



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Innovazione del
Prodotto

**ANALISI E OTTIMIZZAZIONE DEL PROCESSO
DI STIRATURA SU PIASTRE IN LEGA DI
ALLUMINIO 5083**

Relatore: Prof. Franco Bonollo

Laureando:

Matteo Serena

Matricola: 2053331

Anno Accademico 2023/2024

INDICE

Sommario	1
Introduzione	3
Capitolo 1 Niche Fusina Rolled Products	5
1.1 Processo produttivo	7
1.1.1 Fonderia	7
1.1.2 Laminatoio	9
1.2 Leghe da deformazione plastica	12
1.2.1 Leghe da incrudimento	13
1.2.2 Leghe da trattamento termico	14
Capitolo 2 Piastre in lega 5xxx	17
2.1 Meccanismi di rafforzamento	19
2.1.1 Rafforzamento per alligazione	19
2.1.2 Rafforzamento per incrudimento	21
2.1.3 Rafforzamento per affinamento del grano cristallino	23
2.2 Lega di alluminio 5083	24
2.2.1 Composizione chimica	25
2.2.2 Stato fisico	26
2.3 Proprietà meccaniche leghe di alluminio 5083 0/H111	27
Capitolo 3 Analisi della condizione attuale	29
3.1 Ciclo produttivo	29
3.1.1 Fresatura	29
3.1.2 Trattamento termico di omogenizzazione / preriscaldamento	30
3.1.3 Laminazione a caldo	30
3.1.4 Trattamento termico di ricottura	32
3.1.5 Stiratura	32
3.2 Identificazione delle parti della macchina stiratrice 1500T	36
3.3 Caratterizzazione del prodotto e del processo	38
3.3.1 Analisi di processo	38
3.3.2 Analisi metallografica	40
3.3.3 Microdurezza Vickers	43
3.3.4 Test di trazione	45
Capitolo 4 Analisi dei risultati	51

4.1 Verifica del ciclo produttivo	51
4.1.1 Analisi metallografica	51
4.1.2 Test di trazione	70
4.1.3 Analisi microdurezza	76
4.2 Modello sperimentale stiratrice	84
4.2.1 Studio della macchina stiratrice	84
4.2.2 Verifica del modello sperimentale	89
4.2.3 Applicazione del modello sperimentale	94
Conclusioni	101
Bibliografia	105

INDICE FIGURE

Figura 1.1: Alcuni dei nostri prodotti dallo stabilimento Niche Fusina Rolled Products.	5
Figura 1.2: Principali settori d'impiego dei prodotti realizzati da Niche Fusina Rolled Products.	6
Figura 1.3: Forno fusorio.	8
Figura 1.4: Fase di colata placca.	8
Figura 1.5: Fase di taglio della testa e della coda.	9
Figura 1.6: La placca prima della fresatura.	10
Figura 1.7: Fase di fresatura della placca (a sinistra) e la placca dopo la fresatura (a destra).	10
Figura 1.8: Placca in fase di sbazzatura	11
Figura 1.9: Zone dedicate all'imbballaggio del materiale	12
Figura 1.10: Classificazione delle leghe da deformazione plastica [1]	13
Figura 2.1: Alcuni esempi di leghe di alluminio in applicazioni marine e nel settore dei trasporti.	18
Figura 2.2: Alcuni esempi di leghe di alluminio in applicazioni automobilistiche, per illuminazione e per costruzioni generali.	18
Figura 2.3: Solubilità solida binaria di equilibrio in funzione della temperatura per gli elementi alliganti aggiunti più frequentemente all'alluminio [3].	20
Figura 2.4: Differenti distorsioni del reticolo.	20
Figura 2.5: Correlazione tra tensione di snervamento, allungamento e contenuto di magnesio per alcune leghe commerciali di alluminio [3].	21
Figura 2.6: Andamento di tensioni residue, caratteristiche di resistenza, durezza, duttilità e dimensione del grano in funzione della temperatura a cui avviene la deformazione [5].	22
Figura 2.7: Effetto dell'aggiunta di magnesio e dell'incrudimento sul carico unitario di rottura (R), sul carico di snervamento (Rp0.2) e sull'allungamento percentuale a rottura (A%) per leghe della serie 5xxx rispetto alle leghe 1100 e 3003 [4].	23
Figura 3.1: Placca lavorata allo sbazzatore: inizio sbazzatura (a sinistra) e fine sbazzatura (a destra).	30
Figura 3.2: Cambiamenti nella struttura della grana cristallina della colata (a) o dei metalli lavorati a grana grossa durante la laminazione a caldo (b). La struttura cristallina da fonderia viene convertita in una struttura lavorata mediante lavorazioni a caldo [5].	31
Figura 3.3: Punto osservazione lato operatore 1 (a sinistra) e lato operatore 2 (a destra).	33
Figura 3.4: Gestione dell'impianto.	33
Figura 3.5: Movimentazione della piastra in macchina tramite gru a ventose. Prelievo del prodotto (a sinistra), trasporto (a destra) e posizionamento in macchina (in basso).	34
Figura 3.6: Testa traslante.	35
Figura 3.7: Macchina stiratrice.	36
Figura 3.8: Testa traslante (a sinistra) e la testa stirante (a destra).	37

Figura 3.9: Forma semplificata della curva tensione – deformazione nominali elasto– plastico con incrudimento [5]. _____	39
Figura 3.10: Microscopio ottico dell’Università degli Studi di Padova. _____	40
Figura 3.11: Campioni inglobati a freddo (a sinistra) e campioni inglobati a caldo (a destra). _____	42
Figura 3.12: Microdurometro dell’Università degli Studi di Padova. _____	43
Figura 3.13: Schematizzazione dell’impronta Vickers. _____	44
Figura 3.14: Tipica impronta lasciata da una prova di durezza Vickers. _____	44
Figura 3.15: Dettaglio macchina di trazione Zwick Z100. _____	45
Figura 3.16: Curva tensione – deformazione. _____	47
Figura 3.17: Dettaglio macchina di trazione Zwick 100 (a sinistra) ed esempi di provini da sottoporre a pre – stiro (a destra). _____	48
Figura 4.1: Sezione longitudinale rispetto al senso di laminazione della piastra in lega 5083 H111 con uno spessore di 16,7 mm dopo il processo di laminazione a caldo: superficie (in alto), quarto (a sinistra) e mezzeria (a destra). _____	52
Figura 4.2: Sezione longitudinale rispetto al senso di laminazione della piastra in lega 5083 H111 con uno spessore di 16,7 mm dopo il processo di laminazione a caldo e stiratura al 2%: superficie (in alto), quarto (a sinistra) e mezzeria (a destra). _____	53
Figura 4.3: Sezione longitudinale rispetto al senso di laminazione della piastra in lega 5083 H111 con uno spessore di 16,7 mm dopo il processo di laminazione a caldo e stiratura al 7%: superficie (in alto), quarto (a sinistra) e mezzeria (a destra). _____	53
Figura 4.4: Sezione longitudinale rispetto al senso di laminazione della piastra in lega 5083 O con uno spessore di 17 mm dopo trattamento termico di ricottura e stiratura al 1,6 %: superficie (in alto), quarto (a sinistra) e mezzeria (a destra). _____	54
Figura 4.5: Sezione longitudinale rispetto al senso di laminazione della piastra in lega 5083 H111 con uno spessore di 60,6 mm dopo il processo di laminazione a caldo e stiratura al 1%: superficie (in alto), quarto (a sinistra) e mezzeria (a destra). _____	55
Figura 4.6: Sezione longitudinale rispetto al senso di laminazione della piastra in lega 5083 H111 con uno spessore di 16,7 mm dopo il processo di laminazione a caldo: superficie (in alto), quarto (a sinistra) e mezzeria (a destra). _____	56
Figura 4.7: Sezione longitudinale rispetto al senso di laminazione della piastra in lega 5083 H111 con uno spessore di 16,7 mm dopo il processo di laminazione a caldo e stiratura al 2%: superficie (in alto), quarto (a sinistra) e mezzeria (a destra). _____	56
Figura 4.8: Sezione longitudinale rispetto al senso di laminazione della piastra in lega 5083 H111 con uno spessore di 16,7 mm dopo il processo di laminazione a caldo e stiratura al 7%: superficie (in alto), quarto (a sinistra) e mezzeria (a destra). _____	57
Figura 4.9: Rappresentazione del rapporto di aspetto della piastra in lega 5083 H111 con spessore 16,7 mm in diverse condizioni di processo: laminazione a caldo, stiratura 2% e stiratura 7%. _____	60
Figura 4.10: Panoramica fino a 8 mm di spessore della piastra in lega 5083 H111 di spessore 16,7 dopo laminazione a caldo. _____	61

