello FEM dei campioni A, B, C, D.	81
Figura 5.3: Assieme nel FEM del modello semplificato della macchina Nakajima con il campione di geometria C: (a) esploso; (b) prospettiva in sezione; (c) componenti modellati per un quarto; (d) modello completo.	82
Figura 5.4: Generazione della mesh nel modello FEM dei componenti semplificati della macchina Nakajima: (a) punzone; (b) flangia inferiore; (c) premilamiera.	84
Figura 5.5: Generazione della mesh strutturata nel modello FEM dei campioni A, B, C, D.	84
Figura 5.6: Curve delle deformazioni principali ($\epsilon - dist$) nel modello FEM del campione di geometria C: (a) sezione trasversale alla frattura; (b) confronto con i risultati sperimentali del campione C3.	90

Figura 5.7: Mappe delle deformazioni principali (ϵ) nel modello FEM del campione di geometria C: (a) deformazione ϵ_1 ; (b) deformazione ϵ_2 ; (c) deformazione ϵ_3	91
Figura 5.8: Dati acquisiti dalle prove Nakajima sui campioni C2, C3, C4: (a) Forza - Tempo ($F - t$) della cella di carico; (b) Spostamento - Tempo ($w - t$) della Digital Image Correlation.	92
Figura 5.9: Curve sperimentali Forza - Spostamento ($F_p - w_p$) del punzone dei campioni C2, C3, C4.	92
Figura 5.10: Confronto della curve della forza del punzone ($F_p - w_p$) nel modello FEM con i risultati sperimentali dei campioni C2, C3, C4.....	93
Figura 5.11: Mappa della tensione di Von Mises (σ_{vm}) nel modello FEM del campione di geometria C.	94
Figura 5.12: Mesh nel FEM del campione di geometria C con diverso numero di elementi lungo lo spessore (N_{el}): (a) 1 elemento; (b) 2 elementi; (c) 3 elementi; (d) 4 elementi; (e) 5 elementi.	96
Figura 5.13: Confronto dei risultati al variare del numero di elementi lungo lo spessore (N_{el}) nel modello FEM del campione di geometria C: (a) curve $\epsilon - dist$; (b) curve $F_p - w_p$	97
Figura 5.14: Confronto dei risultati con diverse condizioni di anisotropia nel modello FEM del campione di geometria C: (a) curve $\epsilon - dist$; (b) curve $F_p - w_p$	99
Figura 5.15: Confronto dei risultati con diversi coefficienti di attrito Punzone - Campione (μ_p) nel modello FEM del campione di geometria C: (a) curve $\epsilon - dist$; (b) curve $F_p - w_p$	101
Figura 5.16: Confronto dei risultati con diversi coefficienti di attrito Flange - Campione (μ_f) nel modello FEM del campione di geometria C: (a) curve $\epsilon - dist$; (b) curve $F_p - w_p$	103
Figura 5.17: Confronto dei risultati con diverse forze di serraggio del campione (F_s) nel modello FEM del campione di geometria C: (a) curve $\epsilon - dist$; (b) curve $F_p - w_p$	105
Figura 6.1: Diagramma Tensione - Deformazione ($\sigma - \epsilon$) delle prove di trazione E1, E2 ed E3.	107
Figura 6.2: Diagramma Limite di Formabilità (FLD) ottenuto attraverso i metodi dipendenti dalla posizione e dal tempo.	108
Figura 6.3: Confronto tra le curve delle deformazioni principali ($\epsilon - dist$) nel modello FEM e quelle dei risultati sperimentali del campione C3.....	110
Figura 6.4: Confronto tra la curva della forza del punzone ($F_p - w_p$) nel modello FEM e i risultati sperimentali dei campioni C2, C3, C4.....	110
Figura 6.5: Mappe delle deformazioni principali (ϵ) nel modello FEM del campione di geometria C: (a) deformazione ϵ_1 ; (b) deformazione ϵ_2 ; (c) deformazione ϵ_3	111
Figura 6.6: Mappa della tensione di Von Mises (σ_{vm}) nel modello FEM del campione di geometria C.	111

IV. Elenco delle tabelle

Tabella 2.1: Stati tensionali particolari nel diagramma FLD.....	15
Tabella 3.1: Pressioni pneumatiche impostate nella pompa pneumoidraulica.....	30
Tabella 4.1: Pressioni pneumatiche impostate nella pompa pneumoidraulica e velocità del punzone..	45
Tabella 4.2: Punti di snervamento (S) e di rottura (R) delle prove di trazione E1, E2 ed E3.	53
Tabella 4.3: Deformazioni limite ($\epsilon_{1L} - \epsilon_{2L}$) lungo le 5 sezioni trasversali alla frattura del campione C3.	67
Tabella 4.4: Deformazioni limite medie ($\epsilon_{1M} - \epsilon_{2M}$) ottenute attraverso il metodo dipendente dalla posizione.....	69
Tabella 4.5: Deformazioni limite medie ($\epsilon_{1M} - \epsilon_{2M}$) ottenute attraverso il metodo dipendente dal tempo.	77
Tabella 5.1: Confronto delle tensioni equivalenti massime di Von Mises (σ_{vm_max}) al variare del numero di elementi lungo lo spessore (N_{el}) nel modello FEM del campione di geometria C.	97
Tabella 5.2: Confronto delle tensioni equivalenti massime di Von Mises (σ_{vm_max}) con diverse condizioni di anisotropia nel modello FEM del campione di geometria C.	99
Tabella 5.3: Confronto delle tensioni equivalenti massime di Von Mises (σ_{vm_max}) con diversi coefficienti di attrito Punzone - Campione (μ_p) nel modello FEM del campione di geometria C.	101
Tabella 5.4: Confronto delle tensioni equivalenti massime di Von Mises (σ_{vm_max}) con diversi coefficienti di attrito Flange - Campione (μ_f) nel modello FEM del campione di geometria C.	103
Tabella 5.5: Confronto delle tensioni equivalenti massime di Von Mises (σ_{vm_max}) con diverse forze di serraggio del campione (F_s) nel modello FEM del campione di geometria C.	105

1 Abstract

1.1 Premessa

Nel vasto mondo della formatura delle lamiere, dove le conoscenze dell'ingegneria e della material science si intrecciano, sorge una difficile sfida: comprendere fino in fondo il comportamento delle lamiere durante il processo di formatura a freddo. In un contesto di laboratorio, ciascuna informazione registrata ha il potenziale di influenzare il modo in cui vengono progettati e prodotti i componenti. In questo intricato puzzle di scienza e tecnologia, questa ricerca si rivolge ad un aspetto cruciale: la determinazione della Curva Limite di Formabilità (FLC) della lamiera in lega di alluminio AA5182.

Attraverso gli occhi delle telecamere di un laboratorio di prova, esploreremo le deformazioni di questo materiale, cercando di svelare i segreti della sua formabilità. L'importanza di questa ricerca risiede nella sua capacità di delineare i confini della formabilità stessa, aprendo nuove strade per l'innovazione nella produzione di componenti di precisione.

Nel seguire questo percorso attraverso test sperimentali, Analisi agli Elementi Finiti (FEM) e un intricato processo di elaborazione dei dati, scopriremo come una lamiera possa diventare una mappa di informazioni preziose, guidandoci verso una comprensione più profonda della sua risposta alla deformazione.

In questa tesi, ci immergeremo nell'universo microscopico delle lamiere, sfidando le convenzioni e cercando di portare alla luce i segreti nascosti dietro ogni deformazione.

1.2 Obiettivi

Il nucleo centrale di questa tesi è incentrato sull'approfondimento dell'analisi della formabilità di una lamiera, spessa 1,5 mm e realizzata in lega di alluminio AA5182. L'obiettivo principale è esaminare attentamente il comportamento di questa specifica lamiera durante il processo di formatura, con particolare attenzione alla determinazione del Diagramma Limite di Formabilità (FLD).

Attraverso prove sperimentali, quali i test Nakajima e le prove di trazione uniassiale, si mira a raccogliere dati fondamentali sulla formabilità della lamiera. L'impiego della tecnologia Digital Image Correlation (DIC) durante il processo di formatura consente la cattura delle deformazioni, mentre la cella di carico misura la forza applicata dal martinetto.

L'elaborazione dei dati, affidata a script Matlab, si concentra sulla determinazione dei punti limite di formabilità, adottando il metodo "dipendente dalla posizione" descritto dalla norma UNI EN ISO 12004 e il metodo "dipendente dal tempo". Parallelamente, l'analisi si estende all'estrazione delle caratteristiche meccaniche principali del materiale, come la curva Tensione - Deformazione ($\sigma - \varepsilon$), il coefficiente di Poisson (ν) e il parametro di anisotropia di Lankford (R_0), offrendo così una visione dettagliata del comportamento meccanico del materiale sotto sforzo.

L'impiego del software Abaqus di Analisi agli Elementi Finiti (FEM) è finalizzato a convalidare e approfondire i risultati ottenuti sperimentalmente. L'obiettivo chiave è l'estrazione del coefficiente di attrito tra punzone e campione, fornendo così una comprensione più dettagliata del comportamento della lamiera durante le prove.

L'obiettivo finale di questa ricerca è contribuire alla caratterizzazione avanzata della lamiera, fornendo dati critici per ottimizzare i processi di formatura in contesti industriali.

1.3 Riepilogo della ricerca

1.3.1 Introduzione

Nel capitolo introduttivo di questa tesi, si esplora il contesto della **formatura a freddo delle lamiere**, concentrandosi sull'analisi del **Diagramma Limite di Formabilità (FLD)**. Quest'ultimo rappresenta uno strumento essenziale per prevenire la possibile rottura durante il processo di formatura a freddo delle lamiere, consentendo una valutazione predittiva attraverso l'analisi delle deformazioni.

1.3.2 Test sperimentali

La fase esecutiva di questo studio implica una serie iniziale di test sperimentali volti a raccogliere dati che saranno oggetto di successiva elaborazione. I campioni oggetto di analisi sono costituiti da lamiere in **lega di alluminio AA5182**, caratterizzate da uno spessore di 1,5 mm. Questi test, articolati su 5 diverse geometrie di campioni, includono l'impiego di **prove Nakajima** per generare gli stati tensionali biassiali, e **prove di trazione monoassiale**.

La raccolta dei dati è gestita attraverso la cella di carico delle macchine e la tecnica della Digital Image Correlation (DIC), la quale consente di misurare gli spostamenti e, di conseguenza, le deformazioni, mediante l'analisi delle immagini acquisite durante le prove dalle due telecamere. Tuttavia, l'applicazione di questa tecnica richiede un setup complesso e l'implementazione di procedure dettagliate.

1.3.3 Elaborazione dei dati

Prima di avviare l'elaborazione dei dati, è necessario estrarre gli spostamenti e le deformazioni dai dati acquisiti mediante la **Digital Image Correlation (DIC)**, che saranno successivamente elaborati attraverso script Matlab.

Si inizia con la verifica della **velocità del punzone** nelle prove Nakajima, poiché l'utilizzo di una pompa pneumoidraulica comporta una dipendenza della velocità del punzone dalla pressione pneumatica impostata. È essenziale assicurare che la velocità di avanzamento del punzone rientri nel range definito dalla norma.

Successivamente, ci si dedica all'estrazione delle **proprietà meccaniche** del materiale tramite l'analisi delle prove di trazione uniassiale. Queste prove permettono la rappresentazione del diagramma Tensione - Deformazione ($\sigma - \varepsilon$), fornendo informazioni fondamentali come il modulo di Young (E), le tensioni di snervamento (σ_S) e di rottura (σ_R), e il modello di incrudimento. L'analisi estesa alle deformazioni lungo le altre due direzioni consente di ottenere il coefficiente di Poisson (ν) e il parametro di anisotropia di Lankford (R_0).

Per concludere l'analisi dei dati, ci si concentra sull'obiettivo principale della tesi: la **determinazione dei punti limite di formabilità** ($\varepsilon_1 - \varepsilon_2$). Questi punti, successivamente utilizzati per costruire la Curva Limite di Formabilità (FLC) attraverso un processo di interpolazione, sono ottenuti con due approcci distinti:

- **Metodo dipendente dalla posizione:** valutazione dei punti mediante l'analisi delle sezioni trasversali alla frattura (norma UNI EN ISO 12004);
- **Metodo dipendente dal tempo:** valutazione dei punti mediante l'analisi della curva del Thickness Ratio $\left(\frac{d \varepsilon_3}{d t}\right)$.

1.3.4 Analisi agli Elementi Finiti (FEM)

In parallelo con gli studi sperimentali, si adotta Abaqus, un software di **Analisi agli Elementi Finiti (FEM)**. Questo strumento consente la creazione di un modello virtuale, permettendo una verifica accurata dei dati sperimentali e l'ampliamento ulteriore dei risultati ottenuti. Particolare attenzione è dedicata al coefficiente di attrito tra punzone e campione, fornendo così una comprensione più approfondita del comportamento della lamiera durante le complesse operazioni di formatura.

1.3.5 Conclusioni

Il capitolo conclusivo delinea i **risultati** chiave ottenuti e gli **obiettivi** raggiunti durante il corso della ricerca. Inoltre, si proietta lo sguardo verso il futuro, delineando possibili **sviluppi futuri** in questo contesto di ricerca sulla formabilità delle lamiere in lega di alluminio AA5182.

2 Introduzione

2.1 Formatura a freddo delle lamiere

La formatura a freddo delle lamiere è un processo industriale fondamentale nell'ambito della lavorazione dei metalli, consentendo di conferire a essi forme complesse e precise senza ricorrere a temperature elevate.

Questo processo è ampiamente impiegato in diversi settori industriali, svolgendo un ruolo fondamentale nella produzione di componenti per l'industria automobilistica, traendo vantaggio dalla sua versatilità per la creazione di parti strutturali e esterne dei veicoli.

Un esempio tangibile di formatura a freddo delle lamiere nel contesto automobilistico è rappresentato dall'involucro esterno del catalizzatore della marmitta, illustrato nella Figura 2.1.

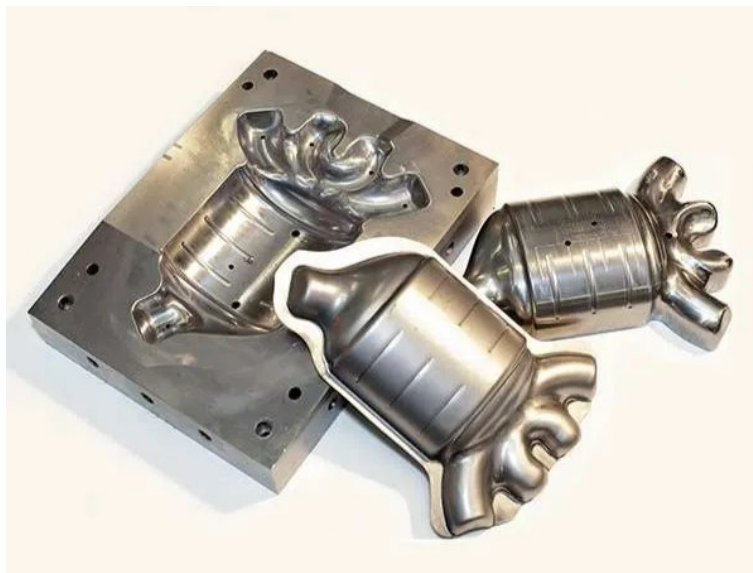


Figura 2.1: Esempio di formatura a freddo delle lamiere nel settore automobilistico.

Il processo di formatura a freddo delle lamiere coinvolge diverse fasi chiave:

1. **Preparazione del materiale:** le lamiere vengono preparate e pulite per garantire una superficie priva di contaminanti e pronta per la deformazione;
2. **Stampaggio o formatura:** la lamiera vengono poste in stampi appositamente progettati, dove vengono sottoposte a pressioni elevate e il materiale subisce una deformazione plastica, cioè una deformazione permanente, che consente di ottenere la geometria desiderata;
3. **Finitura:** i pezzi possono essere sottoposti a ulteriori processi di finitura, come la sabbiatura o la lavorazione meccanica, per migliorare la qualità superficiale e le proprietà estetiche del componente finale.

La formatura a freddo offre vantaggi significativi, tra cui:

- Maggiore precisione dimensionale;
- Ottima finitura superficiale;
- Mantenimento delle proprietà meccaniche del materiale;
- Capacità di lavorare con una vasta gamma di leghe metalliche;
- Alta velocità di produzione;
- Risparmio di materiale;
- Minima o assenza di operazioni secondarie.

Tuttavia, è fondamentale considerare le sfide correlate alla formatura a freddo, come la maggiore resistenza del materiale alla deformazione.

Queste sfide possono essere analizzate in dettaglio attraverso l'utilizzo del Diagramma Limite di Formabilità (FLD), uno strumento essenziale per la comprensione e la gestione della formabilità dei materiali durante il processo di formatura a freddo. Nel prossimo capitolo, viene presentato il ruolo e l'applicazione di questo diagramma nel contesto della formatura a freddo delle lamiere.

2.2 Diagramma Limite di Formabilità (FLD)

2.2.1 *Prevenzione del comportamento di formatura*

Il Diagramma Limite di Formabilità (FLD, Forming Limit Diagram), noto anche come diagramma di Keeler-Goodwin, costituisce un importante strumento per la prevenzione del comportamento durante le operazioni di formatura nella produzione di componenti in lamiera metallica. [1]

La sua indagine riveste particolare importanza nell'ambito della produzione di componenti automobilistici e in settori affini in cui la formatura di lamiere assume un ruolo determinante nel processo di fabbricazione. Tale diagramma influisce significativamente su diverse fasi, come la progettazione di stampi, la selezione dei materiali e dei processi di lavorazione.

Questo diagramma dimostra una notevole versatilità, specialmente nella fase di progettazione attraverso Analisi agli Elementi Finiti (FEM), che consente un'implementazione agevole del diagramma FLD per verificare facilmente l'insorgenza di strizioni indesiderate.

Per definire il limite di formabilità dei materiali, si possono seguire due approcci:

1. **Norma UNI EN ISO 12004-1:** Misurazione e applicazione dei Diagrammi Limite di Formabilità nelle officine di stampaggio. Fornisce una dettagliata procedura per l'analisi della deformazione su componenti difettosi del reparto presse, al fine di determinare la Curva Limite di Formabilità (FLC). Tale curva dipende sia dai componenti che dal processo di formatura. [2]
2. **Norma UNI EN ISO 12004-2:** Determinazione delle Curve Limite di Formabilità in laboratorio. Delinea il procedimento per la valutazione della formabilità di ciascun materiale in vari stati di deformazione, al fine di determinare una Curva Limite di Formabilità (FLC) specifica per il materiale in questione. [3]

2.2.2 Descrizione del Diagramma Limite di Formabilità (FLD)

Il diagramma FLD è un indicatore critico che evidenzia i limiti di deformazione oltre i quali una lamiera metallica inizia a subire deformazioni indesiderate durante il processo di lavorazione. Questo fenomeno, noto come “strizione localizzata”, può provocare guasti significativi nel processo produttivo.

La Figura 2.2 offre un esempio rappresentativo di un diagramma FLD. La sua rappresentazione avviene nel piano delle deformazioni reali principali:

- **Deformazione principale minore** (ϵ_2) sull'asse delle ascisse (X);
- **Deformazione principale maggiore** (ϵ_1) sull'asse delle ordinate (Y).

La capacità del diagramma FLD è di distinguere tra punti sicuri e punti a rischio di rottura, e la transizione tra queste due zone è definita dalla Curva Limite di Formabilità (FLC, Forming Limit Curve). Quest'ultima viene costruita attraverso l'interpolazione di punti sperimentali raccolti da test di formatura su campioni di lamiera, che rappresentano i limiti di formazione in diversi stati di deformazione.

Diversi fattori influenzano la curva FLC, tra cui la composizione del materiale, lo spessore della lamiera, la temperatura, la lubrificazione e altre condizioni di lavorazione. La norma UNI EN ISO 12004: 2009 specifica le condizioni di prova da adottare nella costruzione di una curva FLC a temperatura ambiente e utilizzando percorsi di deformazione lineari. Il materiale considerato è piatto, metallico, e con uno spessore compreso tra 0,3 mm e 4 mm (per la lamiera di acciaio, lo spessore massimo consigliato è di 2,5 mm).

Nel diagramma FLD, oltre alla curva FLC, vengono rappresentati mediante rette casi particolari di tensione o deformazione, dettagliati nella Tabella 2.1.

Queste rette, insieme alla curva FLC, definiscono diverse zone:

- **Zona safe:** sicura per la formabilità;
- **Zona a rischio necking:** si verifica la rottura a causa dell'elevata formabilità;
- **Zone a basso e ad elevato rischio wrinkling:** si formano pieghe dovute a stati di compressione lungo la direzione 2.

Per una valutazione completa della formabilità, è importante avere una conoscenza dettagliata anche delle proprietà meccaniche e della storia del materiale prima di eseguire i test per la determinazione della FLC.

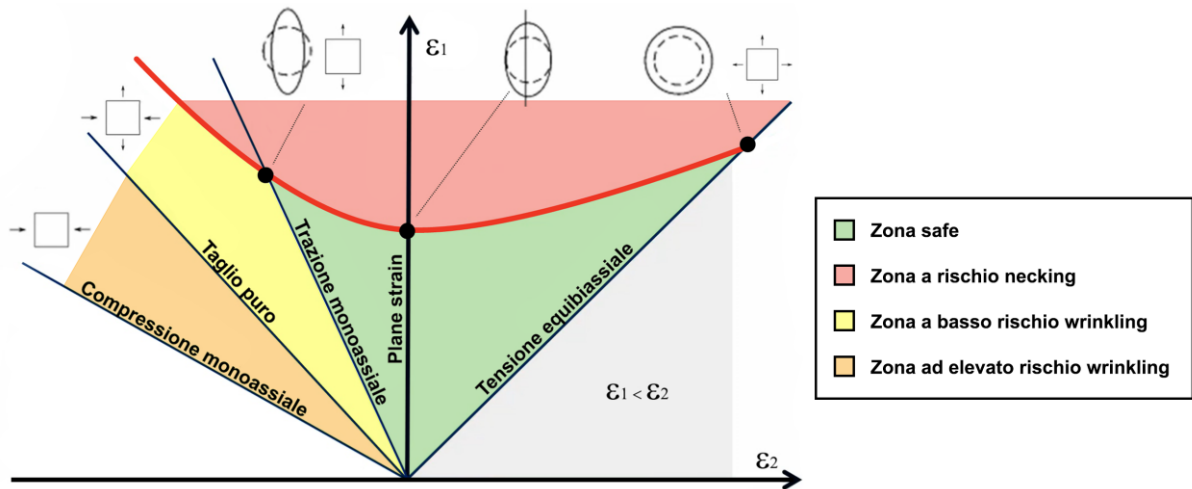


Figura 2.2: Diagramma Limite di Formabilità (FLD).

Tabella 2.1: Stati tensionali particolari nel diagramma FLD.

Stato tensionale	Tensioni (σ)	Deformazioni (ϵ_1)	Coeff. angolare ($\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$)
Tensione equibiassiale	$\sigma_1 = \sigma_2$	$\epsilon_1 = \epsilon_2 = -\frac{1}{2}\epsilon_3$	$m = 1$
Plane strain	$\sigma_1, \sigma_2 \neq 0$	$\epsilon_1 = -\epsilon_3$ $\epsilon_2 = 0$	$m = \infty$
Trazione monoassiale	$\sigma_1 > 0$	$\epsilon_1 = -2\epsilon_2 = -2\epsilon_3$	$m = -2$
Taglio puro	$\sigma_1 = \sigma_2 = \tau$	$\epsilon_1 = -\epsilon_2 = \gamma$ $\epsilon_3 = 0$	$m = -1$
Compressione monoassiale	$\sigma_2 < 0$	$\epsilon_1 = -\epsilon_3 = -\frac{1}{2}\epsilon_2$	$m = -\frac{1}{2}$

2.2.3 Costruzione della Curva Limite di Formabilità (FLC)

La determinazione del limite di formabilità di un materiale può avvenire attraverso vari metodi. Tuttavia, è essenziale notare che i risultati ottenuti mediante metodologie diverse non sono direttamente comparabili.

Due principali approcci per acquisire i dati necessari per costruire la curva FLC sono:

- **Prove di tipo Nakajima:** utilizza un punzone semisferico;
- **Prove di tipo Marciniak:** utilizza un punzone piatto.

In entrambi i casi il provino è un disco con opportuni scarichi che viene stirato tramite il punzone e vengono misurate le deformazioni ε_1 e ε_2 nel punto centrale del disco nel momento della strizione. Variando la dimensione degli scarichi si modifica lo stato tensionale nel materiale.

Per ottenere il punto corrispondente al caso di tensione monoassiale, si utilizza una prova di trazione uniassiale con un campione di geometria di tipo dog-bone (osso di cane).

Tuttavia, il momento esatto di inizio della strizione può risultare difficile da determinare, poiché dipende notevolmente dall'operatore coinvolto. Per ridurre questa dipendenza, la norma ISO 12004 suggerisce l'utilizzo di un metodo "dipendente dalla posizione", mentre un metodo "dipendente dal tempo" risulta essere in fase di sviluppo.

3 Test sperimentali

3.1 Campioni

3.1.1 *Materiale: alluminio AA5182*

L'alluminio AA5182 è una lega di alluminio ampiamente utilizzata nella produzione di lamiere e nell'industria automobilistica. Questa lega è stata appositamente sviluppata per soddisfare i requisiti delle applicazioni in cui sono richieste elevate prestazioni in termini di formabilità e resistenza alla corrosione.

L'acronimo AA, che sta per Aluminium Association, è utilizzato come standard per la classificazione e la designazione dell'alluminio a livello globale. La codifica è composta dal prefisso "AA" seguito da quattro cifre numeriche, che rappresentano:

- La prima cifra identifica il costituente principale della lega (nel caso di AA5182, appartenente al gruppo 5000, è caratterizzato da leghe alluminio - magnesio);
- Le seconda e terza cifre rappresentano la designazione specifica della lega (il numero non ha significato ma è univoco);
- La quarta cifra indica se la lega è utilizzata per fusioni (0) o lingotti (1, 2).

La lega AA5182 è costituita principalmente da alluminio (Al), con piccole quantità di altri elementi leganti, tra cui:

- Magnesio (Mg): 4.0÷5.0%;
- Manganese (Mn): 0.20÷0.50%;
- Ferro (Fe): 0.35%;
- Silicio (Si): 0.2%;
- Zinco (Zn): 0.25%;
- Titanio (Ti): 0.1%;
- Cromo (Cr): 0.1%;
- Rame (Cu): 0.15%.

Questi elementi conferiscono alla lega diverse caratteristiche distintive che la rendono altamente adatta a svariate applicazioni industriali, in particolare per la produzione di parti automobilistiche in lamiera:

- **Lavorabilità a freddo:** ciò significa che può essere deformata a temperatura ambiente o leggermente superiore senza necessità di riscaldamento, il che la rende ideale per processi di stampaggio, piegatura e tranciatura;
- **Resistenza meccanica:** contrariamente a molte leghe, mantiene una buona resistenza meccanica senza compromettere la formabilità, rendendola adatta per soddisfare requisiti strutturali in diverse applicazioni;
- **Resistenza alla corrosione:** ideale per applicazioni in cui le lamiere potrebbero essere esposte a condizioni ambientali avverse o ad agenti corrosivi;
- **Saldabilità:** adatta per la produzione di componenti strutturali complessi, che coinvolgono processi di saldatura;
- **Peso leggero:** come la maggior parte delle leghe di alluminio, contribuisce a ridurre il peso dei componenti, migliorando l'efficienza e le prestazioni dei veicoli.

3.1.2 Geometrie

Per condurre lo studio sulla determinazione della Curva Limite di Formabilità (FLC), sono stati preparati campioni rappresentativi delle 5 diverse geometrie indicate con le lettere A, B, C, D, E. Questa scelta è in conformità con la normativa, mirando a coprire una vasta gamma di condizioni di deformazione e tensione, contribuendo così a una comprensione completa delle prestazioni di formabilità del materiale, dalla tensione uniassiale a quella equibiassiale.

Per ricavare i campioni dalle lamiere è possibile utilizzare la fresatura, l'erosione a scintilla o altri metodi che non causino cricche, incrudimento o cambiamenti della microstruttura, garantendo che la frattura non abbia mai inizio dai bordi dei provini. Particolare attenzione va fatta nell'orientamento rispetto alla direzione di laminazione:

- Nei provini in **alluminio** la geometria deve essere orientata in direzione longitudinale rispetto alla direzione di laminazione;
- Nei provini in **acciaio** la geometria deve essere orientata in direzione trasversale rispetto alla direzione di laminazione.

Le dimensioni specifiche di ciascuna geometria sono rappresentate in dettaglio nella Figura 3.1. Lo spessore di tutti i campioni è di 1,5 mm, mantenendo uniformità nelle condizioni sperimentali.

Ognuna di queste geometrie è stata sottoposta ad almeno tre test indipendenti validi, garantendo così una rappresentatività statistica dei risultati.

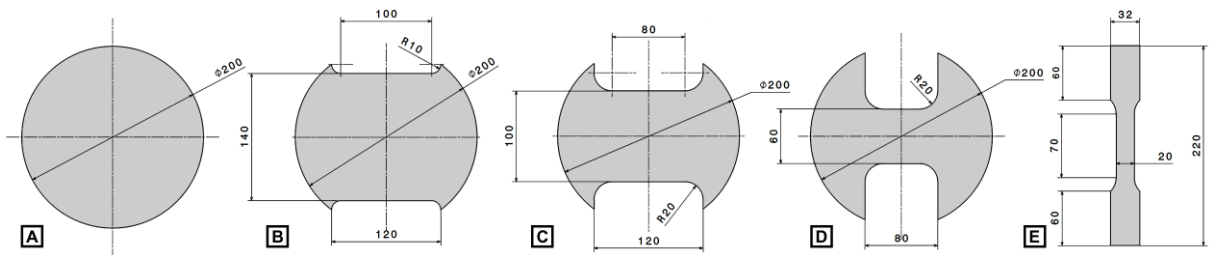


Figura 3.1: Geometrie dei campioni A, B, C, D, E.

3.2 Acquisizione dei dati

Nel processo di acquisizione dei dati provenienti dagli esperimenti in laboratorio, sono coinvolti vari passaggi che possono essere sintetizzati nei seguenti punti:

1. Setup sperimentale;
2. Regolazione delle telecamere;
3. Preparazione e serraggio del campione;
4. Esecuzione della prova e acquisizione dei dati.

Si procede ora ad analizzare più approfonditamente ciascuna di queste fasi della procedura sperimentale per le due tipologie di prove:

- Prove Nakajima: Campioni A, B, C, D;
- Prove di trazione uniassiale: Campioni E.

3.2.1 *Setup sperimentale*

Setup sperimentale: prove Nakajima

La prova Nakajima è adottata specificamente per i campioni A, B, C, D, in cui si verifica una condizione di tensione biassiale.

La fase di setup sperimentale implica la preparazione e la configurazione accurata dell'apparato sperimentale per garantire la corretta esecuzione delle prove.

Si è utilizzata la tecnica della Digital Image Correlation (DIC), un metodo avanzato che consente di misurare gli spostamenti e le deformazioni delle superfici attraverso l'acquisizione di immagini, ampiamente utilizzata nella meccanica dei materiali.

Nel caso specifico, si preferisce ricorrere alla Stereo-DIC, considerata un'evoluzione della DIC classica bidimensionale, che permette di misurare anche gli spostamenti al di fuori del piano. Tuttavia, per catturare la tridimensionalità, è necessario impiegare una seconda telecamera, il che comporta una lieve complicazione nella configurazione.

Prima di avviare l'esperimento, è necessario predisporre una postazione di lavoro con tutti gli strumenti e i componenti necessari, come illustrato nella Figura 3.2.

