POLITECNICO DI TORINO

Laurea magistrale in Ingegneria Meccanica



Tesi di Laurea magistrale

Analisi ottica delle deformazioni di lamiere di acciaio a seguito dei processi di imbutitura

Relatore

Candidato

Prof. Paolo MATTEIS

Matteo CARACCIOLO

Dicembre 2022

Ai miei genitori, Filadelfo e Agata A mia sorella Alice

Sommario

Il presente elaborato è frutto delle attività svolte nel laboratorio del TO PROVE LAB, sito a Rivoli, e nello stabilimento della MA, sito a Chivasso.

L'oggetto della tesi è l'analisi ottica delle deformazioni a seguito dei processi di stampaggio eseguita sull'ossatura della portiera anteriore sinistra di un' I-car, un veicolo elettrico sviluppato nell'ambito di un progetto europeo denominato Avangard.

Il primo passo è stato quello di fare diverse analisi sul materiale per poter ricavare le caratteristiche meccaniche e chimiche utili per determinare la formabilità del materiale e la relativa curva limite (FLC). Successivamente, per poter effettuare l'analisi ottica, è stato necessario imprimere tramite una marcatura elettrolitica dei punti sul blank, necessari per le misurazioni delle deformazioni. Dopo aver fatto ciò, le portiere sono state stampate presso lo stabilimento di Chivasso, con diversi gradi di lubrificazione. Successivamente, le deformazioni subite dai pannelli stampati sono state misurate tramite l'utilizzo del software ARGUS, mettendo in evidenza come i diversi gradi di lubrificazione avessero influito sullo stato delle deformazioni. Infine, per poter verificare l'attendibilità dei risultati, sono stati confrontati i valori di spessore restituiti dal software con quelli misurati.

Indice

Sommario		III	
El	enco	delle tabelle	VI
El	enco	delle figure	VII
1	Intr 1.1 1.2 1.3	oduzione e scopo della tesiIl progetto AvangardIl ruolo di MAScopo della tesi	1 1 3 3
2	Acci 2.1 2.2	i ai per l'industria automotive Classificazione acciai	$4 \\ 5 \\ 6$
3	Car: 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5	atteristiche per l'imbutibilitàCoefficiente di anisotropia r Il coefficiente di incrudimento n Calcolo di n ed r 3.3.1La prova di trazioneFLD eFLC: diagramma limite di formabilità e curva limite di formabilitàCalcolo della FLC 3.5.1Nakajima test3.5.2Metodi analitici per il calcolo della FLC	$11 \\ 11 \\ 13 \\ 14 \\ 15 \\ 17 \\ 18 \\ 19 \\ 20$
4	Il pr 4.1 4.2 4.3 4.4	cocesso di imbutitura Deformazione plastica a freddo Le presse Gli stampi Le fasi del processo	26 26 27 29 30

5	Mat	ceriali e metodi	32	
	5.1	L'acciaio usato	32	
	5.2	Metodi di prova sul materiale	35	
		5.2.1 Analisi chimica	35	
		5.2.2 Metallografia	35	
		5.2.3 Prova di trazione	36	
		5.2.4 Metodo di calcolo FLC	38	
	5.3	Preparazione allo stampaggio e all'analisi ottica	41	
	5.4	Prove di stampaggio e caratterizzazione degli stampati	44	
	5.5	Analisi ottica delle deformazioni	48	
	5.6	Analisi dello spessore	52	
6	Rist	ıltati	54	
	6.1	Analisi chimica	55	
	6.2	Metallografia	55	
	6.3	Prova di trazione	59	
	6.4	FLC	60	
	6.5	Riduzione di spessore	61	
	6.6	Deformazione principale massima	66	
	6.7	Limiti di formabilità	68	
	6.8	Attendibilità dei risultati	73	
7	Con	clusioni	75	
Bi	bliog	rafia	77	
Ri	Ringraziamenti			

Elenco delle tabelle

5.1	Analisi chimica fornita dall'acciaieria	33
5.2	Caratteristiche meccaniche fornite dall'acciaieria	34
5.3	Punti FLC ottenuti tramite il metodo di Keeler	39
5.4	Parametri utili al calcolo della FLC	39
5.5	Punti FLC ottenuti tramite il metodo di Abspoel e Scholting	40
5.6	Punti FLC ottenuti tramite il metodo di ArcelorV9	40
5.7	Parametri di stampaggio	47
6.1	Analisi chimica	55
6.2	Caratteristiche meccaniche Acciaio CR 06	59
6.3	Confronto FLC_0	61
6.4	Confronto tra spessore reale e spessore misurato dal software	73

Elenco delle figure

1.1	I-Bike e I-Car	2
2.1	Classificazione acciai: Mild: Mild Steel; BH: Bake Hardening; CP: Complex Phase; DP: Dual Phase; FB: Ferritic Bainitic; HF: Hot Formed and Quenched; HSLA: High-Strength Low Alloy; IF: In- terstitial Free; MS: Martensitic (MART); TRIP: Transformation Induced Plasticity; TWIP: Twinning Induced Plasticity	6
2.2	Grafico tempo-temperatura per acciai laminati a freddo e ricotti	9
2.3	Schema di un processo di zincatura di tipo continuo	10
3.1	Influenza di n sulla FLC	13
3.2	Andamento del valore di FLC_0 al variare del coefficiente di incrudi-	
	mento n e con spessore t_0 costante pari a 0,8 mm $\ldots \ldots \ldots \ldots$	14
3.3	Provino ad osso di cane utilizzato durante le prove di trazione	15
3.4	Curva tensione-deformazione	16
3.5	Diagramma limite di formabilità	18
3.6	Provini di diversa geometria utilizzati per il nakajima test	19
3.7	Esempio di FLC ottenuta secondo la norma [13]	20
3.8	FLC sviluppata tramite il modello di Abspoel e Scholting	22
3.9	Relazione tra le deformazioni reali misurate nel caso di deformazione	
	piana e l'allungamento totale	23
3.10	Confronto tra le diverse curve FLC di un acciaio laminato a freddo (figura di sinistra), un DC 04, ed un acciaio laminato a caldo (figura	
	di destra), un DD13 [16] \ldots	25
3.11	Confronto tra le diverse curve FLC di un acciaio laminato a freddo (figura di sinistra), un HCT600X+Z, ed un acciaio laminato a caldo (figura di destra), un S420MC [16]	25
4.1	Deformazione plastica per scorrimento in presenza di una dislocazione	97
12	Schome di una prossa moccanica	21 28
±. 4		20

4.4	Presse a semplice e a doppio effetto	-29
		20
5.1	Classificazione acciai ad alta imbutitura rivestiti con zinco secondo	
	la EN 10346	33
5.2	Caratteristiche meccaniche acciai ad alta imbutitura rivestiti con	
F 0	zinco secondo la EN 10346 \dots	34
5.3	Campione inglobato e lucidato	36
5.4	Macchina di trazione	37
5.5	Griglia di punti equidistanti: distanza tra i centri dei punti 3 mm,	41
FC	diametro del punti 1,5 mm	41
0.0	Fower unit, electronita e testa di marcatura della OSILING MAR- KINCSVSTEMS	49
57	Tests di margatura della OSTI INC MARKINCSVSTEMS	42
5.8	Porzione di stoneil con griglia	40
5.0 5.0	Marcatura elettrolitica	40
5.10	Pressa meccanica Mossini	45
5.11	OFIS	46
5.12	Pannello prima e dopo l'imbutitura	47
5.13	Ossatura portiera anteriore sinistra (grezzo di stampaggio)	48
5.14	Markers codificati	49
5.15	Markers posizionati sul pannello	50
5.16	Punti correttamente acquisiti dal software	51
5.17	Esempio modello ricostruito	52
5.18	Punti scelti per le misure di spessore	53
5.19	Punti scelti visualizzati sul modello ricostruito	53
61	Inclusioni acciaio CB 06 con ingrandimento 100X	56
6.2	Micrografia acciaio CR 06 con ingrandimento 100X	57
6.3	Micrografia acciaio CR 06 con ingrandimento 200X	57
6.4	Misurazioni spessore di zinco su strato superiore	58
6.5	Misurazioni spessore di zinco su strato inferiore	58
6.6	Curve di trazione Acciaio CR 06	59
6.7	Confronto curve FLC	60
6.8	Riduzione di spessore (lubrificazione pari a 16 g/ m^2 e con foglio di	
	nylon) (deformazioni ingegneristiche)	62
6.9	Diagramma FLD per valutazione della distanza dalla curva blu	
	(lubrificazione pari a 16 g/ m^2 e con foglio di nylon)	63
6.10	Riduzione di spessore (lubrificazione pari a 10 g/m² e con foglio di	
	$nylon) \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $	64

6.11	Confronto tra FLD in due condizioni diverse di lubrificazione per	
	la riduzione di spessore: 10 g/ m^2 e foglio di nylon(a sinistra) e 12	
	g/m^2 senza foglio di nylon (a destra)	64
6.12	Riduzione di spessore (lubrificazione pari a 12 g/m² e senza foglio	
	di nylon)	65
6.13	Deformazione principale ε_1 ingegneristica (lubrificazione pari a 16	
	g/m^2 e con foglio di nylon)	66
6.14	Deformazione principale ε_1 ingegneristica (lubrificazione pari a 10	
	g/m^2 e con foglio di nylon)	67
6.15	FLC inserita sul software ARGUS	68
6.16	Distanza dei punti dalla FLC (lubrificazione pari a 16 g/m ² e con	
	foglio di nylon)	69
6.17	Diagramma FLD per valutazione della distanza dalla FLC (lubrifi-	
	cazione pari a 16 g/ m^2 e con foglio di nylon)	69
6.18	Distanza dei punti dalla FLC (lubrificazione pari a 10 g/ m^2 e con	
	foglio di nylon)	70
6.19	Diagramma FLD per valutazione della distanza dalla FLC (lubrifi-	
	cazione pari a 10 g/ m^2 e con foglio di nylon)	71
6.20	Distanza dei punti dalla FLC (lubrificazione pari a 12 g/m ² e senza	
	foglio di nylon)	72
6.21	Confronto tra FLD in due condizioni diverse di lubrificazione: 10	
	g/m^2 con foglio di nylon (a sinistra) e 12 g/m^2 senza foglio di nylon	
	(a destra)	72
6.22	Rottura e relativo ingrandimento	73

Capitolo 1

Introduzione e scopo della tesi

La seguente tesi è frutto dell'attività svolta nel laboratorio del TO PROVE LAB, sito a Rivoli, e nello stabilimento della MA, sito a Chivasso.

La tesi riguarda lo studio e l'analisi dell'ossatura della portiera di una I-car, veicolo elettrico sviluppato all'interno del progetto Avangard.

1.1 Il progetto Avangard

Negli ultimi anni, il settore dell'automotive sta vivendo una delle fasi più sensazionali degli ultimi 50 anni. In poco tempo, l'innovazione ha riguardato sia le modalità di produzione dei veicoli, sia la loro motorizzazione. Il progetto AVANGARD si inserisce in questo contesto ed ha come obbiettivo principale quello di creare microfabbriche per la produzione di auto elettriche e biciclette elettriche (figura 1.1), tecnologicamente avanzate e compatibili con l'agenda europea ambientale particolarmente sensibile alle tematiche del risparmio energetico e all'utilizzo di materiali riciclabili durante i processi di produzione.



Figura 1.1: I-Bike e I-Car

È un progetto finanziato dall'unione europea e coinvolge al proprio interno 22 aziende tra cui la divisione MA del gruppo CLN da sempre leader nella produzione di componenti metallici per il mondo dell'automotive [1].

Tra gli obbiettivi che intende perseguire, abbiamo:

- Utilizzare le tecnologie digitali per ripensare radicalmente come è possibile produrre componenti e sistemi consentendo ingenti risparmi nell'investimento necessario;
- Applicare concetti razionali dell'industria 4.0 alla produzione flessibile di una varietà di veicoli diversi;
- Dimostrare grandi risparmi di energia e materiali nel progetto pilota che mira a impianti di produzione indipendenti dal punto di vista energetico;
- Dimostrare il funzionamento dei prototipi di veicoli elettrici a 2-4 ruote e nuovi pacchi batteria;
- Applicare le tecnologie attualmente più avanzate per proteggere gli impianti di produzione da intercettazioni volte a copiare soluzioni tecnologiche;
- Sviluppare un ambiente basato su cloud supportato da tecnologie blockchain;
- Replicare il modello di business del progetto AVANGARD in diversi stati europei.

1.2 Il ruolo di MA

Grazie all'enorme esperienza accumulata nel corso degli anni, la MA del gruppo CLN svolge un ruolo fondamentale all'interno del progetto. Le competenze in materia di taglio, stampaggio a freddo e a caldo, profilatura, saldatura di acciai e leghe di alluminio, le permettono di definire le specifiche del nuovo veicolo da produrre attenzionando diverse tecnologie. Oltre ad MA, all'interno del gruppo CLN troviamo anche la divisione MW, che produce ruote in acciaio per diverse case automobilistiche, e il TO PROVE LAB, laboratorio specializzato nella sperimentazione di componenti per il settore automotive attraverso prove funzionali, analisi dei materiali e metrologia. Il TO PROVE LAB collabora attivamente all'interno del progetto certificando quanto di buono fatto in fase di prototipazione dalla divisione MA, andando ad eseguire sui pezzi prodotti prove di fatica piuttosto che prove legate all'analisi ottica delle deformazioni.