Figura 4.11: Panoramica fino a 8 mm di spessore della piastra in lega 5083 H111 di spessore 16,7 mm laminata a caldo e stirata al 2%. _____	62
Figura 4.12: Panoramica fino a 8 mm di spessore della piastra in lega 5083 H111 di spessore 16,7 mm laminata a caldo e stirata al 7%. _____	63
Figura 4.13: Panoramica fino a 8 mm di spessore della piastra in lega 5083 O di spessore 17 mm dopo trattamento termico di ricottura e stiratura al 1,6%. _____	64
Figura 4.14: Sezione longitudinale rispetto al senso di laminazione della piastra in lega 5083 O con uno spessore di 17 mm dopo il trattamento termico di ricottura e stiratura al 1,6%: superficie (in alto), quarto (a sinistra) e mezzeria (a destra). _____	65
Figura 4.15: Confronto tra lega 5083 O e lega 5083 H111, caratterizzate da uno spessore di 17 mm. _____	66
Figura 4.16: Sezione longitudinale rispetto al senso di laminazione della piastra con uno spessore di 60,6 mm dopo il processo di laminazione a caldo e stiratura al 1%: superficie (in alto), quarto (a sinistra) e mezzeria (a destra). _____	67
Figura 4.17: Rappresentazione del rapporto di aspetto per la piastra stirata al 1% in lega 5083 H111. _____	68
Figura 4.18: Panoramica fino a 20 mm di spessore della piastra 5083 H111 sp. 60,6 mm laminata a caldo e stirata al 1%. _____	69
Figura 4.19: Curva tensione - deformazione su piastra di spessore 16,7mm in lega 5083 H111 dopo laminazione a caldo. _____	70
Figura 4.20: Curva tensione - deformazione su piastra di spessore 16,7 mm in lega 5083 H111 dopo stiratura al 2%. _____	70
Figura 4.21: Curva tensione - deformazione su piastra di spessore 16,7 mm in lega 5083 H111 dopo stiratura al 7%. _____	71
Figura 4.22: Andamento della tensione di rottura (R_m), tensione di snervamento ($R_{p0,2}$) e allungamento percentuale a rottura ($A\%$) in funzione del grado di incrudimento. Prodotto di spessore 16,7 mm in lega 5083 H111 in diverse condizioni di processo: laminazione a condizioni di processo: laminazione a caldo, stiratura 2% e stiratura 7%. _____	72
Figura 4.23: Caratteristiche meccaniche su piastre di spessore 17 mm in lega 5083 O. _____	73
Figura 4.24: Confronto tra la lega 5083 H111 e la lega 5083 O in termini di tensione di rottura, tensione di snervamento e allungamento percentuale a rottura. _____	74
Figura 4.25: Curva tensione - deformazione su piastra di spessore 60,6 mm in lega 5083 H111 dopo laminazione a caldo. _____	75
Figura 4.26: Curva tensione - deformazione su piastra di spessore 60,6 mm in lega 5083 H111 dopo stiratura al 1%. _____	75
Figura 4.27: Tensione di rottura, tensione di snervamento e allungamento percentuale a rottura della lega 5083 H111. Su materiale laminato a caldo e materiale deformato al 1%. _____	76
Figura 4.28: Durezza lungo lo spessore, dalla superficie fino alla mezzeria. Piastra di spessore 16,7 mm in lega 5083 H111, campioni prelevati dopo laminazione a caldo, stiratura al 2% e stiratura al 7%. _____	77

Figura 4.29: Schema del procedimento delle prove di microdurezze.	77
Figura 4.30: Durezza lungo lo spessore, dalla superficie fino alla mezzeria. Piastra di spessore 17 mm in lega 5083 O processata per trattamento termico di ricottura e stiratura al 1,6%.	80
Figura 4.31: Confronto tra lega 5083 H111 e lega 5083 O, con piastre di spessore 17 mm.	81
Figura 4.32: Durezza lungo lo spessore, dalla superficie fino alla mezzeria. Piastra di spessore 60,6 mm in lega 5083 H111 processata per laminazione a caldo e stiratura al 1%.	82
Figura 4.33: Andamento della tensione nel materiale - spessore della piastra.	88
Figura 4.34: Andamento della tensione del materiale - area resistente della piastra.	89
Figura 4.35: Andamento della pressione dei cilindri e allungamento misurato dalla stiratrice. Prodotto in lega 5083H111 caratterizzato da spessore 60 mm e larghezza 1600 mm.	90
Figura 4.36: Curve tensione - deformazione ottenute durante il processo di stiratura di piastre in lega 5083 H111, con spessore di 60 mm e larghezza di 1600 mm.	91
Figura 4.37: Curva tensione – deformazione semplificata dello sbozzato in lega 5083H111, caratterizzato da spessore di 60 mm e larghezza 1600mm.	92
Figura 4.38: Curve tensione-deformazione ottenute durante il processo di stiratura di piastre in lega 5083 H111, con spessore di 15 mm e larghezza di 2200 mm.	93
Figura 4.39: Curva tensione – deformazione ottenuta con la macchina di trazione Zwick Z100. Sono stati eseguiti pre-stiri sui provini in lega 5083H111 con spessore 15 mm.	94
Figura 4.40: Curva tensione – deformazione per alcuni degli sbozzati analizzati.	95
Figura 4.41: Curva tensione – deformazione semplificata per alcuni degli sbozzati analizzati.	95
Figura 4.42: Prima stiratura leghe 5083.	96
Figura 4.43: Seconda stiratura lega 5083.	96
Figura 4.44: Prima stiratura: andamento della larghezza massima stirabile in funzione dello spessore.	98
Figura 4.45: Seconda stiratura: andamento della larghezza massima stirabile in funzione dello spessore.	98

INDICE TABELLE

Tabella 2.1: Composizione chimica lega 5083 definita dalla normativa EN 573 – 3.	25
Tabella 2.2: Lega 5083: composizione chimica media interna allo stabilimento a confronto con i valori limite da normativa.	25
Tabella 2.3: LEGA EN AW - 5083 [Al Mg4,5 Mn0,7] da normativa EN 485-2 [9].	27
Tabella 3.1: Alcune delle specifiche tecniche della macchina stiratrice 1500 T.	39
Tabella 3.2: Tipologia di prodotti sottoposti ad analisi metallografica.	41
Tabella 3.3: Dimensioni nominali dei laminati studiati	46

Tabella 4.1: Dimensioni e parametri di processo dei prodotti analizzati durante il processo di laminazione a caldo.	51
Tabella 4.2: Calcolo del rapporto di aspetto per la piastra in lega 5083 H111 con spessore 16,7 mm dopo laminazione a caldo.	58
Tabella 4.3: Calcolo del rapporto di aspetto per la piastra in lega 5083 H111 con spessore 16,7 mm dopo stiratura al 2%.	58
Tabella 4.4: Calcolo del rapporto di aspetto per la piastra in lega 5083 H111 con spessore 16,7 mm dopo stiratura al 7%.	59
Tabella 4.5: Calcolo del rapporto di aspetto per piastra di spessore 17 mm stirata al 1,6% in lega 5083 O.	65
Tabella 4.6: Calcolo del rapporto di aspetto per piastra di spessore 60,6 mm stirata al 1% in lega 5083 H111.	67
Tabella 4.7: Risultati caratteristiche meccaniche su piastre di spessore 17 mm in lega 5083 O.	73
Tabella 4.8: Analisi di microdurezza su piastra di spessore in 16,7 mm in lega 5083 H111 dopo laminazione a caldo.	78
Tabella 4.9: Analisi di microdurezza su piastra di spessore in 16,7 mm in lega 5083 H111 dopo stiratura al 2%.	78
Tabella 4.10: Analisi di microdurezza su piastra di spessore in 16,7 mm in lega 5083 H111 dopo stiratura al 7%.	79
Tabella 4.11: Analisi di microdurezza su piastra n° 1 di spessore 17 mm in lega 5083 O processata per trattamento termico di ricottura e stiratura al 1,6%.	80
Tabella 4.12: Analisi di microdurezza su piastra n° 8 di spessore 17 mm in lega 5083 O processata per trattamento termico di ricottura e stiratura al 1,6%.	81
Tabella 4.13: Analisi di durezza su piastra di spessore 60,6 mm in lega 5083 H111 dopo laminazione a caldo.	83
Tabella 4.14: Analisi di durezza su piastra di spessore 60,6 mm in lega 5083 H111 dopo stiratura al 1%.	83
Tabella 4.15: Calcolo dell'area del prodotto al variare dello spessore e larghezza.	85
Tabella 4.16: Tensione massima in funzione dello spessore e larghezza della piastra.	87
Tabella 4.17: Prima stiratura, risultati ottenuti dalle equazioni da (6) a (8).	99
Tabella 4.18: Seconda stiratura, risultati ottenuti dalle equazioni da (6) a (8).	100

Sommario

Questo lavoro di tesi presenta una caratterizzazione del processo di stiratura di piastre in lega di alluminio 5083 realizzate dall'azienda Niche Fusina Rolled Products s.r.l. di Fusina (VE). L'obiettivo principale è valutare la condizione attuale del processo e identificare eventuali correlazioni tra le variabili di processo e le caratteristiche del prodotto al fine di approfondire la comprensione del processo di stiratura.

Il capitolo 1 introduce il contesto produttivo in cui si colloca l'analisi, fornendo una dettagliata descrizione dei principali prodotti realizzati nello stabilimento.

Nel capitolo 2 vengono delineati i principali meccanismi di rafforzamento per le piastre da incrudimento, contestualizzando il quadro normativo relativo al prodotto in lega 5083, stato fisico O e H111.

Il capitolo 3 analizza in modo dettagliato il ciclo produttivo, presentando le attività d'indagine condotte sia all'interno dello stabilimento sia presso i laboratori di metallurgia dell'Università degli Studi di Padova, con sede a Vicenza (VI).

Nel capitolo 4 vengono riportati e commentati i risultati ottenuti durante l'indagine.

Introduzione

La macchina Stiratrice riveste un ruolo fondamentale all'interno dello stabilimento di Niche Fusina Rolled Products, rappresentando l'elemento chiave per migliorare le proprietà meccaniche e la qualità delle piastre ottenute da laminazione a caldo. La necessità di garantire processi efficienti e orientati al miglioramento continuo ha spinto a condurre un'analisi dettagliata del processo di stiratura delle piastre, oggetto centrale di questo studio.

Questa tesi propone una caratterizzazione dei prodotti in piastra attualmente realizzati presso lo stabilimento di Fusina (VE). L'obiettivo principale è quello di comprendere al meglio la condizione attuale dei processi esistenti, identificare le variabili che influenzano il raggiungimento delle caratteristiche finali del prodotto e cercare eventuali correlazioni tra di esse. In particolare, il lavoro si concentra sulla macchina Stiratrice, cercando di individuare i parametri chiave per completare con successo il processo di stiratura del prodotto e comprendere l'impatto della stiratura sul materiale. Le attività condotte, incentrate su piastre con spessore 16 e 60 mm e larghezza inferiore a 2100 mm, in lega 5083 H111 e lega 5083 O, hanno avuto l'obiettivo di caratterizzare il prodotto in ogni suo dettaglio: sono state eseguite prove di trazione e durezza per determinare le proprietà meccaniche, mentre le analisi metallografiche hanno permesso di valutare le caratteristiche microstrutturali lungo lo spessore delle piastre.

L'indagine sul processo di stiratura ha coinvolto piastre con diverse combinazioni di larghezze e spessori, aspetti ritenuti fondamentali per una comprensione approfondita del comportamento della macchina. Questo studio ha contribuito a una migliore comprensione del processo di stiratura, portando alla creazione di un modello capace di prevedere il comportamento delle piastre durante il processo stesso.