Questa postazione comprende i seguenti elementi:

- **Macchina per prove Nakajima:** tra i principali componenti della macchina troviamo: il telaio, la pompa pneumoidraulica, il martinetto idraulico con punzone semisferico Φ 100 mm e il sistema di afferraggio del provino;
- **Cella di carico:** per ulteriori verifiche, si utilizza una cella di carico che misura la forza in funzione del tempo;
- **2x Telecamere Blackfly S BFS-U3-88S6M + Obiettivi Fujifilm CF25ZA-1S f1.8/25mm;**
- **2x Sistema di illuminazione a LED 10 W;**
- **PC con software DIC MatchID:** è necessario un software DIC che consente di acquisire ed elaborare le immagini per calcolare le deformazioni;
- **Campioni:** A, B, C, D.

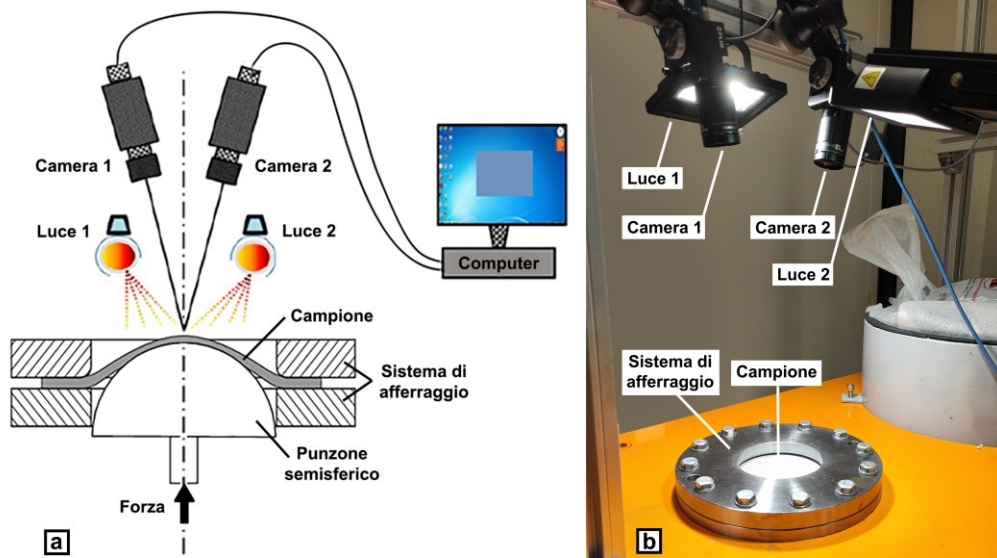


Figura 3.2: Setup sperimentale della prova Nakajima: (a) schema; (b) foto.

Setup sperimentale: prove di trazione uniassiale

Per quanto riguarda i campioni E, caratterizzati da uno stato tensionale uniassiale, si opta per l'impiego della prova di trazione uniassiale.

Come per le prove Nakajima, anche nelle prove di trazione si ricorre alla Stereo-DIC per misurare gli spostamenti e le deformazioni delle superfici.

Prima di avviare l'esperimento, è necessario predisporre una postazione di lavoro con tutti gli strumenti e i componenti necessari, come illustrato nella Figura 3.3.

Questa postazione comprende i seguenti elementi:

- **Macchina per prove di trazione uniassiale:** tra i principali componenti della macchina troviamo: il telaio, la traversa fissa, la traversa mobile, l'unità di carico e il sistema di afferraggio del provino;
- **Cella di carico da 50 kN:** per ulteriori verifiche, si utilizza una cella di carico che misura la forza in funzione del tempo;
- **2x Telecamere Blackfly S BFS-U3-88S6M + Obiettivi Fujifilm CF50ZA-1S f2.4/50mm;**
- **Sistema di illuminazione a LED 10 W;**
- **PC con software DIC MatchID:** consente di acquisire e elaborare le immagini;
- **Campioni:** E.

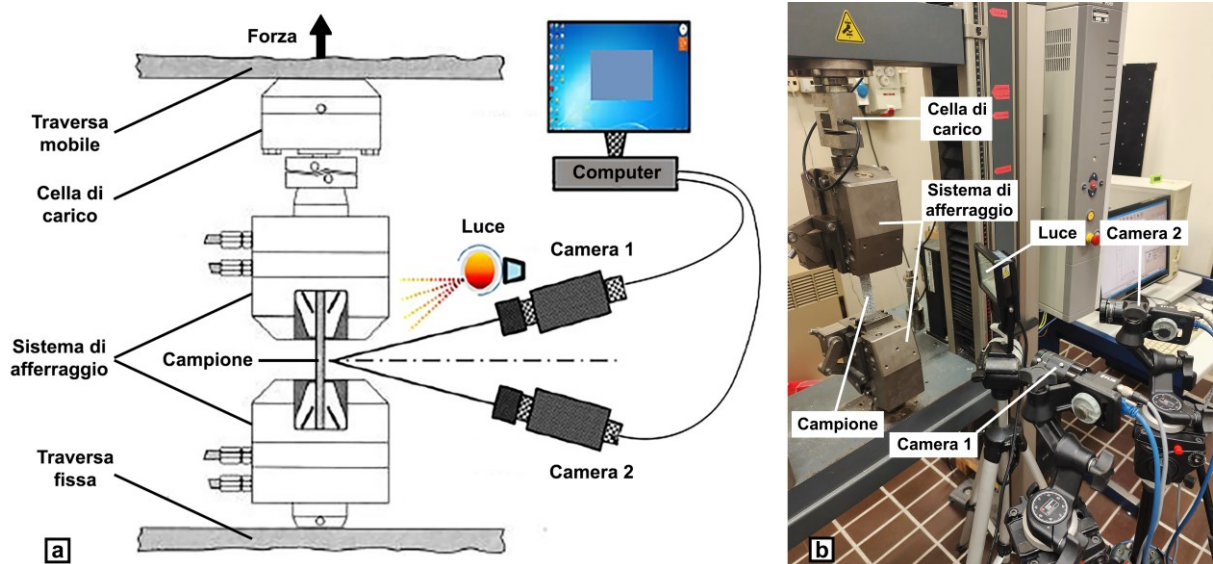


Figura 3.3: Setup sperimentale della prova di trazione: (a) schema; (b) foto.

3.2.2 *Regolazione delle telecamere*

Posizionamento delle telecamere: prove Nakajima

Affinché il posizionamento delle telecamere, schematizzato nella Figura 3.4 (a), assicuri una misurazione di successo, è fondamentale seguire determinate regole per ottenere una visione ottimale dell'area del campione, comunemente definita come Field Of View (FOV):

- Come regola approssimativa, le telecamere dovrebbero essere posizionate ad un'altezza rispetto al campione equivalente a circa 20 volte la lunghezza focale dell'obiettivo.

Nel caso in esame, utilizzando obiettivi con una lunghezza focale di 25 mm, ciò comporta una posizione delle telecamere di circa 448 mm dall'oggetto.

- In base alle specifiche del manuale, con obiettivi da 25 mm, è raccomandato un angolo di circa 20° tra le telecamere.

In questo caso, si è ottenuto un angolo di 21°.

- Tenendo conto di queste due grandezze, si può calcolare la distanza tra le due telecamere, che risulta essere di 166 mm.

Posizionamento delle telecamere: prove di trazione uniassiale

Affinché il posizionamento delle telecamere, schematizzato nella Figura 3.4 (b), assicuri una misurazione di successo, è fondamentale seguire determinate regole per ottenere una visione ottimale dell'area del campione, comunemente definita come Field Of View (FOV):

- Nel caso in esame, utilizzando obiettivi con una lunghezza focale di 50 mm, ciò comporta una posizione delle telecamere di circa 471 mm dall'oggetto.

- In base alle specifiche del manuale, con obiettivi da 50 mm, è raccomandato un angolo superiore a 15° tra le telecamere.

In questo caso, si è ottenuto un angolo di 22°.

- Tenendo conto di queste due grandezze, si può calcolare la distanza tra le due telecamere, che risulta essere di 183 mm.

Regolazione delle telecamere

Una volta posizionate le telecamere, vanno regolate basandosi sul feedback visivo fornito da uno schermo collegato e utilizzando il software di acquisizione DIC.

Queste regolazioni riguardano:

- **Messa a fuoco:** durante la messa a fuoco, l'obiettivo della telecamera viene regolato per ottenere immagini chiare e nitide. Questo è essenziale perché immagini sfocate possono portare a errori nelle misurazioni DIC.
- **Apertura del diaframma:** controlla la quantità di luce che entra nell'obiettivo. È possibile regolare il diaframma per adattarsi alle condizioni di illuminazione e alla profondità di campo desiderata. Un diaframma più ampio consente l'ingresso di una maggiore quantità di luce, ma riduce la profondità di campo, mentre un diaframma più stretto riduce la quantità di luce, ma aumenta la profondità di campo.
- **Tempo di esposizione:** controlla quanto a lungo il sensore della telecamera è esposto alla luce durante la cattura delle immagini. Un tempo di esposizione più lungo può catturare più dettagli in condizioni di illuminazione scarsa, ma potrebbe portare a immagini sfocate se l'oggetto o la telecamera sono in movimento. Un tempo di esposizione più breve è adatto per oggetti in rapido movimento ma richiede una buona illuminazione.

La sequenza di regolazione si articola nei seguenti passaggi, da eseguire per ciascuna delle due telecamere:

1. Apertura completa del diaframma, ponendo il sistema nella condizione più sfavorevole per la profondità di campo;
2. Regolazione della messa a fuoco basata sullo speckle per ottenere immagini nitide e dettagliate;
3. Impostazione del tempo di esposizione a 18000 μ s;
4. Chiusura del diaframma, per ampliare la profondità di campo e garantire un'illuminazione ottimale senza ottenere zone sovraesposte.

Calibrazione delle telecamere

Infine, prima di iniziare l'acquisizione dati, è fondamentale condurre una calibrazione accurata delle telecamere utilizzate. Questo processo assicura la precisione delle misurazioni DIC. La calibrazione consiste nel catturare un numero di 50 immagini con le due telecamere da un campione di calibrazione specifico, come illustrato nella Figura 3.4 (c). Questo campione è dotato di una griglia di 9 x 12 punti, distanziati 5 mm tra di loro. Viene inclinato e ruotato leggermente in diverse posizioni con lo scopo di acquisire un riferimento dimensionale affidabile, permettendo in tal modo la correlazione con le immagini acquisite dalle due telecamere.

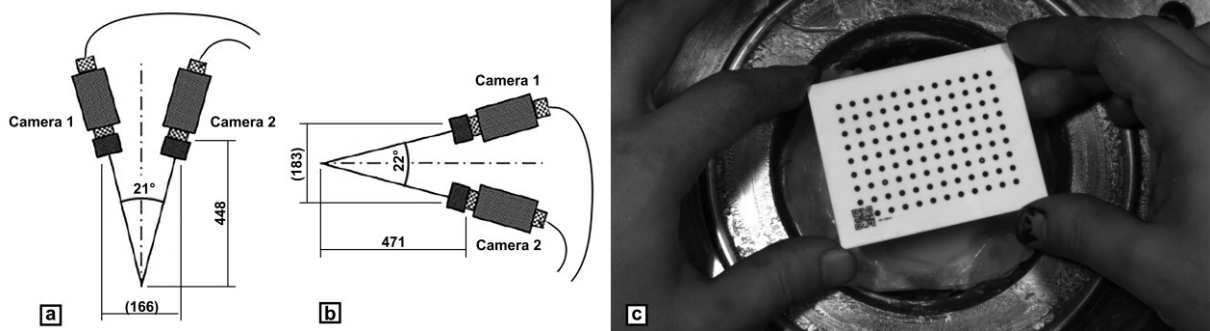


Figura 3.4: Regolazione delle telecamere: (a) posizionamento delle telecamere per le prove Nakajima; (b) posizionamento delle telecamere per le prove di trazione; (c) campione di calibrazione.

3.2.3 Preparazione del campione

Speckle sulla superficie del campione

Per agevolare l'analisi tramite il software Match ID risulta necessario apportare sulla superficie del provino che deve essere analizzata delle modifiche opportune, per consentire al software di seguire in maniera più efficace lo spostamento del materiale.

L'obiettivo è garantire un elevato contrasto senza generare alcun effetto di tacca e cambiamento nella microstruttura.

Esistono diverse possibili soluzioni, tra cui le principali sono:

- **Griglie deterministiche:** alcune tecniche di applicazione comuni sono il trasferimento su griglia, la stampa elettrochimica, fotochimica e offset;
- **Speckle:** questo metodo comporta la spruzzatura di una prima mano di vernice spray bianca opaca, per creare uno sfondo uniforme e ridurre i riflessi dalle superfici del pezzo in esame. Successivamente, viene applicata una seconda mano di vernice spray nera, per creare una superficie con macchie casuali, come mostrato nella Figura 3.5.

Nel contesto di questo studio, è stata scelta la tecnica "Speckle" per entrambe le tipologie di prove, per via della sua versatilità e velocità di applicazione, nonché per la sua comprovata efficacia nell'ambito della DIC.



Figura 3.5: Speckle sulla superficie dei campioni D ed E.

Lubrificazione tra punzone e campione: prove Nakajima

Per ottenere una valutazione precisa della Curva Limite di Formabilità (FLC), è essenziale assicurare che la zona di test nelle prove Nakajima sia caratterizzata da un basso coefficiente di attrito.

La corretta regolazione del sistema tribologico è fondamentale per garantire che la rottura avvenga entro una distanza inferiore al 15% del diametro del punzone rispetto all'apice della cupola, infatti solo in queste condizioni il test è considerato affidabile.

L'attrito eccessivo può portare al problema della doppia strizione simmetrica rispetto al vertice della cupola, in cui una delle due zone di strizione finisce per rompersi. Un sistema tribologico ottimale contribuisce significativamente a ridurre questo problema, migliorando così l'accuratezza dell'analisi delle coppie $\epsilon_1 - \epsilon_2$.

I sistemi di lubrificazione consigliati dalla normativa sono: olio o grasso, fogli di PE, PTFE o PVC. È possibile utilizzare anche sistemi di lubrificazione alternativi: il sistema che fornisce la massima altezza della cupola, e che soddisfi la condizione di frattura sulla sommità della cupola, è considerata la più idonea.

Nel contesto di questo studio, è stato adottato il sistema tribologico schematizzato nella Figura 3.6 (a) e fotografato nella Figura 3.6 (b), che coinvolge due strati di PTFE posizionati tra il punzone e il campione, con l'aggiunta di grasso nelle interfacce. Questa configurazione ha dimostrato di favorire uno scorrimento tra il punzone e il campione, riducendo significativamente il problema della doppia strizione.

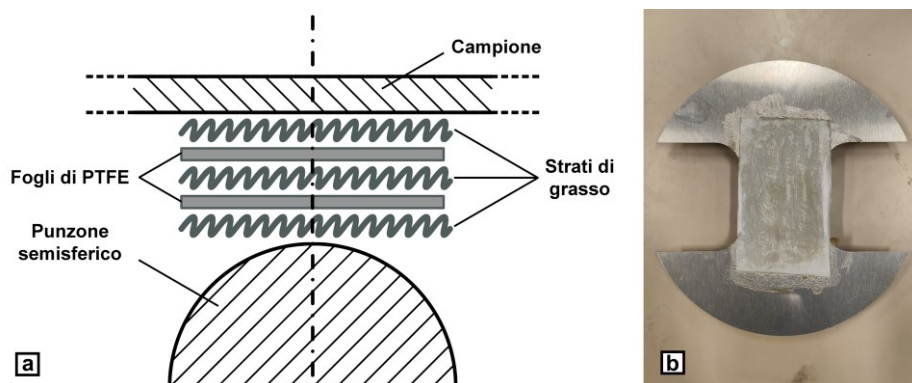


Figura 3.6: Lubrificazione tra punzone e campione nelle prove Nakajima:

(a) schema del sistema tribologico; (b) foto dei fogli di PTFE e grasso applicati sul campione.

Serraggio del campione: prove Nakajima

Nella macchina per le prove Nakajima, il campione da testare viene afferrato tramite un premilamiera composto da due anelli circolari visibili nella Figura 3.7 (a), i quali vengono accoppiati tra loro mediante bulloni di fissaggio, serrati manualmente.

Per la prevenzione dello scorrimento, è comune utilizzare un dispositivo noto come “rompigrinze”: quando i bulloni vengono serrati, è presente un dente che venendo premuto contro il campione, causa una deformazione locale nella sua area di contatto, impedendo così lo scorrimento del campione tra gli anelli durante il test.

Inoltre è essenziale assicurarsi che il campione sia posizionato centralmente all'interno della macchina di prova, per garantire la validità dei risultati.

Serraggio del campione: prove di trazione uniassiale

La macchina di trazione è equipaggiata di specifici afferraggi progettati per fornire una presa sicura e uniforme sul campione durante l'applicazione della forza.

Inizialmente, l'operatore posiziona il campione all'interno degli afferraggi, prestando particolare attenzione alla sua centratura manuale. Successivamente, il campione viene fissato mediante due leve, una posta nell'afferraggio superiore e l'altra nell'afferraggio inferiore, come illustrato nella Figura 3.7 (b).

Durante lo svolgimento della prova, un meccanismo a cuneo integrato negli afferraggi consente di aumentare progressivamente la forza di serraggio in risposta all'incremento della forza di trazione applicata, assicurando che il campione rimanga afferrato anche quando sottoposto a sollecitazioni significative.

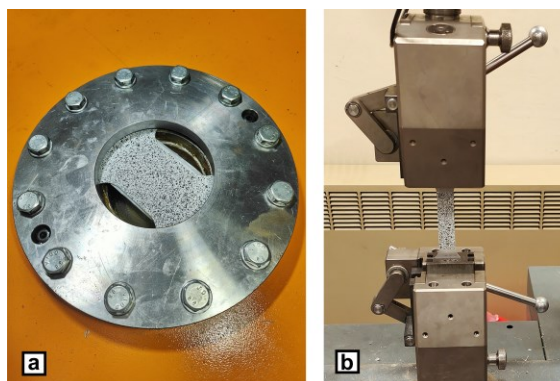


Figura 3.7: Serraggio del campione: (a) sulla macchina Nakajima; (b) sulla macchina di trazione.

3.2.4 Esecuzione della prova e acquisizione dei dati

Esecuzione della prova e acquisizione dei dati: prove Nakajima

Dopo aver completato le operazioni di preparazione, si procede alla fase esecutiva della prova sulla macchina Nakajima.

Durante questa fase, l'esperimento viene condotto in conformità con i parametri predefiniti e una temperatura di prova a 23 ± 5 °C.

I dati vengono registrati e acquisiti in tempo reale da due computer distinti:

- Il **primo computer** è connesso al software di acquisizione DIC (Digital Image Correlation). Secondo la normativa, è consigliata una frequenza di acquisizione di almeno $f = 10$ Hz. Tuttavia, in questo caso specifico, si è adottata una strategia particolare. La frequenza di acquisizione è stata impostata a:
 - $f = 1$ Hz per i primi 15 secondi della prova: la scelta di una frequenza di acquisizione più bassa all'inizio dell'esperimento permette di risparmiare spazio in memoria senza compromettere l'integrità dei dati finali, dato che le prime fasi di deformazione sono solitamente lontane dalla formazione della strizione e non richiedono un'analisi dettagliata;
 - successivamente è stata aumentata a $f = 15$ Hz;
- Il **secondo computer** utilizza un software dedicato per registrare i dati provenienti dalla cella di carico. Questa procedura consente di ottenere immediatamente una curva Forza - Tempo con una frequenza di campionamento molto elevata, garantendo un alto grado di precisione.

L'avvio della prova avviene mediante l'azionamento della pompa pneumoidraulica e il conseguente avanzamento del punzone. La pressione pneumatica viene quindi convertita in pressione idraulica, influenzando direttamente la forza massima esercitata e la velocità di avanzamento del punzone, che, in conformità con la normativa, deve essere mantenuta a $1,5 \pm 0,5$ $\left[\frac{mm}{s}\right]$. La scelta di questo valore richiede un adeguato compromesso, che varia in base alla geometria e resistenza del campione in prova.

Nella Tabella 3.1 sono elencate le sole prove ritenute valide, con le relative pressioni pneumatiche impostate sulla pompa. Mentre le corrispondenti forze massime esercitate e velocità di avanzamento del punzone saranno successivamente dettagliate nel Capitolo 4 dedicato all'elaborazione dei dati.

Dato che i dati vengono acquisiti in funzione del tempo, è essenziale sincronizzare al meglio l'inizio dell'acquisizione tra i due sistemi, in modo da garantire che le due fonti di dati siano coerenti.

L'esecuzione della prova procede in maniera del tutto automatizzata fino alla rottura del campione, coinvolgendo l'analisi di tutti i campioni illustrati in Figura 3.8.

Tabella 3.1: Pressioni pneumatiche impostate nella pompa pneumoidraulica.

Geometria campione	Pressione pneumatica pompa [bar]
A1	4.0
A3	4.2
A4	4.2
B1	4.0
B2	3.5
B3	3.5
B4	3.5
C2	3.0
C3	3.0
C4	3.0
C5	3.0
D2	2.5
D3	2.5
D5	2.5

Esecuzione della prova e acquisizione dei dati: prove di trazione uniassiale

Dopo aver completato le fasi preparatorie, si avvia la fase operativa della prova di trazione uniassiale sulla macchina dedicata.

Durante questa fase, l'esperimento segue i parametri predefiniti, mantenendo la temperatura di prova a 23 ± 5 °C.

L'acquisizione dei dati avviene in tempo reale attraverso due computer distinti:

- Il **primo computer**, connesso al software di acquisizione DIC (Digital Image Correlation), adotta una frequenza di acquisizione costante di $f = 1$ Hz per l'intera durata della prova;
- Il **secondo computer** utilizza un software dedicato per registrare i dati provenienti dalla cella di carico, generando sia una curva Forza - Tempo che una curva Forza - Spostamento misurato dall'LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Tuttavia, è importante notare che la curva Forza - Spostamento potrebbe essere affetta da un possibile errore di misura. Questo è dovuto al fatto che l'LVDT è solidale alla traversa, e quindi lo spostamento misurato contiene il contributo di tutti i componenti inclusi al suo interno. Nel caso in cui la rigidità del provino sia confrontabile con quella dei componenti interni, tali interferenze non sono trascurabili. Questo aspetto sottolinea l'importanza di utilizzare la DIC per ottenere una misura più accurata e dettagliata della deformazione, considerando le possibili limitazioni associate alla curva Forza - Spostamento fornita dalla macchina di trazione.

L'avvio della prova avviene mediante l'avanzamento controllato della traversa mobile ad una velocità costante di $2 \frac{mm}{min}$.

Dato che i dati vengono acquisiti in funzione del tempo, è essenziale sincronizzare al meglio l'inizio dell'acquisizione tra i due sistemi, in modo da garantire che le due fonti di dati siano coerenti.

L'esecuzione della prova procede in maniera del tutto automatizzata fino alla rottura del campione, coinvolgendo l'analisi di tutti i campioni illustrati in Figura 3.8.

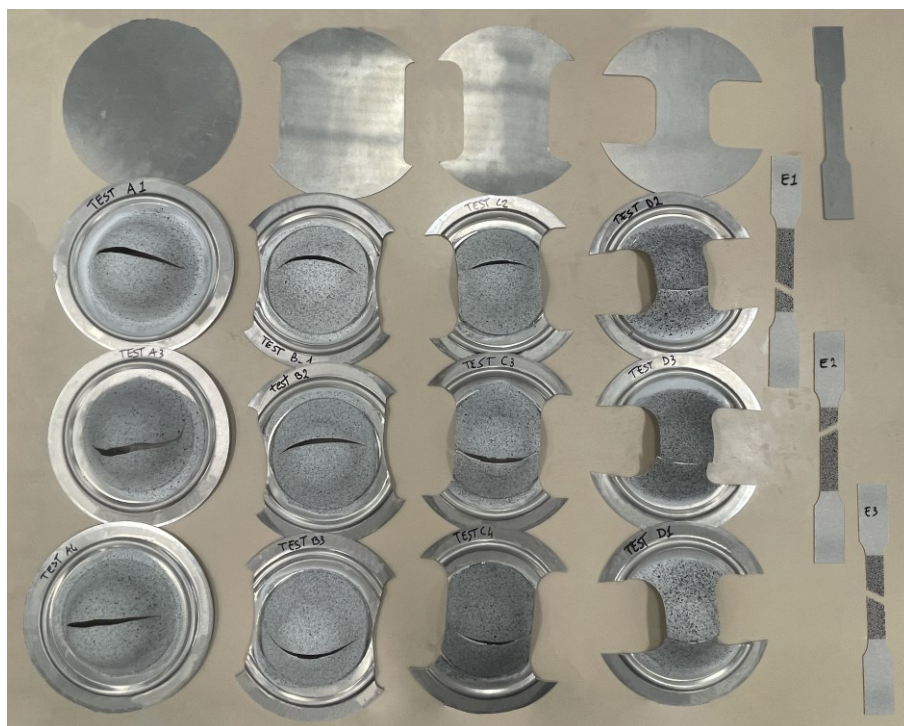


Figura 3.8: Campioni indeformati e campioni testati.

4 Elaborazione dei dati

L'elaborazione dei dati si suddivide in 4 principali studi:

1. **Digital Image Correlation (DIC):** offre la possibilità di misurare gli spostamenti della superficie del campione e di calcolarne le deformazioni;
2. **Verifica della velocità del punzone:** bisogna verificare che la pressione impostata nella pompa pneumoidraulica permetta al punzone di muoversi ad una velocità compresa nell'intervallo $1,5 \pm 0,5 \left[\frac{mm}{s} \right]$, come da norma;
3. **Proprietà meccaniche:** vengono ricavati i principali parametri per definire il diagramma Tensione - Deformazione ($\sigma - \epsilon$), il coefficiente di Poisson (ν) e il parametro di anisotropia di Lankford (R_0).
4. **Determinazione dei punti limite di formabilità (coppia $\epsilon_1 - \epsilon_2$):** applicando la Norma UNI EN ISO 12004-2 (metodo dipendente dalla posizione) e un'analisi della curva del Thickness Ratio (metodo dipendente dal tempo), si estraggono le deformazioni limite ϵ_1 ed ϵ_2 , per costruire la curva FLC.

4.1 Digital Image Correlation (DIC)

Durante le prove sperimentali, è stata impiegata la tecnica della Digital Image Correlation (DIC), che consente la misurazione accurata degli spostamenti e il calcolo delle deformazioni delle superfici, grazie all'acquisizione di immagini durante le fasi di prova. Il software utilizzato per implementare la tecnica DIC è MatchID Stereo.

Il processo di Digital Image Correlation attraversa i seguenti passaggi:

1. Preparazione dei dati;
2. Configurazione delle opzioni di elaborazione;
3. Verifica ed avvio della correlazione;
4. Calcolo delle deformazioni;
5. Esportazione dei dati.

4.1.1 Preparazione dei dati

Caricamento delle immagini

La prima fase del processo coinvolge il caricamento delle immagini acquisite dalle due telecamere durante le prove sperimentali, come nell'esempio della Figura 4.1, in cui si osserva il momento della rottura del campione C3.

Sfruttando la triangolazione, l'approccio stereoscopico abilita il sistema a valutare in modo tridimensionale gli spostamenti e le deformazioni del materiale soprattutto lungo la direzione al di fuori del piano, consentendo di ottenere una rappresentazione più completa e dettagliata.

Si procede con la selezione delle immagini, escludendo quelle acquisite dopo la rottura del campione. Tale decisione è motivata da due considerazioni:

- **Inefficacia della DIC:** l'elaborazione di immagini post-rottura con la Digital Image Correlation risulta inefficace, infatti, potrebbe perdere il riferimento con le immagini precedenti alla rottura a causa dei considerevoli spostamenti generati dalla formazione della frattura;
- **Costruzione della curva FLC:** al fine di determinare i punti limite di formabilità, l'attenzione si concentra principalmente sulle deformazioni pre-rottura, con particolare enfasi sulla zona critica della strizione.

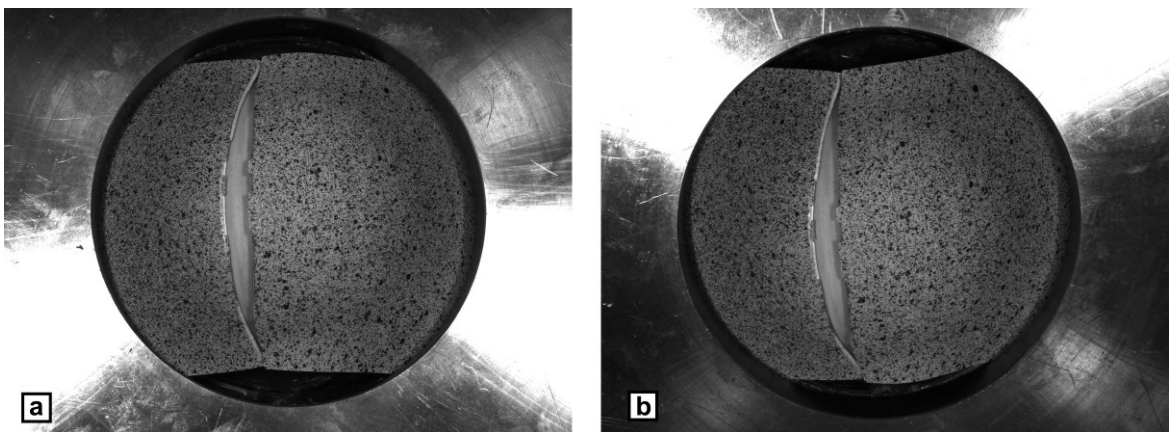


Figura 4.1: Immagini acquisite dalle telecamere nell'istante della rottura del campione C3:

(a) camera 1; (b) camera 2.

Definizione della Regione di Interesse (ROI)

Nella fase successiva, viene definita la Regione di Interesse (ROI, Region Of Interest). Questa operazione coinvolge il disegno manuale di una zona sulla prima immagine, su cui il software andrà a concentrare l'analisi.

Nella Figura 4.2 è rappresentata come esempio la ROI applicata sul campione C3.

La scelta di delineare una ROI leggermente più piccola dello speckle è dettata dalla capacità del software di creare correlazioni più efficaci in questa specifica parte dell'immagine.

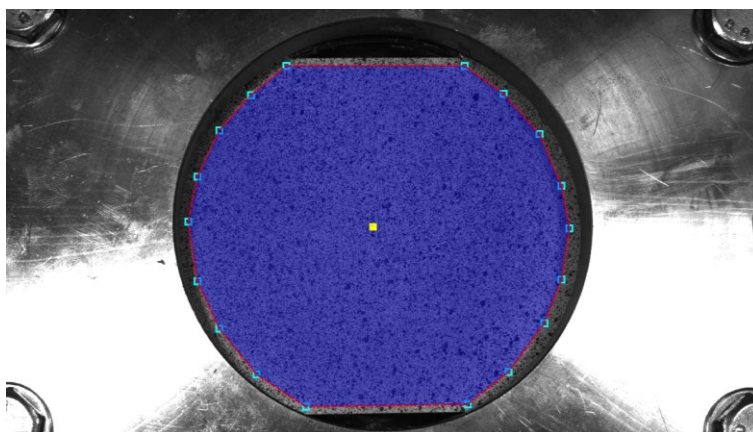


Figura 4.2: Regione di Interesse (ROI) nella DIC applicata sul campione C3.

Calibrazione del sistema

Il processo prosegue con l'inserimento del file ottenuto dalla calibrazione nel software. Tale operazione consente al software di organizzare le immagini a coppie, considerando le acquisizioni provenienti dalle due telecamere, ed effettuare una triangolazione accurata, permettendo una valutazione tridimensionale precisa degli spostamenti e delle deformazioni del campione durante le prove sperimentali.