1.3 Scopo della tesi

Il progetto di tesi, che viene sviluppato all'interno del Progetto Avangard, ha come principale argomento lo studio delle deformazioni che si verificano a seguito del processo di stampaggio. In particolare, sono state analizzate le deformazioni che riguardano l'ossatura della portiera anteriore sinistra della I-car. Tramite diverse prove, è stato verificato che l'acciaio utilizzato avesse le giuste caratteristiche per poter essere stampato. Lo studio e l'analisi delle deformazioni è stato svolto tramite un analisi ottica grazie all'ausilio del software ARGUS della GOM. Il primo passo è stato quello di effettuare una marcatura elettrolitica sui pannelli necessaria per poter ricavare le deformazioni. Poi i pannelli sono stati stampati nello stabilimento di Chivasso facendo diversi tentativi con diversi gradi di lubrificazione. Infine, è stata effettuata l'analisi ottica per studiare le deformazioni a seguito del processo verificando quanto queste fossero effettivamente vicine al limite di formabilità del materiale e come i diversi gradi di lubrificazione potessero influenzare le deformazioni stesse.

Capitolo 2

Acciai per l'industria automotive

Nel corso degli anni, l'acciaio è rimasto il materiale chiave nell'industria automobilistica. La sua forza sta nel basso costo rispetto ad altri materiali, nella maggiore durata e nella variabilità dei livelli di resistenza, soddisfacendo al contempo le esigenze ingegneristiche sempre più stringenti. Inoltre, questo materiale ha un'eccezionale versatilità in termini di formabilità e anche l'industria ha risposto prontamente a riconoscere il cambiamento dovuto ai requisiti legislativi e ambientali. Alcuni degli altri vantaggi di questo materiale sono la facilità di formatura, la resistenza alla corrosione con rivestimenti di zinco, la facilità di giunzione, la riciclabilità e il buon assorbimento dell'energia d'urto. Alcuni degli svantaggi sono che l'acciaio è considerato più pesante dei suoi materiali concorrenti e si corrode molto facilmente se non rivestito. Ci sono stati sviluppi significativi nella produzione di un'ampia gamma di acciai utilizzando vari additivi e implementando interventi tecnologici durante la produzione di acciaio. L'acciaio è considerato un materiale vitale nella maggior parte dei veicoli. L'avvento di nuovi tipi di acciai, come gli acciai ad alta resistenza, ha richiesto un ulteriore attenzione nel concentrarsi su nuove tecniche di progettazione, fabbricazione e assemblaggio da parte delle aziende automobilistiche. La sua applicazione non si limita solo nelle carrozzerie dei veicoli, ma anche nel motore, nel telaio, nelle ruote e in molte altre parti e componenti con l'obiettivo di dimostrare miglioramenti simultanei di resistenza, rigidità e altre caratteristiche

delle prestazioni strutturali [2].

2.1 Classificazione acciai

Gli acciai usati nella costruzione di scocche e carrozzerie possono essere classificati secondo vari modi. Un primo modo tende a classificare gli acciai in:

- acciai a bassa resistenza di cui fanno parte gli acciai dolci e gli acciai intersticial free;
- acciai alto resistenziali (HSS) di cui fanno parte gli acciai HSLA, gli accia BH e gli acciai carbonio manganese;
- acciai alto resistenziali avanzati (AHSS) che comprendono gli acciai DP, gli acciai TRIP e gli acciai TWIP.

Un'altro metodo di classificazione si basa sulla resistenza allo snervamento. Gli acciai che presentano carico di snervamento inferiore a 210 MPa sono considerati acciai convenzionali. Quelli che presentano un carico di snervamento tra 210 a 550 MPa sono gli acciai alto resistenziali, mentre gli acciai con carico di snervamento superiore a 550 MPa sono gli acciai alto resistenziali avanzati.

Una terza classificazione viene fatta in base alle proprietà meccaniche. In figura 2.1, ad esempio, vengono messe in relazione l'allungamento del materiale e il relativo carico di rottura [3].



Figura 2.1: Classificazione acciai: Mild: Mild Steel; BH: Bake Hardening; CP: Complex Phase; DP: Dual Phase; FB: Ferritic Bainitic; HF: Hot Formed and Quenched; HSLA: High-Strength Low Alloy; IF: Interstitial Free; MS: Martensitic (MART); TRIP: Transformation Induced Plasticity; TWIP: Twinning Induced Plasticity

2.2 Acciai dolci per imbutitura

Gli acciai più utilizzati sono sicuramente gli acciai dolci. Questi acciai fanno parte degli acciai a basso tenore di carbonio (minore dello 0,25 %) e sono particolarmente utilizzati in ambito automotive poichè presentano una buona saldabilità e una buona deformabità a freddo. Hanno un carico di snervamento compreso tra i 200 e 300 MPa. Presentano una microstruttura prevalentemente ferritica con qualche zona di perlite qua e là.

Per questi tipi di acciai, un ciclo di lavorazione classico comprende:

- colata;
- laminazione a caldo;
- laminazione a freddo;
- ricottura;

• skinpass.

Oltre alle fasi elencate, può essere anche eseguita una zincatura.

Nella colata continua, l'acciaio viene solidificato in bramme di lunghezza indefinita. La superficie esterna della bramma viene solidificata durante il passaggio nella lingottiera mentre l'interno si solidifica gradualmente. Una volta solidificata, la superficie esterna presenterà grani più fini mentre all'interno i grani saranno più grossi. Dopo la colata, l'acciaio viene sottoposto ad una deformazione a caldo con l'obbiettivo di produrre la sezione desiderata e di ridurre le disomogeneità causate dalla colata. Questo processo solitamente viene svolto in aria ad una temperatura elevata. In alcuni casi, come ad esempio nelle lamiere per imbutitura utilizzate in ambito automobilistico, i parametri del processo di laminazione sono controllati per poter poi ottenere determinate microstrutture finali. Terminata la fase di laminazione a caldo, si passa alla laminazione a freddo. Durante questa fase, il materiale viene fatto passare tra una coppia di rulli che presentano una distanza minore rispetto allo spessore del materiale; così facendo il materiale è costretto a ridursi di spessore, ottenendo così un allungamento nel senso di laminazione. Per ottenere lo spessore voluto, si può eseguire il processo più volte. Le proprietà meccaniche dei laminati a freddo sono a volte sostanzialmente diverse da quelle prima della deformazione. Questo succede perché la deformazione a freddo aumenta lo snervamento e la resistenza alla trazione e allo stesso tempo diminuisce la duttilità. L'aumento percentuale della resistenza alla trazione è molto più piccolo rispetto all'aumento dello snervamento [4].

Lo step successivo prevede la ricottura. In questi tipi di acciai, si esegue una ricottura subcritica che consiste nel riscaldare il materiale fino ad una temperatura T inferiore alla temperatura eutettoidica. Questo trattamento viene eseguito nell'ottica di ridurre lo stato di incrudimento e la tensione residua del materiale causate dalla laminazione a freddo. Durante la ricottura a livello microscopico, si verificano, all'aumentare della temperatura, i seguenti fenomeni:

• Una progressiva riduzione delle concentrazioni dei difetti reticolari (in particolare delle dislocazioni) e delle tensioni e deformazioni microscopiche all'interno dei grani esistenti (fenomeno chiamato **recovery**);

- La nucleazione e la crescita dei nuovi grani, della medesima fase, ma privi di difetti e di tensioni microscopiche, i quali vanno a sostituire i vecchi grani (fenomeno chiamato **ricristallizzazione**);
- La crescita della dimensione media dei grani.

Tutti questi fenomeni dipendono in primo luogo dalla temperatura, ma anche dal tempo di trattamento. L'obbiettivo di questo processo è ottenere una ricristallizzazione completa cercando di evitare l'ingrossamento del grano. La ricottura può essere di due tipi: a lotti o continua. Nella ricottura a lotti, la lamiera viene arrotolata e servono dei tempi molto lunghi affinchè tutto il nastro di lamiera raggiunga la temperatura T inferiore alla temperatura eutettoidica. La ricottura continua invece è estremamente veloce poichè viene fatta sulla lamiera svolta che si riscalda più facilmente. Nel raffreddamento, è possibile eseguire delle soste o dei riscaldamenti successivi per favorire la precipitazione dei carburi. Si tende comunque a controllare il raffreddamento, poichè un raffreddamento troppo veloce porterebbe ad una ferrite sovrassatura di carbonio, il che diminuirebbe la formabilità e causerebbe lo strain-aging [5].

Lo skin-pass è la fase di formatura finale nella produzione di lamiera d'acciaio laminata a freddo. Il processo ha parametri abbastanza diversi rispetto alla laminazione convenzionale della lamiera. Si ha una piccola riduzione dello spessore (ca. 1 %) e un'ampia lunghezza di contatto rispetto allo spessore della lamiera. Inoltre, lo skinpass viene solitamente eseguito in condizioni di attrito secco che porta ad un elevato attrito tra il materiale e i rulli di lavoro. Ha una grande influenza sulle proprietà meccaniche del materiale e migliora in modo significativo la finitura superficiale del pezzo [6].

In figura 2.2 vengono mostrati i due processi di lavorazione, sia con ricottura a lotti che con ricottura continua, e le relative temperature raggiunte durante il processo [5].



Figura 2.2: Grafico tempo-temperatura per acciai laminati a freddo e ricotti

In alcuni casi, per evitare che il pezzo venga corroso, viene eseguito il processo di zincatura, che in linea temporale precede l'operazione di skin-pass. Si tratta di un processo che prevede l'immersione a caldo del pezzo, e che può avvenire o in modo continuo (fig. 2.3) o a lotti. Il processo continuo è più vantaggioso nel caso di laminati o trafilati, mentre quello a lotti viene utilizzato per pezzi sfusi. In generale, prima dell'immersione nel bagno di zinco liquido, il pezzo viene pulito per eliminare qualsiasi ossido superficiale che potrebbe reagire con lo zinco. Dopo l'immersione a caldo, in cui l'acciaio reagisce con il bagno formando il rivestimento, il pezzo viene prelevato, raffreddato e talvolta successivamente trattato termicamente. L'anatomia di una parte in acciaio zincato è costituita dal rivestimento di zinco, uno strato interfacciale tra il rivestimento e l'acciaio del substrato. Ciascuna di queste regioni possono essere influenzate dal tempo e dalla temperatura del bagno, nonché dalla chimica sia del bagno che dell'acciaio del substrato [7].



Figura 2.3: Schema di un processo di zincatura di tipo continuo

Capitolo 3

Caratteristiche per l'imbutibilità

Come già detto nel capitolo precedente, gli acciai dolci sono acciai caratterizzati da una buona formabilità. Nel caso in cui le imbutiture siano più profonde, i trattamenti effettuati non sono sempre sufficienti a garantire questa altissima formabilità e entrano in gioco determinati parametri che influenzano e discriminano l'imbutibilità o meno del materiale in questione. Sia il coefficiente \mathbf{r} di anisotropia che il coefficiente di incrudimento \mathbf{n} sono dei parametri che aiutano a capire se il materiale può essere imbutito. Entrambi i coefficienti vengono determinati attraverso la prova di trazione.

Un altro strumento di fondamentale importanza è il diagramma limite di formabilità (**FLD**) che insieme alla curva limite di formabilità (**FLC**) determinano il limite di formabilità del materiale.

3.1 Coefficiente di anisotropia r

La maggior parte dei fogli industriali mostra una differenza nelle proprietà misurate nei provini allineati, ad esempio, con la direzione di laminazione, trasversale e a 45°. Questa variazione è nota come anisotropia planare. In una prova di trazione in cui le proprietà sono le stesse in tutte le direzioni, ci si aspetterebbe, per simmetria, che le deformazioni di larghezza e spessore siano uguali; se sono diverse, questo suggerisce che esiste una certa anisotropia. Un parametro che misura questo comportamento anisotropo è il coefficiente di anisotropia \mathbf{r} , definito come:

$$r = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_s} \tag{3.1}$$

dove ε_b è la deformazione di una provetta, soggetta a trazione, nella direzione della larghezza della provetta stessa, ε_s è la deformazione della stessa provetta nella direzione dello spessore. Tanto più è elevato **r**, tanto è più facile ottenere un pezzo senza rotture [8].

Alti valori di r vengono ottenuti grazie ad una particolare texture del tipo (111)[110], ottenuta a seguito del processo di laminazione a freddo. Infatti, le lamiere con questa particolare texture hanno grani di ferrite orientati per ridurre al minimo il movimento delle dislocazioni su sistemi di scorrimento che causano assottigliamento. Tuttavia, la ricristallizzazione mi elimina la texture riportano il valore di r uguale ad 1. La ricottura però va comunque eseguita per poter avere il recovery [5]. Ciò che si vuole è quindi inibire la ricristallizzazione e con determinati metodi si riesce ad ottenere quanto voluto. Un primo metodo consiste nel lasciare nell'acciaio 300 ppm di Al e 30 ppm di N. Questi, dopo la ricottura a lotti, formano nitruri di alluminio che, precipitando nei bordi di grano, inibiscono la ricristallizzazione salvando così l'anisotropia del materiale. Un secondo metodo viene utilizzato nel caso in cui la ricottura è di tipo continuo. Infatti, il riscaldamento è più veloce e il metodo precedente non funziona perchè non c'è tempo di far precipitare i nitruri di alluminio. In questo caso si tengono circa 50 ppm di N e C, e vengono aggiunti Ti e Nb con lo scopo di formare nitruri e carburi che inibiscano la ricristallizzazione.

Il valore di r viene ottenuto dalla prova di trazione e solitamente viene misurato per un particolare valore di deformazione, ad esempio pari al 15%. La direzione, in cui è misurato il valore r, è indicata da un suffisso, ovvero r_0 , r_{45} e r_{90} per provini ritagliati lungo il verso di laminazione, a 45° o ortogonali al verso di laminazione. Se, per un dato materiale, questi valori sono diversi, si dice che il foglio mostra un'anisotropia planare e la relativa formula è:

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2} \tag{3.2}$$

questo valore negli acciai è solitamente positivo e più questo valore tende a zero, meno sono le irregolarità sul bordo del prodotto finito [8][9].