L'analisi ha evidenziato alcune delle relazioni esistenti tra vari parametri di processo, fornendo così al reparto di Produzione uno strumento utile per garantire la qualità dei prodotti. L'obiettivo finale è la riduzione degli sprechi e il miglioramento dell'efficienza operativa complessiva dell'impianto.

Capitolo 1 Niche Fusina Rolled Products

Niche Fusina Rolled Products è uno dei principali stabilimenti italiani nella produzione di prodotti laminati in alluminio. Lo stabilimento, fondato nel 1965, si trova nella zona industriale di Fusina, nelle immediate vicinanze di Venezia: nel corso degli anni diverse aziende si sono susseguite assumendo la proprietà dell'impianto e importanti investimenti hanno migliorato le attrezzature per mantenerne una posizione competitiva sul mercato. Oggi l'azienda, di proprietà del gruppo statunitense DADA holding (51%) e Invitalia (49%) dal 1° aprile 2022, conta 260 dipendenti.

Lo stabilimento, composto da una fonderia e un laminatoio, ha una capacità produttiva di circa 75.000 tonnellate annue di prodotti laminati, principalmente lamiere (spessore compreso tra 2 e 8 mm) e piastre (spessore tra 8 e 80 mm).



Figura 1.1: Alcuni dei nostri prodotti dallo stabilimento Niche Fusina Rolled Products.

La produzione di Fusina si rivolge a entrambi i mercati italiano ed estero, con prevalenza di quest'ultimo (Europa, Asia, USA e Oceania). I prodotti realizzati dall'azienda sono destinati a:

- settore marino per la produzione di navi di lusso, catamarani e yacht;
- settore dei trasporti per la produzione di camion cisterna, camion per trasporto merce, autobus e treni;
- prodotti per la costruzione di parti di macchine e stampi;
- prodotti per automotive, silos e difesa militare.

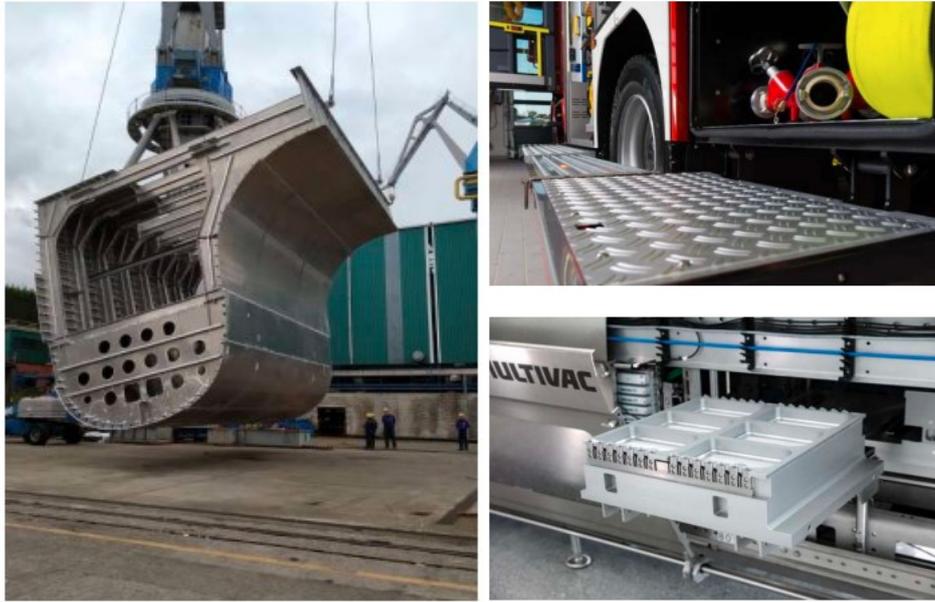


Figura 1.2: Principali settori d'impiego dei prodotti realizzati da Niche Fusina Rolled Products.

Il largo impiego dell'alluminio è dovuto alla straordinaria combinazione delle caratteristiche offerte, come:

- riciclabilità: l'alluminio può essere riciclato all'infinito senza comprometterne la qualità;
- leggerezza: l'alluminio è un materiale molto leggero, con densità pari a $2,7 \frac{g}{cm^3}$;
- alta conducibilità: l'alluminio è un ottimo conduttore per il calore e l'elettricità;
- resistente alla corrosione e altamente durevole: l'alluminio sviluppa uno strato di ossido naturale che lo protegge dalla corrosione. Questa proprietà è importante sia per prodotti con una vita molto lunga, sia per le applicazioni esposte a condizioni estreme, come in ambiente marino;
- facile da lavorare: l'alluminio è facile da formare, saldare e lavorare, grazie alla sua duttilità, ai bassi punti di fusione e alla leggerezza;
- impermeabilità: l'alluminio è un'eccellente barriera contro la luce, gli odori e la contaminazione, rendendolo un materiale di imballaggio perfetto. [1]

Attualmente Niche Fusina Rolled Products si concentra principalmente nella realizzazione di prodotti destinati al settore dei trasporti terrestri ed al settore navale, che risultano quindi i due principali mercati dell'azienda. In particolare, il sito produttivo di Fusina si distingue

come il principale produttore mondiale di alluminio laminato ad uso marino, impiegato nella costruzione di strutture per l'industria offshore, yacht e mega yacht, traghetti e imbarcazioni di vario genere, in conformità alle normative dei principali enti marittimi.

L'azienda ha come obiettivo sfidante a medio-lungo termine un impegno globale per la tutela dell'ambiente e la promozione del riciclo dei prodotti. In media, il 30% della nostra materia prima è costituito da alluminio primario, mentre il restante 70% da alluminio riciclato, noto come alluminio secondario. Al fine di apportare un notevole contributo alla diminuzione delle emissioni di CO₂, la Niche Fusina Rolled Products ha instaurato una partnership per l'acquisto di alluminio primario caratterizzato da emissioni di CO₂ ridotte. L'approvvigionamento di materiale, in questo modo, ridurrà l'impronta di carbonio dei laminati prodotti, offrendo così ai propri clienti una gamma di prodotti a basse emissioni di CO₂. Inoltre, l'obiettivo è di aumentare l'utilizzo di materiale riciclato nei propri prodotti senza alterarne la qualità e le caratteristiche meccaniche.

Grazie alle tecniche di produzione all'avanguardia, l'azienda è in grado di offrire prodotti di qualità ed efficienza elevate che soddisfano i requisiti prescritti da diverse certificazioni, tra cui: ISO 9001 (Qualità), ISO 14001 (Ambiente), OHSAS 18001 (Salute e Sicurezza), ISO 50001 (Energia).

1.1 Processo produttivo

L'azienda si compone di una fonderia e un situati all'interno dello stesso sito in due capannoni separati e distanti circa 300 m tra loro. Completano lo stabilimento tutta una serie di servizi ausiliari (cabina elettrica, impianto di raffreddamento e filtraggio degli oli, depuratori), magazzini, depositi e uffici.

1.1.1 Fonderia

La fonderia ha il compito di fondere sia gli scarti di alluminio provenienti da fornitori esterni che materiale interno, derivante dagli scarti di produzione del laminatoio, al fine di produrre placche da laminazione con dimensioni e composizioni chimiche specifiche, in risposta alle esigenze del mercato.

L'area produttiva è composta da due moderne linee di colata con forni fusori, forni di colata, unità di degasaggio e filtrazione con una capacità produttiva di 95.000 t/anno di placche destinate al laminatoio. Il materiale da rifondere viene caricato nei due forni fusori

(Figura 1.3), ognuno dei quali è collegato a due forni di colata. In aggiunta a questo materiale vengono aggiunti gli alliganti, che sono elementi chimici in grado di sciogliersi nell'alluminio e costituire la base per la creazione di una specifica lega, consentendo di ottenere le proprietà richieste.



Figura 1.3: Forno fusorio.

Il metallo allo stato liquido mescolato con gli alliganti confluisce successivamente in un pozzo per dare inizio alla fase di colata (Figura 1.4), in cui il materiale si ri-solidifica creando le placche.



Figura 1.4: Fase di colata placca.

Ottenute le placche, queste vengono segate alle due estremità, punti che presentano le maggiori impurità del materiale (*Figura 1.5*).



Figura 1.5: Fase di taglio della testa e della coda.

1.1.2 Laminatoio

Il laminatoio trasforma le placche provenienti dalla fonderia in prodotto finito sotto forma di piastre, lamiere e nastri secondo le specifiche richieste dai clienti. Al fine di conferire ai prodotti le caratteristiche desiderate, il reparto è suddiviso in diverse aree operative, ognuna delle quali è dedicata a diverse fasi del processo di produzione.

Le placche che arrivano dalla fonderia devono essere necessariamente fresate sulle superfici laterali per rimuovere lo strato corticale, cioè i primi 5÷10 mm in cui si concentrano i principali difetti di fonderia come ossidi, porosità superficiale, cristallizzazione differenziata, pelli di colata, liquazioni, pieghe fredde che renderebbero inaccettabile la superficie della lamiera finita (*Figure 1.6 – 1.7*).



Figura 1.6: La placca prima della fresatura.



Figura 1.7: Fase di fresatura della placca (a sinistra) e la placca dopo la fresatura (a destra).

Il truciolo che si genera in questa fase viene aspirato e convogliato in un silos di raccolta al cui interno viene compattato per essere riutilizzato in fonderia per realizzare nuove placche. Dopo fresatura le placche vengono caricate all'interno dei forni di preriscaldamento dove subiscono un trattamento di omogeneizzazione per circa 12-24 h ad una temperatura che varia fra i 480°C ed i 575°C. I forni di preriscaldamento presenti nello stabilimento sono il forno Ebner, nel quale possono essere contenute fino a 24 placche contemporaneamente, ed i forni a pozzo nei quali si possono disporre fino a 7 placche in piedi.