La calibrazione svolge un ruolo fondamentale nel garantire la corretta associazione tra le immagini provenienti dalle diverse telecamere, contribuendo così alla coerenza e all'affidabilità dei risultati ottenuti attraverso la Digital Image Correlation.

4.1.2 Configurazione delle opzioni di elaborazione

Scelta dei parametri di Subset e Stepsize

Nella configurazione dei parametri di analisi, due aspetti fondamentali richiedono particolare attenzione:

- **Subset:** rappresenta l'area della finestra in pixel in cui il software ricerca il pattern dello speckle per condurre la correlazione.

Inizialmente, è stato adottato un subset di dimensione indicativa pari a 29 pixel, successivamente adattato per ciascuna prova seguendo la regola approssimativa che suggerisce di avere un subset con dimensioni sufficienti a inglobare almeno 3 macchie nere dello speckle.

Nella Figura 4.3 si osserva il subset impostato per il campione C3.

- **Stepsize:** indica la distanza in pixel tra due subset consecutivi durante l'analisi. In questa fase, è stato scelto uno stepsize di 10 pixel.

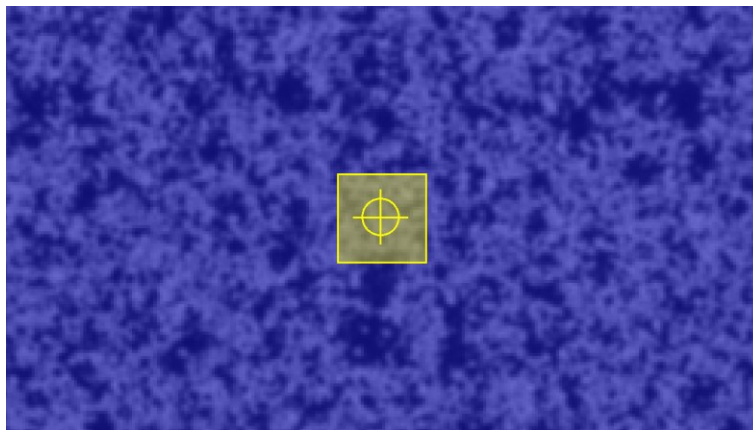


Figura 4.3: Dimensione del subset del campione C3 in relazione allo speckle.

Configurazione delle opzioni di correlazione

Durante la fase di deformazione plastica, si manifestano considerevoli deformazioni che possono causare notevoli differenze tra la prima immagine e le fasi finali, generando potenziali sfide nella correlazione.

Per mitigare questa problematica, si interviene nelle Opzioni di Correlazione, configurando i seguenti parametri:

- **Spostamenti rigidi iniziali: 100 [px]**

Indica l'area di ricerca per le traslazioni di corpi rigidi;

- **Deformazione tra due immagini consecutive: Small**

Indica che le deformazioni tra due immagini sono relativamente contenute, grazie alla frequenza di acquisizione elevata e alla natura del materiale in alluminio, che si deforma lentamente rispetto a materiali iperelastici, ad esempio.

La modalità "Progress History" determina il comportamento della correlazione all'interno dell'immagine:

- **Full Scan:** ogni punto richiede un calcolo completo e non utilizza informazioni precedenti;
- **Spatial:** ogni punto utilizza il risultato del suo vicino più prossimo come ipotesi iniziale per il proprio processo di ottimizzazione;
- **Spatial + Update Reference (correlazione incrementale):** essenziale in presenza di deformazioni elevate. L'immagine registrata prima dell'immagine deformata corrente viene scelta come riferimento aggiornato per la correlazione successiva. Lo spostamento totale si accumula nei passaggi di correlazione. Sono disponibili due criteri di aggiornamento:
 - Aggiornamento ad ogni n-esima immagine: le immagini vengono sempre aggiornate e gli errori si accumulano in misura massima;
 - Aggiornamento quando il numero di iterazioni supera una soglia specifica: le immagini vengono aggiornate solo selettivamente e gli errori si accumulano in misura minima.

Nella pratica, viene impostato su “Spatial + Update Reference: if iterations exceed 3.5”. Se il software non trova una correlazione entro 3.5 iterazioni, procede con l'aggiornamento dell'immagine di riferimento.

La scelta di questo parametro richiede un equilibrio attento:

- Un valore troppo basso può portare all'accumulo di errori durante gli aggiornamenti del riferimento;
- Un valore troppo alto può causare la perdita di correzione tra due immagini successive.

4.1.3 Verifica ed avvio della correlazione

Si procede utilizzando la funzione “Initial Guess”, che esegue una valutazione iniziale della bontà della correlazione attraverso un indice percentuale.

Una volta confermata la validità della correlazione, si procede ufficialmente con il suo avvio utilizzando l'opzione “Start Correlation”, basandosi sui parametri definiti in precedenza.

Nell'esempio della Figura 4.4, è possibile osservare l'evoluzione temporale dello spostamento fuori dal piano (w) ottenuto attraverso la DIC nel campione C3.

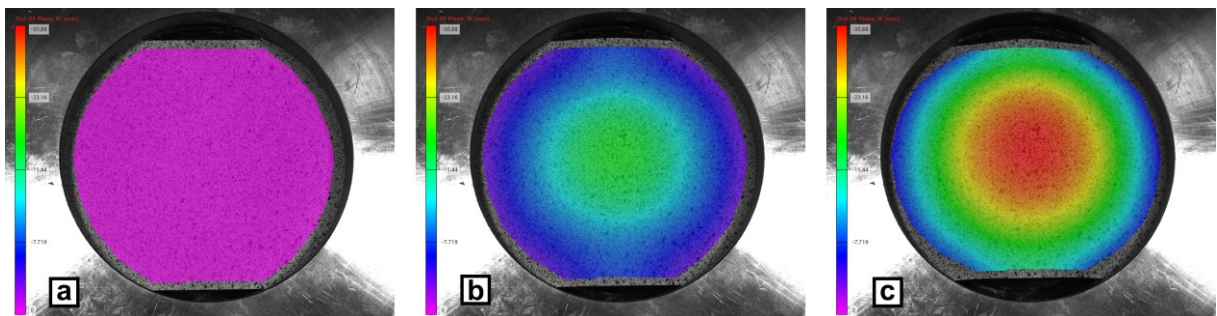


Figura 4.4: Evoluzione temporale dello spostamento fuori dal piano (w) nel campione C3:

(a) istante iniziale; (b) istante intermedio; (c) istante finale.

4.1.4 Calcolo delle deformazioni

Si procede al calcolo delle deformazioni attraverso la funzione “strain calculation” in MatchID. Questa operazione implica l'esecuzione di adattamenti polinomiali locali sui dati di spostamento per ottenere dettagliati campi di deformazione, consentendo un'analisi delle deformazioni durante il processo di deformazione plastica.

Le impostazioni da regolare includono:

- **Strain Window: 5**

Rappresenta le dimensioni dell'adattamento polinomiale locale, ovvero il numero di punti dati di spostamento utilizzati per determinare il campo di deformazione. La dimensione della finestra di deformazione, combinata con il passo imposto e il sottoinsieme nei calcoli degli spostamenti, definisce la dimensione effettiva dell'estensimetro virtuale.

- **Point Tolerance: 0 %**

Indica la tolleranza del punto vicino ai confini del campione o alle aree di discontinuità. La finestra di deformazione può contenere meno di $N \times N$ punti dati. La tolleranza del punto determina il numero minimo di punti relativi che una finestra di deformazione deve contenere per avviare il calcolo della deformazione. Con un'impostazione dello 0 %, viene calcolato ogni punto.

- **Strain Tensor Convention: Logarithmic Euler - Almansi: $\underline{\underline{\epsilon}}^{LEA} = \ln \left(\sqrt{\frac{\underline{\underline{F}} \cdot \underline{\underline{F}}^T}{\underline{\underline{I}} \cdot \underline{\underline{I}}}} \right)$**

Nell'ambito dei grandi spostamenti, il Deformation Gradient ($\underline{\underline{F}}$) emerge come un elemento chiave, in grado di filtrare la rotazione e catturare con precisione le deformazioni. La sua utilità si evidenzia attraverso la Polar Decomposition, illustrata nella Figura 4.5, che consente di interpretarlo come il risultato del prodotto tra il tensore di rotazione ($\underline{\underline{R}}$) e i tensori di deformazione, sia destro ($\underline{\underline{U}}$) che sinistro ($\underline{\underline{V}}$). Questa relazione viene espressa attraverso la formula:

$$\underline{\underline{F}} = \underline{\underline{R}} \cdot \underline{\underline{U}} = \underline{\underline{V}} \cdot \underline{\underline{R}}$$

La selezione del tipo di Tensore di Deformazione ($\underline{\underline{\varepsilon}}$) riveste un'elevata importanza e dipende dalle peculiarità del problema considerato. Nel caso in esame, la scelta del Logarithmic Euler - Almansi è motivata dalla sua efficacia, soprattutto in fase di plasticità. Altre opzioni disponibili includono:

- Green - Lagrange: $\underline{\underline{\varepsilon}}^{GL} = \frac{1}{2} \cdot (\underline{\underline{F}}^T \cdot \underline{\underline{F}} - \underline{\underline{I}})$;
- Euler - Almansi: $\underline{\underline{\varepsilon}}^{EA} = \frac{1}{2} \cdot (\underline{\underline{I}} - \underline{\underline{F}}^{-T} \cdot \underline{\underline{F}}^{-1})$;
- Hencky: $\underline{\underline{\varepsilon}}^H = \ln \left(\sqrt{\frac{\underline{\underline{F}}^T \cdot \underline{\underline{F}}}{\underline{\underline{I}}}} \right)$;
- Biot Undeformed: $\underline{\underline{\varepsilon}}^{BU} = \sqrt{\frac{\underline{\underline{F}}^T \cdot \underline{\underline{F}}}{\underline{\underline{I}}}} - \underline{\underline{I}}$;
- Biot Deformed: $\underline{\underline{\varepsilon}}^{BD} = \sqrt{\frac{\underline{\underline{F}} \cdot \underline{\underline{F}}^T}{\underline{\underline{I}}}} - \underline{\underline{I}}$.

• **Interpolazione: Bilinear Quadrilateral (Q4)**

L'interpolazione è un processo mediante il quale vengono stimati valori intermedi tra i dati esistenti. Le impostazioni di interpolazione definiscono l'ordine del polinomio adottato per derivare le deformazioni. Altre opzioni disponibili per l'interpolazione includono:

- Quadratic Quadrilateral (Q8);
- Improved Quadratic Quadrilateral (Q9).

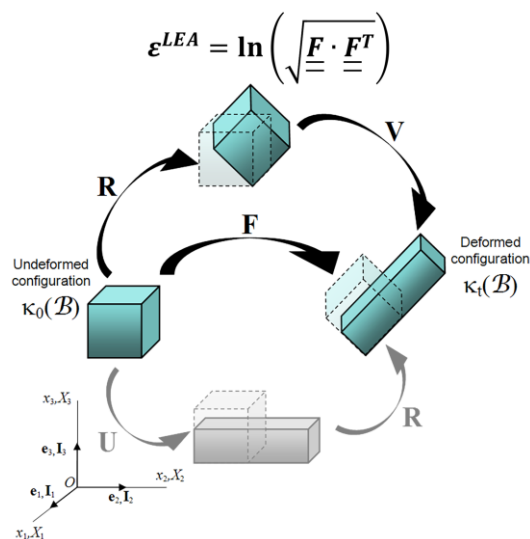


Figura 4.5: Interpretazione grafica della Polar Decomposition del Deformation Gradient (F).

4.1.5 Esportazione dei dati

Dopo aver completato la fase di elaborazione delle immagini attraverso la Digital Image Correlation (DIC), è essenziale esportare i dati in formato .csv per consentirne una successiva elaborazione.

I dati chiave che sono stati esportati per questo studio includono:

- **Posizioni (x, y, z):** rappresentano le coordinate spaziali tridimensionali dei punti di interesse durante il periodo di acquisizione dei dati;
- **Spostamenti (u, v, w):** indicano le variazioni di posizione lungo i tre assi spaziali durante il processo di deformazione;
- **Deformation Gradient (F):** si tratta di un tensore che rappresenta il rapporto tra il cambiamento di forma del materiale e la forma originale;
- **Deformazioni lungo le direzioni cartesiane ($\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$):** indicano le deformazioni lungo le direzioni coordinate del sistema cartesiano;
- **Deformazioni lungo le direzioni principali (ϵ_1, ϵ_2):** indicano le deformazioni lungo le direzioni principali del materiale.

Ogni grandezza viene archiviata in una matrice tridimensionale, come nello schema della Figura 4.6, in cui le coordinate bidimensionali (x, y) definiscono il piano, mentre la terza dimensione rappresenta l'acquisizione temporale (t).

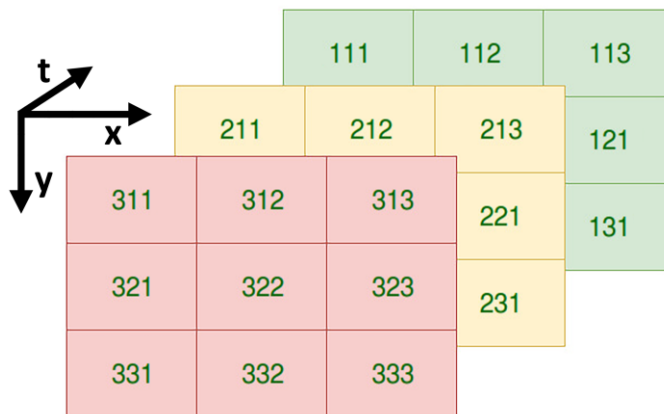


Figura 4.6: Struttura matrice tridimensionale.

4.2 Verifica della velocità del punzone: prove Nakajima

Come già anticipato nel Capitolo 3.2.4, l'avvio della prova avviene mediante l'azionamento della pompa pneumoidraulica, determinando così l'avanzamento del punzone. La pressione pneumatica viene quindi convertita in pressione idraulica, influenzando direttamente la forza massima esercitata e la velocità di avanzamento del punzone.

In conformità con le normative, tale velocità deve essere mantenuta a $1,5 \pm 0,5 \left[\frac{mm}{s} \right]$. La scelta di questo valore richiede un bilanciamento accurato, il quale varia in base alla geometria e alla resistenza specifica del campione sottoposto a prova. Il range specifico di velocità è una componente chiave per assicurare la coerenza, la ripetibilità e la validità delle prove Nakajima, contribuendo così a ottenere dati affidabili per la valutazione delle caratteristiche di formabilità del materiale.

Dopo aver acquisito i dati necessari, si procede con la verifica che la velocità di avanzamento del punzone rientri nell'intervallo specificato. Nel seguito, sono stati delineati i passaggi del procedimento utilizzato, facendo riferimento ad esempi tratti dalla tipologia di campioni C. Tuttavia, al termine del processo, sono riassunte le velocità relative a tutte le prove.

I dati ottenuti attraverso la Digital Image Correlation (DIC) consentono di generare il campo degli spostamenti fuori dal piano (w_{DIC}) per ciascun fotogramma acquisito, in funzione del tempo (t_{DIC}). In questo contesto, è essenziale estrarre lo spostamento del punzone da tali dati, e ciò si ottiene estrapolando il valore massimo del campo degli spostamenti per ciascun fotogramma, il quale si trova al centro della cupola.

La Figura 4.7 illustra gli andamenti dello spostamento del punzone rilevati nei campioni C2, C3 e C4.

È importante evidenziare che l'andamento della curva è direttamente influenzato dalla pressione impostata sulla pompa pneumoidraulica e dalla rigidità del provino:

- Inizialmente, si osserva un tratto con spostamento nullo, indicativo dell'avvio della prova, durante il quale il punzone si sta avvicinando al campione ma non è ancora entrato in contatto con esso;
- Successivamente, si identifica un secondo tratto in cui il punzone deforma effettivamente il provino. È importante notare che questo tratto non segue un andamento perfettamente lineare, ma la velocità diminuisce progressivamente a causa delle crescenti forze esercitate.

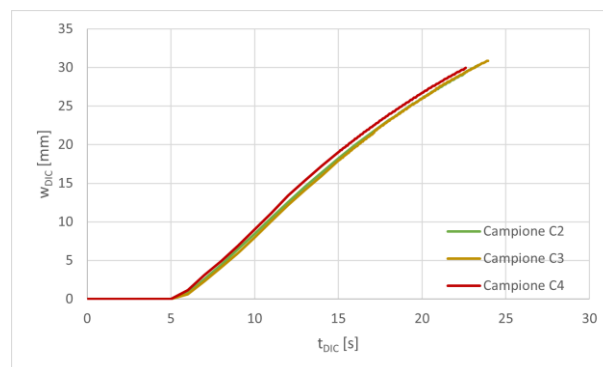


Figura 4.7: Curva Spostamento – Tempo ($w - t$) dei campioni C2, C3 e C4.

La velocità del punzone (V_{DIC}) in funzione del tempo (t_{DIC}) è definita come la derivata dello spostamento rispetto al tempo:

$$V_{DIC} = \frac{d w_{DIC}}{d t_{DIC}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{w_{DIC}(t + \Delta t) - w_{DIC}(t)}{\Delta t}$$

In un contesto di dati discreti, l'intervallo di tempo è definito dalla frequenza di acquisizione della Digital Image Correlation (DIC). Pertanto, la velocità di avanzamento può essere riscritta come la derivata discreta rispetto al tempo:

$$V_{DIC} = \frac{\Delta w_{DIC}}{\Delta t_{DIC}} = \frac{w_{DIC}(t + \Delta t) - w_{DIC}(t)}{\Delta t} = \frac{w_{DIC}(i + 1) - w_{DIC}(i)}{\Delta t}$$

Nella Figura 4.8 (b), sono evidenziati gli andamenti della velocità del punzone ottenuti nei campioni C2, C3 e C4. Si nota che, nonostante la curva dello spostamento risulti piuttosto lineare, quella della velocità presenta una marcata variazione.

Per tale motivo è possibile estrarre i valori di velocità del punzone minima (V_{min}) e massima (V_{max}), riferiti al tratto decrescente della curva, e calcolarne una media aritmetica: $V_{media} = \frac{V_{min} + V_{max}}{2}$.

Le velocità medie calcolate per i tre campioni sono molto simili tra loro, pertanto, è possibile calcolare un'ulteriore media che rappresenta la velocità del punzone per ogni geometria di campione (\bar{V}_{media}). Tale velocità è rappresentata dall'inclinazione della retta blu nella Figura 4.8 (b), che approssima le 3 curve.

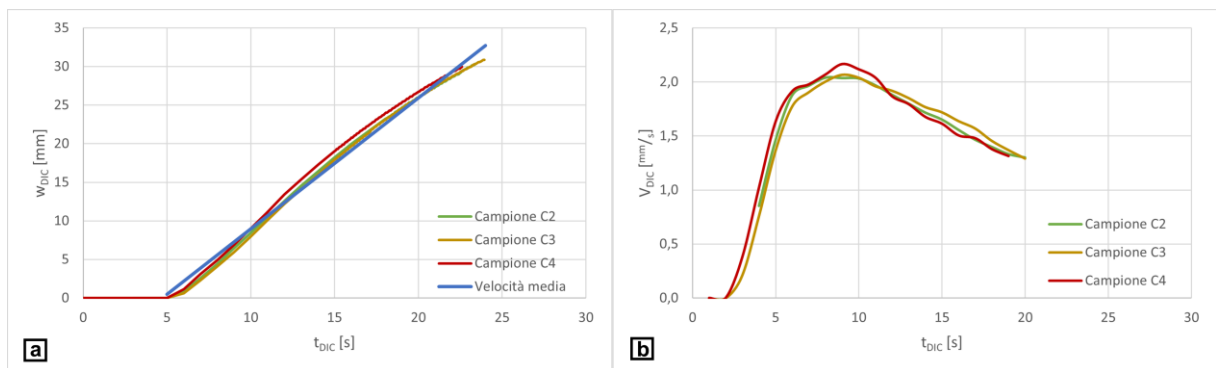


Figura 4.8: Curva Velocità - Tempo ($V - t$) dei campioni C2, C3 e C4:

(a) velocità media approssimante; (b) andamento delle velocità.

Nella Tabella 4.1, sono riportate le velocità calcolate per ogni campione testato, confermando che tutte le velocità medie rientrano nell'intervallo $V_{media} = 1,5 \pm 0,5 \left[\frac{mm}{s} \right]$, come stabilito dalla normativa. Ciò conferma che le pressioni nella pompa pneumoidraulica impostate inizialmente sono risultate corrette.

Tabella 4.1: Pressioni pneumatiche impostate nella pompa pneumoidraulica e velocità del punzone.

Geometria campione	p [bar]	$V_{min} \div V_{max}$ $\left[\frac{mm}{s} \right]$	V_{media} $\left[\frac{mm}{s} \right]$	\bar{V}_{media} $\left[\frac{mm}{s} \right]$
A1	4,0	0,746 ÷ 2,257	1,501	1,570
A3	4,2	1,000 ÷ 2,315	1,658	
A4	4,2	0,736 ÷ 2,363	1,550	
B1	4,0	1,372 ÷ 2,321	1,847	1,723
B2	3,5	1,106 ÷ 2,157	1,631	
B3	3,5	1,252 ÷ 2,132	1,692	
B4	3,5	N/D	N/D	
C2	3,0	1,301 ÷ 2,039	1,670	1,697
C3	3,0	1,292 ÷ 2,067	1,680	
C4	3,0	1,315 ÷ 2,167	1,741	
C5	3,0	N/D	N/D	
D2	2,5	1,405 ÷ 2,169	1,787	1,777
D3	2,5	1,372 ÷ 2,162	1,767	
D5	2,5	N/D	N/D	

4.3 Proprietà meccaniche

Per la fase di progettazione e per condurre Analisi agli Elementi Finiti (FEM) accurate e affidabili in diverse condizioni di carico, è essenziale acquisire una comprensione approfondita dei parametri che influenzano il comportamento meccanico del materiale.

Oltre al diagramma Tensione - Deformazione ($\sigma - \varepsilon$), sono fondamentali i seguenti parametri per l'alluminio AA5182:

- **Modulo di Young (E):** è una misura della rigidità del materiale nella fase elastica e indica la capacità del materiale di resistere alle deformazioni sotto l'applicazione di uno sforzo;
- **Tensione di snervamento (σ_S):** indica il punto in cui il materiale passa dalla fase elastica a quella plastica, rappresentando il limite tra comportamento reversibile ed irreversibile;
- **Tensione di rottura (σ_R):** rappresenta la massima tensione a cui il materiale può essere sottoposto prima di rompersi;
- **Modello di incrudimento:** descrive come il materiale si comporta durante la fase di deformazione plastica, tenendo conto degli effetti cumulativi delle deformazioni precedenti;
- **Coefficiente di Poisson (ν):** rappresenta la relazione tra la deformazione laterale e quella longitudinale;
- **Parametro di Lankford (R_0):** descrive il comportamento anisotropo della lamiera durante la deformazione plastica.

4.3.1 Diagramma Tensione - Deformazione ($\sigma - \varepsilon$)

Il diagramma Tensione - Deformazione ($\sigma - \varepsilon$) rappresenta uno strumento fondamentale per la comprensione del comportamento meccanico dei materiali soggetti a carichi esterni, fornendo una chiara rappresentazione grafica delle risposte del materiale alle sollecitazioni. [4]

La deformazione, rappresentata sull'asse delle ascisse, evidenzia la variazione dimensionale del materiale, mentre l'asse delle ordinate descrive la corrispondente tensione generata dal carico applicato.

Le diverse fasi attraversate dal materiale durante la prova di trazione sono schematizzate nella Figura 4.9:

1. **Zona elastica ($0 \rightarrow S$):** nella fase iniziale, nota come zona elastica, il materiale risponde linearmente (o quasi) all'applicazione di una forza, tornando alla sua forma originale una volta rimossa la sollecitazione.

Il rapporto tra la tensione e la deformazione in questa fase è caratterizzato dal modulo di Young (E).

2. **Punto di snervamento (S):** oltre la zona elastica, si raggiunge il punto di snervamento, dove il materiale inizia a deformarsi in modo permanente senza un aumento significativo della tensione.

Questo punto è indicativo dell'ingresso nella fase plastica.

3. **Zona plastica ($S \rightarrow R$):** il materiale subisce deformazioni permanenti e la tensione continua ad aumentare gradualmente.

Questa fase può essere caratterizzata da una serie di fenomeni, tra cui indurimento o ammorbidimento del materiale.

4. **Punto di rottura (R):** rappresenta il culmine della tensione raggiunta prima della cedevolezza strutturale, portando alla rottura definitiva del materiale.

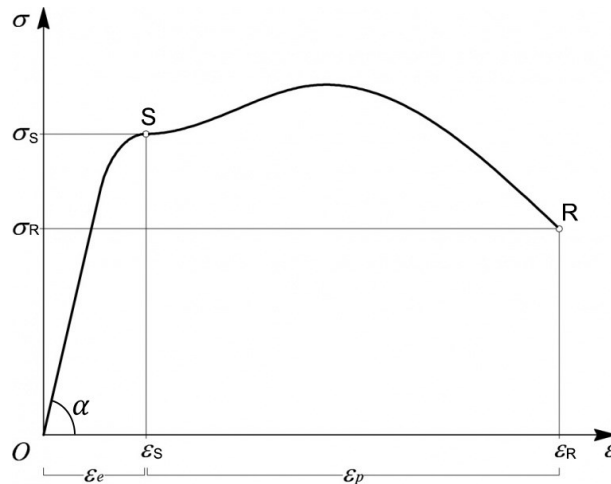


Figura 4.9: Fasi nel diagramma Tensione - Deformazione ($\sigma - \epsilon$).

Risulta ora necessario distinguere la tensione ingegneristica dalla tensione vera, che sono due approcci distinti nella misurazione e nella rappresentazione degli sforzi in un materiale sotto carico.

Di seguito, sono evidenziate le principali differenze tra le due:

- **Tensione ingegneristica (σ_{eng}):** si ottiene dividendo la forza applicata sulla sezione trasversale del materiale per l'area originale della sezione, supponendo quindi che la sezione trasversale rimanga costante durante la deformazione. È comunemente utilizzata nelle applicazioni di ingegneria, poiché è più semplice da calcolare e applicare in condizioni di carico relativamente semplici.
- **Tensione vera o di Cauchy (σ_{true}):** si calcola dividendo la forza applicata sulla sezione trasversale del materiale per l'area effettiva della sezione in ogni istante durante la deformazione. Si basa sulla legge di Cauchy, che tiene conto della variazione dell'area nel tempo, rendendola più accurata in condizioni di carico più complesse.

Trova maggiore utilizzo in ambiti più avanzati dell'analisi strutturale e in situazioni in cui è necessaria un'accuratezza maggiore, come nelle simulazioni numeriche avanzate.

La costruzione del diagramma che correla la tensione con la deformazione principale $\sigma = \sigma(\varepsilon)$, deriva dall'analisi dei risultati ottenuti dalle 3 prove di trazione uniassiale E1, E2 ed E3. I dati acquisiti comprendono:

- **Cella di carico:** la curva della forza in funzione del tempo, $F_{cella} = F_{cella}(t_{cella})$, è rappresentata nella Figura 4.10 (a);
- **Digital Image Correlation (DIC):** la curva della deformazione principale in funzione del tempo, $\varepsilon_{DIC} = \varepsilon_{DIC}(t_{DIC})$, è rappresentata nella Figura 4.10 (b).

Entrambe le curve sono espresse in funzione del tempo. Tuttavia, poiché provengono da acquisizioni indipendenti con frequenze di campionamento e istanti iniziali differenti, è necessario riscrivere la forza come $F_{cella} = F_{cella}(t_{DIC})$.

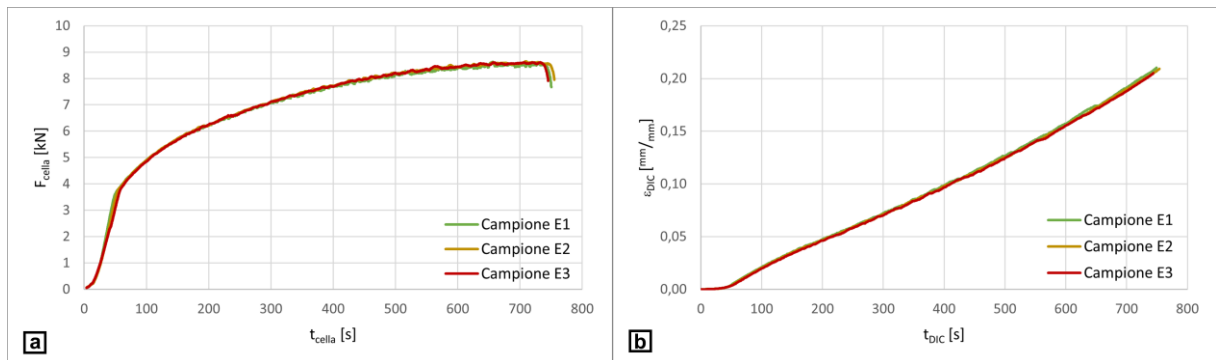


Figura 4.10: Dati acquisiti dalle prove di trazione E1, E2 ed E3: (a) cella di carico; (b) Digital Image Correlation.

Utilizzando la sezione iniziale $A_0 = b \times t = 20,00 \times 1,50 = 30,00 \text{ [mm}^2\text{]}$, è possibile calcolare la tensione ingegneristica come $\sigma_{eng} = \frac{F}{A_0}$, ma, per una maggiore precisione, viene analizzata la tensione vera $\sigma_{true} = \sigma_{eng} \cdot e^{\varepsilon_{DIC}}$, rappresentata nella Figura 4.11.

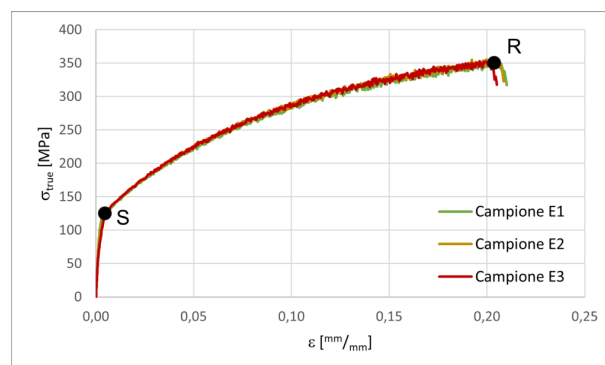


Figura 4.11: Diagramma Tensione - Deformazione ($\sigma - \varepsilon$) delle prove di trazione E1, E2 ed E3.

4.3.2 Modulo di Young (E)

Il modulo di Young (E), noto anche come modulo di elasticità tangenziale, costituisce un parametro meccanico fondamentale che caratterizza la risposta elastica di un materiale quando sottoposto a tensioni longitudinali.

Esso rappresenta la misura della rigidità del materiale nella fase elastica, ovvero la capacità di resistere alle deformazioni quando sottoposto ad uno sforzo:

- Materiali con un elevato Modulo di Young sono più rigidi e hanno una maggiore resistenza alle deformazioni elastiche;
- Materiali con un Modulo di Young più basso risultano essere più flessibili.

La sua definizione matematica è data dalla relazione:

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

Dove:

- σ è la tensione applicata;
- ε è la deformazione longitudinale al carico.

Viene espresso in unità di pressione, solitamente in $[MPa]$, conforme al Sistema Internazionale (SI) delle unità di misura.

Nel tratto elastico del diagramma Tensione - Deformazione della Figura 4.9, la relazione tra le due grandezze è lineare, caratterizzata da un angolo di inclinazione costante (α). Questa fase è indicativa del comportamento reversibile del materiale, in cui esso ritorna alla sua forma originale quando cessato lo sforzo applicato. Il Modulo di Young è rappresentato da questa pendenza lineare e può essere calcolato geometricamente attraverso la relazione $E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \tan(\alpha)$.