Spesso si utilizza un coefficiente di anisotropia r_m dato dalla media dei tre valori di r
 nelle tre differenti direzioni:

$$r_m = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4} \tag{3.3}$$

3.2 Il coefficiente di incrudimento n

Il coefficiente di incrudimento è un parametro importante che influenza la curva limite di formabilità. Infatti, come mostrato nella figura 3.1, la curva limite di formatura intercetta l'asse delle ordinate a circa il valore del coefficiente di incrudimento n. Al diminuire di n, l'altezza della curva sarà minore. Molti processi di rinforzo, in particolare la lavorazione a freddo, tendono a ridurre drasticamente n e questo renderà più difficile la formabilità.



Figura 3.1: Influenza di n sulla FLC

Si trova che come n \rightarrow 0, il limite di formabilità della deformazione piana lungo

l'asse verticale tenderà a zero, tuttavia, in determinati casi, come ad esempio nell'imbutitura con deformazione minore negativa elevata, il limite non è zero e la lamiera può essere imbutita. Negli altri casi l'incrudimento è solitamente il fattore più importante che influenza la formabilità [9].

Nel grafico rappresentato in figura 3.2 , l'influenza del coefficiente di incrudimento è ancora più evidente. Infatti, dalla formulazione proposta da *Keeler e Brazier* che tiene conto sia del coefficiente di incrudimento n che dallo spessore della lamiera, si può vedere come all'aumentare di n (mantenendo costante il valore dello spessore) aumenti il valore di FLC₀, che corrisponde al valore per cui la ε_2 è pari a zero.



Figura 3.2: Andamento del valore di FLC_0 al variare del coefficiente di incrudimento n e con spessore t₀ costante pari a 0,8 mm

3.3 Calcolo di n ed r

Come accennato in precedenza, per poter calcolare i parametri n e r è necessario eseguire una classica prova di trazione.

3.3.1 La prova di trazione

La prova di trazione è una delle prove più semplici da eseguire e permette di misurare molte proprietà del materiale analizzato. Questa prova consiste nel sottoporre una provetta ad un carico uniassiale man mano crescente fino a provocarne la rottura. In figura 3.3, viene mostrato un classico provino di trazione. Le dimensioni iniziali del provino sono note e durante la prova, il carico applicato P viene monitorato da una cella di carico. Un estensimetro applicato al centro del campione monitora la lunghezza l del provino istante per istante e l'estensione è $\Delta l = l - l_0$. Un altro estensimetro può essere applicato in modo trasversale per misurare la variazione di spessore, $\Delta w = w - w_0$. Durante la prova, carico ed estensione vengono registrati in un sistema di acquisizione dati e viene creato un file; questo viene quindi analizzato e viene creato il classico diagramma tensione-deformazione.



Figura 3.3: Provino ad osso di cane utilizzato durante le prove di trazione

Dal diagramma tensione-deformazione (fig. 3.4), è possibile distinguere:

- Un campo elastico caratterizzato da una deformazione elastica, ε_e ;
- Un punto di snervamento Y, oltre il quale ha inizio la deformazione plastica;
- Un campo plastico caratterizzato da una deformazione plastica, ε_p ;

• Un punto di rottura B, che individua i valori di tensione e deformazione per il quale il provino collassa.



Figura 3.4: Curva tensione-deformazione

Dal diagramma tensione-deformazione, è possibile ricavare altre proprietà importanti del materiale come il modulo di Young E, la tenacità e la malleabilità.

Inoltre, ricordando la formula 3.1 e conoscendo le deformazioni riguardanti lo spessore e la larghezza del provino, è possibile calcolare \mathbf{r} ad un determinato valore di deformazione. Il valore di incrudimento \mathbf{n} , invece, viene calcolato, nel caso di determinazione automatica, a partire dalla regressione lineare del logaritmo della tensione vera rispetto al logaritmo della deformazione plastica vera in un determinato intervallo di deformazioni, ad esempio 10 % e 20 %, come indicato dalla norma ISO 10275 [10].

3.4 FLD e FLC: diagramma limite di formabilità e curva limite di formabilità

Il diagramma limite di formabilità (FLD) insieme alla curva limite di formabilità (FLC) fornisce un metodo per determinare le limitazioni del processo nella formatura della lamiera ed è utilizzato per valutare le caratteristiche di stampaggio delle lamiere. Di solito, il diagramma limite di formabilità viene utilizzato nella pianificazione del metodo, nella produzione di utensili e nelle officine di utensili per ottimizzare gli utensili di stampaggio e le loro geometrie.

Questo diagramma presenta nei suoi due assi le deformazioni. Sull'asse delle ordinate, si trova la deformazione principale massima, ε_1 , per definizione sempre positiva. Sull'asse delle ascisse, si trova la deformazione principale minima, ε_2 , che può essere positiva o negativa [11].

Come è possibile vedere in figura 3.5, possiamo avere tre diversi casi:

- Sia la deformazione principale massima che quella minima sono positive. In questo caso si parla di **stiratura**;
- La deformazione minima, ε₂, è uguale a zero. In questo caso si parla di deformazione piana;
- La ε_2 è minore di zero. In questo caso si parla di **imbutitura**.



Figura 3.5: Diagramma limite di formabilità

La curva presente nel grafico in figura 3.5, è la curva limite di formabilità e divide il diagramma in due parti: quella inferiore contiene le combinazioni di deformazioni principali che garantiscono un pezzo integro, mentre quella superiore indica le condizioni in cui si ha probabile rottura del pezzo, in prossimità della linea definitiva, e la certezza di rottura man mano che ci sia allontana da quest'ultima. L'obiettivo , quindi, è garantire che le sollecitazioni nella lamiera non si avvicinino a questa curva limite. Inoltre, la forma della curva dipende da una serie di diverse proprietà del materiale, quindi materiali diversi avranno curve limite di formabilità diverse. Una delle tante proprietà che influenza questa curva è il coefficiente di incrudimento, \mathbf{n} .

3.5 Calcolo della FLC

Nel caso , invece, del calcolo della FLC bisogna o eseguire una prova che prende il nome di Nakajima test, oppure bisogna ricorrere a dei metodi analitici che attraverso i parametri derivanti dalla prova di trazione sono in grado di ricostruire la curva limite di formabilità.

3.5.1 Nakajima test

Il test di Nakajima è un metodo noto per determinare la curva limite di formabilità dei materiali. Il test di Nakajima si basa sul principio della deformazione dei pezzi grezzi di lamiera di diverse geometrie utilizzando un punzone semisferico fino a frattura. Variando la larghezza del provino (Fig. 3.6), si differenziano le condizioni di imbutitura e formatura che si verificano sulla superficie della lamiera (da una regolare deformazione biassiale ad un semplice carico di trazione) [12].



Figura 3.6: Provini di diversa geometria utilizzati per il nakajima test

Un metodo utilizzato consiste nel verniciare manualmente i provini di bianco e successivamente applicare dei punti neri. Successivamente, si ripongono i provini nella macchina e si avvia la prova che va fermata quando l'operatore nota la nucleazione della prima cricca. Le deformazioni vengono misurate nella parte centrale del provino, vicino alla cricca. La misurazione delle deformazioni viene effettuata utilizzando un sistema fotogrammetrico che funziona secondo il principio della correlazione dell'immagine digitale. Il sistema durante tutta la prova acquisisce una quantità considerevole di fotogrammi. Dall'analisi di questi fotogrammi, tramite un script predefinito, il sistema riesce a ricavare i valori delle due deformazioni principali, in accordo con la EN ISO 12004-2 [13].



Eseguendo i medesimi passaggi, per ognuno dei sei diversi provini, si riesce ad ottenere la curva limite di formabilità (fig. 3.7).



Figura 3.7: Esempio di FLC ottenuta secondo la norma [13]

3.5.2 Metodi analitici per il calcolo della FLC

Oltre ad essere ricavata tramite prove sperimentali come il Nakajima test, è possibile calcolare la FLC tramite metodi empirici che utilizzano i dati ottenuti dalle prove di trazione.

Keeler and Brazier furono i primi a sviluppare un modello per il calcolo della FLC che tenesse conto sia dello spessore del materiale che del coefficiente di incrudimento n [14]. Il modello si compone di tre equazioni: una per il calcolo della FLC₀, un'altra per il calcolo della parte destra della curva e una per la parte sinistra della curva. Tutte le deformazioni ricavate da queste equazioni sono deformazioni reali. La FLC₀, che rappresenta il punto più basso della curva laddove la deformazione minima è pari a zero, viene ricavata utilizzando la seguente formula:

$$FLC_0 = ln \Big[1 + \Big(\frac{23,3+14,13t}{100} \Big) \frac{n}{0,21} \Big]$$
(3.4)

dove n è il coefficiente di incrudimento, ricavato dalle prove di trazione, e t è lo spessore del materiale espresso in [mm].

La parte sinistra della FLC presenta una pendenza pari a '-1', come è possibile notare dall'equazione 3.5.

$$\varepsilon_1 = FLC_0 - \varepsilon_2 \tag{3.5}$$

Per il calcolo della parte destra, si utilizza invece l'equazione 3.6.

$$\varepsilon_1 = (1 + FLC_0)(1 + \varepsilon_2)^{0.5} - 1 \tag{3.6}$$

Nel 1992, anche Raghavan, sviluppò un modello leggermente diverso da quello proposto da Keeler and Bazier, dove la FLC_0 cresceva all'aumentare della deformazione totale , ε_t , e dello spessore della lamiera, t.

Cayssials, nel 1998, sviluppò un modello che dimostrava come l'andamento della FLC fosse influenzata soprattutto dalla velocità di deformazione, dall'incrudimento e dallo spessore di lamiera. Dal confronto tra il proprio modello e quello di Keeler, riguardo al calcolo della FLC₀, emerse come il modello di Keeler fosse valido solo per gli acciai a basso tenore di carbonio. Il lavoro venne esteso e completato nel 2005 grazie all'aiuto di Leimone, ottenendo così un modello che prevedeva il calcolo della FLC dai parametri misurati da prove di trazione uniassiale: resistenza a trazione, l'allungamento uniforme, il coefficiente di anisotropia e lo spessore dell'acciaio. I loro articoli però non forniscono equazioni che permettano di calcolare la FLC, e l'unico modo per ottenere un Cayssials-FLC è tramite AutoForm, un software di simulazione agli elementi finiti (così come il modello Arcelor V9 sviluppato dalla Arcelor Mittal)[15].

Uno dei modelli più interessanti è stato sviluppato da Abspoel e Scholting [15]. Tale modello, utilizzato dal colosso indiano Tata Steel, permette di calcolare la FLC utilizzando unicamente i valori restituiti dalla prova di trazione. Oltre alla semplicità di calcolo, tale modello offre una rappresentazione più accurata della FLC per diversi tipi di acciai sia formati a freddo che formati a caldo.

Per la determinazione della FLC, tale modello prevede il calcolo di 4 diversi punti (figura 3.8):

• Punto di tensione uniassiale (TE);

- Punto di deformazione piana (PS);
- Punto di stiramento biassiale intermedio (IM);
- Punto di stiramento biassiale (BI);



Figura 3.8: FLC sviluppata tramite il modello di Abspoel e Scholting

Lo studio di tale modello è stato fatto andando ad analizzare le caratteristiche meccaniche di diversi acciai: acciai laminati a freddo, acciai laminati a caldo, acciai HSLA, acciai TRIP, acciai BH, acciai TWIP e acciai DP. Il primo passo è stato quello di vedere come le diverse proprietà meccaniche, ottenute dalla prova di trazione, influenzassero la costruzione della FLC. Le proprietà meccaniche ottenute dalla prova di trazione sono la resistenza allo snervamento (R_p), la resistenza alla rottura (R_m), l'allungamento uniforme (A_g), l'allungamento totale a rottura (A_{80}), il coefficiente di incrudimento (n), il coefficiente di anisotropia (r).

Per il calcolo del punto di tensiole uniassiale (TE), le analisi fatte hanno mostrato come i valori delle deformazioni reali fossero influenzati dal valore di r, dallo spessore della lamiera t e dall'allungamento totale a rottura A_{80} . Tali studi hanno portato alla definizione delle seguenti equazioni:

$$\varepsilon_1^{TE} = (1 + 0.797 \cdot r^{0.701}) \frac{0.0626 \cdot A_{80}^{0.567} + (t - 1) \cdot (0.12 - 0.0024 \cdot A_{80})}{\sqrt{1 + (0.797 \cdot r^{0.701})^2}}$$
(3.7)

$$\varepsilon_2^{TE} = -\frac{(0.0626 \cdot A_{80}^{0.567} + (t-1) \cdot (0.12 - 0.0024 \cdot A_{80})) \cdot 0.797 \cdot r^{0.701}}{\sqrt{1 + (0.797 \cdot r^{0.701})^2}}$$
(3.8)

Per il calcolo del punto di deformazione piana (PS), Abspoel e Scholting notarono una relazione lineare tra la deformazione reale, ε_1 , e l'allungamento totale a rottura, A_{80} , come mostrato in figura 3.9.