Dopo aver effettuato il preriscaldamento si procede con la laminazione a caldo, comunemente chiamata sbozzatura (*Figura 1.8*). Questa operazione si svolge a una temperatura in cui il metallo da laminare raggiunge la massima deformabilità, situandosi tra i 350°C e i 550°C, ossia ad una temperatura superiore ai due terzi del suo punto di fusione. Si eseguono quindi più passate sulla placca per ottenere una riduzione progressiva dello spessore. Lo sbozzatore presenta cilindri sovrapposti due reversibili in grado di ruotare in entrambi i versi e trascinare la lamiera riducendone contemporaneamente lo spessore.



Figura 1.8: Placca in fase di sbazzatura

Lo sbazzatore presenta una tavola di 3200 mm e monta due cilindri di laminazione aventi diametro di 940 mm, supportati da due cilindri di sostegno in acciaio di diametro 1420 mm. A causa delle considerevoli forze di attrito generate dal contatto tra il materiale in lavorazione e i cilindri, viene impiegata un'emulsione lubrificante composta da acqua demineralizzata e olio con l'aggiunta di antiossidanti. Questa emulsione non solo riduce l'attrito ma contribuisce anche al raffreddamento dei cilindri. In conformità al principio di conservazione di massa e volume, ad ogni passaggio di laminazione lo spessore del laminato si riduce e si verifica un corrispondente aumento della sua lunghezza. Lungo la via rulli una cesoia elimina le estremità del laminato per eliminare le sdoppiature a “bocca di cocodrillo”.

Terminata questa fase iniziale comune a tutti i prodotti, si procede seguendo due percorsi distinti per piastre e lamiere:

- le piastre, che possono essere incrudite o sottoposte a solubilizzazione, tempra e invecchiamento, vengono tagliate alla cesoia, stirate alla stiratrice, tagliate a misura alla sega e sottoposte a trattamento termico all'interno di forni per raggiungere lo stato fisico richiesto. I forni utilizzati sono il forno Efcò e i forni Ferrè a camera.

- I nastri dopo sbazzatura vengono laminati a freddo al Finitore, e poi sottoposti a trattamento termico per ottenere lo stato fisico richiesto. Infine, vengono processati alle linee di taglio per essere tagliati in lamiere (piane o mandorlate) a misura finita.

Sono presenti, infine, zone dedicate al raffreddamento dei prodotti e zone dedicate all'imballaggio del materiale, che precede la spedizione al cliente (*Figura 1.9*).



Figura 1.9: Zone dedicate all'imballaggio del materiale

1.2 Leghe da deformazione plastica

Le leghe prodotte a Fusina appartengono alla categoria delle leghe da deformazione plastica. Queste leghe di alluminio possono essere suddivise in due gruppi principali in base al meccanismo fisico-strutturale che influenza la loro resistenza meccanica finale e la combinazione delle diverse proprietà:

- Leghe da incrudimento;
- Leghe da trattamento termico.

Nella *Figura 1.10* sono illustrate le leghe da deformazione plastica, classificate in conformità alla norma europea EN 573 - 1 [2]. Si evidenziano gli elementi principali che conferiscono le specifiche proprietà meccaniche a ciascuna lega. Inoltre, vengono suddivise nelle due categorie: trattabili e non trattabili termicamente.

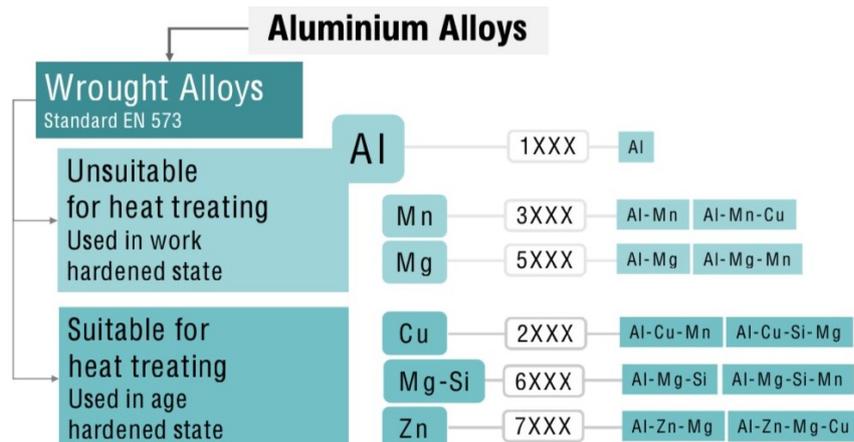


Figura 1.10: Classificazione delle leghe da deformazione plastica [1]

1.2.1 Leghe da incrudimento

Le principali famiglie di leghe da deformazione plastica non trattabili termicamente sono:

- Serie 1xxx Al (alluminio industrialmente puro)
- Serie 3xxx Al - Mn (alluminio – manganese)
- Serie 4xxx Al - Si (alluminio – silicio)
- Serie 5xxx Al - Mg (alluminio – magnesio)

Le leghe appartenenti a tale categoria devono il loro rafforzamento alla soluzione allo stato solido degli alliganti nella matrice di alluminio e alla formazione di seconde fasi e composti intermetallici. Questo accade soprattutto quando sono presenti elementi con una bassa solubilità in alluminio, come il ferro, il nichel, il titanio, il manganese e il cromo. Queste leghe migliorano la loro resistenza meccanica attraverso il processo di deformazione plastica a freddo applicato al materiale ricotto (nello stato O). La deformazione aumenta la durezza del materiale, consentendo così di ottenere la forma desiderata e una struttura cristallina in grado di conferire specifiche proprietà meccaniche, come un incremento di resistenza. L'unico trattamento termico applicabile a questo tipo di leghe è la ricottura, finalizzata a ridurre o eliminare gli effetti della deformazione plastica applicata al materiale. A seconda della temperatura di esecuzione, la ricottura può favorire il riassetto cristallino (tra 200°C ÷ 250°C) o la ricristallizzazione, parziale o completa, dello stato inizialmente indurito (tra 350°C ÷ 400°C). Il raffreddamento deve avvenire lentamente e può essere eseguito in aria o in un forno.

1.2.2 Leghe da trattamento termico

Le principali famiglie di leghe da trattamento termico sono le seguenti:

- Serie 2xxx Al - Cu (alluminio – rame)
- Serie 6xxx Al - Mg - Si (alluminio – magnesio – silicio)
- Serie 7xxx Al - Zn - Mg (alluminio – zinco – magnesio)

Per trattamento termico si intende un'operazione di riscaldamento e raffreddamento controllato, che viene effettuata sul materiale allo stato solido, con lo scopo di modificarne alcune proprietà attraverso l'alterazione della struttura interna. Le leghe appartenenti a tale categoria hanno una concentrazione di alligante maggiore rispetto a quella richiesta per una soluzione solida in equilibrio a temperatura ambiente. L'invecchiamento, che può essere naturale o artificiale e permette il rafforzamento e l'indurimento della lega, si basa sulla formazione di clusters, coerenti con la fase solvente, che consentono una migliore distribuzione delle tensioni all'interno del materiale e che ostacolano o bloccano il movimento delle dislocazioni. L'invecchiamento segue il trattamento termico di solubilizzazione e tempra. L'intero processo, consiste nel creare una soluzione solida ad alta temperatura di vari metalli nella matrice di alluminio e sfruttare l'inevitabile e successiva riprecipitazione dei relativi composti intermetallici, in parte insolubili a temperatura ambiente, per bloccare il movimento delle dislocazioni e quindi rafforzare il metallo. La soluzione solida creata durante la fase iniziale di riscaldamento ad alta temperatura è sovra-satura e quindi instabile, vale a dire che al decrescere graduale della temperatura si ha una progressiva precipitazione della soluzione solida degli elementi metallici di alligazione aggiunti all'alluminio. Per ottenere i precipitati nelle dimensioni desiderate bisogna porre la massima attenzione a tre principali parametri:

- 1) la temperatura (che deve essere sufficientemente alta da permettere la solubilizzazione completa del soluto nel solvente),
- 2) tempo di permanenza a tale temperatura (che deve essere sufficientemente lungo da permettere la solubilizzazione nel preriscaldamento ed un intervallo di tempo per l'invecchiamento che non sia né troppo corto né troppo lungo al fine di creare i precipitati coerenti alle dimensioni volute),
- 3) velocità di raffreddamento alla tempra molto elevata (raffreddamenti blandi hanno come conseguenza lo scarto del materiale).

Subito dopo la tempra, il materiale presenta caratteristiche meccaniche sostanzialmente analoghe a quelle dello stato ricotto (stato fisico O), poiché il processo di riprecipitazione, sebbene iniziato, non ha ancora un impatto significativo sulla deformazione plastica dei cristalli quando vengono sottoposti a sforzi. La riprecipitazione può quindi essere accelerata mediante trattamento termico in forno (invecchiamento artificiale) per ottenere lo stato fisico T6 o T6xx o lasciata proseguire naturalmente a temperatura ambiente (stati fisici T4 o T4xx). Per alcune serie, quali la 6xxx, tra il trattamento termico di tempra e quello di invecchiamento è anche possibile effettuare opportuni processi di deformazione plastica a freddo in modo da incrudire il materiale, tale procedimento consente di aumentare ulteriormente la resistenza meccanica della lega.

Capitolo 2 Piastre in lega 5xxx

I prodotti da laminazione ottenuti per incrudimento presentano caratteristiche meccaniche differenti in funzione del tipo di lega, del grado di incrudimento e di ricristallizzazione, che può essere completo per lo stato ricotto (stato fisico 0) e parziale per gli stati semi incruditi (stato fisico H). Le leghe appartenenti a tale categoria devono il loro rafforzamento agli elementi alliganti in soluzione solida nella matrice di alluminio ed alla formazione di seconde fasi e composti intermetallici. A tali meccanismi vengono aggiunti le lavorazioni a freddo, cioè l'insieme di tutte le lavorazioni che inducono una deformazione sul materiale ricotto, incrudendolo e facendogli conferire sia la forma desiderata, sia una struttura cristallina tale da indurre determinate proprietà meccaniche, come incremento di resistenza meccanica e durezza.