La sua conoscenza è essenziale nella simulazione di comportamenti strutturali mediante Analisi agli Elementi Finiti (FEM), poiché contribuisce a predire il modo in cui un materiale risponde a varie condizioni di carico e a ottimizzare la progettazione di componenti meccanici.

Per determinare il valore del modulo di Young (E), è fondamentale condurre un'analisi del campo elastico presente nel diagramma Tensione - Deformazione ($\sigma - \varepsilon$).

Dalla Figura 4.12 emerge che, nel caso di questa lega AA5182, la relazione $\sigma - \varepsilon$ non presenta una perfetta linearità.

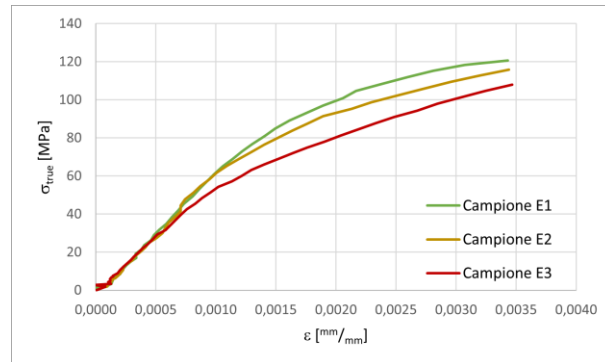


Figura 4.12: Campo elastico nel diagramma Tensione - Deformazione ($\sigma - \varepsilon$) delle prove di trazione E1, E2 ed E3.

Per risolvere questa problematica, è stata adottata la seguente strategia.

Il modulo di Young (E) può essere definito come la derivata della tensione rispetto alla deformazione nel punto iniziale della curva. È possibile quindi calcolarlo per l'intera fase elastica:

$$E_{Young} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \lim_{\Delta\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sigma(\varepsilon + \Delta\varepsilon) - \sigma(\varepsilon)}{\Delta\varepsilon}$$

In un contesto di dati discreti, l'intervallo di tempo è definito dalla frequenza di acquisizione della Digital Image Correlation (DIC). Pertanto, il modulo di Young può essere riscritto come la derivata discreta rispetto alla deformazione:

$$E_{Young} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma(\varepsilon + \Delta\varepsilon) - \sigma(\varepsilon)}{\Delta\varepsilon}$$

Nella Figura 4.13 (a), sono evidenziati gli andamenti dei moduli di Young ottenuti per i campioni E1, E2 e E3. Si osserva che, malgrado la curva della tensione risulti piuttosto lineare, quella del modulo di Young presenta una marcata variazione. Inoltre va notata la presenza di una zona iniziale poco attendibile, causata da grandezze troppo ridotte per essere acquisite correttamente dagli strumenti di misura.

Per superare questa problematica, è stata tracciata una retta blu in grado di approssimare le curve nella zona affidabile. Il punto in cui questa retta interseca l'asse delle ascisse rappresenta il modulo di Young nel punto iniziale della curva, in linea con i valori comunemente riportati per le leghe di alluminio, attestandosi a circa $E_{Young} = 70\,000\ [MPa]$.

Si osserva inoltre che il modulo di Young diminuisce linearmente fino a raggiungere circa $E_{Young} = 38\,000\ [MPa]$ nel punto di snervamento.

Per verificare il valore ottenuto, è possibile rappresentare, attraverso la retta blu della Figura 4.13 (b), l'andamento lineare del campo elastico che approssima le curve nel punto iniziale del diagramma $\sigma - \varepsilon$.

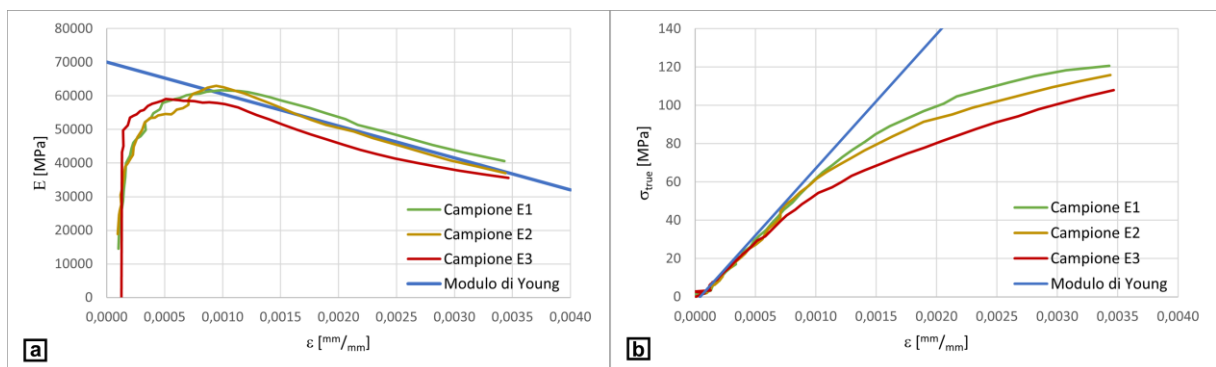


Figura 4.13: Modulo di Young (E) per le prove di trazione E1, E2 ed E3:
 (a) valori del modulo di Young; (b) fase lineare elastica del diagramma $\sigma - \varepsilon$.

4.3.3 Tensione di snervamento (σ_S) e tensione di rottura (σ_R)

La **tensione di snervamento** (σ_S) rappresenta il limite massimo di tensione che un materiale può sostenere senza subire deformazioni plastiche permanenti. In altre parole, è il punto di transizione tra la fase elastica e quella plastica del materiale. Durante la fase elastica, il materiale si deforma in modo reversibile, tornando alla sua forma originale una volta cessato lo stress applicato. Quando il materiale raggiunge la tensione di snervamento, inizia ad entrare nella fase plastica, mostrando deformazioni permanenti anche dopo la rimozione dello stress.

Per le leghe di alluminio, dove il punto di snervamento può essere poco riconoscibile, si fissa $\varepsilon = 0,2 \%$ e viene tracciata una retta con coefficiente angolare pari al modulo di Young (E). L'intersezione tra tale retta e la curva indica lo snervamento $\sigma_{S0,2}$, che assume una deformazione permanente $\varepsilon^{pl} = 0,2 \%$.

Nella Tabella 4.2 sono indicate le deformazioni (ε_S) e le tensioni (σ_S) dei punti di snervamento (S) ricavati dalle prove di trazione condotte sui campioni E1, E2 ed E3.

La **tensione di rottura** (σ_R) rappresenta il punto massimo sulla curva Tensione - Deformazione ($\sigma - \varepsilon$), oltre il quale il materiale subirà una rottura irreversibile.

Il punto di rottura può essere facilmente identificato osservando il valore massimo ottenuto sulla curva Tensione - Deformazione riportata nella Figura 4.11.

Nella Tabella 4.2 sono indicate le deformazioni (ε_R) e le tensioni (σ_R) dei punti di rottura (R) ricavati dalle prove di trazione condotte sui campioni E1, E2 ed E3.

Tabella 4.2: Punti di snervamento (S) e di rottura (R) delle prove di trazione E1, E2 ed E3.

Geometria campione	Snervamento (S)		Rottura (R)	
	$\varepsilon_S \left[\frac{mm}{mm} \right]$	$\sigma_S [MPa]$	$\varepsilon_R \left[\frac{mm}{mm} \right]$	$\sigma_R [MPa]$
E1	0,0038	122,04	0,2055	353,55
E2	0,0037	118,61	0,2054	352,90
E3	0,0037	121,34	0,2011	353,37

4.3.4 Modello di incrudimento

L'incrudimento è un fenomeno metallurgico per cui un materiale metallico risulta rafforzato, in termini di durezza e resistenza meccanica, in seguito a una deformazione plastica a freddo.

Per valutare l'incrudimento, si ricorre a modelli matematici che descrivono la complessa relazione tra la tensione e la deformazione plastica, noti come modelli di incrudimento. [5]

Tra le leggi più comuni che descrivono questo fenomeno, possiamo citare:

- **Modello lineare:**

- Elastoplastico perfetto:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{per } \sigma < \sigma_s$$

$$\sigma = \sigma_s \quad \text{per } \sigma \geq \sigma_s$$

- Lineare:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{per } \sigma < \sigma_s$$

$$\sigma = \sigma_s + E_T \left(\varepsilon - \frac{\sigma_s}{E} \right) \quad \text{per } \sigma \geq \sigma_s$$

- **Multilineare:**

$$\sigma = \sigma_s + E_1 \left(\varepsilon_1 - \frac{\sigma_s}{E} \right) + E_2(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) + E_3(\varepsilon_3 - \varepsilon_2) + \dots$$

- **Modelli con incrudimento esponenziale:**

- Power Law - Hollomon:

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n$$

- Swift Law:

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon^{pl})^n$$

- Voce Law a 3 parametri:

$$\sigma = \sigma_0 + A \left(1 - \frac{1}{e^{b \cdot \varepsilon^{pl}}} \right)$$

- Voce Law a 4 parametri:

$$\sigma = \sigma_0 + A \left(1 - \frac{1}{e^{b \cdot \varepsilon^{pl}}} \right) + A_0 \cdot \varepsilon^{pl}$$

L'incrudimento è strettamente legato al movimento delle dislocazioni all'interno della struttura cristallina del materiale. Durante la deformazione plastica, le dislocazioni si muovono e si accumulano nei punti di ostacolo, come i contorni dei grani e le imperfezioni nella struttura cristallina. Questo accumulo ostacola il movimento delle successive dislocazioni, aumentando la resistenza del materiale, come si osserva dalla Figura 4.9.

Nel contesto di questa ricerca, è stato utilizzato il modello di incrudimento di tipo Voce Law a 3 parametri. La scelta di questo modello è motivata dalla sua capacità di adattarsi agevolmente attraverso la taratura dei suoi 3 parametri. Inoltre, dimostra una notevole efficacia nell'approssimare con precisione il tratto di incrudimento osservato nella curva Tensione - Deformazione ($\sigma - \varepsilon$) della Figura 4.11.

Per calibrare i 3 parametri (σ_0, A, b) del modello di incrudimento di tipo Voce Law, si segue il seguente approccio.

Il primo passaggio consiste nel calcolare la deformazione plastica per ogni punto della curva $\sigma - \varepsilon$ acquisita, utilizzando la relazione:

$$\varepsilon^{pl} = \varepsilon - \frac{\sigma_{true}}{E}$$

Dal calcolo della deformazione plastica, è possibile identificare il punto di snervamento, corrispondente a $\varepsilon^{pl} = 0,2 \%$. Il modello di incrudimento deve essere applicato da questo punto in avanti, ovvero durante la fase plastica della deformazione.

Attraverso uno strumento di elaborazione dati come Excel, si fissano valori iniziali arbitrari per i 3 parametri (σ_0, A, b), che saranno successivamente calibrati.

Per ciascun valore calcolato di deformazione plastica (ε^{pl}), utilizzando i parametri iniziali, si calcola la tensione tramite la Voce Law:

$$\sigma_{voce} = \sigma_0 + A \left(1 - \frac{1}{e^{b \cdot \varepsilon^{pl}}} \right)$$

Si definisce un errore di approssimazione tra la curva della tensione vera (σ_{true}) e quella ottenuta dal modello Voce Law (σ_{voce}), mediante lo scarto quadratico medio:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_{true} - \sigma_{voce})^2}{N}}$$

Utilizzando la funzione Risolutore del software, si risolve il problema inverso per minimizzare l'errore (RMS). Si imposta come obiettivo la minimizzazione della cella RMS e si selezionano le celle contenenti i parametri da tarare σ_0 , A , b .

Dopo alcune iterazioni, si ottiene la taratura dei parametri in modo da minimizzare l'errore. Il modello di incrudimento risultante è quindi rappresentato dalla seguente legge:

$$\sigma_{voce} = \sigma_0 + A \left(1 - \frac{1}{e^{b \cdot \epsilon^{pl}}} \right) = 121,71 + 259,00 \left(1 - \frac{1}{e^{10,68 \cdot \epsilon^{pl}}} \right)$$

Dove:

- $\sigma_0 = 121,71$ [MPa];
- $A = 259,00$ [MPa];
- $b = 10,68$.

Tali parametri consentono di far approssimare al meglio la curva blu della Figura 4.14, che rappresenta la tensione calcolata con il modello di incrudimento (σ_{voce}), alle curve della tensione vera (σ_{true}) ottenute dalle prove di trazione.

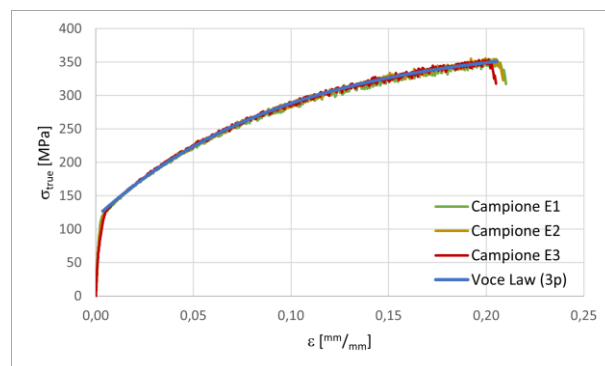


Figura 4.14: Modello di incrudimento di tipo Voce Law a 3 parametri per le prove di trazione E1, E2 ed E3.

4.3.5 Coefficiente di Poisson (ν)

Il coefficiente di Poisson (ν), conosciuto anche come coefficiente di contrazione trasversale, è una delle due proprietà che descrive l'elasticità di un solido elastico. Rappresenta il grado in cui il campione di materiale si restringe o si dilata trasversalmente in presenza di una sollecitazione monodirezionale longitudinale (σ).

La formula che definisce il coefficiente di Poisson è data da:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l}$$

Dove:

- ε_t è la deformazione trasversale al carico;
- ε_l è la deformazione longitudinale al carico.

Il segno negativo nella formula è una convenzione che riflette la scelta di rappresentare positivamente gli sforzi di trazione, in cui si verifica un allungamento del materiale, mentre contemporaneamente si ha una contrazione della dimensione trasversale, come schematizzato nella Figura 4.15.

È essenziale sottolineare che questa relazione è valida solo in uno stato di sollecitazione monodirezionale. In stati tensionali più complessi non è più verificata ed il coefficiente di Poisson non coincide più con tale rapporto. [6]

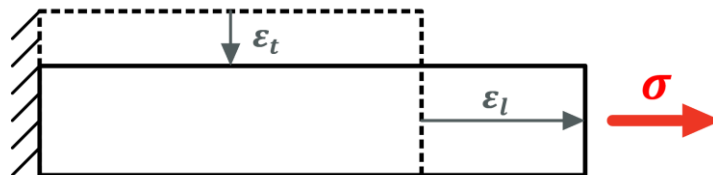


Figura 4.15: Schema sollecitazione monodirezionale.

Per il calcolo del coefficiente di Poisson (ν), è necessario effettuare un'analisi dettagliata delle deformazioni longitudinali (ε_l) e trasversali (ε_t) presenti nel campo elastico precedentemente definito delle prove di trazione.

Poiché le deformazioni sono disponibili come un campo discreto di valori, è stato adottato un approccio che coinvolge la definizione di una Regione di Interesse (ROI, Region Of Interest). Questa regione, centrata e con dimensioni pari a 10×40 celle, rappresenta circa il 20% della dimensione totale.

I valori presenti in questa sottomatrice sono stati successivamente mediati per ottenere il valore finale del coefficiente di Poisson (ν) per una specifica acquisizione della Digital Image Correlation (DIC), ovvero in corrispondenza di un istante di tempo specifico.

I risultati ottenuti sono visualizzati nella Figura 4.16, espressi in funzione della deformazione longitudinale (ε_l) riscontrata durante la prova di trazione.

Va notata la presenza di una zona iniziale poco attendibile, dovuta a deformazioni troppo ridotte per essere acquisite con precisione dalla DIC. Successivamente, i valori mostrano una stabilizzazione intorno a un valore medio, coerente con il coefficiente di Poisson tipicamente tabellato per le leghe di alluminio, attestandosi intorno alla retta blu con $\nu = 0.33$.

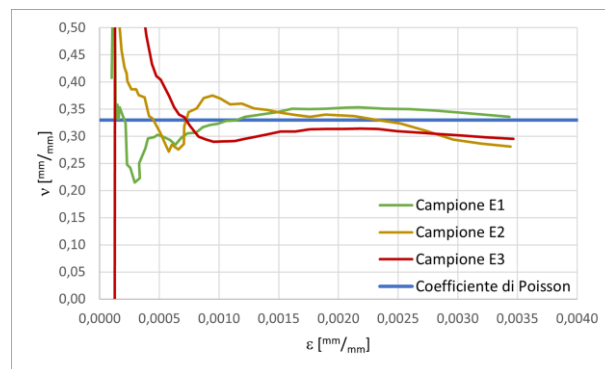


Figura 4.16: Coefficienti di Poisson (ν) per le prove di trazione E1, E2 ed E3.

4.3.6 Parametro di anisotropia di Lankford (R_0)

Il parametro di Lankford (R-value), noto anche come rapporto di deformazione plastica, è un indicatore dell'anisotropia plastica di una lamiera. Questo parametro è ampiamente utilizzato per valutare la formabilità delle lamiere. [7]

La definizione del coefficiente di Lankford è data dal rapporto:

$$R = \frac{\varepsilon_t^{pl}}{\varepsilon_s^{pl}}$$

Dove:

- ε_t^{pl} è la deformazione plastica nel piano trasversale alla direzione di carico;
- ε_s^{pl} è la deformazione plastica attraverso lo spessore.

Per le lamiere, i valori di R sono generalmente determinati per tre diverse direzioni di carico nel piano (0° , 45° , 90° rispetto alla direzione di laminazione).

L'**indice di anisotropia normale** (R_N) considera la media di questi tre valori:

$$R_N = \frac{1}{4}(R_0 + 2 R_{45} + R_{90})$$

L'**indice di anisotropia planare** (R_P) è una misura della variazione dell'R-value con l'angolo rispetto alla direzione di laminazione. Questa quantità è definita come:

$$R_P = \frac{1}{2}(R_0 - 2 R_{45} + R_{90})$$

In questo studio, i provini disponibili sono stati quelli tagliati longitudinalmente alla direzione di laminazione (0°), conformemente alle disposizioni della norma UNI 12004 per lamiere in lega di alluminio, impedendo così l'ottenimento dei parametri R_{45} e R_{90} . Di conseguenza, la caratterizzazione completa del comportamento anisotropo della lamiera in studio è stata limitata dalla mancanza di dati relativi a queste direzioni specifiche.

Per calcolare il parametro di Lankford longitudinale alla direzione di laminazione (R_0), è stata condotta un'analisi dettagliata delle deformazioni trasversali (ε_t) e lungo lo spessore (ε_s) presenti nel campo plastico.

L'utilizzo dell'ipotesi di conservazione del volume, valida in campo plastico, ha permesso di calcolare le deformazioni lungo lo spessore:

$$\varepsilon_s = -(\varepsilon_l + \varepsilon_t)$$

Questo processo è stato eseguito su una Regione di Interesse (ROI) di dimensioni 10 x 40 celle, rappresentante circa il 20% della dimensione totale. I valori risultanti sono stati successivamente mediati per ottenere il valore finale del parametro di Lankford, specifico per ciascuna acquisizione della Digital Image Correlation (DIC).

I risultati ottenuti sono visualizzati nella Figura 4.17, espressi in funzione della deformazione longitudinale (ε_l) riscontrata durante la prova di trazione.

Va notata la presenza di una zona iniziale poco attendibile, dovuta a deformazioni troppo ridotte per essere acquisite con precisione dalla DIC.

Successivamente, i valori mostrano una stabilizzazione intorno a un valore medio pari a $R_0 = 0,60$, rappresentato mediante la retta blu. Tale risultato suggerisce un marcato comportamento anisotropo del materiale, attribuibile principalmente alla lavorazione di laminazione effettuata in fase di produzione della lamiera.

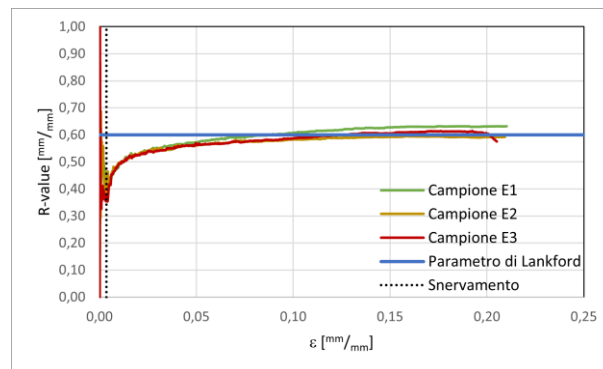


Figura 4.17: Parametri di Lankford (R_0) per le prove di trazione E1, E2 ed E3.

È evidente che il parametro di Lankford (R_0) misurato è coerente con i valori ricavati dagli articoli [8][9], i quali riportano i seguenti parametri di Lankford nelle tre direzioni:

- $R_0 = 0,642$
- $R_{45} = 1,039$
- $R_{90} = 0,829$

4.4 Diagramma Limite di Formabilità (FLD)

La determinazione dei punti limite di formabilità (coppia $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$) per la costruzione della Curva Limite di Formabilità (FLC) si articola in due metodi distinti:

- **Metodo dipendente dalla posizione:** utilizza una valutazione dei punti mediante l'analisi delle sezioni trasversali alla frattura;
- **Metodo dipendente dal tempo:** utilizza una valutazione dei punti mediante l'analisi della curva del Thickness Ratio $\left(\frac{d\varepsilon_3}{dt}\right)$.

La norma UNI EN ISO 12004: 2009 documenta dettagliatamente il metodo dipendente dalla posizione, sottolineando che il metodo dipendente dal tempo era in fase di sviluppo e poteva essere incluso in successive revisioni della norma. Tale distinzione evidenzia l'evoluzione e la possibilità di miglioramenti nella metodologia nel corso del tempo.

Per entrambi i metodi, il primo passaggio consiste nell'importare i risultati ottenuti dalla Digital Image Correlation (DIC) in formato .csv all'interno di uno script Matlab per elaborare i dati e determinare i punti limite di formabilità.

È possibile visualizzare immediatamente le grandezze principali da elaborare, come illustrato nell'esempio del campione C3, dove sono osservabili lo spostamento fuori dal piano w [mm] (Figura 4.18 (a)), la deformazione principale maggiore ε_1 $\left[\frac{mm}{mm}\right]$ (Figura 4.18 (b)) e la deformazione principale minore ε_2 $\left[\frac{mm}{mm}\right]$ (Figura 4.18 (b)).

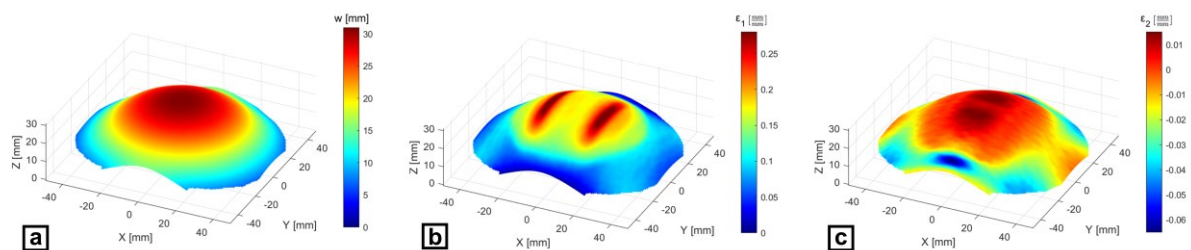


Figura 4.18: Grandezze principali del campione C3: (a) spostamento fuori dal piano (w); (b) deformazione principale maggiore (ε_1); (c) deformazione principale minore (ε_2).

4.4.1 Metodo dipendente dalla posizione: valutazione mediante sezioni trasversali alla frattura

Nella determinazione dei punti limite di formabilità (coppia $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$), la norma UNI EN ISO 12004: 2009-2 descrive il metodo dipendente dalla posizione. Questo approccio si basa sull'analisi delle distribuzioni delle deformazioni misurate lungo 5 sezioni predefinite trasversali alla frattura.

Il processo prevede la rimozione dei punti di deformazione nell'area della rottura, seguita dalla ricostruzione della distribuzione delle deformazioni appena prima dell'inizio della strizione mediante l'adattamento di una parabola inversa che meglio si adatta alla forma della "curva a campana", cercando di ottenere una determinazione precisa e oggettiva dei punti limite di formabilità.

Questo procedimento può essere suddiviso nei seguenti passaggi:

1. Posizionamento delle sezioni trasversali alla frattura;
2. Definizione dei confini interni della finestra di adattamento;
3. Definizione dei confini esterni della finestra di adattamento;
4. Valutazione delle parabole inverse sulle "curve a campana";
5. Determinazione dei punti limite di formabilità (coppia $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$);
6. Diagramma Limite di Formabilità (FLD).

4.4.1.1 Posizionamento delle sezioni trasversali alla frattura

Sfruttando la Digital Image Correlation (DIC), è possibile valutare le deformazioni dal momento iniziale fino all'istante immediatamente precedente alla rottura del materiale. Questo processo consente di definire la posizione delle sezioni trasversali perpendicolari alla frattura sull'immagine in cui la rottura è evidente. Successivamente, queste sezioni vengono trasferite all'ultima immagine prima che la frattura diventi visibile, al fine di ottenere le sezioni trasversali utili per la valutazione della coppia di valori $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ su un'immagine priva di aperture della frattura.

Le sezioni sono scelte approssimativamente perpendicolari alla frattura, in modo da permettere l'elaborazione di dati lungo la direzione principale maggiore.

La scelta del posizionamento delle sezioni trasversali alla frattura si articola nei seguenti passaggi:

1. **Sezione principale (S_0):** si individua la prima linea di intersezione perpendicolare alla frattura e passante per il suo centro. Per agevolare la localizzazione del centro della frattura, ci si orienta verso la posizione in cui ϵ_1 assume il valore massimo. Questa sezione è rappresentata dal segmento nero nell'esempio del campione C3 della Figura 4.19;
2. **Sezioni secondarie (S_{-2}, S_{-1}, S_1, S_2):** si definiscono altre due linee di intersezione per ciascun lato, parallele alla principale, poste a una distanza di 2 mm. Queste sono rappresentate dai segmenti grigi nell'esempio del campione C3 della Figura 4.19.

Per i calcoli successivi, è essenziale conoscere le seguenti grandezze su tali sezioni:

- **Distanza (dist):** posizione data sulla lunghezza dell'arco della sezione sulla superficie deformata, contando dal primo punto di intersezione;
- ϵ_1 : deformazione principale maggiore;
- ϵ_2 : deformazione principale minore.

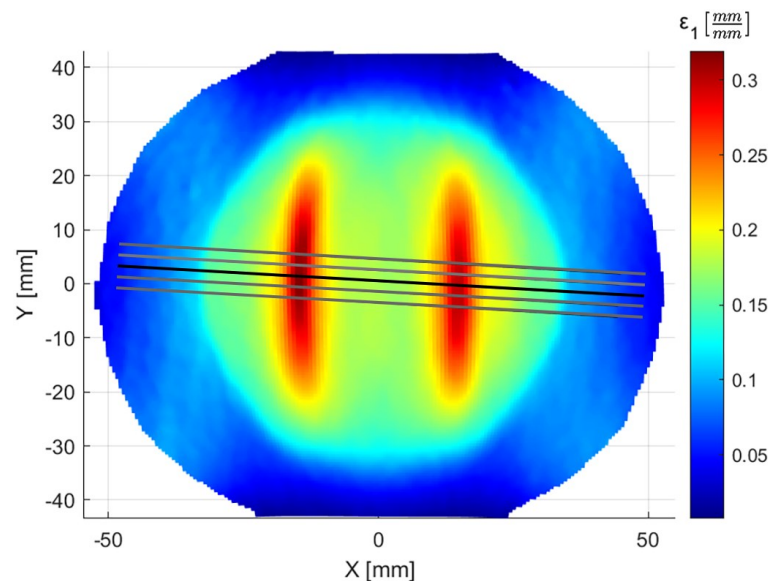


Figura 4.19: Posizionamento delle sezioni trasversali alla frattura sul campione C3.

4.4.1.2 Definizione dei confini interni della finestra di adattamento

Per stabilire i confini interni della finestra di adattamento della parabola inversa, si possono impiegare due approcci distinti, rappresentati nella Figura 4.20. Questi vengono applicati su ciascuna delle sezioni appena create e sull'ultima immagine prima che la frattura diventi visibile:

- **Metodo della derivata seconda:** calcolare la derivata seconda della deformazione principale maggiore $\left(\frac{d^2\varepsilon_1}{d\text{dist}^2}\right)$ per entrambi i lati della fessura. Per la determinazione della derivata seconda discreta, si considerano 3 punti consecutivi $(x_1, y_1; x_2, y_2; x_3, y_3)$ e si determina la parabola del secondo ordine $f(x) = ax^2 + bx + c$ passante per tali punti. La derivata seconda nel punto medio (x_2) è il doppio del coefficiente del termine quadratico $f''(x_2) = 2a$;
- **Metodo della derivata seconda "filtrata":** segue un procedimento simile al metodo della derivata seconda, ma con l'utilizzo di un intervallo di 5 punti $(x_1, y_1; x_2, y_2; x_3, y_3; x_4, y_4; x_5, y_5)$. Per la derivata seconda nel punto medio (x_3) , il coefficiente del termine quadratico è raddoppiato, generando così un effetto di filtraggio del valore della derivata seconda.

In entrambi i metodi, la determinazione della posizione del massimo locale della derivata seconda su ciascun lato, definisce il limite interno della finestra di adattamento della parabola inversa. Questo procedimento viene ripetuto per entrambi i lati della fessura, ottenendo così le due posizioni dei confini interni (indicate dalle rette verticali rosse nella Figura 4.21) della finestra di adattamento.

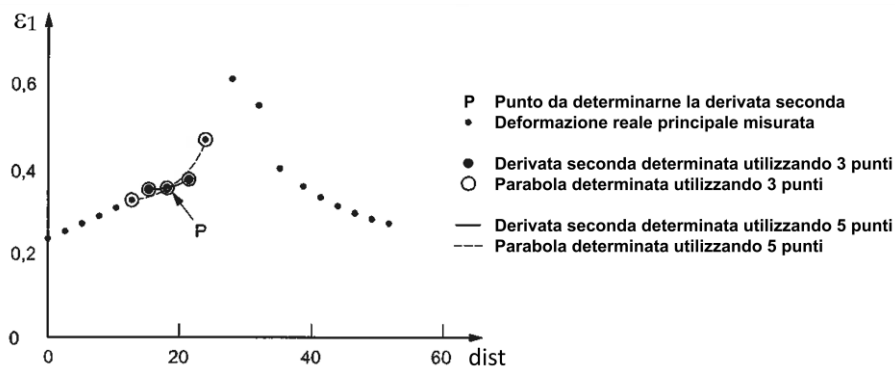


Figura 4.20: Calcolo della derivata seconda del profilo di deformazione ε_1 .

4.4.1.3 Definizione dei confini esterni della finestra di adattamento

Per definire i confini esterni della finestra di adattamento, viene calcolata la larghezza della finestra (w) in funzione della posizione dei confini interni, secondo la seguente relazione:

$$w = 10 \left(1 + \frac{\bar{\varepsilon}_2}{\bar{\varepsilon}_1} \right)$$

Dove:

- $\bar{\varepsilon}_1 = \frac{1}{2}(\varepsilon_{1,BL} + \varepsilon_{1,BR})$;
- $\bar{\varepsilon}_2 = \frac{1}{2}(\varepsilon_{2,BL} + \varepsilon_{2,BR})$.