Figura 3.9: Relazione tra le deformazioni reali misurate nel caso di deformazione piana e l'allungamento totale

Tenendo conto anche dell'influenza dello spessore t, ricavarono l'equazione 3.9 per il calcolo della ε_1^{PS} (la ε_2^{PS} nel caso di stato di deformazione piana è pari a zero).

$$\varepsilon_1^{PS} = 0.0084 \cdot A_{80} + 0.0017 \cdot A_{80} \cdot (t-1) \tag{3.9}$$

Anche per il calcolo del punto di stiramento biassiale (BI), laddove le due deformazioni reali sono uguali, viene fatta un'analisi simile a quella già fatta per i punti precedentemente analizzati. Dagli studi fatti, si nota sempre una relazione lineare tra la deformazione e l'allungamento a rottura, però, a differenza del caso precedentemente analizzato, si è visto che oltre un certo valore di spessore t, questo non aveva più influenza sul valore di deformazione. Per tale motivo si è trovato un valore t di transizione, espresso dalla seguente formula:

$$t^{trans} = \frac{1.5 - 0.00215 \cdot A_{80}^{MIN}}{0.6 + 0.00285 \cdot A_{80}^{MIN}} \tag{3.10}$$

dove A_{80}^{MIN} è il minimo valore di allungamento a rottura calcolato nelle tre direzioni rispetto al verso di laminazione (0°,45° e 90°). Al di sotto di tale valore, la deformazione si calcola utilizzando la formula 3.11.

$$\varepsilon_1^{BI} = 0.00215 \cdot A_{80}^{MIN} + 0.25 + 0.00285 \cdot A_{80}^{MIN} \cdot t \tag{3.11}$$

Nel caso in cui il valore di t sia superiore al valore di t^{trans} precedentemente calcolato, la formula risulta essere pari a:

$$\varepsilon_1^{BI} = 0.00215 \cdot A_{80}^{MIN} + 0.25 + 0.00285 \cdot A_{80}^{MIN} \cdot t^{trans}$$
(3.12)

Le analisi fatte per il calcolo del punto di stiramento biassiale intermedio (IM) mostrano anche , in questo caso, sia un andamento lineare delle deformazione nei confronti dell'allungamento sia il fatto che oltre ad un determinato valore di spessore, questo non ha più nessuna influenza sul valore delle deformazioni. Quindi, nel caso in cui il valore di t sia minore del valore di t^{trans} calcolato con la formula 3.10, le deformazioni si calcolano utilizzando le seguenti equazioni:

$$\varepsilon_1^{IM} = 0.0062 \cdot A_{80} + 0.18 + 0.0027 \cdot A_{80} \cdot (t-1) \tag{3.13}$$

$$\varepsilon_2^{IM} = 0.75 \cdot \varepsilon_1^{IM} \tag{3.14}$$

Se, il valore di t è superiore a t^{trans} , si ha:

$$\varepsilon_1^{IM} = 0.0062 \cdot A_{80} + 0.18 + 0.0027 \cdot A_{80} \cdot (t^{trans} - 1)$$
(3.15)

$$\varepsilon_2^{IM} = 0.75 \cdot \varepsilon_1^{IM} \tag{3.16}$$

Le figure 3.10 e 3.11 , fornite da Tata Steel, mostrano come tale modello sia quello che riesce a seguire meglio i punti sperimentali derivanti dal test Nakajima per diversi tipi di acciai [16].



Figura 3.10: Confronto tra le diverse curve FLC di un acciaio laminato a freddo (figura di sinistra), un DC 04, ed un acciaio laminato a caldo (figura di destra), un DD13 [16]



Figura 3.11: Confronto tra le diverse curve FLC di un acciaio laminato a freddo (figura di sinistra), un HCT600X+Z, ed un acciaio laminato a caldo (figura di destra), un S420MC [16]

Capitolo 4

Il processo di imbutitura

Il processo di imbutitura è uno dei processi più usati in ambito industriale. È un'operazione di deformazione plastica a freddo che permette di passare da una lamiera piana ad una di forma concava. Diverse operazioni possono precedere o meno l'operazione di imbutitura, ad esempio nel caso in cui la lamiera non sia già stata divisa in blank verrà eseguita un'operazione di tranciatura al fine di ottenere i blank già sagomati. In questo capitolo, verranno descritti i processi di deformazione plastica a freddo, gli strumenti utilizzati per eseguire un processo di imbutitura e le sue fasi.

4.1 Deformazione plastica a freddo

Il meccanismo di deformazione plastica a freddo, da un punto di vista microscopico, può essere spiegato attraverso la teoria delle dislocazioni. Le dislocazioni sono dei difetti di linea presenti nella struttura del reticolo cristallino. Tale difetto comporta che lo scorrimento di una parte del reticolo rispetto all'altro avviene con tensione tangenziale minore rispetto all'assenza di difetto poichè i legami interatomici da rompere sono minori.


Figura 4.1: Deformazione plastica per scorrimento in presenza di una dislocazione a spigolo

Nel caso più comune dei policristalli, la traslazione dei blocchi di atomi avviene a partire da quei grani dove i piani di scorrimento hanno un' orientazione favorevole rispetto alla forza applicata. Tuttavia lo scorrimento viene bloccato da quei grani che presentano un'orientazione non favorevole. La conseguenza è che non tutti i grani subiscono la stessa deformazione. Durante la deformazione plastica, il numero di dislocazioni cresce rendendo più facile la deformazione plastica del pezzo [8].

4.2 Le presse

Le macchine normalmente utilizzate per le operazioni di stampaggio lamiera sono le presse. Le presse sono macchine in cui si realizza un moto alternativo di un organo mobile, la slitta, che durante la sua corsa esercita una determinata forza sul materiale al fine di deformarlo. Le presse si distinguono in presse meccaniche, dove il movimento della slitta viene ottenuto tramite il meccanismo biella-manovella, e presse oleodinamiche nelle quali il movimento della slitta viene ottenuto tramite un olio in pressione. Nelle presse meccaniche (fig. 4.2), il motore elettrico aziona il volano tramite degli ingranaggi o delle cinghie. Durante il funzionamento, una frizione mette in comunicazione l'albero del volano con l'albero eccentrico o a manovella che, per mezzo di una biella, comanda la corsa della slitta.



Figura 4.2: Schema di una pressa meccanica

Nelle presse oleodinamiche (fig. 4.3), il funzionamento si basa sul movimento di uno o più pistoli idraulici ottenuto tramite l'olio in pressione. Una pressa oleodinamica ha il vantaggio di poter regolare la pressione e quindi la velocità di discesa slitta che può essere resa costante. Un'altra caratteristica è la capacità di poter limitare la forza massima a un valore desiderato potendo utilizzare valvole idrauliche di massima pressione [8].



Figura 4.3: Schema di una pressa oleodinamica

Le presse , inoltre, possono essere a semplice effetto o a doppio effetto (fig. 4.4). La differenza principale sta nel fatto che nelle presse a semplice effetto abbiamo il punzone fisso ancorato al basamento. In entrambi i casi, sono presenti delle guide che impediscono ad eventuali forze laterali di portare sbilanciamento della pressione sulla lamiera, comportando pezzi finali con errori geometrici e in alcuni casi rottura di componenti degli stampi.



Figura 4.4: Presse a semplice e a doppio effetto

4.3 Gli stampi

Gli stampi sono caratterizzati da tre elementi principali:

- La matrice è la parte fissa ed inferiore dello stampo. Questa, insieme al punzone, ha il compito di deformare la lamiera ed è realizzata prevedendo anche un angolo di sformo per facilitare l'espulsione della lamiera a lavorazione terminata;
- Il **punzone** costituisce la parte mobile dello stampo e può avere diverse forme a seconda della lavorazione da effettuare. Di solito, viene fissato sulla parte superiore delle presse e , con il suo movimento, garantisce la formatura della lamiera;
- Il **premilamiera** ha il compito di tenere premuta la lamiera contro la matrice ed evitare che questa scivoli via durante la fase di imbutitura. Ha anche il compito di evitare la formazione di grinze.

Gli stampi possono avere sia forme geometricamente semplici o forme più complesse come ad le portiere di un'automobile. Negli stampi più complessi, per evitare eccessive tensioni e poter controllare meglio il flusso della lamiera nella matrice, vengono inseriti nel premilamiera dei dispositivi chiamati *rompigrinze* che rallentano il movimento della lamiera verso quelle zone più critiche. Vengono previste inoltre zone di rilascio della tensione, dove le tensioni in eccesso rispetto alla resistenza del materiale provocano rotture. Queste zone vengono disposte dove il materiale viene successivamente eliminato tramite l'operazione di tranciatura [8].

4.4 Le fasi del processo

Dopo aver visto le macchine e gli stampi utilizzati per questo tipo di processo, si pone l'attenzione sulle fasi del processo. In sintesi, il processo di imbutitura può essere diviso in quattro fasi. Durante la prima fase, il punzone e il premilamiera si trovano in alto al di sopra della matrice; lo spezzone di lamiera si trova posizionato sulla matrice. Nel momento in cui la pressa viene azionata, ha inizio la seconda fase in cui il premilamiera compie la sua corsa verso il basso, fino ad appoggiarsi sulla lamiera posizionata; in questo modo la lamiera viene pressata fra le superfici della matrice e del premilamiera. Il valore della pressione sulla lamiera dipende dal materiale che si sta utilizzando e dal suo spessore. Anche il punzone inizia la sua corsa verso il basso. Successivamente, il punzone, continuando a scendere, viene a contatto con la lamiera ed inizia l'imbutitura. La forza esercitata dal punzone costringe la lamiera a deformarsi e a scorrere verso l'interno della matrice assumendo la forma del punzone. La forza del premilamiera deve avere un'intensità tale da non impedire lo scorrimento della lamiera (ciò è facilitato attraverso un'opportuna lubrificazione che riduce l'attrito), ma adatta a contrastarne il raggrinzimento conseguente al moto imbutente del punzone. Durante l'ultima fase, sia il punzone che il premilamiera effettuano la corsa di ritorno verso l'alto; nel mentre il pezzo, per l'azione della molla dell'espulsore, viene spinto fuori dalla matrice. La molla viene compressa durante l'imbutitura immagazzinando l'energia che restituisce in questa fase. Diversi sono i parametri che possono essere variati durante un processo di imbutitura, come ad esempio la lubrificazione o la pressione del premilamiera. La lubrificazione riduce l'attrito tra la lamiera, la matrice e il premilamiera, diminuendo

così la forza di imbutitura e aumentando la durata dello stampo. Solitamente vengono usati oli per acciai. La pressione del premilamiera, invece, deve essere scelta in modo corretto. Un ottimo valore di pressione, infatti, rappresenta un compromesso tra il pericolo di rottura a trazione del pezzo e quello di formazione di pieghe. I valori tipici di pressione utilizzati per gli acciai sono intorno ai 2,5 MPa.

Capitolo 5

Materiali e metodi

In questo capitolo, verranno trattati i vari metodi sperimentali utilizzati per poter avere delle informazioni sul materiale utilizzato. Le prove sul materiale sono state svolte nei laboratori del TO PROVE LAB a Rivoli, mentre le prove di stampaggio sono state effettuate nello stabilimento della MA a Chivasso.

5.1 L'acciaio usato

L'acciaio utilizzato è un acciaio per imbutitura profonda. Questi acciai, che appartengono alla famiglia degli acciai dolci, sono caratterizzati da un alto valore del coefficiente di anisotropia r. Più questo coefficiente è alto, più è facile formare a freddo il materiale. L'acciaio è stato fornito dall'acciaieria ArcelorMittal. Dal certificato fornito dall'acciaieria, secondo la EN 10346, questo acciaio viene classificato come un DX57D+Z. Infatti, la norma EN 10346 specifica i requisiti per i prodotti rivestiti per immersione a caldo in continuo di acciai a basso tenore di carbonio idonei alla formatura a freddo e di acciai ad alto limite di snervamento per formatura a freddo e rivestiti con zinco (Z), lega zinco – ferro (ZF) o lega zinco – alluminio (ZA), con spessori da un minimo di 0.35mm fino ad un massimo di 3mm se non diversamente accordato [17]. Se concordato al momento della richiesta o dell'ordine la presente norma europea può essere applicata anche ai prodotti piani rivestiti per immersione a caldo in continuo spessore < 0.35mm o > 3mm. I prodotti presenti all'interno di questa norma europea sono utilizzati dove formabilità a freddo, alta resistenza, un determinato snervamento minimo e resistenza alla corrosione sono i fattori più importanti. Questi acciai (fig. 5.1) vengono classificati secondo un ordine crescente di formabilità, da un DX51D, che è il meno formabile, ad un DX57D che presenta le caratteristiche migliori di formabilità.

	Des	signation		C	hemical % by m	composi y mass nax.	ition	
Steel grade								
Steel	Steel number	available coatings	С	Si	Mn	P	S	Ti ^a
DX51D	1.0917	+Z,+ZF,+ZA,+ZM,+AZ,+AS	0,18		1,20	0,12		
DX52D	1.0918	+Z,+ZF,+ZA,+ZM,+AZ,+AS		1			1	
DX53D	1.0951	+Z,+ZF,+ZA,+ZM,+AZ,+AS						
DX54D	1.0952	+Z,+ZF,+ZA,+ZM,+AZ,+AS	0.40	0.50	,50 0,60	0,10 0,045	0.045	0.00
DX55D	1.0962	+AS	0,12	0,50			0,30	
DX56D	1.0963	+Z,+ZF,+ZA,+ZM,+AZ,+AS						
DX57D	1.0853	+Z,+ZF,+ZA,+ZM,+AS						

Figura 5.1: Classificazione acciai ad alta imbutitura rivestiti con zinco secondo la EN 10346

In tabella 5.1, viene mostrata l'analisi chimica fornita dall'acciaieria. I valori dei vari elementi presenti nell'acciaio sono del tutto in linea con i riferimenti dati dalla norma UNI EN 10346.

Analisi chimica						
Tipo di acciaioC %Mn %P %S%Si %Al%Ti%						
DX57D+Z 0,015 0,1123 0,0095 0,0097 0,024 0,045 0,055						

Tabella 5.1: Analisi chimica fornita dall'acciaieria

Oltre all'analisi chimica, l'acciaieria fornisce le caratteristiche meccaniche tipiche di questo acciaio, riportate nella tabella 5.2.