Nei prodotti in lega 5xxx, il principale elemento alligante è il magnesio, presente in quantità fino al 5%, insieme a concentrazioni minori di manganese e cromo. Il magnesio conferisce proprietà distintive, come resistenza alla corrosione, resistenza meccanica e resistenza a temperature elevate. Il magnesio precipita ai bordi dei grani formando composti intermetallici con l'alluminio, come il Al_3Mg_2 e Al_2Mg_3 . Nonostante ciò, le leghe della serie 5xxx non vengono sottoposte a solubilizzazione, tempra e invecchiamento, poiché tale trattamento non produce un miglioramento significativo delle proprietà meccaniche. Aumentando il contenuto di magnesio si registra un incremento delle caratteristiche di resistenza, ma si verifica una progressiva riduzione della deformabilità a freddo e della duttilità [3].

I prodotti delle lavorazioni sono spesso disponibili in stato ricotto (stato fisico O) o in uno dei tre stati base: H1, H2, H3, che migliorano la stabilità delle proprietà o la resistenza alla corrosione in molte leghe. Nelle leghe 5083, 5086 e 5456 si verificano numerosi precipitati ai bordi dei grani, rendendo la lega suscettibile a rotture per fatica o corrosione, specialmente dopo trattamenti di indurimento per deformazione. Per ridurre questa instabilità, sono stati sviluppati trattamenti speciali identificati con la sigla H3xx. Le leghe alluminio - magnesio sono ampiamente utilizzate nel settore dei trasporti, nella

costruzione di strutture e in applicazioni militari che richiedono eccellenti proprietà balistiche e criogeniche.



Figura 2.1: Alcuni esempi di leghe di alluminio in applicazioni marine e nel settore dei trasporti.

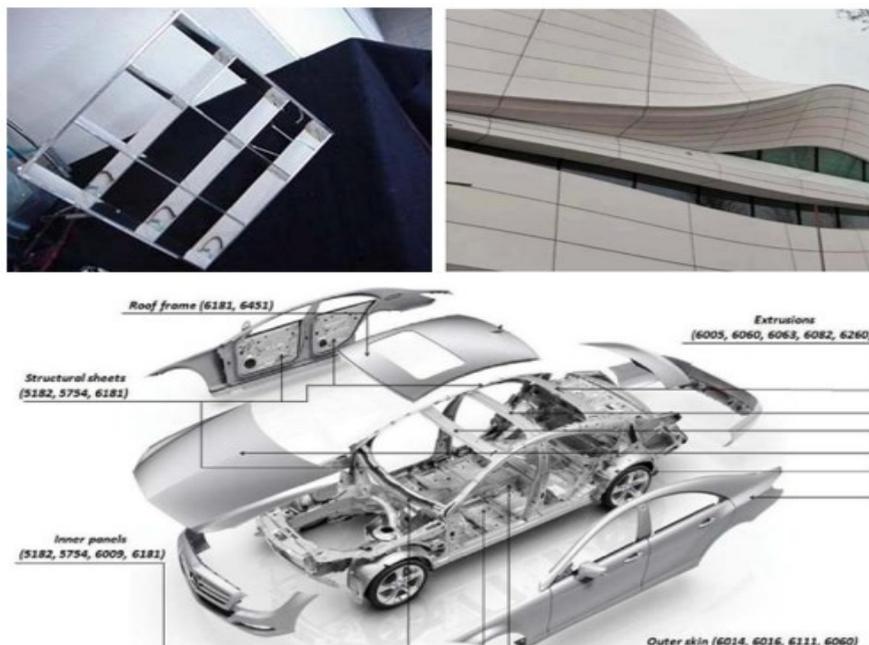


Figura 2.2: Alcuni esempi di leghe di alluminio in applicazioni automobilistiche, per illuminazione e per costruzioni generali.

2.1 Meccanismi di rafforzamento

Il rafforzamento in un materiale metallico consiste nell'aumento del limite elastico, ovvero nell'incremento della tensione richiesta per provocare la transizione del materiale dal campo elastico a quello plastico. Questo obiettivo è raggiunto attraverso l'impiego di specifici meccanismi volti a ostacolare il movimento delle dislocazioni. I principali meccanismi di rafforzamento applicati alle leghe di alluminio sono:

- Rafforzamento per alligazione;
- Rafforzamento per incrudimento;
- Rafforzamento per affinazione del grano;
- Rafforzamento per precipitazione.

Dato che le leghe della serie 5xxx non vengono sottoposte al processo di solubilizzazione, tempra e invecchiamento, in quanto tale trattamento non porta a un miglioramento significativo delle proprietà meccaniche, si traslascia l'analisi del rafforzamento per precipitazione.

2.1.1 Rafforzamento per alligazione

L'inclusione di atomi di soluto in soluzione solida all'interno del reticolo del solvente genera una lega più resistente rispetto al metallo puro. L'effetto del rafforzamento si amplifica con l'aumentare della concentrazione di soluto. Gli atomi nel reticolo del soluto possono sostituire gli atomi del solvente (soluzione solida sostituzionale) o occupare siti interstiziali (soluzione solida interstiziale).

Gli atomi idonei a occupare i siti interstiziali sono O, H, C, N e B, caratterizzati dalle loro dimensioni ridotte; al contrario, gli altri atomi di soluto, aventi dimensioni simili a quelle del solvente, formano soluzioni solide sostituzionali in quanto non sono in grado di occupare tali siti interstiziali. Gli elementi che sono più comunemente presenti nelle leghe commerciali per conferire maggiore resistenza, soprattutto quando associati all'indurimento per deformazione a freddo o a trattamenti termici, o a entrambi, sono rame, magnesio, manganese, silicio e zinco.

Tutti questi elementi hanno una significativa solubilità solida nell'alluminio, in tutti i casi la solubilità aumenta con l'aumentare della temperatura (*Figura 2.3*).

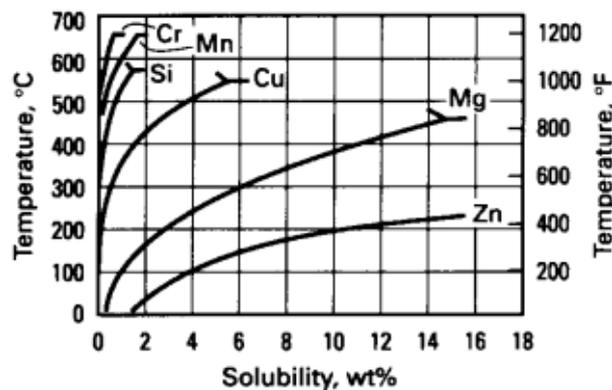


Figura 2.3: Solubilità solida binaria di equilibrio in funzione della temperatura per gli elementi alliganti aggiunti più frequentemente all'alluminio [3].

L'effetto di incremento di resistenza della massa metallica dipende sia dalla quantità dell'elemento di lega in soluzione che dalla sua dimensione atomica, ovvero dalla maggiore o minore azione di disturbo che un atomo estraneo crea nel reticolo del metallo solvente (Figura 2.4).

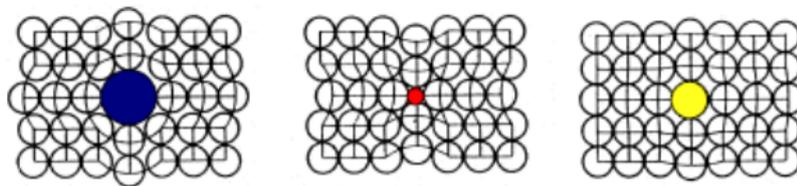


Figura 2.4: Differenti distorsioni del reticolo.

Si generano campi di sollecitazione, associati a deformazioni reticolari, intorno agli atomi di soluto. Questi campi di sollecitazione interagiscono con le dislocazioni, rendendo più complesso il loro movimento e, di conseguenza, la soluzione solida diventa più resistente del metallo puro. Le leghe principali che vengono rinforzate mediante l'aggiunta di elementi leganti in soluzione solida (spesso associate a lavorazioni a freddo) sono quelle appartenenti alla serie alluminio - magnesio, con una percentuale di magnesio che varia dallo 0,5% al 6% in peso. Queste leghe includono spesso piccole aggiunte di elementi di transizione, come cromo o manganese, e, più raramente, zirconio, per controllare la microstruttura. Inoltre, contengono impurità di ferro e silicio, di solito presenti sotto forma di particelle intermetalliche.

La *Figura 2.5* illustra l'effetto del magnesio in soluzione solida sulla resistenza allo snervamento e sull'allungamento a rottura per la maggior parte delle comuni leghe commerciali di alluminio - magnesio [3].

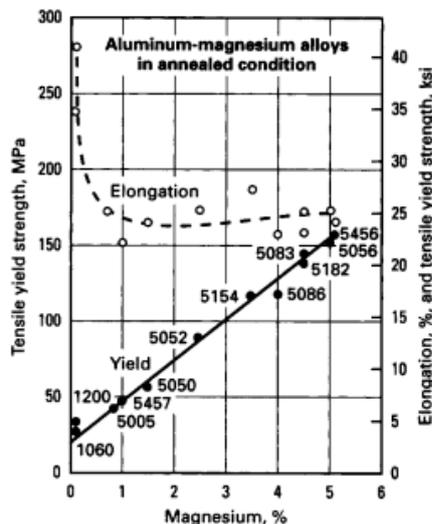


Figura 2.5: Correlazione tra tensione di snervamento, allungamento e contenuto di magnesio per alcune leghe commerciali di alluminio [3].

2.1.2 Rafforzamento per incrudimento

La deformazione a freddo o incrudimento è uno dei metodi più importanti per aumentare la resistenza meccanica di alcuni metalli. Per deformazione plastica a freddo si intende che il processo di lavorazione è eseguito ad una temperatura inferiore rispetto alla temperatura di ricristallizzazione. Quando un metallo subisce una profonda deformazione a freddo, che lo incrudisce, gran parte dell'energia spesa per la deformazione plastica viene conservata al suo interno sotto forma di difetti lineari, cioè dislocazioni. Si sfrutta l'incrudimento prodotto per deformazione plastica a freddo affinché le dislocazioni si ostacolino tra loro.

In *Figura 2.6* si può osservare come una deformazione ad una temperatura inferiore a quella di ricristallizzazione determini un aumento delle caratteristiche di resistenza e durezza, unitamente ad una diminuzione di duttilità [5].