Gli indici "BL" e "BR" sono utilizzati per i valori ε_1 e ε_2 dei confini interni sinistro (Left Inner Boundary) e destro (Right Inner Boundary), rispettivamente.

A questo punto, conoscendo la larghezza della finestra di adattamento (w), è possibile calcolare i confini esterni della finestra di adattamento (rappresentati dalle rette verticali blu nella Figura 4.21):

- Confine esterno sinistro: sottrarre la larghezza w dalla posizione del confine interno sinistro;
- Confine esterno destro: sommare la larghezza w alla posizione del confine interno destro.

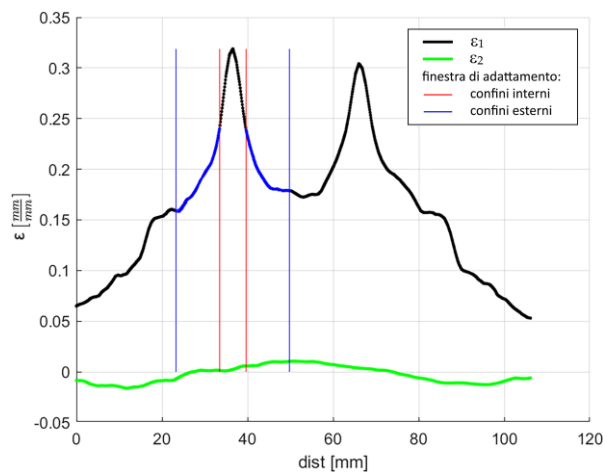


Figura 4.21: Determinazione dei confini interni ed esterni della finestra di adattamento del campione C3.

4.4.1.4 Valutazione delle parabole inverse sulle “curve a campana”

Per valutare le parabole inverse che approssimano al meglio le “curve a campana” all'interno della finestra di adattamento appena definita, procedere come segue:

1. Utilizzare l'adattamento migliore con una parabola inversa del secondo ordine $f(x) = \frac{1}{ax^2+bx+c}$ sulla curva a campana dei valori di ε_1 , ottenendo per il campione C3 la parabola inversa rossa della Figura 4.22 (a);
2. Calcolare la deformazione dello spessore dall'ipotesi di conservazione del volume, valida in campo plastico: $\varepsilon_3(x) = -(\varepsilon_1(x) + \varepsilon_2(x))$;
3. Utilizzare l'adattamento migliore con una seconda parabola inversa del secondo ordine $f(x) = -\frac{1}{ax^2+bx+c}$ sulla curva a campana dei valori di ε_3 , ottenendo per il campione C3 la parabola inversa rossa della Figura 4.22 (b);

4.4.1.5 Determinazione dei punti limite di formabilità (coppia $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$)

Per determinare i punti limite di formabilità che formeranno la Curva Limite di Formabilità (FLC), occorre seguire i seguenti passaggi:

1. La posizione della frattura viene definita come il punto in cui la deformazione reale principale maggiore (ε_1) assume il valore massimo, indicata nella Figura 4.22 (a) come ε_{1max} (punto arancione);
2. Il valore risultante della parabola inversa sulla curva a campana di ε_1 nella posizione di rottura, rappresenta la deformazione limite principale maggiore desiderata, indicata nella Figura 4.22 (a) come ε_{1L} (punto rosso);
3. Il valore risultante della parabola inversa sulla curva a campana di ε_3 nella posizione di rottura, rappresenta la deformazione limite principale desiderata lungo la direzione dello spessore, indicata nella Figura 4.22 (b) come ε_{3L} (punto rosso);
4. Tramite l'ipotesi di conservazione del volume, dai valori delle deformazioni limite reali principali determinati ($\varepsilon_{1L}, \varepsilon_{3L}$), viene calcolata la deformazione limite principale minore desiderata (ε_{2L}) nella posizione di rottura come segue: $\varepsilon_{2L} = -(\varepsilon_{1L} + \varepsilon_{3L})$.

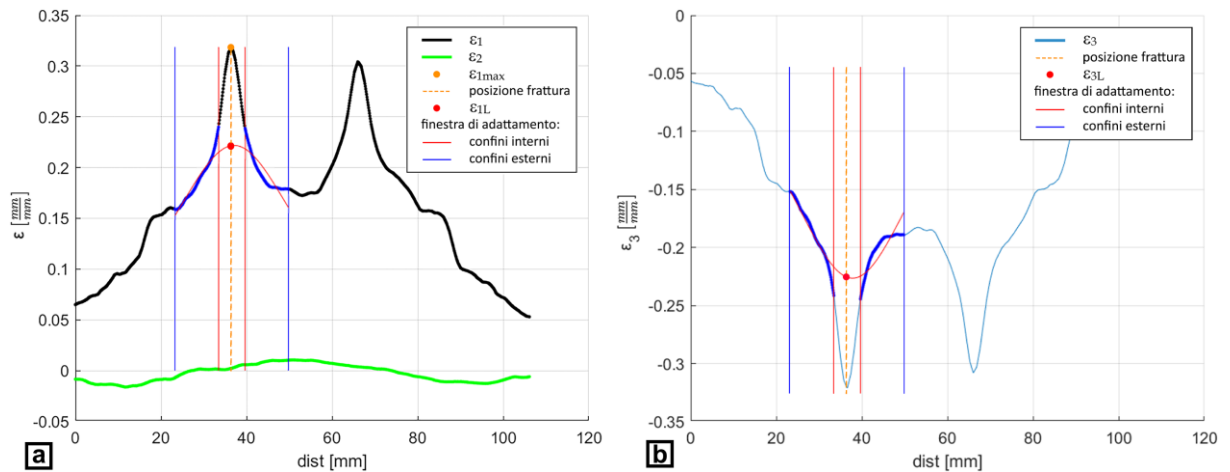


Figura 4.22: Determinazione dei punti limite di formabilità del campione C3: (a) ϵ_{1L} ; (b) ϵ_{3L} .

Nel processo di analisi, per ogni singola prova, si raccolgono e esaminano attentamente tutti i valori di deformazione principale maggiore e minore ($\epsilon_1 - \epsilon_2$) provenienti dalle diverse sezioni trasversali. A titolo di esempio, sono stati documentati i risultati delle varie sezioni per il campione C3 nella Tabella 4.3.

Successivamente, al fine di sintetizzare in modo rappresentativo l'andamento complessivo del campione, si procede con il calcolo della media di tutti i valori ottenuti:

- $\epsilon_{1M} = 0,2222$;
- $\epsilon_{2M} = 0,0051$.

Tabella 4.3: Deformazioni limite ($\epsilon_{1L} - \epsilon_{2L}$) lungo le 5 sezioni trasversali alla frattura del campione C3.

Sezione	$\epsilon_{1L} \left[\frac{mm}{mm} \right]$	$\epsilon_{2L} \left[\frac{mm}{mm} \right]$
S ₋₂	0,2136	0,0061
S ₋₁	0,2174	0,0043
S ₀	0,2258	0,0054
S ₁	0,2265	0,0051
S ₂	0,2276	0,0044
Media	0,2222	0,0051

4.4.1.6 Diagramma Limite di Formabilità (FLD)

Fino a questo momento, è stato fornito un esempio dettagliato utilizzando il campione C3 per illustrare il processo di determinazione dei punti limite di formabilità tramite il metodo dipendente dalla posizione. Tuttavia, è fondamentale sottolineare che questo approccio analitico va esteso e applicato sistematicamente a tutti i campioni considerati nel nostro studio.

Ripetendo il procedimento descritto per ciascun campione, si è in grado di raccogliere una vasta gamma di dati, offrendo una visione completa delle deformazioni limite in diversi stati tensionali.

La Tabella 4.4, riassume i valori di ϵ_{1M} e ϵ_{2M} ottenuti da ciascun campione attraverso il metodo dipendente dalla posizione, fornendo una panoramica chiara e comparativa delle prestazioni di formabilità.

Per visualizzare in maniera più intuitiva e completa l'andamento di tali valori nel contesto del Diagramma Limite di Formabilità (FLD), si procede con la sua rappresentazione grafica, illustrata nella Figura 4.23.

Dal diagramma, emergono discrepanze evidenti con i punti estremi della curva, i quali non si collocano perfettamente sulle rette delle tensioni uniassiale ed equiassiale. Questo fenomeno potrebbe essere attribuibile alla natura non isotropa del materiale, come è stata discussa nel Capitolo 4.3.6, la quale potrebbe dare origine a stati tensionali più complessi. Inoltre, durante le prove di trazione, la presenza di una geometria non particolarmente snella potrebbe favorire effetti di confinamento laterale, contribuendo alla formazione di uno stato tensionale non completamente uniassiale.

Anche il punto associato alla geometria D mostra una deviazione rispetto all'andamento generale della curva. Questo fenomeno potrebbe essere attribuibile a due fattori. In primo luogo, analizzando le dimensioni nel Capitolo 3.1.2, si nota una differenza nella lunghezza degli scarichi laterali del campione di geometria D, che misura 80 mm anziché 120 mm come nei campioni di geometria B e C. In secondo luogo, i campioni di geometria D provengono da un lotto diverso e sono stati testati successivamente rispetto agli altri.

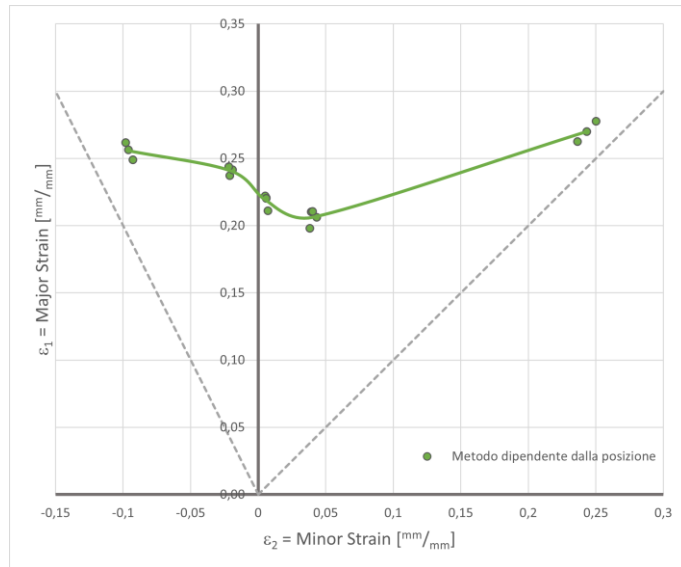


Figura 4.23: Diagramma Limite di Formabilità (FLD) ottenuto attraverso il metodo dipendente dalla posizione.

Tabella 4.4: Deformazioni limite medie ($\epsilon_{1M} - \epsilon_{2M}$) ottenute attraverso il metodo dipendente dalla posizione.

Campione	$\epsilon_{1M} \left[\frac{mm}{mm} \right]$	$\epsilon_{2M} \left[\frac{mm}{mm} \right]$
A1	0,2626	0,2364
A3	0,2701	0,2433
A4	0,2776	0,2501
B1	0,2103	0,0392
B2	0,2061	0,0434
B3	0,1979	0,0382
B4	0,2105	0,0404
C2	0,2208	0,0060
C3	0,2222	0,0051
C4	0,2111	0,0073
C5	0,2203	0,0060
D2	0,2372	-0,0209
D3	0,2416	-0,0190
D4	0,2438	-0,0218
E1	0,2565	-0,0959
E2	0,2617	-0,0980
E3	0,2489	-0,0927

4.4.2 Metodo dipendente dal tempo: valutazione mediante Thickness Ratio

Nel Capitolo 4.4.1, è stato evidenziato come il metodo dipendente dalla posizione possa generare risultati non particolarmente affidabili. Questo è attribuibile alla complessità del procedimento e ai numerosi passaggi coinvolti, che possono contribuire all'accumulo di errori. Inoltre, la scelta della sezione S_0 di partenza è a discrezione dell'operatore, rendendo il metodo soggettivo.

Il progresso tecnico nel campo dei dispositivi di misurazione ottica, come la Digital Image Correlation (DIC), ha consentito lo sviluppo di metodi alternativi, tra cui il secondo metodo trattato in questo elaborato per la determinazione dei punti limite di formabilità (coppia $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$), noto come “metodo dipendente dal tempo”, che considera la cronologia temporale dei test. [10] [11] [12] [13]

Questo metodo costituisce la base per la proposta di revisione della UNI EN ISO 12004-2, elaborata dal Gruppo di lavoro tedesco Internazionale di Ricerca sull'Imbutitura Profonda (IDDRG, International Deep Drawing Research Group). Sebbene la recente revisione della UNI EN ISO 12004-2: 2021 abbia rimosso l'affermazione specifica relativa al “metodo dipendente dal tempo” presente nella sezione 5.1 della UNI EN ISO 12004-2: 2009, la norma riconosce ora l'uso di vari metodi, inclusi sia il “metodo dipendente dal tempo” che i “metodi dipendenti dal tempo e dalla posizione”, come indicato nella clausola 5.

L'obiettivo principale di questo approccio è determinare la Curva Limite di Formabilità (FLC) basandosi sull'analisi della curva del Thickness Ratio $\left(\frac{d\varepsilon_3}{dt}\right)$, sia per i campioni di tipo A, B, C, D dei test Nakajima che per i campioni di tipo E delle prove di trazione.

La differenza sostanziale di questo metodo è proporre un'alternativa chiara, semplice e poco dipendente dall'operatore per identificare l'istante di insorgenza della strizione (necking instabile). Si prende come limite critico l'inizio della strizione durante le operazioni di formatura delle lamiere, poiché dalla pratica si osserva che oltre tale punto si verificano assottigliamenti localizzati che possono causare problemi strutturali e difetti estetici.

Il processo prevede il calcolo del Thickness Ratio $\left(\frac{d \varepsilon_3}{d t}\right)$ e la definizione del punto di strizione come l'istante in cui questa curva subisce un notevole cambio di pendenza. Da tale istante si ricavano le deformazioni principali limite corrispondenti (coppia $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$).

Questo procedimento può essere suddiviso nei seguenti passaggi:

1. Definizione della Regione di Interesse (ROI);
2. Calcolo del Thickness Ratio (TR);
3. Definizione dell'istante di inizio della strizione;
4. Determinazione dei punti limite di formabilità (coppia $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$);
5. Diagramma Limite di Formabilità (FLD).

4.4.2.1 Definizione della Regione di Interesse (ROI)

Questo metodo potrebbe funzionare definendo un singolo punto, ma poiché non è possibile prevedere con certezza la posizione esatta dell'inizio della strizione, si definisce una Regione di Interesse (ROI, Region Of Interest) in cui mediare i risultati.

Il primo passo consiste nel rappresentare sul piano la deformazione principale maggiore (ϵ_1). La Regione di Interesse viene definita disegnando manualmente un poligono nella zona in cui le ϵ_1 sono maggiori, sull'ultima immagine elaborata dalla Digital Image Correlation (DIC) prima della rottura.

Sebbene questa operazione sia manuale, i risultati sono poco dipendenti dall'operatore, rendendo questo metodo più preciso e ripetibile rispetto a quello dipendente dalla posizione.

Nella Figura 4.24 (a), si osserva in nero il confine della Regione di Interesse definita sul campione C3. È importante notare che, nonostante la presenza di una doppia strizione, lo studio si concentra solo sulla zona con valori più elevati, ovvero dove effettivamente avverrà la rottura tra le due.

A questo punto, è possibile rappresentare graficamente le grandezze di deformazione principale maggiore (ϵ_1) e minore (ϵ_2), come media ottenuta dai valori di questa regione, in funzione dello spostamento del punzone (w).

Nella Figura 4.24 (b), si osservano queste due grandezze, rispettivamente di colori rosso e blu, riferite alla ROI appena definita sul campione C3.

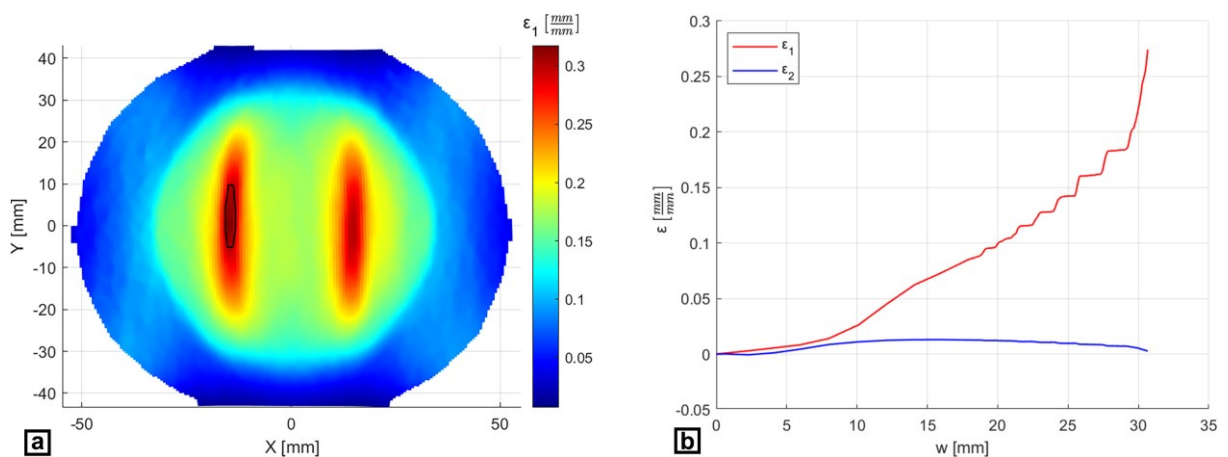


Figura 4.24: Definizione della Regione di Interesse (ROI) del metodo dipendente dal tempo applicata sul campione C3: (a) confine; (b) grandezze ϵ_1 ed ϵ_2 mediate.

4.4.2.2 Calcolo del Thickness Ratio (TR)

Tramite l'ipotesi di conservazione del volume valida in campo plastico, viene calcolata la deformazione principale lungo lo spessore mediata ε_3 come segue:

$$\varepsilon_3(t) = -(\varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t))$$

Nella Figura 4.25 (a) viene rappresentata deformazione ε_3 del campione C3.

Successivamente, si calcola il Thickness Ratio (TR), definito come la velocità di deformazione lungo lo spessore, ovvero la derivata della ε_3 rispetto al tempo:

$$TR = \frac{d \varepsilon_3}{d t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\varepsilon_3(t + \Delta t) - \varepsilon_3(t)}{\Delta t}$$

In un contesto di dati discreti, l'intervallo di tempo è definito dalla frequenza di acquisizione della Digital Image Correlation (DIC). Pertanto, il Thickness Ratio può essere riscritto come la derivata discreta rispetto al tempo:

$$TR = \frac{\Delta \varepsilon_3}{\Delta t} = \frac{\varepsilon_3(t + \Delta t) - \varepsilon_3(t)}{\Delta t} = \frac{\varepsilon_3(i + 1) - \varepsilon_3(i)}{\Delta t}$$

Dove:

- t = istante di tempo di acquisizione della DIC [s];
- $f = 15$ = frequenza di acquisizione della DIC [Hz];
- $\Delta t = \frac{1}{f} = \frac{1}{15}$ = intervallo di acquisizione della DIC $\left[\frac{1}{Hz} = s\right]$;
- i = frame i – esimo di acquisizione della DIC.

Seguendo lo stesso esempio, nella Figura 4.25 (b) viene rappresentato il TR.

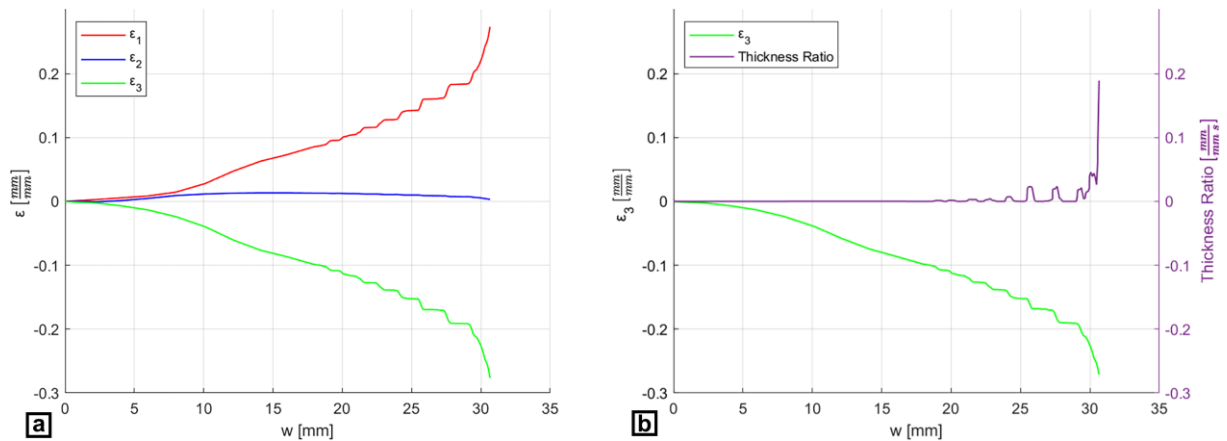


Figura 4.25: Thickness Ratio (TR) del campione C3:

(a) calcolo della deformazione principale lungo lo spessore mediata (ε_3); (b) calcolo del Thickness Ratio.

4.4.2.3 Definizione dell'istante di inizio della strizione

La determinazione dell'istante iniziale della strizione avviene attraverso l'analisi della curva del Thickness Ratio, rappresentata nella Figura 4.26 (a).

La curva presenta due regioni chiaramente distinte:

- **Zona stabile:** questa fase iniziale della curva mostra una velocità di deformazione stabile con una crescita relativamente costante;
- **Zona instabile:** nella fase successiva, il Thickness Ratio (TR) inizia a crescere in modo esponenziale, indicativo del fenomeno instabile della strizione.

Dal grafico risulta intuitivo notare che, poiché la strizione può causare considerevoli assottigliamenti, da evitare durante la formatura di lamiere, l'identificazione precisa dell'istante iniziale della strizione diventa essenziale. Questo istante è impostato come un punto limite per prevenire assottigliamenti indesiderati, che potrebbero compromettere la resistenza strutturale e provocare difetti estetici nel materiale.

Per determinare con precisione questo punto critico, si utilizza un approccio semplice, ripetibile ed obiettivo, caratteristico del metodo dipendente dal tempo. Consiste nell'approssimare le due regioni con le due rette distinte in celeste della Figura 4.26 (b) e, il punto arancione ottenuto dall'intersezione di queste rette, definisce l'istante esatto in cui inizia la strizione.

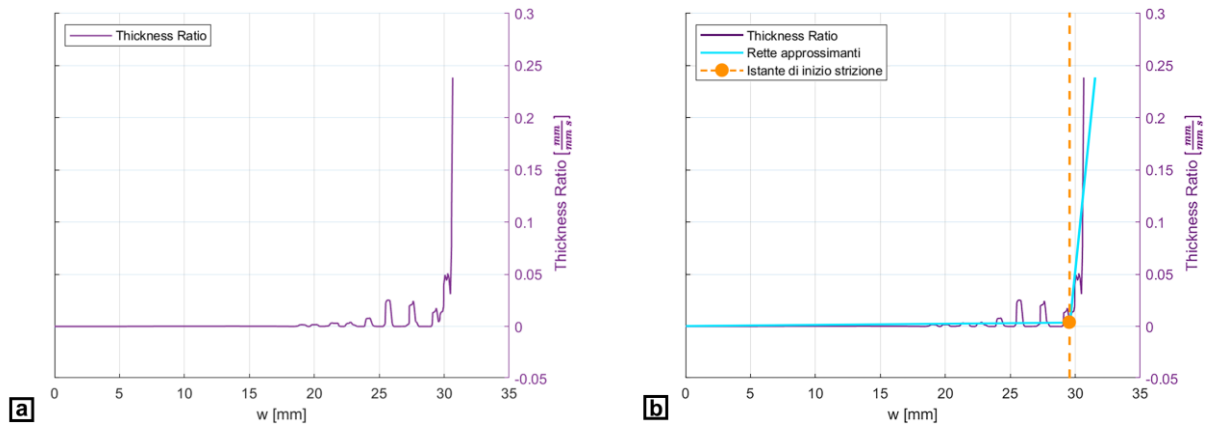


Figura 4.26: Definizione dell'istante di inizio della strizione del campione C3:
(a) curva del Thickness Ratio; (b) approssimazione della curva del Thickness Ratio.

4.4.2.4 Determinazione dei punti limite di formabilità (coppia $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$)

Dopo aver definito l'istante di inizio della strizione, rappresentato dalla retta tratteggiata arancione nella Figura 4.27 (a), è possibile procedere con la determinazione dei punti limite di formabilità. Questi punti rappresentano la coppia di deformazioni principali ($\varepsilon_1 - \varepsilon_2$) nel preciso istante di tempo di inizio della fase di strizione del materiale.

Nella Figura 4.27 (b), che illustra i valori delle deformazioni del campione C3, i punti limite di formabilità sono individuati attraverso l'intersezione della retta dell'istante di inizio della strizione (tratteggiata arancione) con le rette rossa e blu, rappresentanti rispettivamente le deformazioni principali mediate limite maggiore (ε_{1M}) e minore (ε_{2M}). I valori risultanti sono i seguenti:

- $\varepsilon_{1M} = 0,2077$;
- $\varepsilon_{2M} = 0,0063$.

Questi valori forniscono informazioni fondamentali sulla formabilità del materiale in esame, indicando le deformazioni massime sostenibili prima che si verifichino fenomeni indesiderati come la strizione, evitando così assottigliamenti indesiderati che potrebbero compromettere la resistenza strutturale e provocare difetti estetici nel materiale.

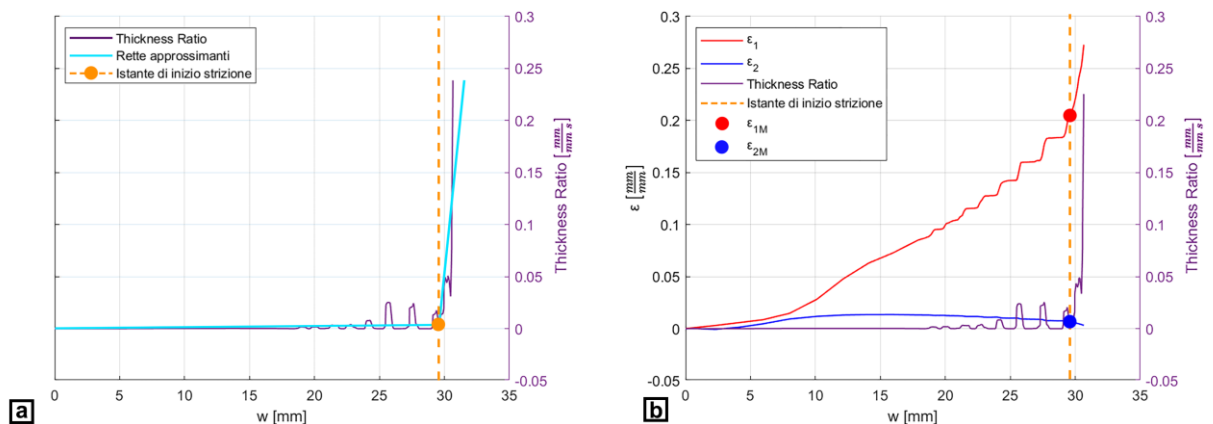


Figura 4.27: Determinazione dei punti limite di formabilità del campione C3:

(a) istante di inizio della strizione; (b) determinazione dei punti limite di formabilità (coppia $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$).

4.4.2.5 Diagramma Limite di Formabilità (FLD)

Fino a questo momento, è stato fornito un esempio dettagliato utilizzando il campione C3 per illustrare il processo di determinazione dei punti limite di formabilità tramite il metodo dipendente dal tempo. Tuttavia, è fondamentale sottolineare che questo approccio analitico va esteso e applicato sistematicamente a tutti i campioni considerati nel nostro studio.

Ripetendo il procedimento descritto per ciascun campione, si è in grado di raccogliere una vasta gamma di dati, offrendo una visione completa delle deformazioni limite in diversi stati tensionali.

La Tabella 4.5, riassume i valori di ε_{1M} e ε_{2M} ottenuti da ciascun campione attraverso il metodo dipendente dal tempo, fornendo una panoramica chiara e comparativa delle prestazioni di formabilità.

Per visualizzare in maniera più intuitiva e completa l'andamento di tali valori nel contesto del Diagramma Limite di Formabilità (FLD), si procede con la sua rappresentazione grafica, illustrata nella Figura 4.28.

Dal diagramma, emergono discrepanze evidenti con i punti estremi della curva, i quali non si collocano perfettamente sulle rette delle tensioni uniassiale ed equiassiale. Questo fenomeno potrebbe essere attribuibile alla natura non isotropa del materiale, come è stato discusso nel Capitolo 4.3.6, il quale potrebbe dare origine a stati tensionali più complessi. Inoltre, durante le prove di trazione, la presenza di una geometria non particolarmente snella potrebbe favorire effetti di confinamento laterale, contribuendo alla formazione di uno stato tensionale non completamente uniassiale.

A differenza del metodo dipendente dalla posizione, utilizzato nel Capitolo 4.4.1, tutti i punti generati seguono l'andamento generale della curva in modo coerente, contribuendo a rendere i risultati più affidabili e meno soggetti a fattori indesiderati.

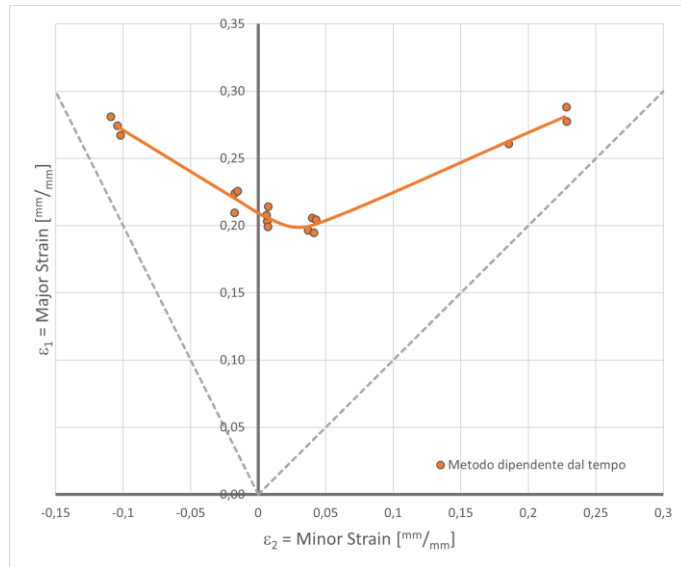


Figura 4.28: Diagramma Limite di Formabilità (FLD) ottenuto attraverso il metodo dipendente dal tempo.

Tabella 4.5: Deformazioni limite medie ($\epsilon_{1M} - \epsilon_{2M}$) ottenute attraverso il metodo dipendente dal tempo.

Campione	$\epsilon_{1M} \left[\frac{mm}{mm} \right]$	$\epsilon_{2M} \left[\frac{mm}{mm} \right]$
A1	0,2881	0,2282
A3	0,2607	0,1856
A4	0,2775	0,2286
B1	0,2057	0,0400
B2	0,2045	0,0428
B3	0,1966	0,0370
B4	0,1947	0,0413
C2	0,2032	0,0067
C3	0,2077	0,0063
C4	0,2141	0,0076
C5	0,1989	0,0073
D2	0,2241	-0,0171
D3	0,2256	-0,0150
D4	0,2097	-0,0174
E1	0,2811	-0,1091
E2	0,2671	-0,1018
E3	0,2743	-0,1041

5 Analisi agli Elementi finiti (FEM)

5.1 Introduzione al FEM

5.1.1 Il concetto di Analisi agli Elementi Finiti (FEM)

L'Analisi agli Elementi Finiti (FEM, dall'inglese Finite Element Method) è una metodologia numerica ampiamente utilizzata per studiare il comportamento dei materiali e delle strutture complesse.