<u> </u>					
Caratteristiche meccaniche					
Re	167 MPa				
Rm	297 MPa				
A %	56,2				
r	$2,\!35$				
n	$0,\!240$				

Tabella 5.2: Caratteristiche meccaniche fornite dall'acciaieria

La norma EN 10346, oltre ad indicare i valori limite degli elementi chimici presenti nell'acciaio, dà dei valori minimi per le caratteristiche meccaniche di questi tipi di acciai. Confrontando i valori della tabella 5.2 con quelli indicati dalla EN 10346 (figura 5.2), tali valori sembrano essere in linea con i riferimenti dati.

	Designation		Yield strength	Tensile strength	Elongation	Plastic strain ratio	Strain hardening exponent
Steel	orade		MPa ⁹	MPa ⁹	%	min.	min.
Steel name	Steel number	- Symbols for the types of available coatings			min.		
DX51D	1.0917	+Z,+ZF,+ZA,+ZM,+AZ,+AS,	-	270 to 500	22	-	-
DX52D	1.0918	+Z,+ZF,+ZA,+ZM +AZ,+AS	140 to 300 ^c	270 to 420	26	-	-
DX53D	1.0951	+Z,+ZF,+ZA,+ZM +AZ,+AS	140 to 260	270 to 380	30	-	-
DX54D	1.0952	+Z,+ZA	120 to 220	260 to 350	36	1,6 ^d	0,18
DX54D	1.0952	+ZF,+ZM	120 to 220	260 to 350	34	1,4 ^d	0,18
DX54D	1.0952	+AZ	120 to 220	260 to 350	36	-	-
DX54D	1.0952	+AS	120 to 220	260 to 350	34	1,4 ^{d, e}	0,18 ^e
DX55D ^f	1.0962	+AS	140 to 240	270 to 370	30	-	-
DX56D	1.0963	+Z,+ZA	120 to 180	260 to 350	39	1,9 ^d	0,21
DX56D	1.0963	+ZF,+ZM	120 to 180	260 to 350	37	1,7 ^{d, e}	0,20 ^e
DX56D	1.0963	+AZ, +AS	120 to 180	260 to 350	39	1,7 ^{d, e}	0,20 ^e
DX57D	1.0853	+Z, +ZA	120 to 170	260 to 350	41	2,1 ^d	0,22
DX57D	1.0853	+ZF,+ZM	120 to 170	260 to 350	39	1,9 ^{d, e}	0,21 ^e
DX57D	1.0853	+AS	120 to 170	260 to 350	41	1,9 ^{d, e}	0,21 ^e

Figura 5.2: Caratteristiche meccaniche acciai ad alta imbutitura rivestiti con zinco secondo la EN 10346

Tale acciaio però all'interno del laboratorio TO PROVE LAB, facendo riferimento ad una vecchia norma fiat, viene definito come un **CR 06** poichè le caratteristiche meccaniche e l'analisi chimica corrispondono all'acciaio così denominato. D'ora in avanti chiameremo quindi l'acciaio utilizzato come **CR 06**, in cui CR sta per cold rolled, laminato a freddo, e il valore 06 sta ad indicare l'alta imbutibilità di tale acciaio.

Sia per le caratteristiche meccaniche che per l'analisi chimica, verrano comunque eseguite delle prove in laboratorio per attestare la veridicità dei dati forniti dall'acciaieria.

5.2 Metodi di prova sul materiale

Sul materiale, sono state fatte una serie di prove tra cui: l'*analisi chimica*, per poter valutare la percentuale di elementi presenti in lega; la *prova di trazione* utile per poter conoscere le caratteristiche meccaniche del materiale; le *prove metallografiche* per la valutazione della microstruttura e per la possibile presenza di inclusioni.

5.2.1 Analisi chimica

L'analisi chimica è stata svolta nei laboratori del TO PROVE LAB utilizzando uno spettrometro ad emissione ottica, lo S5 SOLARIS CCD Plus e seguendo la normativa ASTM E415-21 relativa agli acciai [18].

Prima di poter effettuare la prova, poichè l'acciaio da analizzare è un acciaio zincato, è necessario eliminare lo strato superficiale di zinco. Eliminato lo strato di zinco, il materiale viene sottoposto ad una potente scarica elettrica generata da un elettrodo. Sotto l'effetto di questa scarica parte della superficie viene vaporizzata creando una nube di ioni eccitati che emettono una radiazione elettromagnetica. Tale radiazione viene successivamente risolta nelle sue componenti spettrali. Ogni singola componente è univoca per ogni elemento chimico e la sua intensità è proporzionale alla sua concentrazione. I valori di concentrazione degli elementi chimici sono stati ricavati come media delle tre prove svolte su un campione di materiale.

5.2.2 Metallografia

Per poter analizzare la microstruttura del materiale, bisogna realizzare dei campioni metallografici. Per poter fare ciò, bisogna prima tagliare il pezzo da analizzare, in questo caso corrispondente ad una sezione trasversale (fase di troncatura); poi inglobare il pezzo tagliato ottenendo così un campione facile da maneggiare e da analizzare (fase di inglobatura); ed infine bisogna lucidare il campione (fase di lucidatura). L'inglobatura del campione è stata fatta utilizzando una inglobatrice a caldo. Lo scopo di questa fase è quello di ottenere un campione che possa essere facilmente lucidato. La fase di lucidatura è stata svolta tramite una lucidatrice automatica. È la fase finale del processo di preparazione del campione per le successive analisi e ha lo scopo di rettificare le deformazioni causate dalle precedenti fasi di lavoro (durante il sezionamento e il taglio). La lucidatura metallografica consiste in diversi passaggi, ciascuno dei quali utilizza un abrasivo più fine del precedente. Una volta eseguita anche la lucidatura, il campione si presenta come mostrato in figura 5.3.



Figura 5.3: Campione inglobato e lucidato

5.2.3 Prova di trazione

La prova di trazione è stata svolta nei laboratori del TO PROVE LAB utilizzando una macchina di trazione della Galdabini (fig. 5.4).

Materiali e metodi



Figura 5.4: Macchina di trazione

La prova viene eseguita seguendo la normativa ISO 6892-1 relativa alle prove di trazione a temperatura ambiente sui materiali metallici [19]. I provini, solitamente ad osso di cane, vengono ottenuti mediante un taglio a cesoia e una successiva fresatura al fine di rimuovere le bave e l'incrudimento dato dal taglio meccanico. A partire da un blank rettangolare, si ricavano nove provini: tre provini lungo il verso di laminazione, tre provini a 45° rispetto al verso di laminazione e tre provini a 90° rispetto al verso di laminazione. Per ogni direzione rispetto al verso di laminazione, si testano i tre provini e successivamente si fa una media dei valori ottenuti. Inoltre, la norma ISO 6892 illustra due possibili metodi da poter utilizzare per la velocità di prova. Il metodo Annn basato sulla velocità di deformazione e il metodo Bn basato sulla velocità del carico unitario. I simboli 'nnn' sono una serie di un massimo di

3 caratteri che si riferiscono alle velocità utilizzate durante ciascuna prova nelle varie fasi. La norma indica infatti quattro intervalli, numerati dall'1 al 4, che indicano diversi livelli di velocità. In questo caso, è stato utilizzato il metodo A224. Questo metodo basato sulla velocità di deformazione consiste nell'utilizzare nelle due fasi corrispondenti al campo elastico e al campo elasto-plastico, una velocità di deformazione pari a 0,00025 s⁻¹ corrispondente all'intervallo 2 indicato sulla norma, e nella fase di campo plastico una velocità di deformazione pari a 0,0067 s⁻¹ corrispondente all'intervallo 4 indicato sulla norma.

Le quattro caratteristiche meccaniche, quali la resistenza allo snervamento, la resistenza alla trazione, l'allungamento uniforme e l'allungamento a rottura, sono grandezze che il software legge direttamente dal grafico.

Diverso è invece per il calcolo delle grandezze r ed n. In accordo con la norma EN ISO 10113, il valore r, ricordando la formula 3.1, viene calcolato conoscendo la deformazione lungo la larghezza , che viene misurata dall'estensimetro trasversale, e dalla deformazione lungo lo spessore che viene ricavata dal software applicando il principio di conservazione del volume [20]. Inoltre, il valore di r riportato nelle tabelle viene calcolato per un determinato valore di deformazione che, in questo caso, è pari al 20 %.

In accordo con la norma ISO 10275, il valore di n è determinato da una regressione lineare del logaritmo della vera tensione rispetto al logaritmo della vera deformazione, in un determinato intervallo di deformazioni plastiche che, in questo caso, è stato scelto tra il 10 % e il 20 %. La pendenza della retta così ottenuta fornisce il valore di n [10].

5.2.4 Metodo di calcolo FLC

La curva limite di formabilità, meglio nota come FLC, è stata ottenuta utilizzando e confrontando tre modelli analitici differenti:

- il modello di Keeler;
- il modello di Abspoel e Scholting;
- il modello ArcelorV9;

Il modello di Keeler, come già detto in precedenza, necessita di due parametri fondamentali per il calcolo della FLC: spessore della lamiera, t, e indice di incrudimento, n. L'indice di incrudimento viene calcolato come media delle tre diverse prove nelle tre direzioni ed è riportato in tabella 5.4. Utilizzando la formula 3.4 si ottiene il punto chiamato FLC₀, con le formule 3.6 e 3.5 si ottengono rispettivamente la parte destra e sinistra della curva, riportati nella tabella 5.3.

ε_2	ε_1
-0,3465	0,6654
0	0,3188
0,0635	0,3601
0,2	0,4447
0,3368	0,5248
0,4665	0,5971

Tabella 5.3: Punti FLC ottenuti tramite il metodo di Keeler

Il modello di Abspoel e Scholting, invece, tiene conto di un numero maggiore di parametri rispetto al modello precedente, tra cui:

- lo spessore della lamiera, t;
- l'indice di anisotropia, r;
- l'allungamento totale a rottura, A₈₀;
- l'allungamento totale minimo a rottura nelle tre direzioni 0°, 45° e 90°, A₈₀^{MIN};

Questi parametri sono ottenuti dalla prova di trazione precedentemente svolta e sono ottenuti come media delle prove svolte. Per il valore di r, invece che utilizzare una semplice media statistica come nel caso degli altri parametri, si è utilizzata la formula 3.3 per $r_{\rm m}$. Nella tabella 5.4, sono riportati i valori di tali parametri utili per il calcolo della curva.

t	A ₈₀	A_{80}^{MIN}	r	n
0,8 mm	43,73~%	42,16~%	1,95	0,23

 Tabella 5.4:
 Parametri utili al calcolo della FLC

L'utilizzo di tali valori all'interno delle formule già presentate nel capitolo 3, permettono di calcolare i 4 punti caratteristici di tale modello riportati nella tabella 5.5.

Abspoel e Scholting				
	ε_2	ε_1		
ΤE	-0,4169	0,7444		
\mathbf{PS}	0	$0,\!3524$		
IM	0,3206	$0,\!4275$		
BI	$0,\!4367$	0,4367		

Tabella 5.5: Punti FLC ottenuti tramite il metodo di Abspoel e Scholting

Per quanto concerne il modello ArcelorV9, è il modello più utilizzato all'interno del laboratorio del TO PROVE LAB e la FLC viene ottenuta utilizzando il software Autoform. Trattandosi infatti di un modello sviluppato dall'ArcelorMittal, di cui ne è il proprietario, non si hanno delle equazioni che dicano come calcolare i diversi punti della curva. Si può comunque dire che per il calcolo della FLC con tale modello, bisogna importare all'interno di Autoform:

- lo spessore della lamiera, t;
- l'indice di anisotropia a 90° rispetto al verso di laminazione, r_{90} ;
- l'allungamento uniforme a 90° rispetto al verso di laminazione, $A_{g,90}$;
- la resistenza alla trazione a 90° rispetto al verso di laminazione, $R_{m,90}$;

Nella tabella 5.6 sono stati riportati i valori utili per la costruzione della FLC utilizzando il metodo appena citato.

ε_2	ε_1
-0,3465	0,693
0	0,344
0,0635	0,3512
0,2	0,417
0,3368	0,4665
0,4665	0,4665

Tabella 5.6: Punti FLC ottenuti tramite il metodo di ArcelorV9

5.3 Preparazione allo stampaggio e all'analisi ottica

Prima di poter effettuare l'operazione di stampaggio, è necessario effettuare la marcatura elettrolitica dei blank che servirà successivamente per poter effettuare l'analisi ottica delle deformazioni. Questo processo prende il nome di reticolatura. Tale processo consiste nell'applicare sulla lamiera indeformata una griglia regolare di punti (fig. 5.5), in cui sia il diametro dei punti che le distanze tra i centri dei punti abbiano un valore iniziale ben definito, che solitamente può essere pari a 3, 2 o 1 mm.



Figura 5.5: Griglia di punti equidistanti: distanza tra i centri dei punti 3 mm, diametro dei punti 1,5 mm

La distanza tra i punti ha un'influenza non banale sulla soluzione. Più i punti sono vicini, più accurata sarà la soluzione. Per tale motivo in base alla grandezza del pezzo e alle deformazioni che ci si aspetta, si sceglie la griglia più opportuna. Per far sì che i punti siano chiaramente visibili, è necessario che ci sia un buon contrasto tra i punti stessi e il materiale di base. Infatti, per un metodo ottico, la precisione del punto, la nitidezza e l'omogeneità del colore determinano fortemente l'applicabilità del metodo [21].

Il processo di reticolatura avviene tramite il passaggio di una carica elettrica a bassa tensione e a basso voltaggio da un elettrodo, che in genere è composto da un blocco di grafite dotato di un tampone assorbente in feltro (polo positivo), al pezzo da marcare (polo negativo). Il passaggio della carica viene agevolato dall'uso di un apposito liquido elettrolitico.