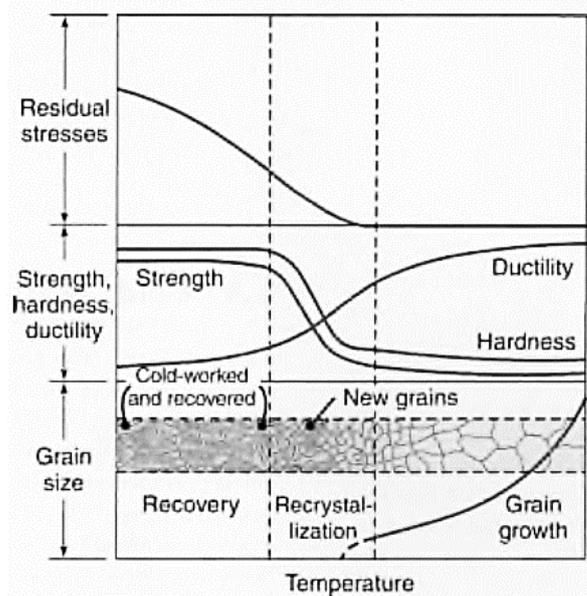


Figura 2.6: Andamento di tensioni residue, caratteristiche di resistenza, durezza, duttilità e dimensione del grano in funzione della temperatura a cui avviene la deformazione [5].

Maggiore è la deformazione a freddo, maggiore è la quantità di dislocazioni prodotte e maggiore è la quantità di energia necessaria per permettere lo scorrimento reciproco dei cristalli.

Quindi, un materiale incrudito ha un'energia interna più elevata di uno non incrudito. Quando necessario, si esegue un trattamento termico di ricottura totale o parziale, fornendo al metallo l'energia necessaria per ripristinare, completamente o parzialmente, la regolarità della struttura cristallina originaria, riducendo quindi il numero di dislocazioni. Per le leghe 5xxx, l'effetto combinato dell'incrudimento e la presenza di magnesio determinano un aumento delle proprietà meccaniche, come evidenziato nella *Figura 2.7* [4].

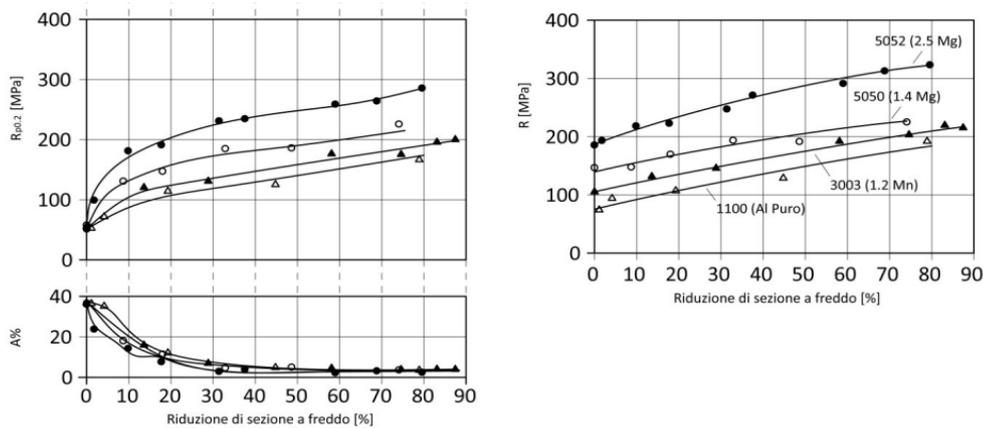


Figura 2.7: Effetto dell'aggiunta di magnesio e dell'incrudimento sul carico unitario di rottura (R), sul carico di snervamento ($R_{p0.2}$) e sull'allungamento percentuale a rottura ($A\%$) per leghe della serie 5xxx rispetto alle leghe 1100 e 3003 [4].

2.1.3 Rafforzamento per affinamento del grano cristallino

La maggior parte delle leghe di interesse tecnologico presenta una struttura policristallina. Nei materiali policristallini, i bordi dei grani rappresentano ostacoli significativi al movimento delle dislocazioni, tranne che alle alte temperature, dove diventano zone di debolezza a causa della possibilità di scorrimento dei grani. Le dislocazioni si accumulano all'interfaccia tra due grani adiacenti e vengono trattenute a causa del cambiamento di orientazione cristallografica. Il passaggio di una dislocazione da un grano a uno adiacente richiede un aumento della forza applicata. Alle basse temperature, i bordi dei grani impediscono il moto delle dislocazioni, provocando un aumento della resistenza del metallo quando le dimensioni medie dei grani diminuiscono.

Questo fenomeno è quantificato dall'equazione di Hall-Petch, equazione empirica che mette in relazione lo sforzo di snervamento di un metallo (σ_s) con il diametro medio di un grano (d):

$$\sigma_s = \sigma_i + K * d^{-\frac{1}{2}}$$

dove: σ_s = tensione di snervamento; σ_i = tensione necessaria per muovere le dislocazioni dentro un monocristallo; K = costante di proporzionalità (dipende dal reticolo e dalla temperatura), d = dimensione media del grano.

Nel corso della deformazione plastica dei metalli, le dislocazioni che si spostano lungo un piano specifico di scorrimento non possono passare da un grano all'altro mantenendo la

stessa direzione. In ciascun grano, le dislocazioni si orientano in relazione ai suoi piani preferenziali di scorrimento, che differiscono dagli orientamenti dei grani circostanti. Aumentando il numero di grani e riducendone il diametro, le dislocazioni all'interno di ciascun grano possono muoversi per una distanza minore prima di incontrare il bordo del grano, dove il loro movimento termina. Questa dinamica è la ragione per cui i metalli con grana fine manifestano una maggiore resistenza meccanica.

2.2 Lega di alluminio 5083

La lega 5083, appartenente alla classe 5xxx delle leghe da incrudimento, è caratterizzata da una percentuale di magnesio compresa tra il 4% e il 4,9%. Questo, insieme a basse concentrazioni di manganese e cromo, assicura un efficace processo di indurimento della lega. Dal punto di vista delle proprietà meccaniche, la lega di alluminio 5083 mostra prestazioni superiori rispetto ad altre leghe appartenenti alla famiglia 5xxx, con una notevole resistenza alla corrosione e buona saldabilità. Queste leghe sono impiegate in una vasta gamma di applicazioni, inclusi assemblaggi saldati, componenti marini e serbatoi, dove è richiesta un'elevata efficienza saldante e una resistenza massima delle giunzioni. Trovano impiego anche in recipienti a pressione fino a 65 °C e in molte applicazioni criogeniche, come ponti, carri merci, componenti marini, torri televisive, piattaforme di perforazione, attrezzature di trasporto, componenti per missili e cassoni per camion. [3]

2.2.1 Composizione chimica

La composizione chimica tipica della lega di alluminio 5083 è stabilita secondo le specifiche della normativa EN 573-3. Secondo gli standard europei, la lega 5083 è designata con il codice EN AW – 5083. Di seguito, la *Tabella 2.1* presenta i valori massimi e minimi consentiti in percentuale di massa per colata, definiti dalla normativa di riferimento [6]:

Tabella 2.1: Composizione chimica lega 5083 definita dalla normativa EN 573 – 3.

	Si [wt%]	Fe [wt%]	Cu [wt%]	Mn [wt%]	Mg [wt%]	Cr [wt%]	Zn [wt%]	Bi [wt%]	Ti [wt%]	Be [wt%]	Altri ¹ [wt%]	
											Ciasc.	Totale
MIN				0,4	4	0,05						
MAX	0,4	0,4	0,1	1	4,9	0,25	0,25	-	0,15	-	0,05	0,15

All'interno del processo produttivo di Fusina vengono utilizzate diverse formulazioni della lega 5083 per garantire che il prodotto finale soddisfi requisiti specifici in base all'applicazione prevista. Per alcune varianti particolari viene effettuato il monitoraggio della concentrazione di idrogeno durante la colata al fine di ottimizzare l'utilizzo della lega in contesti applicativi specifici. A titolo di confronto, tramite la piattaforma aziendale Flits AS400 è stato possibile recuperare le composizioni chimiche espresse in percentuale di massa di tutti i laminati realizzati in lega 5083 nel 2023. I valori medi di ciascun elemento chimico sono riportati nella *tabella 2.2*.

Tabella 2.2: Lega 5083: composizione chimica media interna allo stabilimento a confronto con i valori limite da normativa.

	Si [wt%]	Fe [wt%]	Cu [wt%]	Mn [wt%]	Mg [wt%]	Cr [wt%]	Zn [wt%]	Na [wt%]	Ti [wt%]	Be [wt%]
VALORI LIMITE DA NORMATIVA	0,4	0,4	0,1	1 - 0,4	4,9 - 4	0,25 - 0,05	0,25	-	0,15	-
VALORE MEDIO INTERNO	0,23	0,32	0,04	0,61	4,61	0,08	0,1	-	0,02	-

¹ "Altri" include sia gli elementi elencati per i quali non è indicato alcun limite specifico, sia elementi non elencati.

2.2.2 Stato fisico

Per definire lo stato fisico delle leghe di alluminio ci si basa sulla normativa europea EN 515². Nel caso delle piastre non soggette a trattamento termico si utilizza la lettera O per indicare lo stato ricotto e la lettera H per indicare lo stato incrudito. La designazione con la lettera H si applica a semilavorati che sono stati sottoposti a lavorazione plastica a freddo dopo una ricottura, a lavorazione plastica a caldo o a una combinazione di lavorazione plastica a freddo e ricottura parziale o ricottura di stabilizzazione, al fine di ottenere specifiche proprietà meccaniche desiderate.

La lettera H è sempre seguita da almeno due cifre: la prima indica il tipo di trattamento termico³, mentre la seconda indica il grado di incrudimento. La seconda cifra successiva alla lettera H denota il grado finale di incrudimento, espresso attraverso il valore minimo del carico di rottura a trazione. Il numero 8 è assegnato agli stati più duri. Gli stati compresi tra O (ricotto) e Hx8 sono designati con numeri da 1 a 7. Talvolta viene utilizzata una terza cifra per identificare processi di produzione particolari.