Si basa sulla suddivisione del sistema in un gran numero di elementi finiti, i cui comportamenti vengono analizzati numericamente mediante l'approssimazione della soluzione di equazioni differenziali alle derivate parziali, consentendo una rappresentazione numerica del comportamento complessivo del sistema. [14][15]

Il sistema risolutivo approssimante è espresso dalla seguente equazione:

$$\underline{F} = \underline{K} \cdot \underline{u} + \underline{C} \cdot \underline{\dot{u}} + \underline{M} \cdot \underline{\ddot{u}}$$

Dove:

- \underline{F} è il vettore delle forze esterne;
- \underline{K} è la matrice di rigidità;
- \underline{C} è la matrice di smorzamento;
- \underline{M} è la matrice di massa;
- \underline{u} , $\underline{\dot{u}}$, $\underline{\ddot{u}}$ sono rispettivamente i vettori di spostamento, velocità e accelerazione.

Questo approccio fornisce una base per comprendere gli aspetti strutturali, termici, e fluidodinamici di un sistema, consentendo di simularne le condizioni reali e prevederne il comportamento in risposta alle diverse variabili, rendendolo uno strumento versatile ed essenziale in diverse discipline ingegneristiche.

5.1.2 Obiettivi delle simulazioni FEM in questo studio

Nel contesto di questa tesi, l'Analisi agli Elementi Finiti è stata impiegata come strumento fondamentale per una valutazione approfondita del comportamento della lamiera in lega di alluminio AA5182 durante il complesso processo di formatura.

L'obiettivo chiave nell'utilizzo del FEM è stato simulare in dettaglio il processo di stampaggio delle lamiere durante i test Nakajima, al fine di valutare l'influenza delle seguenti variabili sui risultati e ottimizzare le relative condizioni operative:

- Mesh-indipendenza (N_{el});
- Effetto dell'anisotropia (R_0);
- Attrito Punzone - Campione (μ_p);
- Attrito Flange - Campione (μ_f);
- Forza di serraggio (F_s).

Particolare attenzione è stata dedicata alla variabile dell'attrito tra punzone e campione, poiché la sua riduzione si è rivelata fondamentale per limitare il problema della doppia strizione. Questo studio mira ad ottenere risultati più accurati e replicabili, fornendo una base solida per l'ottimizzazione del processo di formatura.

5.1.3 Integrazione del diagramma FLD nel FEM per la prevenzione della strizione

L'instabilità del fenomeno della strizione rende difficile la sua previsione attraverso la sola analisi FEM. Proprio per questo motivo è stato svolto lo studio di questa tesi per la determinazione dei punti della FLC. Infatti, inserendo i dati della curva FLC nel modello FEM, è possibile migliorare significativamente la capacità di prevedere con precisione l'insorgere della strizione e, di conseguenza, ottimizzare i processi di formatura a freddo.

In sintesi, l'integrazione tra lo studio sperimentale della FLC e l'analisi predittiva del FEM, costituisce un approccio avanzato per affrontare la complessità della formatura a freddo, permettendone di ottimizzare i processi.

5.2 Modello FEM

Nel contesto di questa analisi, è stata adottata la dinamica esplicita per l'Analisi agli Elementi Finiti, utilizzando il software Simulia Abaqus.

A differenza del modello implicito, caratterizzato da una precisione di calcolo superiore, la dinamica esplicita viene scelta per la sua maggiore resistenza ai problemi di convergenza, conferendo stabilità al processo di simulazione e rivelandosi particolarmente adatto per gestire le dinamiche complesse coinvolte nella formatura delle lamiere. Questo perché la dinamica esplicita calcola direttamente l'accelerazione in un istante di tempo, e gli spostamenti vengono ottenuti integrando le accelerazioni e le velocità calcolate negli istanti precedenti.

Un parametro critico nella dinamica esplicita è il Time Period, che rappresenta il tempo totale della simulazione. È essenziale che questo tempo sia sufficientemente breve per diminuire il tempo di calcolo della simulazione, ma al contempo non così breve da far prevalere le forze d'inerzia, trascurabili nelle prove sperimentali a causa delle basse accelerazioni coinvolte, dovute alla durata delle prove di circa 30 secondi.

Sperimentando diversi valori compresi tra 0,01 e 1, è emerso che da 0,05 in su, le forze d'inerzia risultano sufficientemente trascurabili, garantendo risultati stabili e non dipendenti in modo significativo da questo parametro. La scelta di un Time Period di 0,1, dunque, consente una simulazione sufficientemente rapida senza compromettere la precisione dell'analisi.

Seguendo una struttura logica, i passaggi fondamentali per la creazione di un modello agli Elementi Finiti comprendono:

1. **Geometrie:** definizione della geometria semplificata della macchina Nakajima e del campione da simulare;
2. **Mesh:** suddivisione del modello in elementi finiti;
3. **Proprietà del materiale:** impostazione delle proprietà meccaniche precedentemente ricavate della lega di alluminio AA5182;
4. **Condizioni al contorno:** approfondimento sulle condizioni vincolari, sulla forza applicata dal premilamiera e sulle interazioni descritte dell'attrito.

5.2.1 Geometrie

Utilizzando il modellatore 3D di Abaqus, vengono disegnati i campioni A, B, C, D e le geometrie semplificate della macchina Nakajima. Si evidenzia che, sfruttando le simmetrie rispetto ai due piani verticali, la modellazione coinvolge solo un quarto del problema, ottimizzandone così la simulazione e riducendone i tempi di calcolo.

Per quanto riguarda il punzone (Figura 5.1 (a)), la flangia inferiore (Figura 5.1 (b)) e il premilamiera (Figura 5.1 (c)), vengono modellate solo le superfici che entrano in contatto con il campione e impostate come rigide, dato che sono realizzate in acciaio, un materiale significativamente più rigido dell'alluminio utilizzato per i campioni.

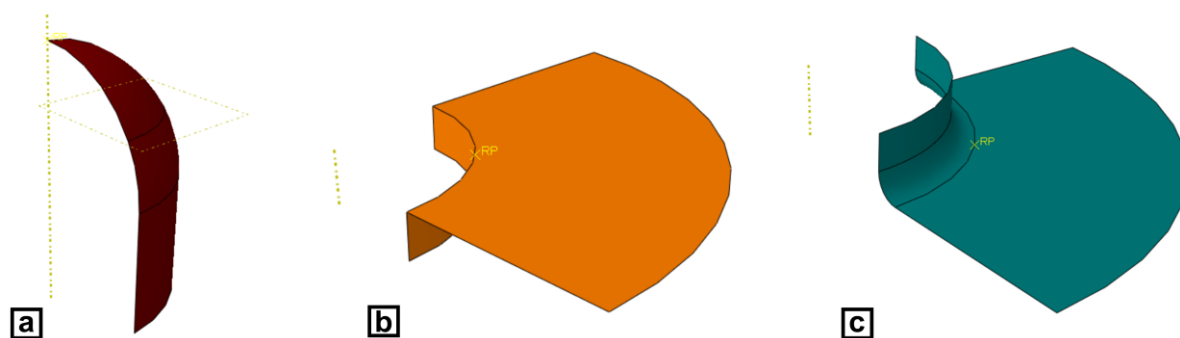


Figura 5.1: Disegni tridimensionali nel modello FEM dei componenti semplificati della macchina Nakajima: (a) punzone; (b) flangia inferiore; (c) premilamiera.

I campioni vengono modellati come corpi solidi deformabili. La loro forma inizia dal disegno di un disco circolare spesso 1,5 mm. Nonostante il campione reale abbia un diametro di Φ 200 mm, nel modello viene disegnato con un diametro di Φ 156 mm, corrispondente al diametro medio del dispositivo "rompigrinze". Tale scelta mira a vincolare successivamente lo spostamento radiale del campione per evitarne lo scorrimento. Infine si esegue l'operazione di taglio degli opportuni scarichi per ottenere le diverse geometrie da analizzare, illustrate nella Figura 5.2.

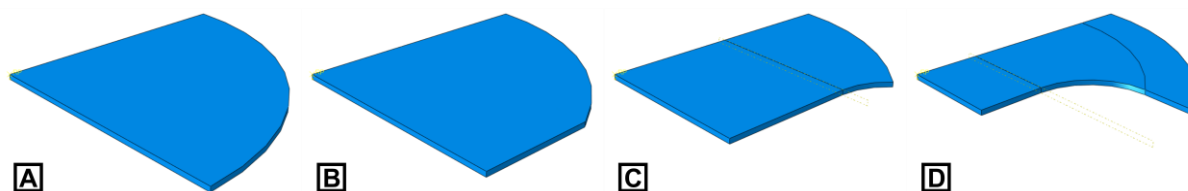


Figura 5.2: Disegni tridimensionali nel modello FEM dei campioni A, B, C, D.

In conclusione, viene creato l'assieme dei componenti in modo tale che il campione si trovi a contatto con la flangia inferiore e con il premilamiera, mentre il punzone si presenti tangente alla superficie inferiore del campione.

Al fine di agevolare la compressione dell'insieme, vengono fornite le seguenti rappresentazioni grafiche, considerando come esempio il campione di geometria C:

- Figura 5.3 (a): esploso dell'assieme;
- Figura 5.3 (b): assieme con un solo piano di simmetria, offrendo una prospettiva in sezione;
- Figura 5.3 (c): assieme con i componenti modellati per un quarto;
- Figura 5.3 (d): assieme con entrambi i piani di simmetria, consentendo di visualizzare il modello completo.

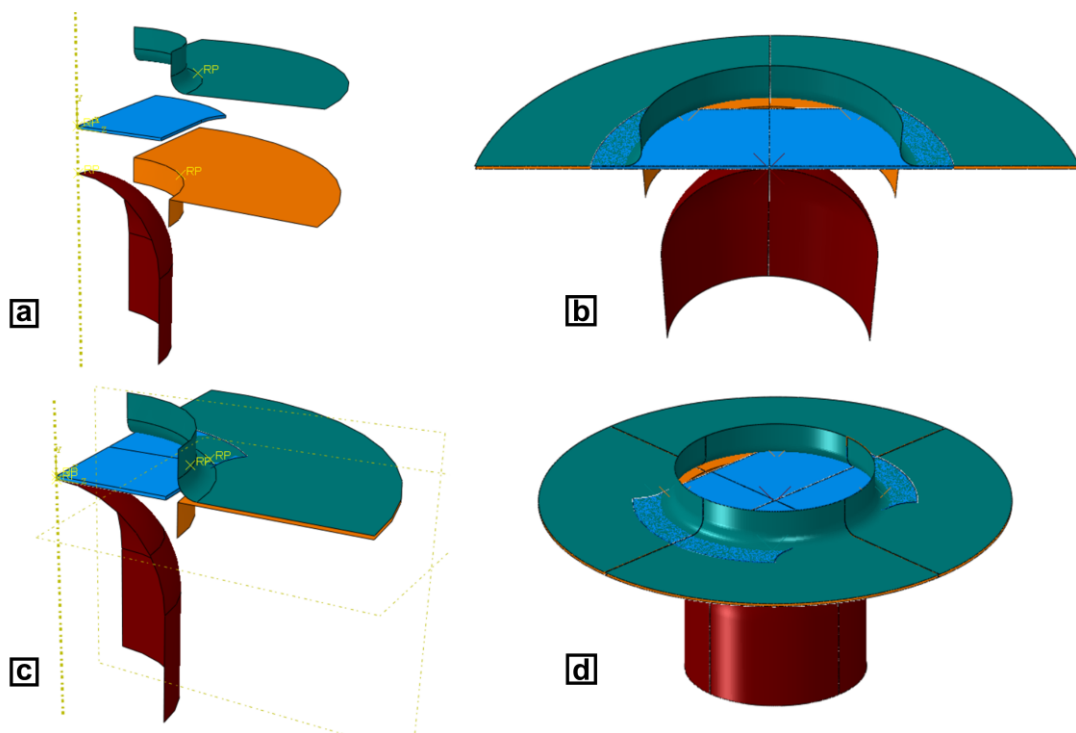


Figura 5.3: Assieme nel FEM del modello semplificato della macchina Nakajima con il campione di geometria C: (a) esploso; (b) prospettiva in sezione; (c) componenti modellati per un quarto; (d) modello completo.

5.2.2 Mesh

La generazione della mesh, è un passo caratterizzante dell'analisi agli Elementi Finiti (FEM). Rappresenta la discretizzazione della geometria in piccoli "elementi finiti", che traducono il problema fisico in un dominio discretizzato per facilitarne l'applicazione di metodi numerici per l'analisi.

La generazione accurata della mesh è essenziale per ottenere risultati affidabili e rappresentare correttamente il comportamento del sistema durante la simulazione. La forma, la dimensione e la disposizione degli elementi finiti influenzano direttamente la precisione e l'efficienza dell'analisi.

Particolarmente significativa è l'adozione di mesh strutturate, che consentono di avere gli elementi finiti organizzati in modo ordinato e regolare, seguendo uno schema strutturato, come una griglia o una rete.

Le mesh strutturate offrono diversi vantaggi:

- **Velocità di generazione:** la generazione della mesh risulta più veloce;
- **Stabilità numerica:** la distribuzione uniforme ed organizzata dei nodi degli elementi, migliora la stabilità numerica degli algoritmi di risoluzione;
- **Efficienza computazionale:** sono più efficienti dal punto di vista computazionale, specialmente per geometrie regolari e strutture reticolari;
- **Controllo sulla risoluzione:** è possibile avere un maggiore controllo sulla densità dei punti della mesh in determinate regioni, risultando utile quando si desidera concentrare la risoluzione in aree specifiche della geometria.

Tuttavia, è importante notare che la creazione di una mesh strutturata potrebbe risultare **complessa**, specialmente in contesti con geometrie complesse o irregolari, limitandone l'adattabilità.

Per quanto riguarda il punzone (Figura 5.4 (a)), la flangia inferiore (Figura 5.4 (b)) e il prelamiera (Figura 5.4 (c)), si procede con la generazione di una mesh caratterizzata da dimensioni globali approssimative degli elementi pari a 1 mm.

In particolare, si evidenzia dalla Figura 5.1 (a) che nel punzone è stata eseguita una partizione durante la creazione della geometria, in modo da agevolare la generazione di una mesh strutturata.

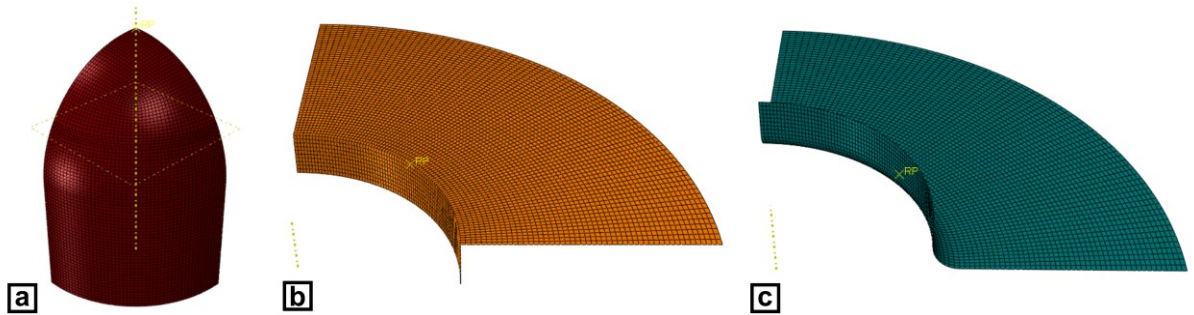


Figura 5.4: Generazione della mesh nel modello FEM dei componenti semplificati della macchina Nakajima: (a) punzone; (b) flangia inferiore; (c) prelamiera.

Per quanto riguarda i campioni, dalla Figura 5.2 (C) e dalla Figura 5.2 (D), è evidente che sono state eseguite partizioni durante la creazione delle geometrie dei campioni C e D, in modo da agevolare la generazione di una mesh strutturata.

Nella Figura 5.5 sono presentati esempi delle mesh generate per le quattro diverse geometrie dei campioni (A, B, C, D), consentendo di osservare come risulta strutturata. Al fine di migliorare la chiarezza delle figure, è stato utilizzato un solo elemento lungo lo spessore.

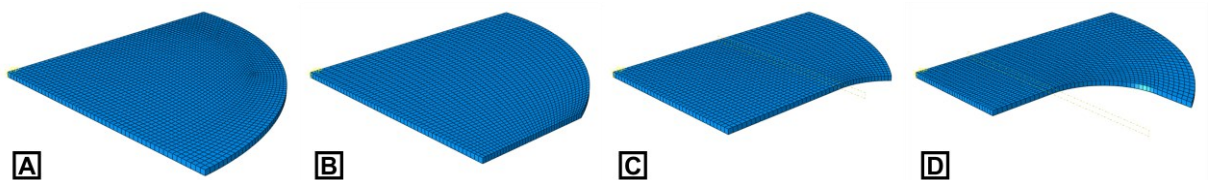


Figura 5.5: Generazione della mesh strutturata nel modello FEM dei campioni A, B, C, D.

Per quanto concerne la dimensione degli elementi della mesh per i campioni, si è scelto di adottare una mesh più densa, considerando che essi rappresentano l'oggetto principale di studio. Una mesh più fitta è vantaggiosa per aumentare l'accuratezza delle simulazioni, anche se ciò comporta un incremento del tempo computazionale.

Tale aumento è dovuto al fatto che il passo temporale di incremento (Δt) è proporzionale alla dimensione dell'elemento più piccolo della mesh, seguendo la formula:

$$\Delta t \propto \frac{L_{min}}{c}$$

Dove:

- L_{min} è la dimensione caratteristica dell'elemento più piccolo della mesh;
- $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \approx 5092 \left[\frac{m}{s} \right]$ è la velocità del suono nel materiale (alluminio).

Le dimensioni globali approssimative degli elementi sono state regolate in base al numero desiderato di elementi lungo lo spessore, che è stato scelto pari a 3.

A tal proposito, è stata condotta una mesh-indipendenza che sarà discussa nel Capitolo 5.4.1, al fine di determinare il numero minimo di elementi lungo lo spessore necessario per ottenere risultati indipendenti da tale parametro.

Considerando che lo spessore della lamiera è di 1,5 mm e si mira ad ottenere un numero di 3 elementi lungo lo spessore, ciò implica la generazione di una mesh con dimensioni globali approssimative degli elementi pari a 0,5 mm.

5.2.3 Materiale

Il passo successivo riguarda l'impostazione delle proprietà meccaniche della lega di alluminio AA5182, precedentemente ottenute nel Capitolo 4.3.

In particolare, le proprietà impostate comprendono:

- **Densità (ρ):** è essenziale notare che nei modelli espliciti di Abaqus, le unità di misura non sono specificate, e quindi è fondamentale inserirle in modo coerente. Nel caso della densità, andrebbe inserita come $\left[\frac{\text{tonn}}{\text{mm}^3}\right]$.

Tuttavia, per ottimizzare il tempo computazionale, è stata ridotta di un fattore di 1000, passando da $\rho = 2,7E - 09 \left[\frac{\text{tonn}}{\text{mm}^3}\right]$ a $\rho = 2,7E - 06 \left[\frac{\text{tonn}}{\text{mm}^3}\right]$, al fine di aumentare il passo temporale di incremento $\Delta t \propto \frac{L_{min}}{c}$ attraverso la diminuzione della velocità del suono nel materiale $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$;

- **Fase elastica:**
 - **Modulo di Young (E):** 70 000 [MPa];
 - **Coefficiente di Poisson (ν):** 0,33 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mm}}\right]$;
- **Fase plastica:**
 - **Modello di Voce a 3 parametri:** viene discretizzata la curva in 100 punti attraverso una discretizzazione con $\Delta\varepsilon^{pl} = 0,01$ e registrando i corrispondenti valori della tensione vera (σ_{true});
 - **Parametro di Lankford (R_0):** l'impostazione Potential consente di descrivere l'anisotropia del materiale attraverso la matrice \underline{R} . [16]
In assenza di dati sufficienti, si ipotizza un'anisotropia trasversale e si calcolano le seguenti componenti della matrice:
 - $R_{11} = R_{22} = R_{12} = R_{13} = R_{23} = 1$
 - $R_{33} = \sqrt{\frac{1+R_0}{2}} = \sqrt{\frac{1+0,60}{2}} = 0,8944$

Un'analisi più approfondita degli effetti dell'anisotropia sarà affrontata nel Capitolo 5.4.2.

5.2.4 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno rivestono un ruolo fondamentale nella soluzione dei problemi agli Elementi Finiti. La corretta definizione di tali condizioni, consente di modellare in modo accurato e realistico il comportamento strutturale del sistema.

Le principali condizioni al contorno impostate, possono essere classificate come:

- **Vincoli:** definiscono le relazioni geometriche e di movimento tra i diversi componenti del modello:
 - **Campione:** vincolato sulla superficie cilindrica esterna, corrispondente alla posizione del dispositivo “rompigrinze”, in modo da permettere la sola traslazione verticale, gestita dalla forza di serraggio del premilamiera;
 - **Flangia inferiore:** completamente incastrata;
 - **Premilamiera (flangia superiore):** vincolato in modo da permettere la sola traslazione verticale, gestita dalla forza di serraggio;
 - **Punzone:** vincolato in modo da permettere uno spostamento verticale con velocità costate e pari alla corsa ottenuta nelle prove sperimentali;
 - **Simmetrie:** avendo modellato il problema solo per un quarto del modello, vengono inserite le condizioni di simmetria rispetto ai due piani verticali, ortogonali tra loro;
- **Carichi:** rappresentano le forze e i momenti esterni applicati alla struttura:
 - **Forza di serraggio (F_s):** pari a $F_s = 50\,000\ [N]$ ed esercitata verso il basso dal premilamiera. È importante notare che questa forza corrisponde solo ad un quarto della forza totale, pari a $F_{s_tot} = 4 F_s = 200\,000\ [N]$. La scelta di questo valore, tiene conto del fatto che le forze massime durante le prove sul campione di geometria A, le più elevate, sono state dell'ordine di $F_{s_tot} = 80\,000\ [N]$.
È rilevante evidenziare che, come sarà discusso nel Capitolo 5.4.5, il valore di questa forza ha un'influenza limitata sui risultati della simulazione.

- **Interazioni:** definiscono il contatto con attrito tra diverse superfici del modello:
 - Attrito Punzone - Campione (μ_p): è stato fissato un coefficiente di attrito pari a $\mu_p = 0,034$.
Tuttavia, la sua influenza sui risultati sarà trattata nel Capitolo 5.4.3;
 - Attrito Flangie - Campione (μ_f): è stato fissato un coefficiente di attrito pari a $\mu_f = 0,61$, valore tabellato per il contatto tra l'acciaio del punzone e l'alluminio della lamiera.
Tuttavia, la sua influenza sui risultati sarà trattata nel Capitolo 5.4.4.

5.3 Risultati FEM

Una volta conclusa la fase di definizione del modello, bisogna avviare il calcolo della simulazione, durante il quale vengono risolte le equazioni discretizzate.

Tra i risultati di particolare interesse che sono stati analizzati e che costituiranno il focus della valutazione, figurano:

- Curve delle deformazioni principali ($\varepsilon - dist$);
- Curva della forza del punzone ($F_p - w_p$);
- Tensione equivalente di Von Mises (σ_{vm}).

Questi dati permettono di valutare il modello e di trarre conclusioni significative riguardo alla sua validità e alle sue potenziali applicazioni pratiche.

Nei capitoli successivi, a scopo dimostrativo, verranno analizzati i risultati relativi ai campioni di geometria C.

5.3.1 Curve delle deformazioni principali ($\varepsilon - dist$)

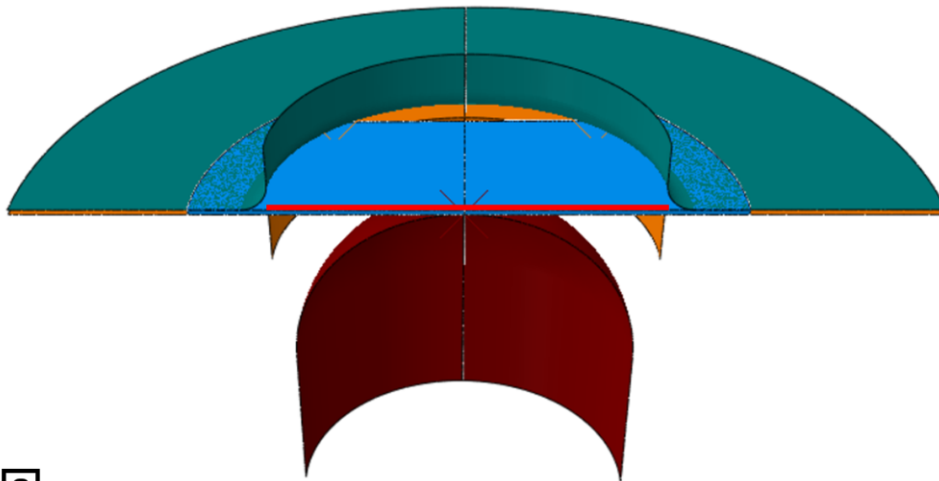
Le prime curve esaminate riguardano le deformazioni lungo le 3 direzioni principali ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$) rappresentate in funzione della posizione sulla deformata ($dist$). Queste curve sono confrontate con quelle ottenute nel Capitolo 4.4.1 mediante il metodo dipendente dalla posizione, che valuta le sezioni trasversali alla frattura.

La sezione trasversale selezionata nel modello FEM, indicata in rosso nella Figura 5.6 (a), è posizionata lungo il piano di simmetria e sulla superficie superiore del campione, in corrispondenza della quale è stata effettuata l'acquisizione tramite la Digital Image Correlation (DIC).

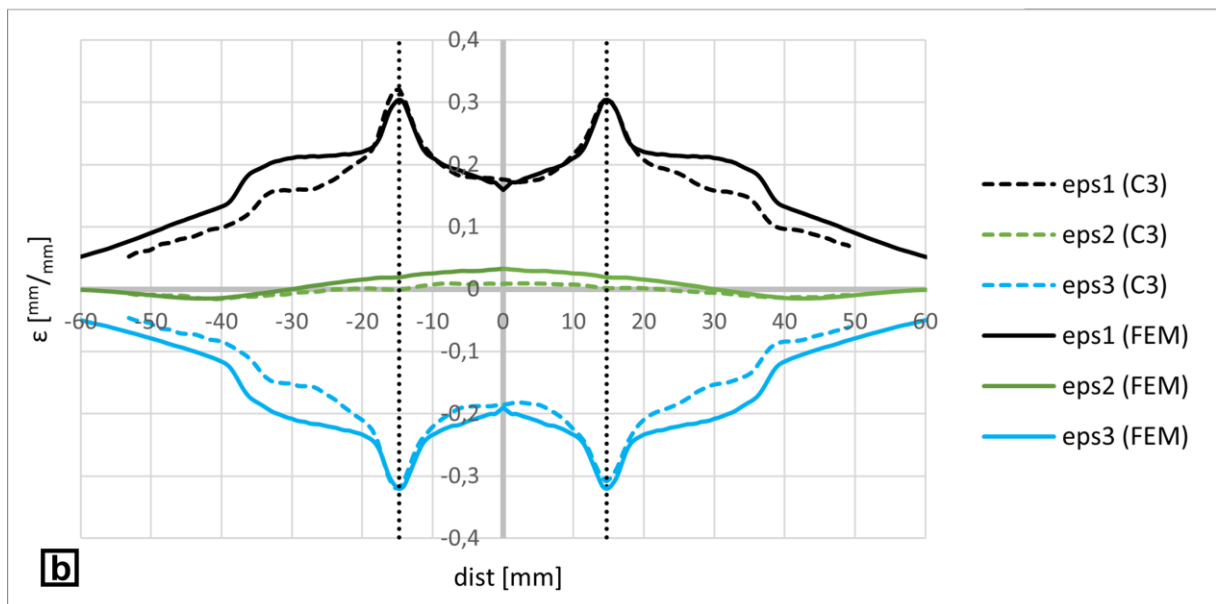
Nella Figura 5.6 (b), viene presentato il confronto delle curve delle deformazioni principali ε_1 (curve nere), ε_2 (curve verdi), ε_3 (curve azzurre), ottenute tramite FEM (linee continue) con quelle ottenute sperimentalmente per il campione di geometria C3 (linee tratteggiate).

Per generare queste curve, è stato seguito un approccio iterativo al fine di ottimizzare i parametri precedentemente impostati, con l'obiettivo di ottenere risultati simili, o almeno comparabili, in termini di:

- Valori delle 3 deformazioni lungo tutte le curve;
- Posizione delle fratture rispetto all'apice della cupola (rette verticali);
- Posizione dei 2 picchi esterni più bassi.



a



b

Figura 5.6: Curve delle deformazioni principali (ϵ - dist) nel modello FEM del campione di geometria C: (a) sezione trasversale alla frattura; (b) confronto con i risultati sperimentali del campione C3.

Nella Figura 5.7 sono presentati i risultati relativi alle mappe delle deformazioni principali ε_1 (Figura 5.7 (a)), ε_2 (Figura 5.7 (b)), ε_3 (Figura 5.7 (c)), ottenute nel modello FEM per il campione di geometria C.

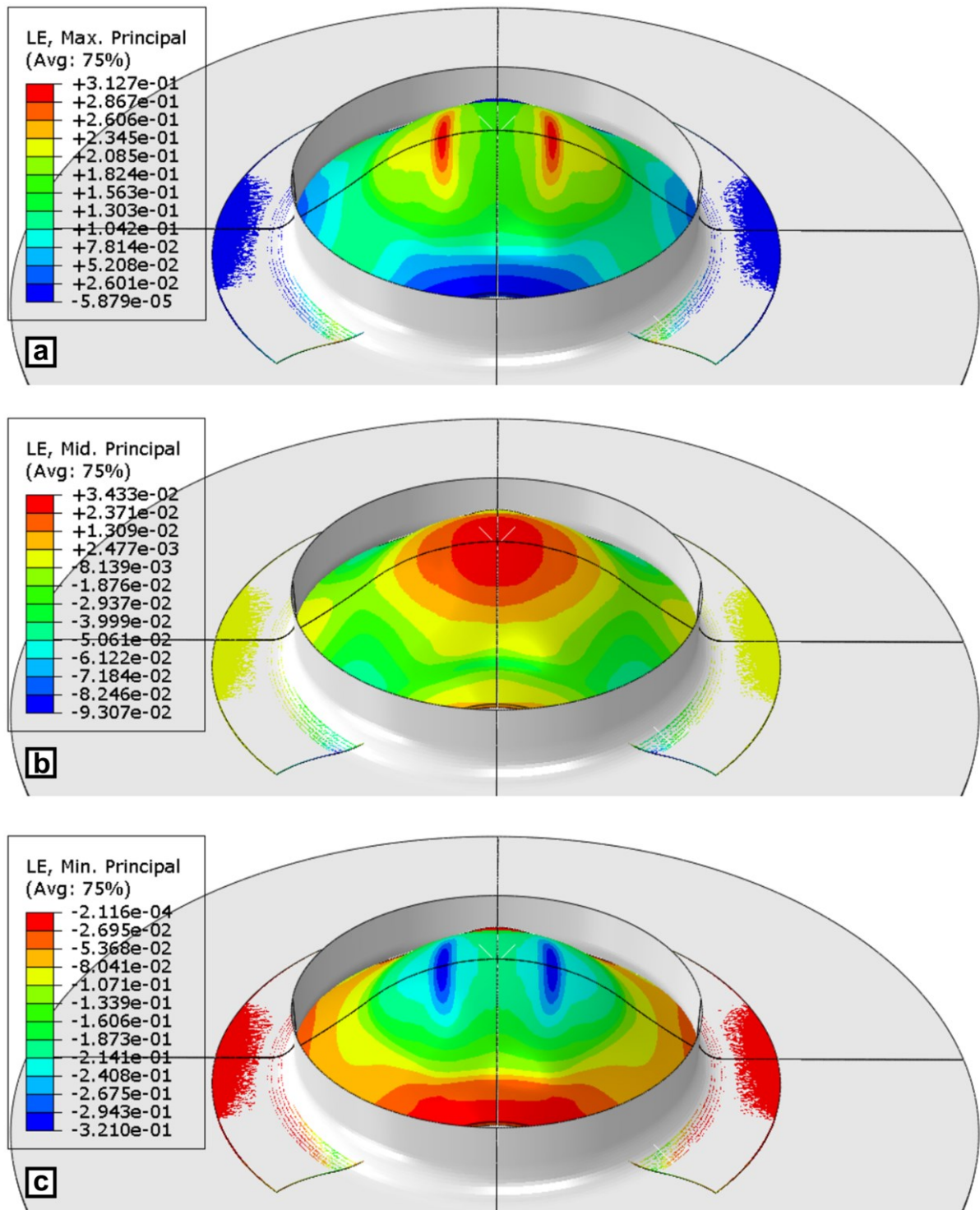


Figura 5.7: Mappe delle deformazioni principali (ε) nel modello FEM del campione di geometria C:

(a) deformazione ε_1 ; (b) deformazione ε_2 ; (c) deformazione ε_3 .