Il kit per effettuare la marcatura è prodotto dalla OSTLING MARKINGSY-STEMS ed è costituito da:

• Power Unit EU CLASSIC 500 (figura 5.6): costituita da un trasformatore che produce la tensione in uscita da un minimo di 0 V fino a un massimo di 24V in corrente continua o alternata. Presenta due elettrodi: il primo viene collegato al pezzo da marcare, il secondo è collegato alla testa di marcatura [22];



Figura 5.6: Power unit, elettrolita e testa di marcatura della OSTLING MAR-KINGSYSTEMS

• Testa di marcatura: è costituita da un pezzo di grafite, da una membrana conduttiva, da un feltro (fig. 5.7).È collegata tramite un cavo elettrico alla power unit;



Figura 5.7: Testa di marcatura della OSTLING MARKINGSYSTEMS

- Liquido elettrolitico: favorisce il passaggio di corrente dalla testa di marcatura al pezzo. L'elettrolita utilizzato è il 701/9 della OSTLING MARKINGSY-STEMS;
- Stencil: costituito da una membrana semiporosa e da un telaio in metallo (fig. 5.8). Lo stencil utilizzato presenta una griglia con cerchi di diametro 1,5 mm e una distanza tra i centri dei cerchi di 3 mm.



Figura 5.8: Porzione di stencil con griglia

La reticolatura viene effettuata manualmente. Un operatore immerge la testa di marcatura nel liquido elettrolitico, finchè il feltro non assorbe tale liquido. Successivamente la testa di marcatura viene passata con una certa pressione al di sopra dello stencil più volte in modo uniforme. Una volta fatto ciò, lo stencil viene rimosso. Una volta terminato il processo, la lamiera si presenta come mostrato in figura 5.9



Figura 5.9: Marcatura elettrolitica

5.4 Prove di stampaggio e caratterizzazione degli stampati

Lo stampaggio delle lamiere è avvenuto nello stabilimento della MA sito a Chivasso. Lo stampaggio riguarda l'ossatura della portiera anteriore sinistra della I-car sviluppata nell'abito del progetto Avangard.

Per il suddetto processo, viene utilizzata una pressa meccanica della Mossini (fig. 5.10).La forza massima che la pressa è in grado di esercitare, è 400 t.

Materiali e metodi



Figura 5.10: Pressa meccanica Mossini

I pannelli reticolati, di dimensioni 1500x1310 mm e con uno spessore pari a 0,8 mm, vengono opportunamente lubrificati prima di poter essere stampati. Il grado di lubrificazione su ogni pannello viene misurato tramite uno strumento chiamato OFIS (Oil Film Thickness Measurement) (fig. 5.11) .Tale strumento sfrutta la legge sull'assorbimento della luce di Lambert Beer, secondo cui la quantità della luce assorbita dal materiale (in questo caso l'olio) è proporzionale allo spessore del materiale stesso. Lo strumento infatti, una volta posizionato al di sopra della lamiera, illumina il foglio oleato tramite due lampade alogene poste alla base delo strumento. Una parte della luce viene riflessa ed una parte assorbita. Grazie a ciò, è in grado di restituire in pochi secondi la quantità di olio (g/m^2) presente sul pannello [23]. Inoltre, sui pannelli vengono effettuati due fori in modo tale da scaricare le tensioni e poter richiamare del materiale verso l'esterno. Infatti, a seguito del processo di stampaggio, i fori presenteranno un diametro maggiore rispetto al diametro iniziale sintomo del fatto che ci sia stato un richiamo di materiale verso l'esterno.



Figura 5.11: OFIS

Vengono effettuate tre diverse prove con tre diverse condizioni al contorno. Nelle prime due prove, viene aggiunto un telo di nylon che ha lo scopo di agevolare lo scivolamento della lamiera. Tale telo può essere definito come un ulteriore lubrificante di tipo solido. Di seguito, si riportano le diverse condizioni analizzate:

- un pannello stampato con 10 g/ m^2 di olio in due passi successivi, con telo di nylon;
- un pannello stampato con 16 g/ m^2 di olio in due passi successivi, con telo di nylon;
- un pannello stampato con 12 g/ m^2 di olio in due passi successivi, senza nylon.

Si sottolinea come, trattandosi di una fase prototipale, le quantità d'olio utilizzate siano più alte rispetto ad un normale processo di imbutitura. In tutti e tre i casi l'operatore ha scelto di effettuare lo stampaggio in due passi successivi. Ha infatti controllato la discesa della pressa, facendola risalire quando ancora il pezzo non era completamente imbutito e facendone così scaricare le tensioni. Con il secondo

Materiali e metodi

passaggio si ha lo stampaggio definitivo del pannello. I primi due stampaggi hanno dato esito positivo, in quanto il pezzo, alla fine dello stampaggio, non presentava rotture. Nell'ultimo caso, invece, a causa probabilmente della mancanza del telo di nylon, il pezzo una volta stampato presentava due rotture.



Figura 5.12: Pannello prima e dopo l'imbutitura

Durante il processo, si raggiunge una pressione pari a 260 bar. Conoscendo la pressione, è possibile calcolare la forza di stampaggio considerando il fatto che la superficie su cui agisce è pari alla somma delle superfici degli steli che sorreggono la matrice.

I parametri di stampaggio sono riportanti nella tabella 5.7.

Parametri di stampaggio					
N° di steli	30				
Diametro di uno stelo	$40 \ mm$				
Superficie di uno stelo	$1256,\!64\ mm^2$				
Pressione di stampaggio	$26 \mathrm{MPa}$				
Forza agente su uno stelo	32,7 kN				
Forza totale	$981 \mathrm{~kN}$				

 Tabella 5.7:
 Parametri di stampaggio

A seguito del processo di imbutitura, il pezzo finito si presenta come mostrato in figura 5.13.



Figura 5.13: Ossatura portiera anteriore sinistra (grezzo di stampaggio)

5.5 Analisi ottica delle deformazioni

Una volta eseguite tutte le prove sul materiale e dopo aver ricavato la curva FLC che servirà per determinare il livello di deformazione degli stampati, si passa all'analisi ottica degli stampati. L'analisi ottica avviene tramite il software ARGUS della GOM. Tale attività consta di tre fasi:

- Acquisizione ed elaborazione delle immagini;
- Ricostruzione del modello;
- Analisi dei dati ottenuti.

Prima di poter acquisire le immagini, vanno posizionati sul pannello da analizzare dei markers magnetici (figura 5.15). In generale, vi sono due tipi di markers: i markers non codificati, che sono rappresentati dai punti precedentemente marcati sulla lamiera e che mi permettono di ricalcolare il cad 3D del pezzo da analizzare, e i markers codificati (fig. 5.14) che hanno il compito di collocare nello spazio il pannello dandone i riferimenti e percepirne le dimensioni reali.



Figura 5.14: Markers codificati

I markers codificati circolari possono essere identificati in modo inequivocabile grazie al codice circolare attorno al punto medio. Una distanza definita tra i marcatori codificati fornisce una lunghezza di riferimento per scalare la misurazione delle coordinate al mondo reale. Sono di vitale importanza perchè il pezzo in questione, trattandosi di un pezzo di dimensioni notevoli, verrà diviso per sottoprogetti. L'unione di questi sottoprogetti grazie ai riferimenti acquisiti darà vita al pezzo nella sua interezza.

Le immagini vengono acquisite utilizzando una NIKON D500 che è collegata al software tramite una LAN wireless. Il software elaborerà le immagini. Per far sì che il software riconosca i markers codificati e non condificati, ovvero i punti ottenuti a seguito della reticolatura, è necessario che:

- Ogni marker codificato sia presente in almeno due immagini;
- Ogni marker non codificato sia presente in almeno tre immagini.



Figura 5.15: Markers posizionati sul pannello

Una volta acquisite ed elaborate un numero sufficiente di immagini, si passa alla fase successiva che consiste nella ricostruzione del pannello. I markers non codificati infatti, una volta riconosciuti, verranno evidenziati in rosso (figura 5.16), e sarà possibile ricostruire la griglia dei punti manualmente. In determinate zone però può succedere che il software non sia in grado di ricostruire la griglia a causa della scarsa visibilità dei punti. Ciò è dovuto al fatto che durante il processo di stampaggio, nelle zone di maggiore attrito, è stata asportata completamente o parzialmente la reticolatura. Laddove i punti presentino deformazioni poco elevate è possibile ricostruire il modello tramite l'interpolazione, che restituisce comunque un risultato affidabile e in linea con la realtà. Nei punti più sollecitati ,invece, i risultati ottenuti non rispecchiano la realtà e per tale motivo si è deciso di non ricostruire tali zone.



Figura 5.16: Punti correttamente acquisiti dal software

Una volta costruita la griglia il software è in grado di calcolare le deformazioni. Quest'ultime vengono calcolate tramite una comparazione tra lo stato indeformato e lo stato deformato, valutando sia la distanza tra i centri dei punti prima e dopo il processo di imbutitura che la trasformazione da cerchi ad ellissi dei relativi markers non codificati. Inoltre, la deformazione non viene calcolata come la distanza tra i punti in linea retta, ma viene calcolata considerando una spline tra i due punti [24]. Una volta terminata la ricostruzione di ogni sottoprogetto, viene sviluppato un file che comprenderà l'unione di tutti i sottoprogetti dando così forma al modello finale ricostruito.

Una volta ricostruito il modello, il software genera la nuvola di punti che verrà confrontata con la FLC del materiale. Per ogni punto, è possibile conoscere: la deformazione ε_1 , la deformazione ε_2 e la riduzione di spessore. Mentre le prime due vengono calcolate confrontando la distanza tra i centri dei punti prima e dopo la deformazione, la riduzione di spessore viene calcolata partendo dalle deformazioni ε_1 e ε_2 , e assumendo che il volume si mantenga costante (conservazione del volume). A titolo di esempio, si riporta uno dei tre modelli ricostruiti in figura, in questo caso riguardante la riduzione di spessore del pannello stampato con 16 g/m² di olio. Come è possibile notare dalla figura 5.17, i pallini verdi indicano i markers codificati applicati al pezzo per poterlo collocare nello spazio , mentre le linee non ricostruite, evidenziate in figura, sono presenti a causa del posizionamento dello stencil durante la fase di reticolatura.



Figura 5.17: Esempio modello ricostruito

5.6 Analisi dello spessore

A seguito dell'analisi ottica, si è voluto verificare l'attendibilità di tali valori forniti dal software per ogni punto. Per fare ciò, è stato necessario asportare un pezzo della portiera per poter così misurare lo spessore. Per misurare lo spessore, è stato utilizzato un banco di misura orizzontale della TRIMOS. Il pezzo è stato asportato dalla zona che presentava una maggiore riduzione dello spessore e la portiera in questione è quella stampata con una grammatura d'olio pari a 16 g/m² e con l'aggiunta del foglio di nylon. Sono stati scelti e misurati 5 punti, come mostrato in figura 5.18.



Figura 5.18: Punti scelti per le misure di spessore

Gli stessi 5 punti sono stati estrapolati dal software. Per poter prendere correttamente i punti, è stato necessario inserire la modalità griglia sul pezzo, per essere così certi di aver selezionato i punti in questione. Infatti, le intersezioni tra le linee della griglia corrispondono ai centri dei punti. Partendo così dal punto uno e spostandosi orizzontalmente sulla stessa linea dei punti, è stato possibile individuare i punti scelti contando le intersezioni presenti.



Figura 5.19: Punti scelti visualizzati sul modello ricostruito

Capitolo 6

Risultati

In questo capitolo, vengono presentati i risultati ottenuti. I primi ad essere presentati sono i risultati ottenuti sul materiale relativi alle diverse prove fatte. Successivamente, una volta presentati tutti i risultati relativi alle prove svolte sul materiale, vengono mostrati i risultati relativi all'analisi ottica.

In primis, è stata analizzata la riduzione di spessore nei tre casi tenendo conto dei diversi gradi di lubrificazione. Per ogni pannello, è stato evidenziato sia il punto che ha subito una riduzione massima dello spessore sia un'analisi generale della riduzione di spessore al variare dei diversi gradi di lubrificazione.

Una seconda analisi è stata fatta andando a evidenziare i diversi valori della deformazione principale ε_1 in diversi punti di ogni singolo pannello e anche qui è stata fatto un confronto in base ai diversi gradi di lubrificazione.

Sono stati confrontati anche i diagrammi FLD ottenuti, facendo una serie di considerazioni sui punti più vicini alla FLC.

In ultima analisi, è stato misurato lo spessore su una determinata zona della portiera per poterlo così confrontare con quello restituito dal sotware e poterne così accertare l'attendibilità.

6.1 Analisi chimica

Nella tabella 6.1, sono riportati i valori di concentrazione degli elementi chimici ottenuti come media delle tre prove svolte su un campione di materiale. Tali prove sono state fatte seguendo la normativa di riferimento, la ASTM E415-21.

Analisi chimica							
	C %	Mn %	Р %	S%	Si %	Al%	Ti%
Prova 1	0,014	0,128	0,013	0,004	0,043	0,043	0,060
Prova 2	0,016	0,127	0,013	0,005	0,045	0,045	0,058
Prova 3	0,014	0,129	0,013	0,004	0,043	0,044	0,059
Media	0,015	0,128	0,013	0,004	0,044	0,044	0,059
Analisi Acciaieria	0,015	0,1123	0,0095	0,0097	0,024	0,045	0,055
Limiti di norma	0,12	0,60	0,10	0,045	0,50	/	0,30

Tabella 6.1: Analisi chimica

I valori ottenuti sono in linea con quelli forniti dall'acciaieria e rispettano i limiti imposti dalla norma.

6.2 Metallografia

Ottenuto il campione da analizzare, questo è stato osservato al microscopio ottico rovesciato. La prima analisi che è stata fatta riguarda la presenza di inclusioni non metalliche, secondo la normativa UNI 3244:1980 [25]. Le principali inclusioni che vengono riscontrate sono inclusioni non metalliche di tipo endogeno, generate nel bagno metallico per effetto delle reazioni che hanno luogo durante il processo produttivo dell'acciaio. La loro formazione è legata alla diversa affinità chimica che gli elementi presenti nel bagno possiedono nei confronti dello zolfo, dell'ossigeno e dell'azoto. Si dividono in ossidi, nitruri e solfuri.