Questa terza cifra è impiegata quando si desidera individuare una variante di uno stato a due cifre, ad esempio quando ci sono differenze significative nel controllo dello stato metallurgico o nelle caratteristiche meccaniche, o in entrambi, rispetto alla designazione a due cifre base.

² La norma UNI EN 515 stabilisce le designazioni degli stati metallurgici per tutti i tipi di semilavorati in alluminio e per vergella e nastro in alluminio e leghe di alluminio colati in continuo e destinati ad essere lavorati plasticamente.

³ Lo stato fisico H1x differisce da quello H2x, H3x e H4x.

La designazione H2x (incrudito e ricotto parzialmente) si applica ai semilavorati che sono incruditi più dell'entità finale desiderata e di cui poi viene ridotta la resistenza meccanica al livello desiderato mediante ricottura parziale.

I semilavorati caratterizzati da uno stato fisico H3x (incrudito e stabilizzato) sono incruditi e le caratteristiche meccaniche vengono stabilizzate mediante trattamento termico a bassa temperatura oppure a seguito di un riscaldamento introdotto durante la fabbricazione. Generalmente, la stabilizzazione migliora la duttilità. Questa designazione è applicabile soltanto alle leghe che, in assenza di stabilizzazione, si addoliscono gradualmente con l'invecchiamento a temperatura ambiente.

La designazione H4x (incrudito e laccato o verniciato), invece, si applicano ai semilavorati che sono incruditi e che possono essere sottoposti a una sorta di ricottura parziale durante il trattamento di cottura che segue l'operazione di verniciatura o laccatura [7].

2.3 Proprietà meccaniche leghe di alluminio 5083 O/H111

Le specifiche meccaniche della lega 5083 O/H111 sono stabilite conformemente alla normativa EN 485 – 2⁴. Secondo gli standard europei, la lega 5083 è designata con il codice EN AW – 5083 [Mg4,5 Mn0,7].

Tabella 2.3: LEGA EN AW - 5083 [Al Mg4,5 Mn0,7] da normativa EN 485-2 [9].

LEGA EN AW - 5083 [Al Mg4,5 Mn0,7]								
STATO FISICO	SPESSORE [mm]		TENSIONE DI ROTTURA Rm [Mpa]		TENSIONE DI SNERVAMENTO Rp _{0,2} [Mpa]		ALLUNGAMENTO MIN. [%]	
	sopra	fino a	min.	max.	min.	max.	A50	A
0	0,2	0,5	275	350	125		11	
	0,5	1,5	275	350	125		12	
	1,5	3	275	350	125		13	
	3	6,3	270	350	125		15	
	6,3	12,5	270	345	115		16	
	12,5	50	270	345	115			15
	50	80	270	345	115			14
	80	120	260		110			12
	120	200	255		105			12
	200	250	250		95			10
H111	0,2	0,5	275	350	125		11	
	0,5	1,5	275	350	125		12	
	1,5	3	275	350	125		13	
	3	6,3	275	350	125		15	
	6,3	12,5	270	345	115		16	
	12,5	50	270	345	115			15
	50	80	270	345	115			14
	80	120	260		110			12
	120	200	255		105			12
	200	250	250		95			10
250	300	245		90			9	

⁴ La normativa Europea EN 485-2 [9] fa a riferimento alla norma Europea EN 485-1 [8], la quale specifica le modalità di ispezione e spedizione dei prodotti laminati nastri, lamiere e piastre realizzati in alluminio e sue leghe; questa è applicabile a laminati con spessore da 0,20 mm a 400 mm e include anche alcune disposizioni riguardanti modalità d'ordine e test.

Capitolo 3 Analisi della condizione attuale

Nello stabilimento Niche Fusina Rolled Products la produzione di piastre laminate in alluminio ottenute mediante incrudimento o tempra segue una sequenza di lavorazioni in cui la macchina Stiratrice è impiegata in modo continuativo.

Alcuni casi di scarto del materiale in corso di lavorazione verificatisi nel corso dell'ultimo anno e la necessità di garantire processi efficienti e orientati al miglioramento continuo hanno spinto a condurre un'analisi dettagliata del processo di stiratura delle piastre, oggetto di questo studio.

All'interno di questo capitolo si illustra il ciclo produttivo delle piastre da incrudimento, accompagnato dalla descrizione del metodo che è stato utilizzato per verificare il processo utilizzando piastre con spessore di 17 e 60 mm. Vengono dettagliate le attività svolte e le analisi condotte per caratterizzare i diversi processi di trasformazione prima e dopo la fase di stiratura: viene condotta un'analisi di processo approfondita sulla macchina Stiratrice e sul comportamento delle leghe di alluminio 5083, tenendo conto dei parametri di stiratura. L'obiettivo è studiare l'influenza di tali parametri sulle caratteristiche meccaniche del materiale, ampliando contemporaneamente lo studio a semilavorati con spessori diversi da quelli precedentemente esaminati in laboratorio. L'analisi delle caratteristiche del prodotto e del processo di produzione permette di comprendere il funzionamento della macchina in modo da assicurare il raggiungimento della qualità del prodotto finale.

3.1 Ciclo produttivo

Il processo di produzione delle piastre comprende diverse fasi, che vengono descritte nei paragrafi seguenti.

3.1.1 Fresatura

La prima operazione a cui viene sottoposta la placca, al suo arrivo in laminatoio, è la fresatura delle sue superfici. La fresatrice utilizzata, di tipo Knoevenagel, è parte di un impianto progettato per rimuovere lo strato superficiale delle placche (noto come strato corticale). La placca, dopo essere stata caricata sulla rulliera dell'impianto, viene fresata da teste rotanti dotate di utensili (teste fresanti) che lavorano in modo alternato sulle facce

superiore e inferiore e, se necessario, anche su quelle laterali. Questa operazione è essenziale poiché la superficie potrebbe presentare difetti di colata come pieghe fredde, disomogeneità chimiche e pelli di ossido formatesi durante il processo di colata e solidificazione. Dopo la fresatura si ottiene una superficie lucida ed omogenea. La capacità della macchina consente di fresare placche con un peso massimo di 18 tonnellate. Un sistema di aspirazione dedicato, dotato di silos di raccolta, estrae i trucioli prodotti durante la fresatura per immagazzinarli in attesa di essere inviati al processo di rifusione di recupero.

3.1.2 Trattamento termico di omogenizzazione / preriscaldamento

Completata la fase di fresatura della placca, si procede con un trattamento termico di omogeneizzazione / preriscaldamento all'interno di forni a pozzo (forni Stordy) o a spinta (forno Ebner) a seconda del formato placca.

La placca viene riscaldata fino a raggiungere la temperatura richiesta, variabile da lega a lega e generalmente compresa tra 480 e 570°C. Il tempo di permanenza a tale temperatura dipende dalle dimensioni della placca, dalla lega utilizzata e dall'uso finale del prodotto, e può variare tra 12 e 40 ore. L'obiettivo di questa operazione è ridurre la tensione di snervamento e migliorare la lavorabilità del materiale in preparazione alla successiva laminazione a caldo.

3.1.3 Laminazione a caldo

Dopo il completamento del trattamento termico di omogenizzazione, la placca viene sottoposta ad un certo numero di passi di laminazione a caldo allo Sbozzatore (*Figura 3.1*).

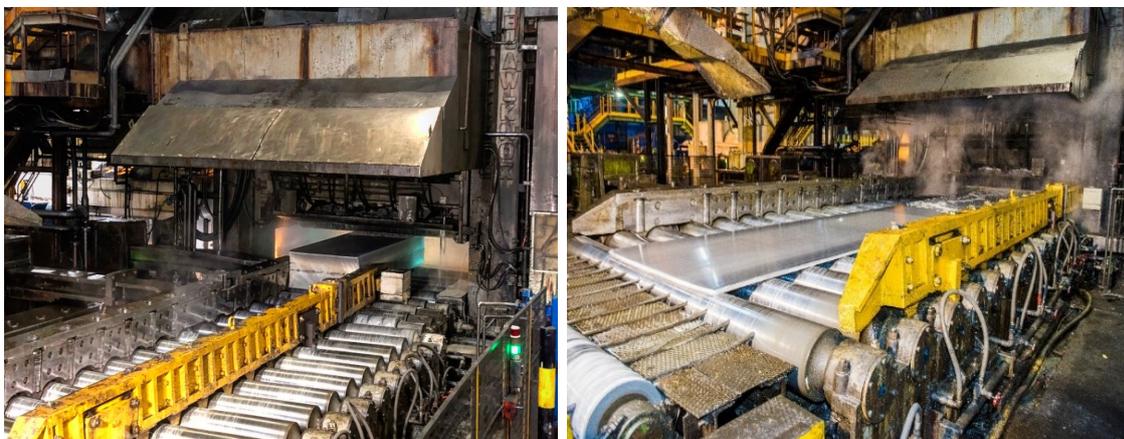


Figura 3.1: Placca lavorata allo sbozzatore: inizio sbozzatura (a sinistra) e fine sbozzatura (a destra).

La laminazione a caldo viene eseguita a una temperatura superiore a quella di ricristallizzazione del metallo. In questo processo, l'azione combinata della deformazione applicata dai cilindri e l'effetto della temperatura influenzano la microstruttura e le proprietà meccaniche del metallo (vedi la *Figura 2.6*). Si verifica il processo della ricristallizzazione dinamica, in cui entro un certo intervallo di temperatura si formano nuovi grani senza tensioni che sostituiscono i grani più vecchi. La temperatura richiesta per la ricristallizzazione varia approssimativamente tra $0,3 \div 0,5 T_m$, dove T_m è il punto di fusione del metallo su scala assoluta. [5]

In stabilimento la temperatura all'inizio della laminazione è generalmente compresa tra 450 e 550°C; durante la laminazione essa diminuisce di 100-150°C sotto l'azione di raffreddamento dell'emulsione. La temperatura di laminazione e la sequenza dei passi (per passo di laminazione si intende un passaggio dello sbozzato fra i cilindri di lavoro del laminatoio) hanno un'influenza decisiva sulla struttura del materiale, come pure sulla qualità della superficie.