5.3.2 Curva della forza del punzone ($F_p - w_p$)

Per analizzare la curva Forza - Spostamento ($F_p - w_p$) del punzone, è necessario prima ricavarla dalle prove sperimentali. I dati acquisiti comprendono:

- **Cella di carico:** la curva della forza del punzone in funzione del tempo, $F_{punzone} = F_{punzone}(t_{punzone})$, è rappresentata nella Figura 5.8 (a);
- **Digital Image Correlation (DIC):** la curva dello spostamento in funzione del tempo, $w_{DIC} = w(t_{DIC})$, è rappresentata nella Figura 5.8 (b).

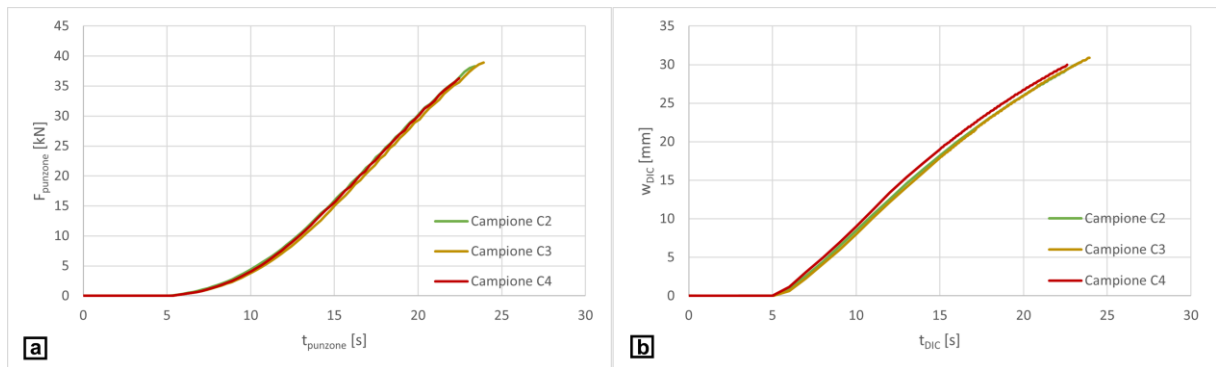


Figura 5.8: Dati acquisiti dalle prove Nakajima sui campioni C2, C3, C4:

(a) Forza - Tempo ($F - t$) della cella di carico; (b) Spostamento - Tempo ($w - t$) della Digital Image Correlation.

Entrambe le curve sono rappresentate in funzione del tempo. Tuttavia, poiché derivano da acquisizioni indipendenti con frequenze di campionamento e istanti iniziali diversi, è necessario riscrivere la forza come $F_{punzone} = F_{punzone}(t_{DIC})$.

Dopo questo adeguamento, è possibile ottenere facilmente le curve sperimentali Forza - Spostamento ($F_p - w_p$) presenti nella Figura 5.9.

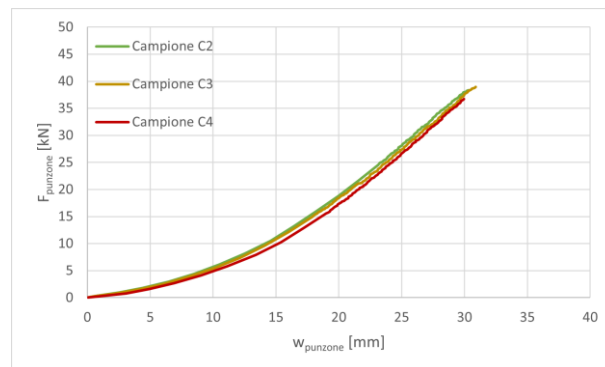


Figura 5.9: Curve sperimentali Forza - Spostamento ($F_p - w_p$) del punzone dei campioni C2, C3, C4.

Nella Figura 5.10, viene illustrato il confronto tra la curva della forza del punzone ottenuta tramite FEM (rappresentata dalla curva blu) e quelle ottenute sperimentalmente per i campioni C2, C3 e C4.

Per generare tali curve, è stato seguito un approccio iterativo al fine di ottimizzare i parametri precedentemente impostati, con l'obiettivo di ottenere risultati simili nell'andamento della curva.

È importante notare che, mentre le prove sperimentali raggiungono la strizione ad una corsa del punzone di circa $w_p \approx 30$ [mm], nel modello FEM questa si verifica un paio di millimetri più avanti. Ciò è dovuto al fatto che l'instabilità del fenomeno della strizione rende difficile la sua previsione tramite la sola analisi FEM.

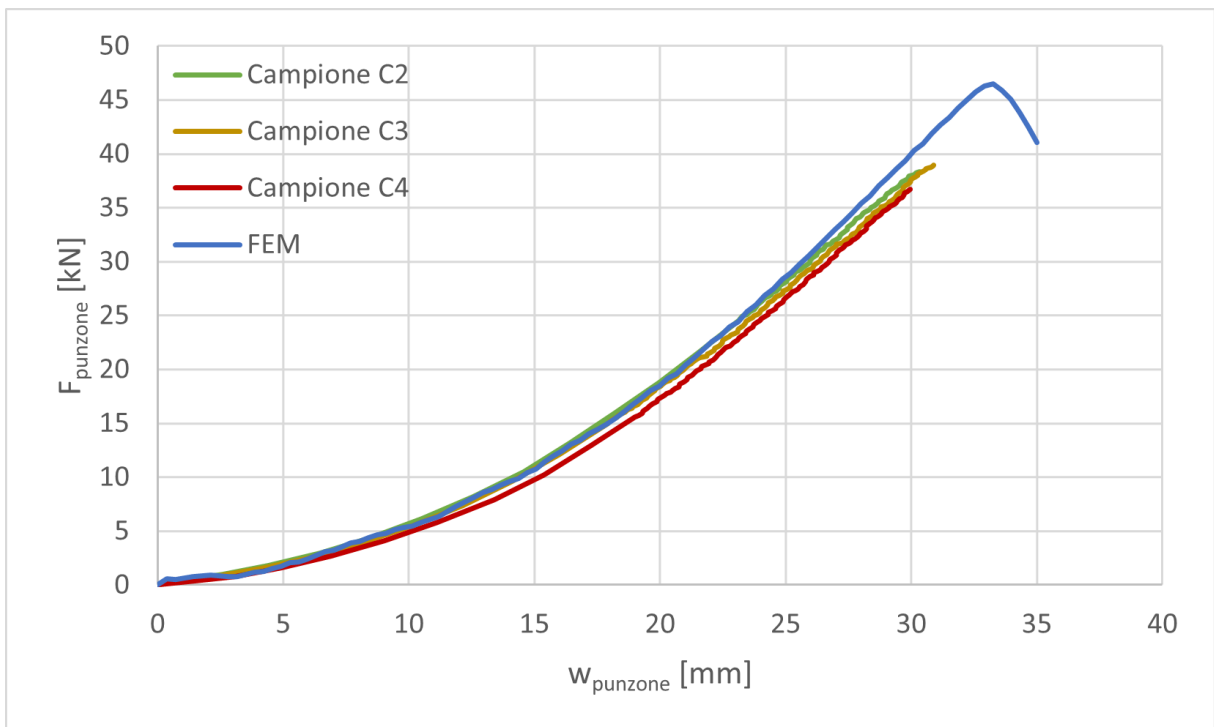


Figura 5.10: Confronto della curve della forza del punzone ($F_p - w_p$) nel modello FEM con i risultati sperimentali dei campioni C2, C3, C4.

5.3.3 Tensione equivalente di Von Mises (σ_{vm})

La tensione equivalente di Von Mises (σ_{vm}) è un parametro per valutare la resistenza di un materiale soggetto a carichi complessi. Essa tiene conto delle tensioni principali e del loro orientamento nello spazio, fornendo un'unica misura scalare della massima tensione equivalente nel materiale.

Questa tensione viene calcolata utilizzando le tensioni principali ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) presenti in un punto del materiale, attraverso la seguente formula:

$$\sigma_{vm} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$$

Ne contesto delle simulazione FEM, la tensione di Von Mises viene calcolata per ogni elemento finito del modello, consentendo di identificare le regioni critiche soggette a tensioni elevate che potrebbero portare a deformazioni permanenti o alla rottura del materiale.

Nella Figura 5.11 sono presentati i risultati relativi alla mappa delle tensioni equivalenti di Von Mises ottenute nel modello FEM per il campione di geometria C.

Si osserva che il valore massimo assunto è di $\sigma_{vm_max} = 370,2 [MPa]$, valore confrontabile con le tensioni di rottura ottenute nelle prove sperimentali di trazione del Capitolo 4.3.3, pari a circa $\sigma_R \approx 353 [MPa]$.

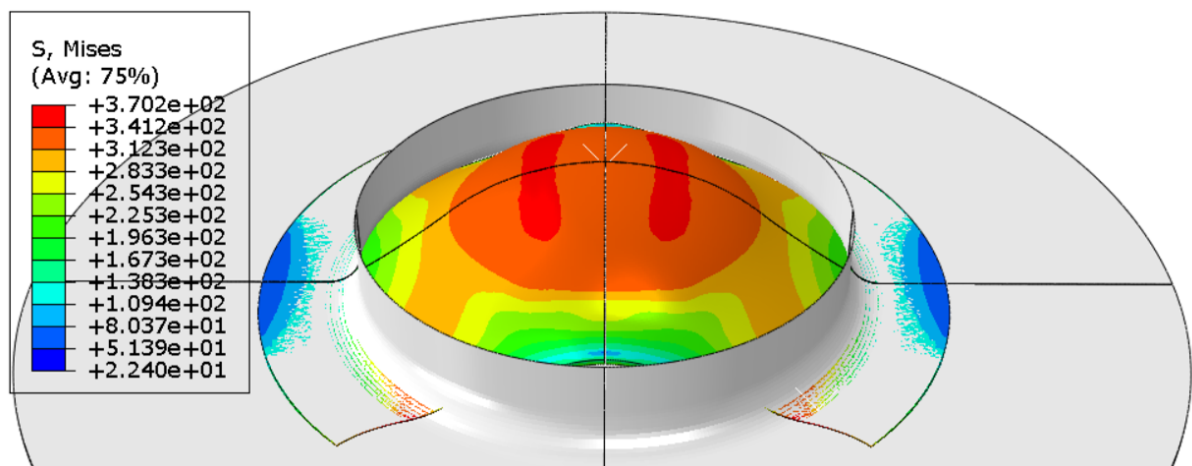


Figura 5.11: Mappa della tensione di Von Mises (σ_{vm}) nel modello FEM del campione di geometria C.

5.4 Influenza delle variabili sui risultati FEM

Come già anticipato, è consigliato analizzare come diverse variabili influenzino gli esiti delle Analisi agli Elementi Finiti. Questo approfondimento mira a semplificare e velocizzare la creazione di un modello il più possibile fedele al caso reale.

Le variabili esaminate includono:

- Mesh-indipendenza (N_{el});
- Effetto dell'anisotropia (R_0);
- Attrito Punzone - Campione (μ_p);
- Attrito Flange - Campione (μ_f);
- Forza di serraggio (F_s).

Queste sono state analizzate confrontando come ciascuna influenzi il comportamento del sistema durante la simulazione, analizzando i risultati descritti nel Capitolo 5.3:

- Curve delle deformazioni principali ($\varepsilon - dist$);
- Curva della forza del punzone ($F_p - w_p$);
- Tensione equivalente di Von Mises (σ_{vm}).

5.4.1 Mesh-indipendenza (N_{el})

La mesh-indipendenza, si riferisce alla capacità di ottenere risultati affidabili indipendentemente dalla densità della mesh utilizzata.

La sua verifica coinvolge la realizzazione di diverse simulazioni con differenti risoluzioni di mesh, con l'obiettivo di determinare il numero minimo di elementi necessario per ottenere risultati stabili al variare della densità della mesh. Una volta raggiunta la mesh-indipendenza, si può avere più fiducia che i risultati dell'analisi siano affidabili e rappresentativi del comportamento reale della struttura.

Per quantificare la densità della mesh, è stato scelto di utilizzare come parametro di riferimento il numero di elementi lungo lo spessore (N_{el}). Di conseguenza, la mesh-indipendenza è stata valutata determinando il numero minimo di elementi lungo lo spessore necessario per ottenere risultati indipendenti da questo parametro.

Le sperimentazioni hanno coinvolto un numero di elementi lungo lo spessore variabile da 1 a 5, come illustrato nella Figura 5.12.

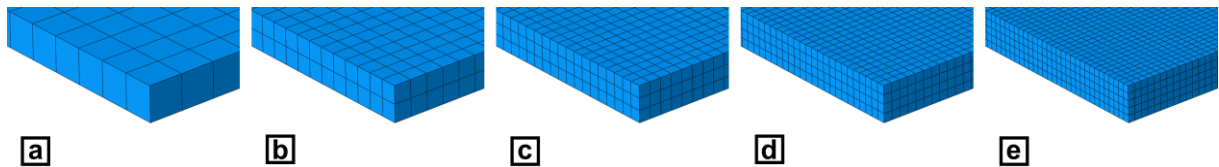


Figura 5.12: Mesh nel FEM del campione di geometria C con diverso numero di elementi lungo lo spessore (N_{el}):
(a) 1 elemento; (b) 2 elementi; (c) 3 elementi; (d) 4 elementi; (e) 5 elementi.

Nella Figura 5.13 (a), sono confrontate le curve delle deformazioni principali ε_1 , ε_2 , ε_3 , al variare del numero di elementi lungo lo spessore (N_{el}). Si fa notare che, per una migliore chiarezza visiva, nella figura sono rappresentate solo le curve delle simulazioni con 1, 3 e 5 elementi lungo lo spessore.

Emergono notevoli somiglianze tra le curve, ad eccezione della simulazione con 1 solo elemento, che non presenta le deformazioni locali a campana tipiche della fase di strizione.

Nella Figura 5.13 (b), sono invece confrontate le curve della forza esercitata dal punzone (F_p) in funzione del suo spostamento (w_p), al variare del numero di elementi lungo lo spessore (N_{el}). Anche in questo caso, si riscontrano similitudini dell'andamento delle curve, ad eccezione di quella con un solo elemento, che non presenta la strizione nella fase finale, e presenta oscillazioni dei risultati durante l'intera simulazione.

Infine, nella Tabella 5.1, sono riportati i valori massimi della tensione equivalente di Von Mises (σ_{vm_max}) al variare del numero di elementi lungo lo spessore (N_{el}).

Concludendo, dall'analisi dei risultati emerge che, sebbene l'indipendenza della mesh sia raggiunta già con 2 elementi, è stata scelta una risoluzione di 3 elementi per garantire maggiore affidabilità.

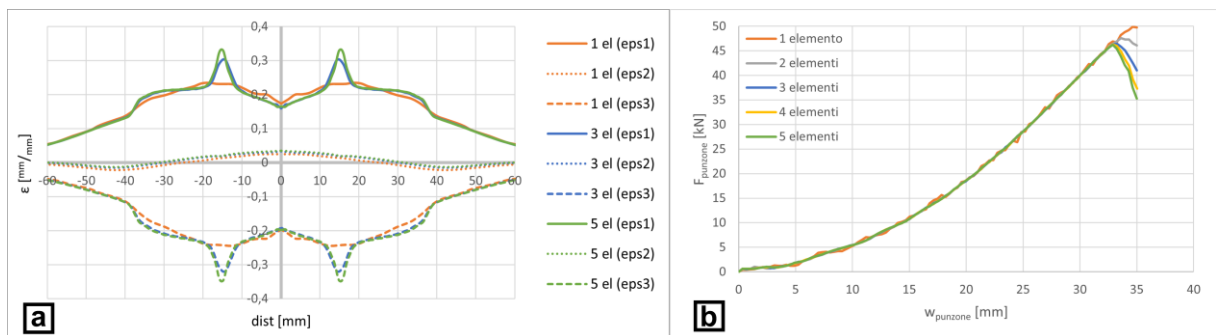


Figura 5.13: Confronto dei risultati al variare del numero di elementi lungo lo spessore (N_{el}) nel modello FEM del campione di geometria C: (a) curve ϵ - dist; (b) curve F_p - w_p .

Tabella 5.1: Confronto delle tensioni equivalenti massime di Von Mises (σ_{vm_max}) al variare del numero di elementi lungo lo spessore (N_{el}) nel modello FEM del campione di geometria C.

Elementi lungo lo spessore (N_{el})	σ_{vm_max} [MPa]
1	357,3
2	365,9
3	370,2
4	371,0
5	372,2

5.4.2 Anisotropia ($\underline{\underline{R}}$)

L'effetto dell'anisotropia, introdotto nel Capitolo 4.3.6, viene ora analizzato utilizzando la matrice di anisotropia ($\underline{\underline{R}}$) di Abaqus e considerando tre casi specifici:

- **Materiale isotropo:**

Per un materiale isotropo, tutte le componenti della matrice $\underline{\underline{R}}$ sono unitarie:

$$R_{11} = R_{22} = R_{33} = R_{12} = R_{13} = R_{23} = 1$$

- **Materiale con anisotropia trasversale:**

Poiché i provini disponibili sono stati quelli tagliati longitudinalmente alla direzione di laminazione (0°), viene impedito il calcolo dei parametri R_{45} e R_{90} .

Tuttavia, l'ipotesi di anisotropia trasversale suppone $R_0 = R_{45} = R_{90} = 0,60$.

Le componenti della matrice $\underline{\underline{R}}$ sono quindi calcolate come segue: [16]

$$R_{11} = R_{22} = R_{12} = R_{13} = R_{23} = 1$$

$$R_{33} = \sqrt{\frac{1 + R_0}{2}} = 0,8944$$

- **Materiale con anisotropia planare:**

Per analizzare il comportamento con un'anisotropia planare, si fa riferimento ai parametri di Lankford ottenuti per le 3 direzioni negli articoli [8][9]:

- $R_0 = 0,642$;
- $R_{45} = 1,039$;
- $R_{90} = 0,829$.

Di conseguenza è possibile calcolare le componenti della matrice $\underline{\underline{R}}$ come: [16]

$$R_{11} = R_{13} = R_{23} = 1$$

$$R_{22} = \sqrt{\frac{R_{90} (R_0 + 1)}{R_0 (R_{90} + 1)}} = 1,0767$$

$$R_{33} = \sqrt{\frac{R_{90} (R_0 + 1)}{(R_0 + R_{90})}} = 0,9620$$

$$R_{12} = \sqrt{\frac{3 R_{90} (R_0 + 1)}{(R_0 + R_{90})(2 R_{45} + 1)}} = 0,9497$$

Nella Figura 5.14 (a), sono confrontate le curve delle deformazioni principali $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, sotto diverse condizioni di anisotropia del materiale.

Nella Figura 5.14 (b), sono invece confrontate le curve della forza esercitata dal punzone (F_p) in funzione del suo spostamento (w_p), considerando diverse condizioni di anisotropia del materiale.

Entrambe le figure evidenziano che con una condizione di anisotropia trasversale si riesce ad ottenere la strizione per una corsa minore del punzone. Seguono la condizione di anisotropia planare e infine il caso isotropo.

Infine, nella Tabella 5.2, sono riportati i valori massimi della tensione equivalente di Von Mises (σ_{vm_max}) sotto diverse condizioni di anisotropia del materiale. Si osservano valori identici per le due condizioni di anisotropia del materiale, mentre un valore maggiore per la condizione di isotropia.

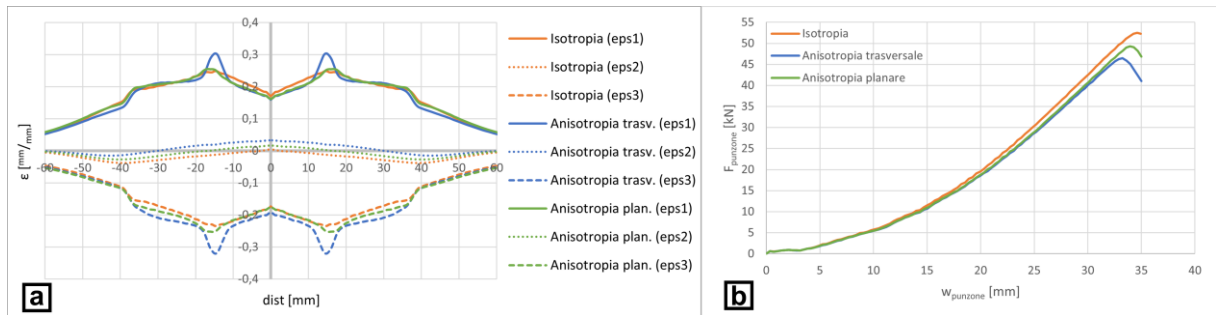


Figura 5.14: Confronto dei risultati con diverse condizioni di anisotropia nel modello FEM del campione di geometria C: (a) curve $\varepsilon - dist$; (b) curve $F_p - w_p$.

Tabella 5.2: Confronto delle tensioni equivalenti massime di Von Mises (σ_{vm_max}) con diverse condizioni di anisotropia nel modello FEM del campione di geometria C.

Condizione	σ_{vm_max} [MPa]
Isotropia	374,2
Anisotropia trasversale	370,2
Anisotropia planare	370,2

5.4.3 Attrito Punzone - Campione (μ_p)

Come già spiegato nel Capitolo 3, l'attrito eccessivo tra punzone e campione (μ_p) può portare al problema della doppia strizione simmetrica rispetto al vertice della cupola, e un sistema tribologico ottimale contribuisce significativamente a ridurre questo problema.

Per valutare l'influenza di questo parametro sui risultati sono stati scelti i seguenti sistemi tribologici di riferimento:

- **Attrito nullo: $\mu_p = 0$**

È la condizione ideale, in cui il problema della doppia strizione è minimizzato poiché non vi è attrito tra il punzone e il campione;

- **Teflon - Teflon lubrificato: $\mu_p = 0,034$**

È la condizione reale con il più basso coefficiente di attrito che si è riusciti ad ottenere in questo studio;

- **Acciaio - Alluminio lubrificato: $\mu_p = 0,100$**

Consiste nell'utilizzare del lubrificante nell'interfaccia Punzone - Campione, ma senza l'utilizzo di teflon;

- **Acciaio - Alluminio: $\mu_p = 0,610$**

Consiste di non attuare misure per ridurre l'attrito, risultando il caso peggiore.

Nella Figura 5.15 (a), sono confrontate le curve delle deformazioni principali $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, in diverse condizioni di attrito tra il punzone e il campione.

In generale, si osserva che un aumento dell'attrito, porta la doppia strizione ad allontanarsi dalla zona centrale del campione, e il materiale compreso tra i due picchi tende a deformarsi in maniera minore, poiché l'eccessivo attrito lo impedisce. Nella zona esterna ai due picchi, i valori delle deformazioni risultano poco influenzati da questo parametro.

Si nota infine che, nonostante la curva arancione presenti un caso con attrito nullo, il problema della doppia strizione si presenta comunque, seppur in maniera molto ridotta, come ci si aspettava.

Nella Figura 5.15 (b), sono invece confrontate le curve della forza esercitata dal punzone (F_p) in funzione del suo spostamento (w_p), considerando diverse condizioni di attrito tra il punzone e il campione.

I risultati delle forze sono molto simili per le prime tre curve, che comprendono valori di attrito molto bassi. Tuttavia, per l'ultima curva, che presenta un elevato attrito, l'andamento si discosta leggermente durante la prova, e si osserva che la strizione avviene in maniera molto anticipata rispetto alle altre, in termini di corsa del punzone.

Infine, nella Tabella 5.3, sono riportati i valori massimi della tensione equivalente di Von Mises (σ_{vm_max}), considerando diverse condizioni di attrito tra il punzone e il campione. Si osservano valori molto simili per le prime tre prove, che comprendono valori di attrito molto bassi. Tuttavia, per l'ultima prova, che presenta un elevato attrito, i valori risultano maggiorati a causa della zona di strizione in fase avanzata.

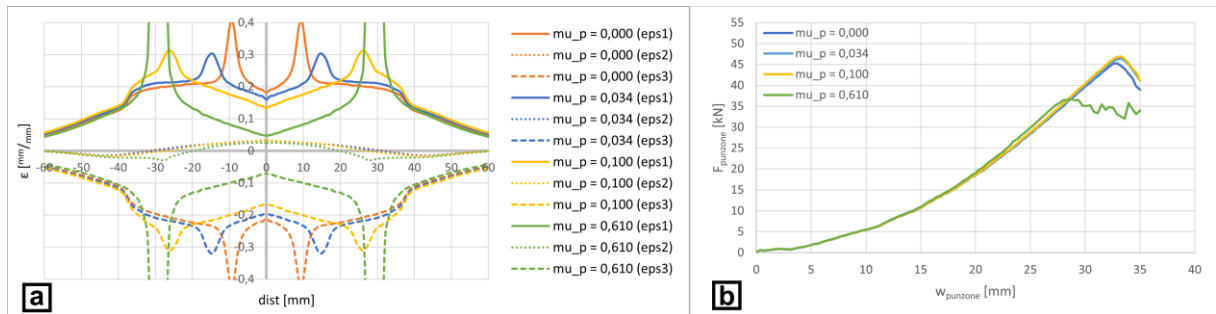


Figura 5.15: Confronto dei risultati con diversi coefficienti di attrito Punzone - Campione (μ_p) nel modello FEM del campione di geometria C: (a) curve ϵ - dist; (b) curve F_p - w_p .

Tabella 5.3: Confronto delle tensioni equivalenti massime di Von Mises (σ_{vm_max}) con diversi coefficienti di attrito Punzone - Campione (μ_p) nel modello FEM del campione di geometria C.

Sistema tribologico	Coefficiente di attrito Punzone - Campione (μ_p)	σ_{vm_max} [MPa]
Attrito nullo	0,000	368,9
Teflon - Teflon lubrificato	0,034	370,2
Acciaio - Alluminio lubrificato	0,100	370,3
Acciaio - Alluminio	0,610	385,0

5.4.4 Attrito Flange - Campione (μ_f)

Un altro aspetto da considerare che potrebbe influenzare i risultati, è l'attrito tra le flange e il campione (μ_f). Questo poiché durante la prova, il campione risulta vincolato sul dispositivo "rompigrinze", mentre nella zona interna a questo, è libero di scorrere deformandosi.

Per valutare l'influenza di questo parametro sui risultati, sono stati considerati i seguenti valori di attrito:

- **Attrito nullo: $\mu_f = 0$**

È la condizione ideale, in cui non vi è attrito tra le flange e il campione;

- **Acciaio - Alluminio: $\mu_p = 0,61$**

È la condizione reale, in cui vi è attrito tra le flange e il campione;

- **Attrito eccessivo: $\mu_p = 2,00$**

Non ha un corrispondente significato fisico, ma aiuta a comprendere in maniera più approfondita gli effetti di come questo influenza i risultati.

Nella Figura 5.16 (a), sono confrontate le curve delle deformazioni principali $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, in diverse condizioni di attrito tra le flange e il campione.

Si osserva che anche aumentando significativamente questo valore, la posizione della doppia strizione rimane pressoché identica.

Tuttavia, si nota una differenza sostanziale nell'istante di inizio della strizione, che risulta anticipata in termini di corsa del punzone. Questo è dovuto al fatto che la lunghezza radiale di deformazione utile del campione tende a diminuire, poiché l'attrito impedisce la deformazione della porzione compresa tra le due flange.

Nella Figura 5.16 (b), sono invece confrontate le curve della forza esercitata dal punzone (F_p) in funzione del suo spostamento (w_p), considerando diverse condizioni di attrito tra le flange e il campione.

Si osserva che i risultati delle forze risultano simili, nonostante valori molto differenti del coefficiente di attrito. Le piccole differenze che si notano sono che aumentando questo coefficiente, la forza necessaria al punzone aumenta leggermente per contrastare quella di attrito, e l'istante di inizio della strizione risulta anticipata, in termini di corsa del punzone.

Infine, nella Tabella 5.4, sono riportati i valori massimi della tensione equivalente di Von Mises (σ_{vm_max}), considerando diverse condizioni di attrito tra le flange e il campione. Si osservano valori molto simili per le prime due prove, che comprendono valori di attrito sufficientemente realistici. Tuttavia, per l'ultima prova, che presenta un elevato attrito, i valori risultano maggiorati a causa della zona di strizione in fase avanzata.

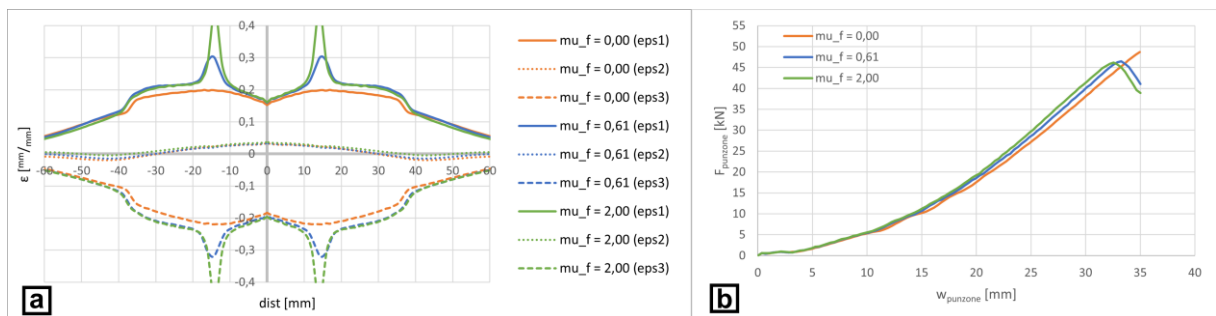


Figura 5.16: Confronto dei risultati con diversi coefficienti di attrito Flange - Campione (μ_f) nel modello FEM del campione di geometria C: (a) curve ϵ - dist; (b) curve F_p - w_p .

Tabella 5.4: Confronto delle tensioni equivalenti massime di Von Mises (σ_{vm_max}) con diversi coefficienti di attrito Flange - Campione (μ_f) nel modello FEM del campione di geometria C.

Sistema tribologico	Coefficiente di attrito Flange - Campione (μ_f)	σ_{vm_max} [MPa]
Attrito nullo	0,00	370,0
Acciaio - Alluminio	0,61	370,2
Attrito eccessivo	2,00	378,9

5.4.5 Forza di serraggio (F_s)

La forza tangenziale di attrito tra le flange e il campione (F_t) è calcolata come il prodotto tra il coefficiente di attrito (μ_f), discusso nel Capitolo 5.4.4, e la forza normale alle superfici (F_n), secondo la relazione $F_t = \mu_f \cdot F_n$.