L'esame si effettua su provette metallografiche che vengono esaminate al microscopio ottico per confronto visivo con immagini tipo. La tavola delle immagini tipo comprende 10 serie (colonne) di immagini con inclusioni di vario tipo e forma, divise ognuna in 9 gradi (righe) che rappresentano la diversa entità delle inclusioni. Per una corretta analisi dello stato inclusionale, il campione è stato analizzato senza attacco metallografico al microscopio ottico a 100X. Facendo riferimento alle tavole di immagini presenti all'interno della norma UNI 3244:1980, le inclusioni riscontrate sono ossidi di forma globulare di grado 1 (fig. 6.1).



Figura 6.1: Inclusioni acciaio CR 06 con ingrandimento 100X

Per poter invece analizzare la microstruttura, è necessario fare un attacco chimico del provino utilizzando del nital con lo scopo di evidenziare la struttura dei grani. Come era facile aspettarsi, l'analisi al microscopio ottico mostra una struttura di ferrite. Inoltre, facendo riferimento alle tabelle presenti all'interno della norma ISO 643:2012 che classifica la dimensione dei grani con dei livelli che vanno da 0 (grano più grande) a 10 (grano più piccolo), la grandezza del grano è compresa tra i livelli 7.0 e 7.5 [26]. Di seguito, si riportano due micrografie a due diversi ingrandimenti, una a 100x (fig. 6.2) e l'altra a 200x (fig. 6.3). Risultati



Figura 6.2: Micrografia acciaio CR 06 con ingrandimento 100X



Figura 6.3: Micrografia acciaio CR 06 con ingrandimento 200X

È stato inoltre possibile, trattandosi di un acciaio zincato, misurare lo strato di zinco su ambedue le facce della lamiera. L'acciaio in questione presenta un rivestimento Z100, dove 100 indica la grammatura minima per metroquadro di zinco. Secondo la norma EN 10346, tale quantità di zinco equivale ad uno spessore minimo sulla lamiera pari a 7 μ m. Le misurazioni fatte sul provini hanno portato ad una valore medio di 7,7 μ m sia per lo strato inferiore che per quello superiore (figure 6.4 e 6.5).



Figura 6.4: Misurazioni spessore di zinco su strato superiore



Figura 6.5: Misurazioni spessore di zinco su strato inferiore

6.3 Prova di trazione

Per ogni prova si ottengono le caratteristiche meccaniche ed il diagramma tensionedeformazione.



Figura 6.6: Curve di trazione Acciaio CR 06

Caratteristiche meccaniche							
0°	45°	90°					
$80 \mathrm{mm}$	$80 \mathrm{mm}$	$80 \mathrm{mm}$					
$154 \mathrm{MPa}$	$156 \mathrm{MPa}$	147 MPa					
$293 \mathrm{MPa}$	$302 \mathrm{MPa}$	294 MPa					
$43,\!66$	42,16	$45,\!37$					
23,1	$22,\!4$	$24,\!8$					
$2,\!25$	$1,\!6$	2					
$0,\!23$	$0,\!22$	0,24					
	$\begin{array}{c} \hline \text{Caratteristic} \\ \hline 0^{\circ} \\ \hline 80 \text{ mm} \\ 154 \text{ MPa} \\ 293 \text{ MPa} \\ 43,66 \\ 23,1 \\ 2,25 \\ 0,23 \\ \end{array}$	$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $					

Tabella 6.2: Caratteristiche meccaniche Acciaio CR 06

Sul grafico, sono presenti 9 curve in totale, 3 per ogni verso. Inoltre, è possibile notare nella parte iniziale una variazione dell'andamento delle curve. Tale zona è chiamata zona elastoplastica e corrisponde a quella zona in cui il materiale passa da un comportamento elastico ad uno plastico.

Sulla tabella 6.2, oltre alle caratteristiche meccaniche utili per il calcolo della FLC, viene riportato il valore di L_0 corrispondente alla lunghezza iniziale dell'estensimetro meccanico assiale.

6.4 FLC

Una volta ottenuti tutti i valori utili per la costruzione delle curve, presentati nel capitolo 5, queste sono state rappresentate e messe a confronto, come si può notare nella figura 6.7.



Figura 6.7: Confronto curve FLC

Dal confronto tra le curve emerge come i due modelli, ArcelorV9 e Abspoel & Scholting, siano molto simili. Il modello di Keeler, invece, tende ad avere un andamento diverso soprattutto nella parte destra del grafico. Questo può essere

imputato al fatto che per il calcolo di tale modello vengono utilizzati un numero minore di parametri, in questo caso solo spessore e indice di incrudimento. Non tiene infatti conto né dell'allungamento a rottura né del coefficiente di anisotropia, uno dei parametri chiave per la formabilità del materiale. Questo si ripercuote nel valore FLC₀, che risulta sottostimato rispetto agli altri due modelli. Motivo per cui tale modello è da considerarsi ormai obsoleto. Solo per semplicità i valori di ε_2 del modello di Keeler corrispondono a quelli di ArcelorV9. Infatti, nel modello di Keeler, a differenza degli altri due, il valore di ε_2 viene dato come input e non deriva da particolari formulazioni analitiche come per gli altri due modelli.

Il modello ArcelorV9 risulta più conservativo del modello di Abspoel soprattutto nella zona di plane strain o comunque vicina ad essa. Spostandosi verso la zona di tensione biassiale (la parte più a destra del grafico) è invece il modello di Abspoel a rivelarsi più conservativo. Per quanto riguarda il calcolo del punto FLC_0 , entrambi i modelli sembrano convergere poichè la differenza tra i due è intorno al 2 % (tabella 6.3).

	ArcelorV9	Abspoel	Differenza %
FLC_0	0,344	$0,\!3524$	2,3

Tabella 6.3:Confronto FLC0

Si sottolinea come i valori di deformazione presentati fanno riferimento a delle deformazioni reali. Per una più immediata comprensione dei valori di deformazione subiti dal pezzo, tali valori, all'interno del software ARGUS, verranno trasformati da deformazioni reali ad ingegneristiche così da avere dei valori in percentuale facilmente interpretabili.

6.5 Riduzione di spessore

Una volta analizzati i risultati ottenuti dalle prove sul materiale, si passa ad analizzare i risultati relativi all'analisi ottica.

Una prima analisi, viene fatta andando a valutare la riduzione di spessore subita dal pezzo. In questo caso, risulta interessante andare a capire quale zona del pezzo ha subito una riduzione maggiore e come i diversi livelli di lubrificazione abbiano influito sulla riduzione di spessore. Per ciò che riguarda la riduzione di spessore, si è soliti stabilire quello che è un limite di riduzione oltre il quale sarebbe meglio non andare, tale limite si attesta in una riduzione del 20 %. Il software , in questo caso, è in grado di generare su FLD una curva blu che mi indica il limite di riduzione, ovvero tutti i punti al di sopra di tale curva avranno una riduzione maggiore del 20 %.

Per quanto riguarda il pezzo integro stampato con una grammatura pari a 16 g/m^2 e con l'aggiunta del foglio di nylon (figura 6.8), presenta una riduzione di spessore massima pari a 21,83 %. La zona inferiore, in cui è stata riscontrata la riduzione massima, si rivela essere la più critica mentre le altre zone non sembrano aver subito un'eccessiva riduzione di spessore.



Figura 6.8: Riduzione di spessore (lubrificazione pari a 16 g/ m^2 e con foglio di nylon) (deformazioni ingegneristiche)

Nel grafico 6.9 viene evidenziato, dall'incrocio delle due rette verdi, il punto che ha subito una maggior riduzione di spessore. Dal grafico, è possibile vedere
come pochi punti si trovino al di sopra della curva. Inoltre, considerando il tipo di materiale, ovvero un acciaio da profonda imbutitura, tali valori sono del tutto in linea con quelli ammissibili. Infatti, il limite del 20 % è comunque conservativo. In alcuni casi, le norme in ambito automotive, considerando lo spessore pari a 0,8 mm, indicano in certi casi limiti di riduzione di spessore pari al 25/28 %. Ovviamente, in questi casi, entra anche in gioco la funzionalità del componente poichè, ad esempio, un componente soggetto a fatica avrà dei limiti più severi (10 %) rispetto al componente in questione. Si noti inoltre come sia sul grafico che sul modello 3D i colori sono correlati alla deformazione subita dal pezzo. Il colore blu indica una riduzione di spessore pari a zero o quasi, mentre il rosso indica che si è in prossimità o si è oltrepassato il limite stabilito (in questo caso) pari ad una riduzione del 20 %.



Figura 6.9: Diagramma FLD per valutazione della distanza dalla curva blu (lubrificazione pari a 16 g/ m^2 e con foglio di nylon)

Riducendo la grammatura d'olio, si ha una maggiore deformazione plastica poichè aumenta l'attrito e ciò porta ad un maggior assottigliamento della lamiera. Nel caso del pannello stampato con 10 g/ m^2 e con il foglio di nylon, si ha una riduzione di spessore massima del 23,64 % (figura 6.10).



Figura 6.10: Riduzione di spessore (lubrificazione pari a 10 g/ m^2 e con foglio di nylon)

Particolare è il confronto con il pannello stampato con una grammatura pari a 12 g/m² ma senza foglio di nylon.



Figura 6.11: Confronto tra FLD in due condizioni diverse di lubrificazione per la riduzione di spessore: 10 g/ m^2 e foglio di nylon(a sinistra) e 12 g/ m^2 senza foglio di nylon (a destra)

Come è possibile notare dalle figure 6.10 e 6.12, il pannello stampato con 12

 g/m^2 ma senza foglio di nylon presenta una maggiore riduzione di spessore di quello stampato con 10 g/m^2 ma col foglio e ciò non si verifica in un solo punto ma tale condizione si verifica in tutta l'interezza del pannello. Si ricorda che il pannello stampato con 12 g/m^2 presenta due rotture, una delle quali è collocata laddove è presente la riduzione di spessore massima. Tale condizione dimostra come l'utilizzo del foglio di nylon porti ad un minor attrito con il punzone, fungendo quindi da lubrificante solido.



Figura 6.12: Riduzione di spessore (lubrificazione pari a 12 g/ m^2 e senza foglio di nylon)

Confrontando inoltre i diagrammi FLD (figura 6.11), si possono fare diverse considerazioni interessanti. Si può notare come i punti evidenziati dal rettangolo verde, nel caso di lubrificazione pari a 10 g/m² (con foglio di nylon) si trovano al di sotto della curva, mentre nel caso di lubrificazione pari a 12 g/m² (senza foglio di nylon) si trovano al di sopra della curva presentando una riduzione di spessore maggiore del 20 %, dovuta ad un maggiore attrito e un maggior stiramento della lamiera. Mentre i punti evidenziati dal rettangolo rosso sono quelli relativi alla parte della portiera soggetta alla rottura e poichè non ricostruita, non sono presenti nel grafico i relativi punti.

6.6 Deformazione principale massima

Considerazioni analoghe, si possono fare per quanto riguarda la deformazione principale massima, ε_1 , data come ingegneristica. Anche in questo caso, si procede andando a confrontare i diversi casi con diversi gradi di lubrificazione, in particolare confrontando il caso con lubrificazione pari a 16 g/m² e il caso con lubrificazione pari a 10 g/m², entrambi con l'aggiunta del foglio di nylon.



Figura 6.13: Deformazione principale ε_1 ingegneristica (lubrificazione pari a 16 g/m² e con foglio di nylon)

Partendo dal primo caso (fig. 6.13), si rileva una deformazione principale massima pari a 28,88 % proprio laddove si era misurata la massima riduzione di spessore. In tale punto, la lamiera risulta fortemente stirata. Inoltre, si nota come i fori praticati nella parte centrale del pezzo abbiano fatto il proprio lavoro. Le deformazioni infatti presenti sulla circonferenza testimoniano come ci sia stato un richiamo di materiale verso l'esterno, evitando così altre possibili rotture.

La riduzione di lubrificante da 16 g/ m^2 a 10 g/ m^2 porta ad un notevole aumento della deformazione principale massima, passando da un precedente valore pari a 28,88 % a 34,2 %. L'aumento è considerevole però non si è verificata nessuna rottura. Nelle altre zone del pezzo, non sembra esserci una particolare variazione riguardante la deformazione principale massima.



Figura 6.14: Deformazione principale ε_1 ingegneristica (lubrificazione pari a 10 g/m² e con foglio di nylon)

6.7 Limiti di formabilità

Oltre ad indicare la riduzione di spessore e la deformazione principale massima del pezzo, risulta interessante andare a vedere quali sono i punti che più si avvicinano alla curva limite di formabilità. Più un punto si avvicina alla FLC, più è probabile che in tale punto si verifichi una rottura.

Per la scelta del modello da adottare per il calcolo della FLC, si sono fatte una serie di considerazioni. Come visto nel capitolo precedente, sia la curva ottenuta con ArcelorV9 che quella ottenuta con il metodo di Abspoel & Scholting presentavano un andamento molto simile. Poichè la maggior parte dei punti critici si trovano in una condizione di plane strain, si è scelto di essere più conservativi e utilizzare la FLC ricavata con ArcelorV9 che risulta, infatti, più conservativa nella zona di plane strain. Come margine di sicurezza, si è voluto ridurre di un 15 % la FLC. Tale curva è stata rappresentata in verde (figura 6.15).



Figura 6.15: FLC inserita sul software ARGUS

Il primo confronto interessante riguarda i due pezzi integri, il primo con una grammatura di 16 g/ m^2 e il secondo con 10 g/ m^2 , entrambi stampati con l'aggiunta di un foglio di nylon.

Nel pezzo che presenta una grammatura d'olio pari a 16 g/ m^2 e stampato con l'aggiunta di un foglio di nylon, la maggior parte dei punti si trova non solo al di sotto della FLC ma anche al di sotto della FLC ridotta del 15 %. La scala utilizzata in questo caso va da 0 a -50 %. Ciò significa che più un punto è vicino allo zero, più questo si troverà vicino alla FLC. Nel caso in questione, il punto più vicino si trova ad una distanza pari al -14,36 %. Tale distanza viene definita come la distanza minima dalla FLC ed viene presa con il segno "-" se il punto si trova sotto la curva.



Figura 6.16: Distanza dei punti dalla FLC (lubrificazione pari a 16 g/ m^2 e con foglio di nylon)



Figura 6.17: Diagramma FLD per valutazione della distanza dalla FLC (lubrificazione pari a 16 g/m² e con foglio di nylon)

Nel caso del pezzo con una grammatura pari a 10 g/ m^2 e con foglio di nylon, le deformazioni risultano più importanti. Infatti una parte dei punti si trovano al di sopra del margine di sicurezza fissato. Questo è dovuto al fatto che una minore grammatura d'olio porta ad un maggior attrito tra il pezzo e il punzone, portando così ad una maggior deformazione plastica del pezzo stesso. Il punto più vicino alla FLC si trova nella stessa posizione del pezzo con grammatura pari a 16 g/ m^2 ma ad una distanza dalla FLC pari a -9,417 % più vicino quindi alla FLC rispetto al caso precedente.

In entrambi i casi, si nota comunque come le zone più critiche risultino collacate nella parte inferiore della portiera laddove si ha un'imbutitura più importante rispetto alla parte superiore.



Figura 6.18: Distanza dei punti dalla FLC (lubrificazione pari a 10 g/ m^2 e con foglio di nylon)



Figura 6.19: Diagramma FLD per valutazione della distanza dalla FLC (lubrificazione pari a 10 g/m² e con foglio di nylon)

Nella figura 6.18, si notano sulla destra delle parti non ricostruite. Come già detto in prededenza, ciò è dovuto al fatto che parte della reticolatura è andata via a seguito del processo di stampaggio. Poichè la ricostruzione in quel punto avrebbe portato ad una distorsione rispetto alla realtà, si è deciso di non ricostruire tale zona.

Il terzo pezzo analizzato è stato stampato con una grammatura pari a 12 g/m^2 e non utilizzando il telo in nylon come negli altri due casi. In questo caso, per via delle rotture presenti, non è stato possibile ricostruire quelle zone laddove si era verificata la rottura, evidenziate in rosso in figura 6.20. Pertanto, andando ad analizzare il pezzo, si ha comunque una visione non veritiera della realtà poichè il punto più vicino alla FLC risulta avere una distanza pari al -16,63 % e tutti i punti si trovano al di sotto della curva FLC, condizione che non può essere correlata al fenomeno della rottura. Come è possibile notare dalla figura 6.20, questo è correlato al fatto che non è stato possibile ricostruire quella parte di portiera dove si è verificata la rottura, che corrisponde al punto precedentemente evidenziato negli altri due casi. Tali punti si troverebbero probabilmente al di sopra della FLC.



Figura 6.20: Distanza dei punti dalla FLC (lubrificazione pari a 12 g/ m^2 e senza foglio di nylon)

Una considerazione ancora più evidente può essere fatta andando a confrontare i diagrammi limite di formabilità, nel caso di un pezzo integro (in questo caso quello con grammatura pari a 10 g/ m^2 e con foglio di nylon) e nel caso del pezzo in questione.



Figura 6.21: Confronto tra FLD in due condizioni diverse di lubrificazione: 10 g/m^2 con foglio di nylon (a sinistra) e 12 g/m^2 senza foglio di nylon (a destra).



Figura 6.22: Rottura e relativo ingrandimento

Come evidenziato dai due rettangoli in figura 6.21, risulta chiaro che tutti quei punti aventi una condizione vicina a quella di plane strain, e presenti nel primo grafico afferente al pezzo stampato con 10 g/ m^2 , nel grafico relativo al pezzo in questione mancano e sono proprio quelli presenti nella zona di rottura.

Infatti, dalla figura 6.22, si nota come i cerchi a seguito dello stampaggio risultano allungati in una sola direzione, riconducibili quindi proprio ad una condizione di plane strain.

6.8 Attendibilità dei risultati

Come detto in precedenza, attraverso l'analisi ottica riusciamo ad avere una misura diretta delle due deformazioni principali $\varepsilon_1 \in \varepsilon_2$, mentre per ciò che riguarda la terza deformazione, ovvero la riduzione di spessore, questa viene ricavata dal software partendo dalle altre due e assumendo che il volume rimanga costante (conservazione del volume).

Spessore [mm]			
	Reale	Software	Differenza $\%$
Punto 1	$0,\!683$	0,680	$0,\!487$
Punto 2	0,693	$0,\!685$	1,208
Punto 3	0,669	0,669	0,026
Punto 4	$0,\!635$	0,640	0,722
Punto 5	0,601	0,603	0,386

 Tabella 6.4:
 Confronto tra spessore reale e spessore misurato dal software

Confrontando i punti misurati con quelli ottenuti dal software (tabella 6.4), si è notato come i valori risultassero molto vicini tra di loro. Infatti, su 5 punti, 4 di questi riportano una differenza percentuale inferiore all'1 % e solo il punto 2 riporta una differenza percentuale superiore all'1 %. In definitiva, si può quindi dire che il software ha restituito dei valori del tutto simili a quelli misurati nella realtà.

Capitolo 7

Conclusioni

Al termine di questo lavoro, che ha avuto come obbiettivo l'analisi delle deformazioni a seguito del processo di stampaggio, è possibile fare una serie di considerazioni interessanti sia riguardanti i pezzi analizzati che la tecnica utilizzata.

Partendo dal confronto tra i due pezzi integri, uno stampato con 10 g/m² e l'altro stampato con 16 g/m², ed entrambi con l'aggiunta del foglio di nylon, questi hanno riportato valori di deformazioni differenti. Il pezzo stampato con un maggior grado di lubrificazione non solo ha riportato un livello minore dell'assottigliamento della lamiera ma anche un maggiore distanza, e quindi una maggior margine di sicurezza dalla FLC. Di contro però, un così alto grado di lubrificazione ha portato alla formazione di alcune grinze, portando così ad un difetto estetico del pezzo. Il pezzo stampato con un minor grado di lubrificazione (10 g/m²) ha riportato valori più critici delle deformazioni, ma comunque sempre al di sotto della curva limite e questo ci ha permesso di ottenere un pezzo integro, seppur con valori di assottigliamento dello spessore maggiori. Dal punto di vista estetico, il pezzo risulta più stirato a causa del maggior attrito tra punzone e lamiera, e quindi privo di grinze.

Diverso è il caso del pezzo stampato a 12 g/ m^2 . Tale pezzo seppur avendo un grado di lubrificazione più alto, in mancanza del telo di nylon, ha subito due rotture. Inoltre, l'analisi ottica , seppur risulta essere un mezzo assai valido, è principalmente indicata per pezzi integri. La presenza di una rottura infatti rende difficile andare intercettare i punti vicino ad essa o addirittura quelli in corrispondenza della rottura. La mancanza di queste informazioni ci porta ad un errato diagramma FLD, dove ci si aspetterebbe trovare dei punti al di sopra della curva limite (condizione che comporta una probabile rottura), che in realtà non sono presenti. Le rotture sarebbero da imputare al mancato utilizzo del telo di nylon tra lamiera e punzone che permette un miglior scorrimento dalla lamiera fungendo così da lubrificante solido.

In tutti e tre i pezzi, si è comunque notato come la parte inferiore della portiera, ovvero quella che presenta un'altezza di imbutitura maggiore, risulta essere la più critica indipendentemente dalla quantità di lubrificante utilizzata.

Per quanto riguarda la tecnologia utilizzata, l'analisi ottica tramite il software ARGUS si è rivelata una tecnologia valida, attendibile ma seppur con qualche limite. Tra i vantaggi, si ha sicuramente la capacità di ricostruire e avere delle informazioni su dei pezzi anche abbastanza complessi, con dei risultati attendibili (come mostrato dalla verifica sulla riduzione di spessore). Come contro, si ha che in alcuni casi, a causa dell'attrito, parte della reticolatura viene portata via, rendendo così impossibile l'acquisizione delle informazioni.

Bibliografia

- [1] http://www.avangard-project.eu/.
- [2] John M DeCicco. «Steel and iron technologies for automotive lightweighting». In: *Environmental Defense*, March 3 (2005).
- [3] Mayank Kumar Singh. «Application of steel in automotive industry». In: International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering 6.7 (2016), pp. 246–253.
- [4] Wei-wen Yu. Cold-Formed Steel Design. Hoboken: John Wiley & Sons, Incorporated, 2010. ISBN: 0-470-46245-0.
- [5] George Krauss. Steels : Processing, Structure, and Performance. eng. Materials Park: ASM International, 2015. ISBN: 1-62708-083-X.
- [6] Hideo Kijima e Niels Bay. «Skin-pass rolling I—Studies on roughness transfer and elongation under pure normal loading». In: International Journal of Machine Tools and Manufacture 48.12-13 (2008), pp. 1313–1317.
- [7] AR Marder. «The metallurgy of zinc-coated steel». In: Progress in materials science 45.3 (2000), pp. 191–271.
- [8] Marco Santochi e Francesco Giusti. *Tecnologia meccanica e studi di fabbricazione*. Vol. 1. Casa Editrice Ambrosiana, 2000.
- [9] Jack Hu, Zdzisław Marciniak e John Duncan. *Mechanics of sheet metal forming*. Elsevier, 2002.
- [10] ISO 10275:2020: Metallic materials. Sheet and strip. Determination of tensile strain hardening exponent. 2020.
- [11] Jason Rowe. Advanced materials in automotive engineering. Elsevier, 2012.

- [12] Ján Slota et al. «Experimental FLC determination of high strength steel sheet metal». In: Acta Metallurgica Slovaca 21.4 (2015), pp. 269–277.
- [13] EN ISO 12004-2:2008: Metallic materials. Sheet and strip. Determination of forming-limit curves. Determination of forming-limit curves in the laboratory. 2008.
- [14] Surajit Kumar Paul. «Controlling factors of forming limit curve: A review».In: Advances in Industrial and Manufacturing Engineering 2 (2021).
- [15] Michael Abspoel, Marc E Scholting e John MM Droog. «A new method for predicting forming limit curves from mechanical properties». In: Journal of Materials Processing Technology 213.5 (2013), pp. 759–769.
- [16] https://www.tatasteeleurope.com/sites/default/files/tata-steelautomotive-aurora-online-forming-limit-curves-casestudy-en.pdf.
- [17] EN 10346:2009 :Continuously hot-dip coated steel flat products for cold forming
 Technical delivery conditions. 2009.
- [18] ASTM E415-21: Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry. 2021.
- [19] ISO 6892-1: 2016: Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature. 2016.
- [20] ISO 10113:2020: Metallic materials. Sheet and strip. Determination of plastic strain ratio. 2020.
- [21] Eckart Kunze et al. «Forming analysis of internal plies of multi-layer unidirectional textile preforms using projectional radiography». In: *Proceedia Manufacturing* 47 (2020), pp. 17–23.
- [22] https://www.ostling-markingsystems.com/products/electrolyticmarking-systems/.
- [23] https://amepa.de/wp-content/uploads/2022/04/Amepa_Broschuere_ OFIS_EN_2022_04_RZ_Web.pdf.
- [24] GOM. ARGUS, user manual.
- [25] UNI 3244:1980: Esame microscopico dei materiali ferrosi. Valutazione delle inclusioni non metalliche negli acciai mediante immagini tipo. 1980.

[26] ISO 643:2012: Steels - Micrographic determination of the apparent grain size. 2012.

Ringraziamenti

Ringrazio il mio relatore, il professor Paolo Matteis, sempre disponibile e pronto ad aiutarmi dandomi i giusti consigli affinchè potessi concludere al meglio il mio lavoro di tesi.

Ringrazio il mio tutor aziendale, l'ingegner Jean Lamontanara, per la possibilità che mi ha dato nello svolgere la tesi all'interno dell'azienda MA.

Ringrazio l'ingegner Domenico Russo, che mi ha seguito nello svolgimento del lavoro di tesi, e Silvio Finotti, sempre pronto a sostenermi ed aiutarmi.

Ringrazio tutti i ragazzi del laboratorio del TO PROVE LAB per avermi accolto e per essere sempre stati disponibili.

Ringrazio i miei due fratelli materani, Biagio e Giampiero, con i quali ho condiviso vari momenti del mio percorso al Poli, belli e brutti. Vi ringrazio per esserci sempre stati durante questo percorso.

Ringrazio i miei fratelli di giù: Ciccio, Simone e Andrea. Pur non sentendoci tutti i giorni e pur essendo a migliaia di kilometri di distanza, l'affetto è sempre rimasto inalterato ed è anche grazie a voi se sono riuscito a raggiungere tale risultato.

Ringrazio tutti gli amici di Torino e non, non basterebbero tre righe per elencarvi tutti. Ognuno di voi, nel suo piccolo, ha contribuito al raggiungimento del risultato finale.

Ringrazio i miei genitori, Filadelfo e Agata, che mi hanno sempre supportato e sopportato in ogni mia scelta. I miei grazie nei vostri confronti non saranno mai abbastanza per potervi ringraziare degli sforzi fatti. Questo traguardo è per voi.

Ringrazio la mia sorellina, Alice, anche lei sempre pronta a sostenermi. Ti voglio bene. Questo traguardo è anche per te.

Ringrazio tutta la mia famiglia, i miei zii, i miei cugini, e i miei nonni, anche coloro i quali non sono più su questa terra. Grazie per tutto.