A sua volta, la forza F_n dipende sia dalla reazione alla forza esercitata dal punzone (F_p), sia dalla forza di serraggio del campione (F_s) esercitata dalla flangia superiore tramite il serraggio manuale dei bulloni.

In questa sezione, viene analizzato come la forza di serraggio del campione (F_s) influisca sui risultati delle simulazioni FEM nelle seguenti situazioni:

- **Flangia superiore vincolata: $F_s = 0$**

È la condizione in cui non vi è una forza di serraggio del campione, ma la forza normale dipende solo dalla reazione alla forza esercitata dal punzone;

- **Forza di serraggio reale: $F_s = 200\,000$ [N]**

È la condizione reale, in cui vi è una forza di serraggio del campione;

- **Forza di serraggio eccessiva: $F_s = 2\,000\,000$ [N]**

Questo risulta essere un valore eccessivo, ma consente di capire in maniera più approfondita come questa forza influenzi i risultati.

La scelta del valore reale, tiene in considerazione il fatto che le forze massime raggiunte durante le prove sul campione di geometria A, le più elevate, sono state dell'ordine di $F_s = 80\,000$ [N]. Mentre l'utilizzo di forze di serraggio superiori a $F_s = 2\,000\,000$ [N] risulterebbero eccessive, provocando la rottura a compressione.

Nella Figura 5.17 (a), sono confrontate le curve delle deformazioni principali ε_1 , ε_2 , ε_3 , in diverse situazioni di serraggio del campione.

Si osserva che anche aumentando significativamente questo valore, la posizione della doppia strizione rimane pressoché identica.

Tuttavia, si nota una differenza sostanziale nell'istante di inizio della strizione, che risulta anticipata in termini di corsa del punzone. Questo è dovuto al fatto che la lunghezza radiale di deformazione utile del campione tende a diminuire, poiché l'attrito impedisce la deformazione della porzione compresa tra le due flange.

Nella Figura 5.17 (b), sono invece confrontate le curve della forza esercitata dal punzone (F_p) in funzione del suo spostamento (w_p), in diverse situazioni di serraggio del campione.

Si osserva che i risultati delle forze risultano simili, nonostante valori molto differenti della forza di serraggio. Le piccole differenze che si notano sono che aumentando questo valore, la forza necessaria al punzone aumenta leggermente per contrastare quella di attrito, e l'istante di inizio della strizione risulta anticipata, in termini di corsa del punzone.

Infine, nella Tabella 5.5, sono riportati i valori massimi della tensione equivalente di Von Mises (σ_{vm_max}), considerando diverse situazioni di serraggio del campione. Si osservano valori molto simili per le prime due prove, che comprendono valori di serraggio sufficientemente realistici. Tuttavia, per l'ultima prova, che presenta una forza elevata, i valori risultano maggiorati a causa della zona di strizione in fase avanzata.

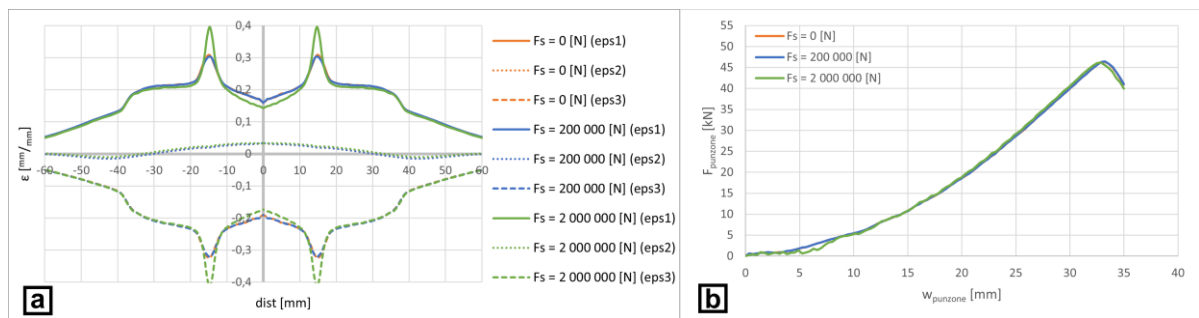


Figura 5.17: Confronto dei risultati con diverse forze di serraggio del campione (F_s) nel modello FEM del campione di geometria C: (a) curve ϵ - dist; (b) curve $F_p - w_p$.

Tabella 5.5: Confronto delle tensioni equivalenti massime di Von Mises (σ_{vm_max}) con diverse forze di serraggio del campione (F_s) nel modello FEM del campione di geometria C.

Forza di serraggio (F_s) [N]	σ_{vm_max} [MPa]
0	369,7
200 00	370,2
2 000 000	377,2

6 Conclusioni

6.1 Obiettivi

Il nucleo centrale di questa tesi è incentrato sull'approfondimento dell'analisi della formabilità di una lamiera, spessa 1,5 mm e realizzata in lega di alluminio AA5182. L'obiettivo principale è stato esaminare attentamente il comportamento di questa specifica lamiera durante il processo di formatura, con particolare attenzione alla determinazione del Diagramma Limite di Formabilità (FLD).

Attraverso prove sperimentali, quali i test Nakajima e le prove di trazione uniassiale, si è mirato a raccogliere dati fondamentali sulla formabilità della lamiera. L'impiego della tecnologia Digital Image Correlation (DIC) durante il processo di formatura ha consentito la cattura delle deformazioni, mentre la cella di carico ha misurato la forza applicata dal martinetto.

L'elaborazione dei dati, affidata a script Matlab, si è concentrata sulla determinazione dei punti limite di formabilità, adottando il metodo "dipendente dalla posizione" e il metodo "dipendente dal tempo". Parallelamente, l'analisi si è estesa all'estrazione delle caratteristiche meccaniche principali del materiale, come la curva Tensione - Deformazione ($\sigma - \varepsilon$), il coefficiente di Poisson (ν) e il parametro di anisotropia di Lankford (R_0), offrendo così una visione dettagliata del comportamento meccanico del materiale sotto sforzo.

L'impiego del software Abaqus di Analisi agli Elementi Finiti (FEM) è stato finalizzato a convalidare e approfondire i risultati ottenuti sperimentalmente. L'obiettivo chiave è stato l'estrazione del coefficiente di attrito tra punzone e campione, fornendo così una comprensione più dettagliata del comportamento della lamiera durante le prove.

L'obiettivo finale di questa ricerca è stato contribuire alla caratterizzazione avanzata della lamiera, fornendo dati critici per ottimizzare i processi di formatura in contesti industriali.

6.2 Risultati

Dai test Nakajima e dalle prove di trazione uniassiale per la lamiera in lega di alluminio AA5182, caratterizzata da uno spessore di 1,5 mm, si sono ottenuti i diagrammi **Tensione - Deformazione** ($\sigma - \epsilon$) della Figura 6.1, da cui si ricavano le seguenti proprietà:

- **Modulo di Young:** $E_{Young} = 70\,000$ [MPa];
- **Tensione di Snervamento:** $\sigma_S = 121$ [MPa];
- **Tensione di Rottura:** $\sigma_R = 353$ [MPa];
- **Modello di Incrudimento:** legge di Voce a 3 parametri

$$\sigma_{voce} = \sigma_0 + A \left(1 - \frac{1}{e^{b \cdot \epsilon^{pl}}} \right)$$

Dove:

- $\sigma_0 = 121,71$ [MPa];
- $A = 259,00$ [MPa];
- $b = 10,68$;
- **Coefficiente di Poisson:** $\nu = 0,33$;
- **Parametro di Lankford:** $R_0 = 0,60$.

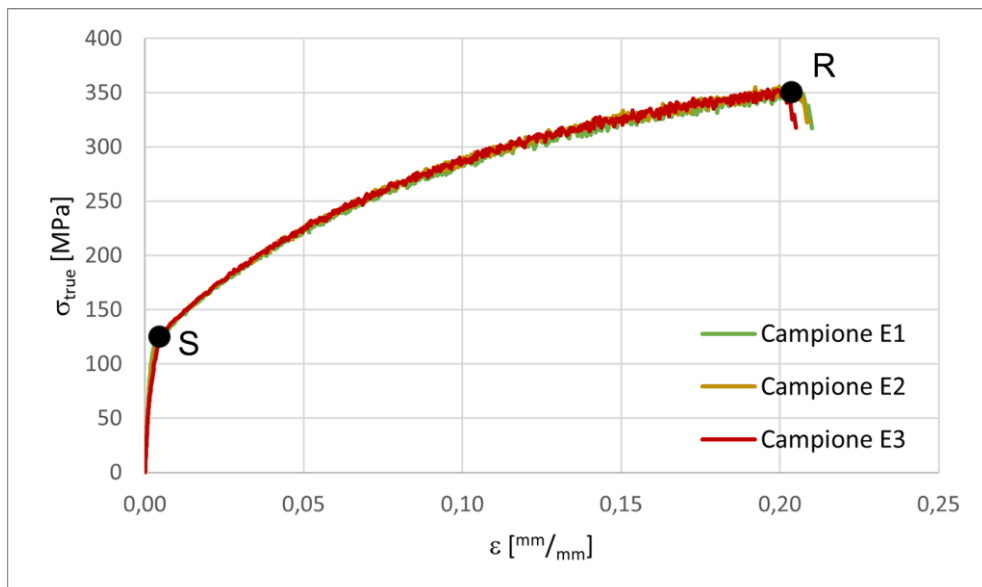


Figura 6.1: Diagramma Tensione - Deformazione ($\sigma - \epsilon$) delle prove di trazione E1, E2 ed E3.

Per determinare i punti limite di formabilità ($\varepsilon_1 - \varepsilon_2$), che descrivono il **Diagramma Limite di Formabilità (FLD)** della Figura 6.2, sono stati utilizzati due approcci distinti:

- **Metodo dipendente dalla posizione:** valutazione dei punti mediante l'analisi delle sezioni trasversali alla frattura (norma UNI EN ISO 12004);
- **Metodo dipendente dal tempo:** valutazione dei punti mediante l'analisi della curva del Thickness Ratio ($\frac{d \varepsilon_3}{d t}$).

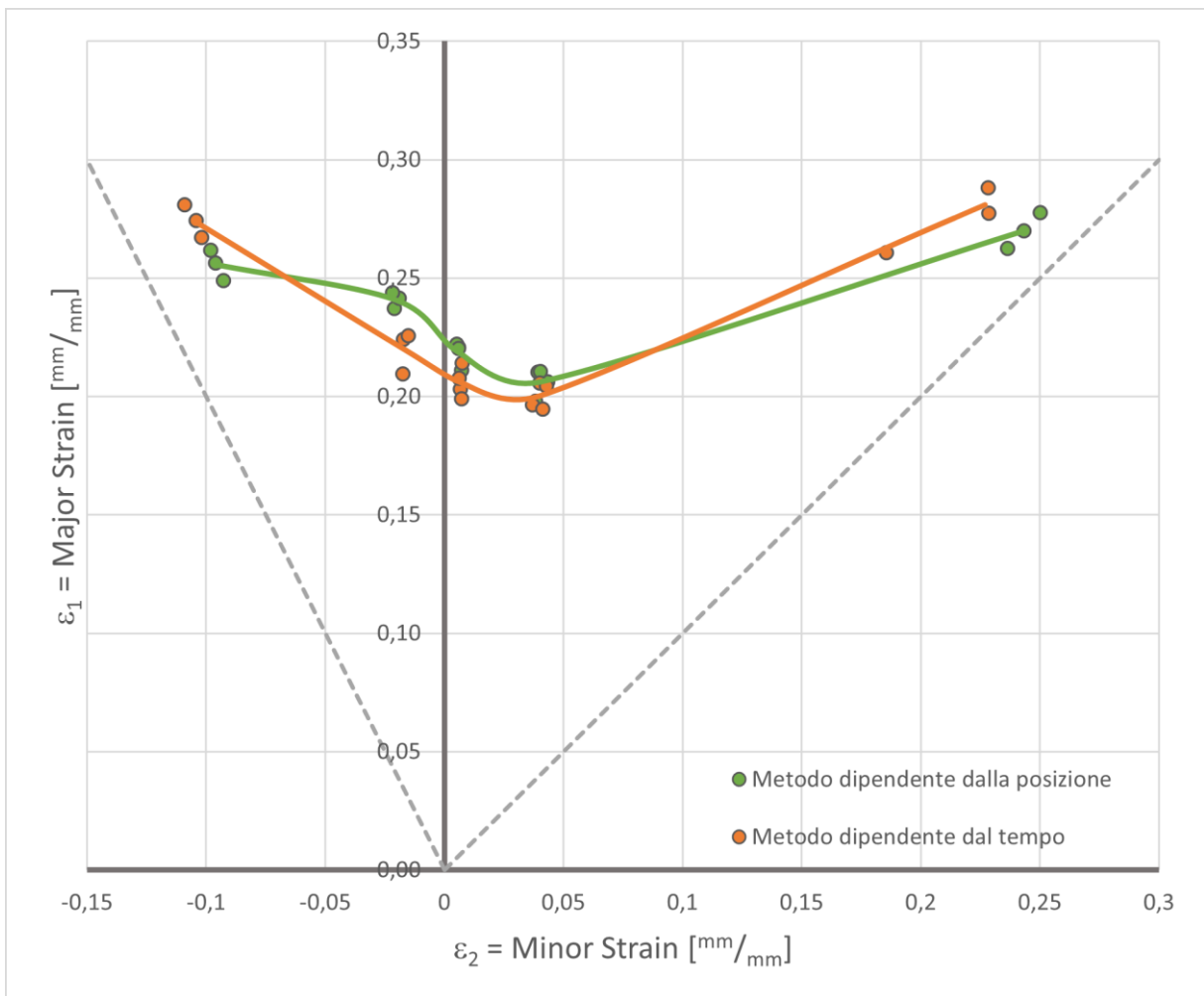


Figura 6.2: Diagramma Limite di Formabilità (FLD) ottenuto attraverso i metodi dipendenti dalla posizione e dal tempo.

Attraverso il software Abaqus di Analisi agli Elementi Finiti (FEM), è stata possibile la creazione di un modello virtuale, permettendo una verifica accurata dei dati sperimentali e l'ampliamento ulteriore dei risultati ottenuti.

Particolare attenzione è stata dedicata all'influenza dei vari parametri sui risultati, ricavandone i valori ottimali per descrivere fedelmente il comportamento reale:

- **Attrito Punzone - Campione:** $\mu_p = 0,034$;
- **Attrito Flangie - Campione:** $\mu_f = 0,61$;
- **Forza di serraggio:** $F_s = 200\ 000 [N]$.

Tra i risultati di particolare interesse che sono stati analizzati, figurano:

- **Curve delle deformazioni principali ($\varepsilon - dist$)**

Nella Figura 6.3, viene presentato il confronto delle curve delle deformazioni principali ε_1 (curve nere), ε_2 (curve verdi), ε_3 (curve azzurre), ottenute tramite FEM (linee continue) con quelle ottenute sperimentalmente per il campione di geometria C3 (linee tratteggiate).

Nella Figura 6.5 sono presentati i risultati relativi alle mappe delle deformazioni principali ε_1 (Figura 6.5 (a)), ε_2 (Figura 6.5 (b)), ε_3 (Figura 6.5 (c)), ottenute nel modello FEM per il campione di geometria C;

- **Curva della forza del punzone ($F_p - w_p$)**

Nella Figura 6.4, viene illustrato il confronto tra la curva della forza del punzone ottenuta tramite FEM (rappresentata dalla curva blu) e quelle ottenute sperimentalmente per i campioni C2, C3 e C4;

- **Tensione equivalente di Von Mises (σ_{vm})**

Nella Figura 6.6, sono presentati i risultati relativi alla mappa delle tensioni equivalenti di Von Mises ottenute nel modello FEM per il campione di geometria C.

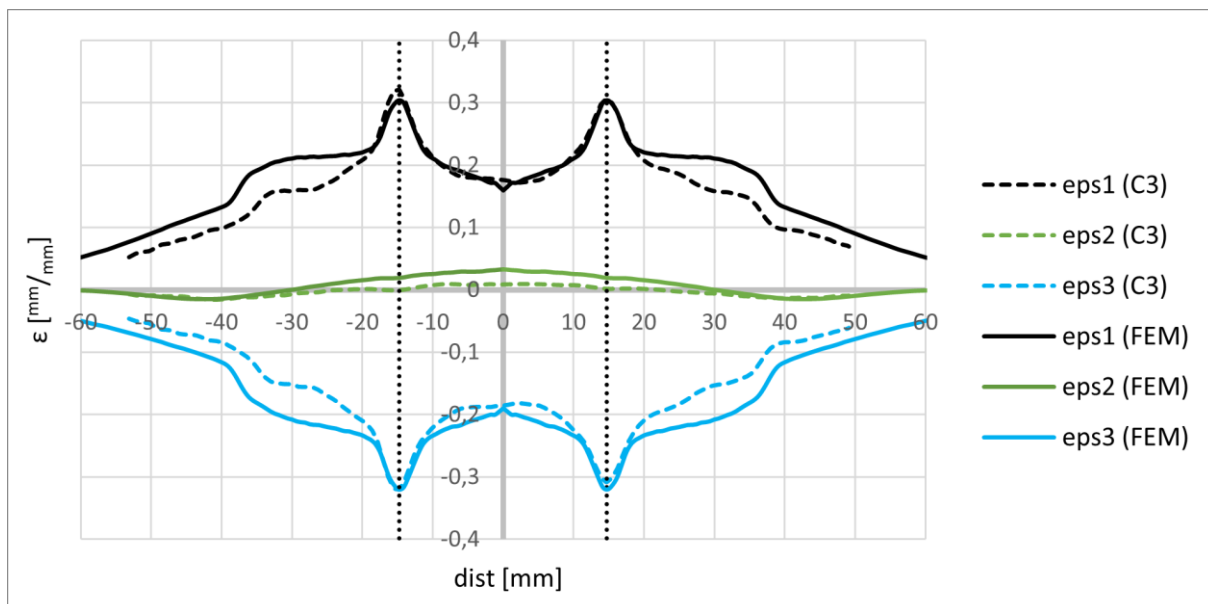


Figura 6.3: Confronto tra le curve delle deformazioni principali ($\epsilon - dist$) nel modello FEM e quelle dei risultati sperimentali del campione C3.

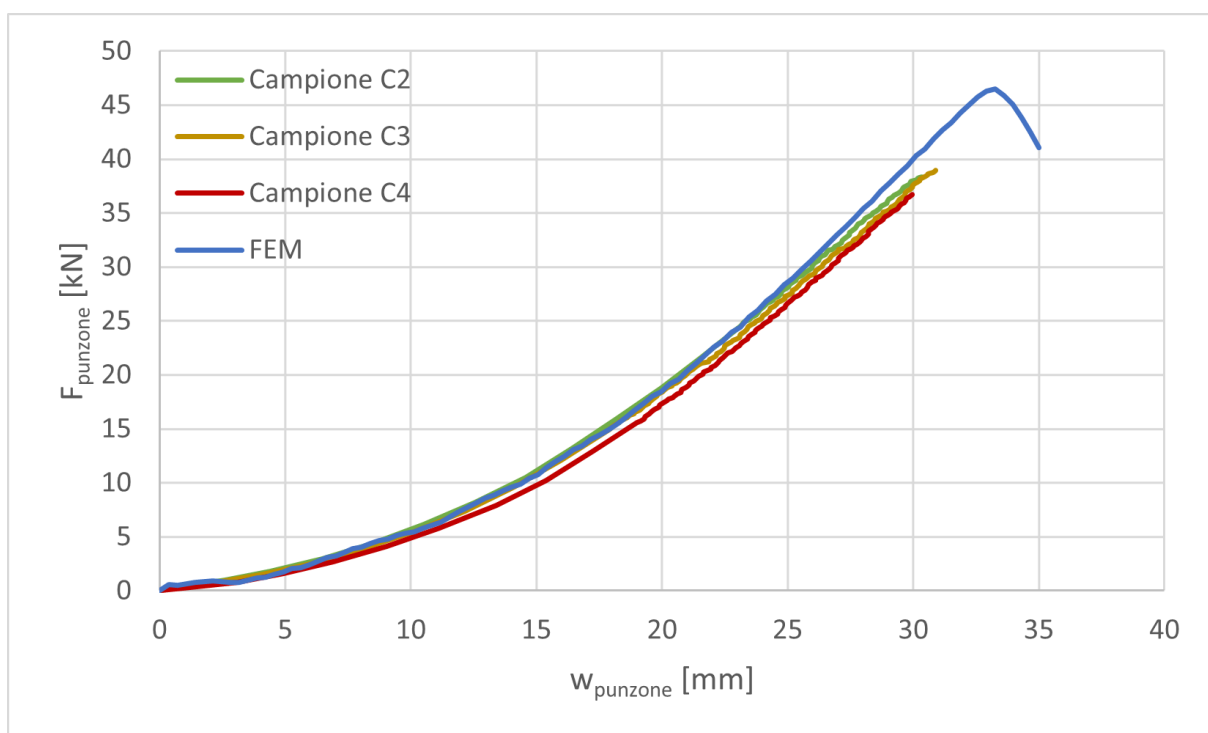


Figura 6.4: Confronto tra la curva della forza del punzone ($F_p - w_p$) nel modello FEM e i risultati sperimentali dei campioni C2, C3, C4.

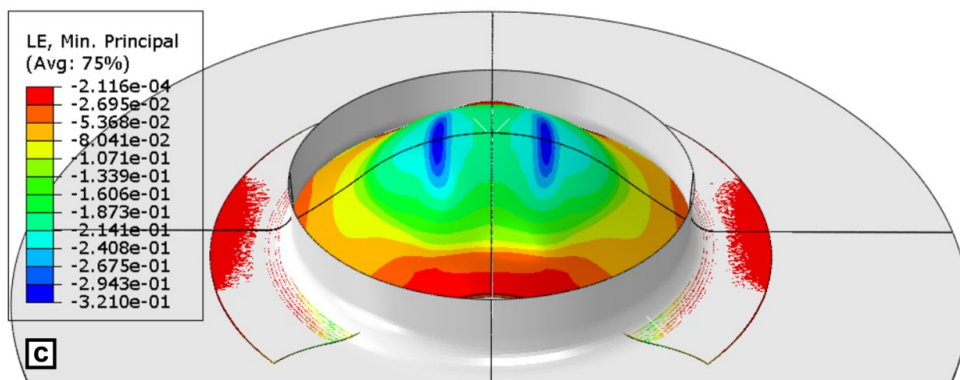
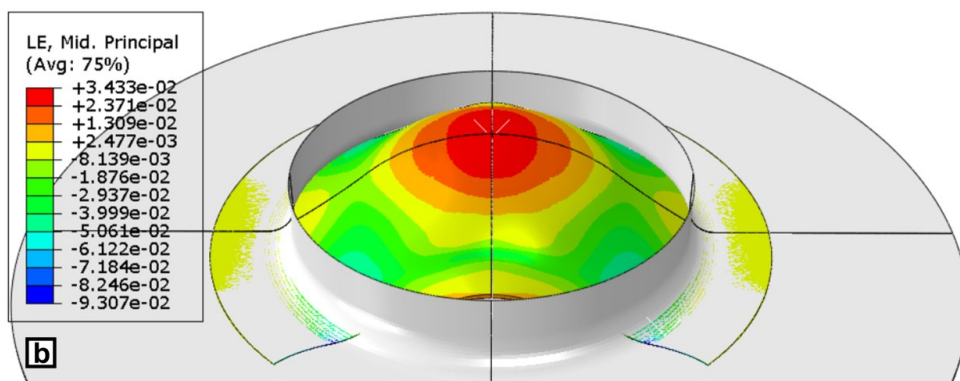
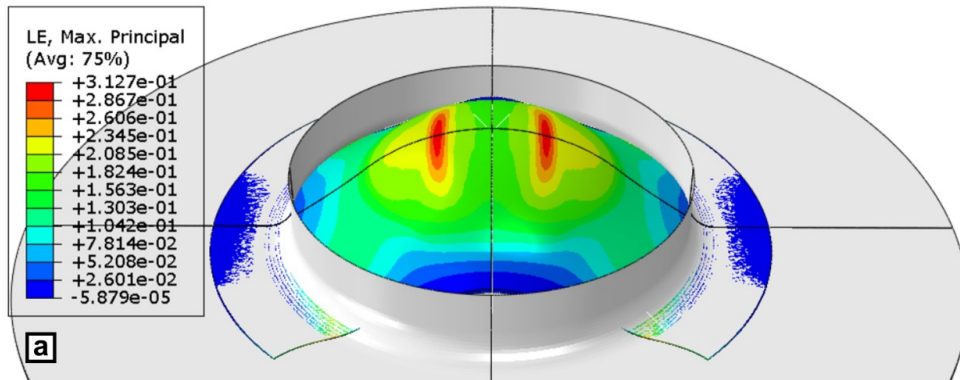


Figura 6.5: Mappe delle deformazioni principali (ϵ) nel modello FEM del campione di geometria C:

(a) deformazione ϵ_1 ; (b) deformazione ϵ_2 ; (c) deformazione ϵ_3 .

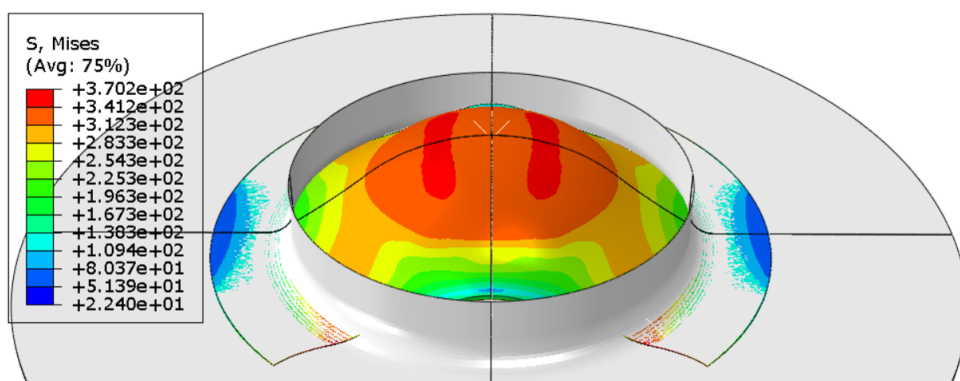


Figura 6.6: Mappa della tensione di Von Mises (σ_{vm}) nel modello FEM del campione di geometria C.

6.3 Sviluppi futuri

Nonostante il solido contributo fornito da questa tesi nella determinazione del Diagramma Limite di Formabilità (FLD), ci sono ancora aree che possono beneficiare di ulteriori ricerche e miglioramenti. Di seguito sono proposti alcuni sviluppi futuri per affinare e ampliare il lavoro svolto:

- **Nuovi metodi per la determinazione dei punti limite di formabilità ($\epsilon_1 - \epsilon_2$)**
Data la non perfetta sovrapposizione tra le Curve Limite di Formabilità (FLC) ottenute attraverso i metodi dipendenti dalla posizione e dal tempo, potrebbe essere utile esplorare nuovi metodi analitici per determinare i punti limite di formabilità ($\epsilon_1 - \epsilon_2$), in modo da ottenere risultati più affidabili;
- **Utilizzo di campioni di geometrie alternative per i campioni di trazione**
Potrebbe essere vantaggioso esplorare l'utilizzo di una geometria più snella per i campioni di trazione, con l'obiettivo di ottenere uno stato tensionale più vicino a quello uniassiale rispetto a quello riscontrato in questo studio;
- **Approfondimento dell'effetto dell'anisotropia (\underline{R})**
Ulteriori prove di trazioni con campioni tagliati a 45° e 90° rispetto alla direzione di laminazione, approfondirebbero l'effetto dell'anisotropia. Questo consentirebbe di determinare i coefficienti R_{45} e R_{90} , completando così la descrizione del comportamento anisotropo del materiale attraverso la matrice di anisotropia (\underline{R}) e migliorando la bontà dei risultati spiegando il motivo per cui i punti estremi della Curva Limite di Formabilità (FLC) non si collocano esattamente sulle rette delle tensioni uniassiale ed equibiassiale;
- **Integrazione di un modello di danneggiamento del materiale nel FEM**
È possibile integrare un modello di danneggiamento del materiale nelle Analisi agli Elementi Finiti, al fine di simulare in modo più accurato il fenomeno della strizione e migliorare la qualità dei risultati. Tuttavia, va tenuto presente che questo è un processo estremamente complesso a causa delle sfide associate alla modellazione accurata del danneggiamento del materiale.

7 Bibliografia

- [1] Marciniak Z., Duncan J. L., Hu S. J., (2002), "Mechanics of sheet metal forming", Butterworth-Heinemann, pp. 75. ISBN 0-7506-5300-0;
- [2] UNI EN ISO 12004-1: 2009, "Materiali metallici - Lamiere e nastri - Determinazione delle curve limite di formabilità - Parte 1: Misurazione e applicazione dei diagrammi limite di formabilità nelle officine di stampaggio", Ente Italiano di Normazione (UNI), febbraio 2009;
- [3] UNI EN ISO 12004-2: 2009, "Materiali metallici - Lamiere e nastri - Determinazione delle curve limite di formabilità - Parte 2: Determinazione delle curve limite di formabilità in laboratorio", Ente Italiano di Normazione (UNI), febbraio 2009;
- [4] Davis, Joseph R., (2004), "Tensile Testing", 2^a edizione, ASM International, ISBN 0-87170-806-X;
- [5] Marco Rossi, dispensa del corso Meccanica dei Materiali Avanzati: "Plasticità: Modelli di Incrudimento", Capitolo 7, Università Politecnica delle Marche, A.A. 2021/2022;
- [6] The Engineering ToolBox, (2008), "Poisson's Ratio", (online), disponibile al link: https://www.engineeringtoolbox.com/poissons-ratio-d_1224.html (Accesso 14/12/2023);
- [7] Lankford, W. T., Snyder, S. C., Bausher, J. A., "New criteria for predicting the press performance of deep drawing sheets", Trans. ASM, 42, 1197-1205 (1950);
- [8] Banabic D., Aretz H., Paraianu L., Jurco, P., "Application of various FLD modelling approaches", Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 13, (2005), 759-769;
- [9] Shahid S., Gukhool W, "Experimental Testing and Material Modeling of Anisotropy in Injection Moulded Polymer Materials", Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, Blekinge Institute of Technology, (2020), SE-371 79 Karlskrona, Sweden;

- [10] Hotz W., Merklein M., Kuppert A., Friebe H., Möller T., Klein M., "Time Dependent FLC Determination - Comparison of Different algorithms to Detect the Onset of Unstable Necking Before Fracture", In: Asim Tewari, K. Narasimhan, P.P. Date (Hrsg.): Proceedings of IDDRG 2012, I(2012), Bhandup Mumbai INDIA: Swastik Printer, S. 258-264;
- [11] Merklein M., Kuppert A., Mütze S., Geffert A., "New Time Dependent Method for Determination of Forming Limit Curves Applied to SZBS800", In: Kolleck, R. (Hrsg.): Proc. 50th Conference of IDDRG 2010, (2010)50, Graz : Verlag der Technischen Universität Graz, S. 489-498;
- [12] Merklein M., Kuppert A., Geiger M., "Time dependent determination of forming limit diagrams", In: Annals of the CIRP, 59-1(2010), Amsterdam : Elsevier, S. 295-298;
- [13] Volk W, Hora P, "New algorithm for a robust user-independent evaluation of beginning instability for the experimental FLC determination", Int. J. Material Forming, 2010: 1-8;
- [14] J. Chaskalovic, "Finite Elements Methods for Engineering Sciences", Springer Verlag, (2008);
- [15] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, J. Z. Zhu, "The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals", Butterworth-Heinemann, (2005);
- [16] Dassault Systemes, (2018), "18.2.6 Anisotropic yield/creep", In ABAQUS Analysis User's Manual. Versione 18.2.6. Products: ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit, ABAQUS/CAE.