Durante la laminazione a caldo i grani si deformano allungandosi (*Figura 3.2*), si formano grani più fini e con maggiore duttilità. La laminazione a caldo è un modo efficace per ridurre la granulometria nei metalli per una maggiore resistenza e duttilità [5].

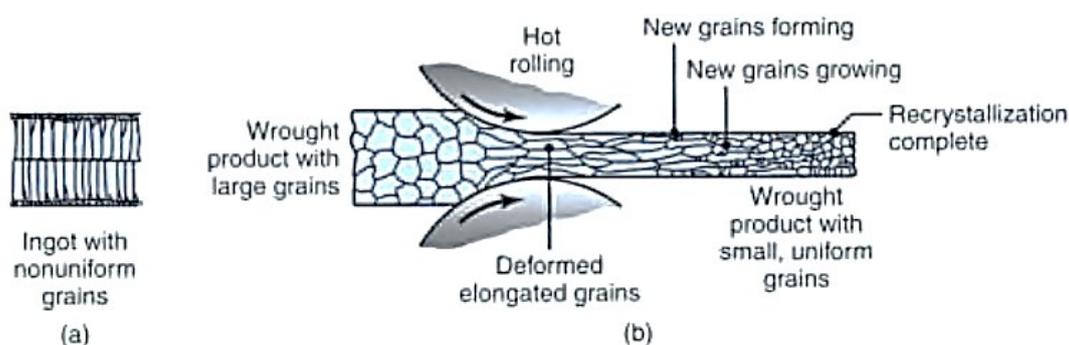


Figura 3.2: Cambiamenti nella struttura della grana cristallina della colata (a) o dei metalli lavorati a grana grossa durante la laminazione a caldo (b). La struttura cristallina da fonderia viene convertita in una struttura lavorata mediante lavorazioni a caldo [5].

Nella linea di laminazione a caldo, di lunghezza di 250 metri (100 m a monte e 150 m a valle), è inserita una cesoia utilizzabile per tagliare a misura le piastre ed eliminare eventuali difetti, come la doppiatura in testa o in coda dello sbozzato.

3.1.4 Trattamento termico di ricottura

In alcuni casi dopo la laminazione a caldo viene eseguito un trattamento termico di ricottura. Questa operazione ha l'obiettivo di annullare più o meno completamente uno stato di incrudimento. Le lavorazioni plastiche a caldo possono provocare infatti uno stato di indurimento del materiale che può ostacolare ulteriori trasformazioni. La ricottura di ricristallizzazione ha un effetto di addolcimento, e comporta una diminuzione del carico di rottura, del carico limite di snervamento e della durezza, e un incremento delle caratteristiche di allungamento. Il grado di addolcimento è in funzione della temperatura (350-400°C) alla quale il materiale è sottoposto e del tempo di permanenza alla temperatura di regime: tale ricottura può quindi risultare parziale o completa.

3.1.5 Stiratura

Dopo il processo di laminazione a caldo vengono eseguite diverse operazioni di finitura per conferire alla piastra il suo stato finale. Uno dei trattamenti applicati è la stiratura, che mira a migliorare le proprietà meccaniche e la qualità superficiale della piastra. Applicando uno sforzo di trazione superiore alla tensione di snervamento, il materiale subisce un aumento della sua lunghezza elastoplastica, consentendo la regolarizzazione della sua forma lungo l'intera lunghezza. La piastra subisce una o due sessioni di stiratura al fine di garantire un'elevata resistenza meccanica e uno spessore omogeneo in tutta la lunghezza, conforme alle specifiche richieste del cliente.

Per poter funzionare correttamente, la Stiratrice necessita della presenza di due operatori, che gestiscono la macchina dall'interno di due cabine collocate in punti distinti dell'impianto (*Figura 3.3*).



Figura 3.3: Punto osservazione lato operatore 1 (a sinistra) e lato operatore 2 (a destra).

All'operatore della cabina due è affidato il compito di movimentare la piastra e di immettere nel pulpito principale (Figura 3.4) le dimensioni caratteristiche della piastra da lavorare, ovvero larghezza, lunghezza e spessore. Dopo aver inserito tali parametri, imposta in macchina la percentuale di stiratura e la pressione massima da applicare ai prodotti. Mentre a sinistra dello schermo vengono inseriti questi parametri, il resto dello schermo monitora lo stato dei cilindri, la posizione della coppia di teste e tutti gli altri parametri con cui viene supervisionato il corretto funzionamento della macchina.



Figura 3.4: Gestione dell'impianto.

All'esterno della macchina, si trova una zona dedicata allo stoccaggio dei prodotti, suddivisa in una sezione per il carico e una per lo scarico. Le piastre lavorate vengono posizionate nella zona di scarico, mentre quelle destinate alla lavorazione trovano posto nelle aree di carico. Per facilitare il trasporto dei pallet contenenti i prodotti, sia la zona di carico che quella di scarico sono dotate di un sistema di movimentazione indipendente efficiente. L'introduzione delle piastre nella macchina avviene tramite l'uso di una gru, la quale è equipaggiata con un sistema di ventose appositamente progettato per sollevare materiali non ferrosi (si veda *Figura 3.5*).

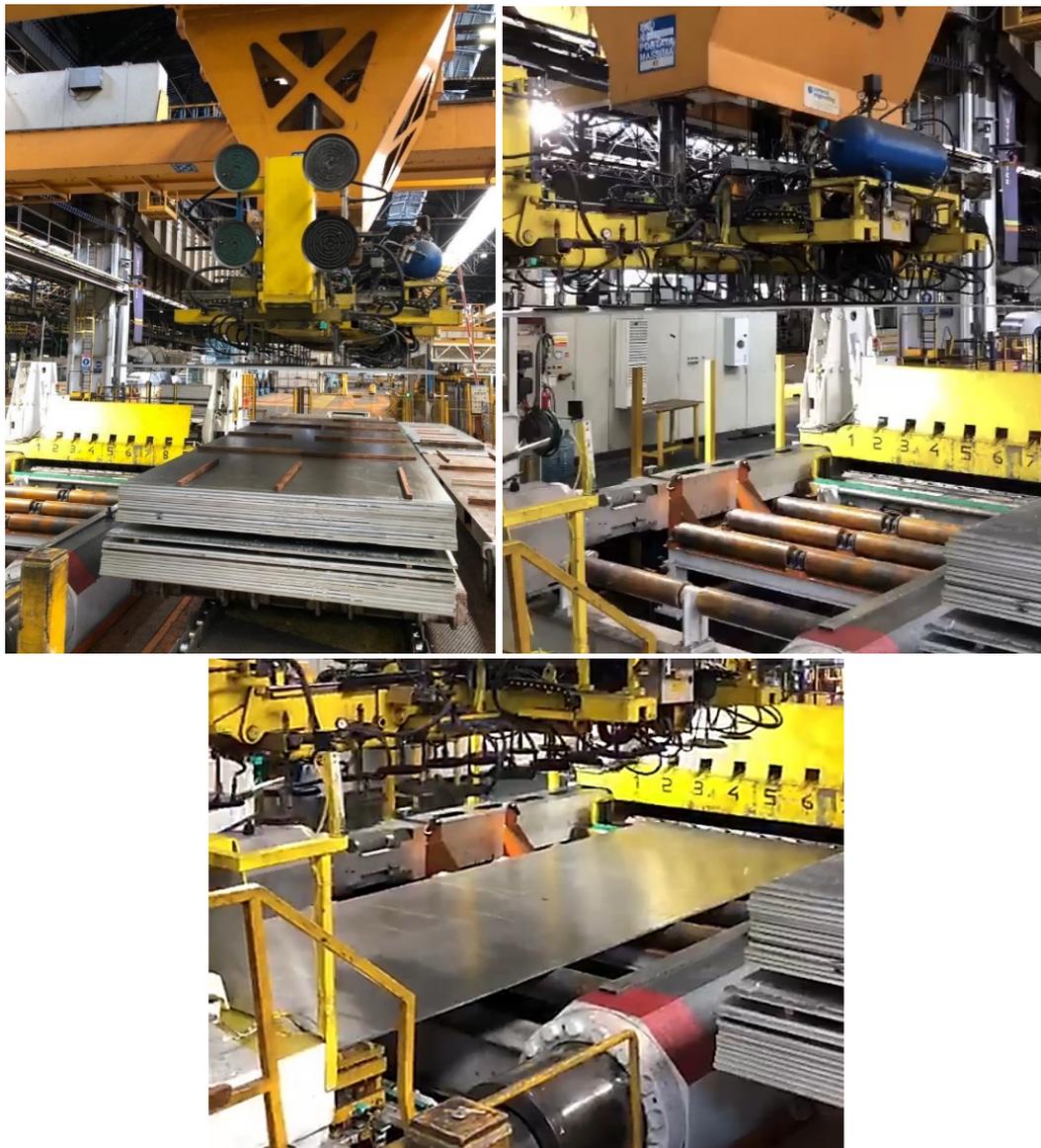


Figura 3.5: Movimentazione della piastra in macchina tramite gru a ventose. Prelievo del prodotto (a sinistra), trasporto (a destra) e posizionamento in macchina (in basso).

L'operatore nella cabina uno è responsabile di assicurarsi che la piastra si posizioni correttamente all'interno della macchina, evitando eventuali contatti indesiderati con componenti meccanici durante la fase di discesa. In seguito, la piastra viene saldamente ancorata alle estremità tra le teste della macchina (*Figura 3.6*), le quali sono equipaggiate con pinze apposite. Ciò garantisce un'aderenza uniforme su tutta la larghezza, contribuendo a ottenere una stiratura uniforme.



Figura 3.6: Testa traslante.

L'allungamento necessario per raggiungere la raddrizzatura è determinato dall'operatore, che controlla visivamente lo stato di planarità del materiale ed effettua misurazioni micrometriche dello spessore della piastra, il quale si riduce proporzionalmente all'allungamento.

3.2 Identificazione delle parti della macchina stiratrice 1500T

La stiratrice (*Figura 3.7*) è in grado di esercitare una forza di 1500 tonnellate grazie all'azione combinata dei suoi due cilindri principali e secondari.

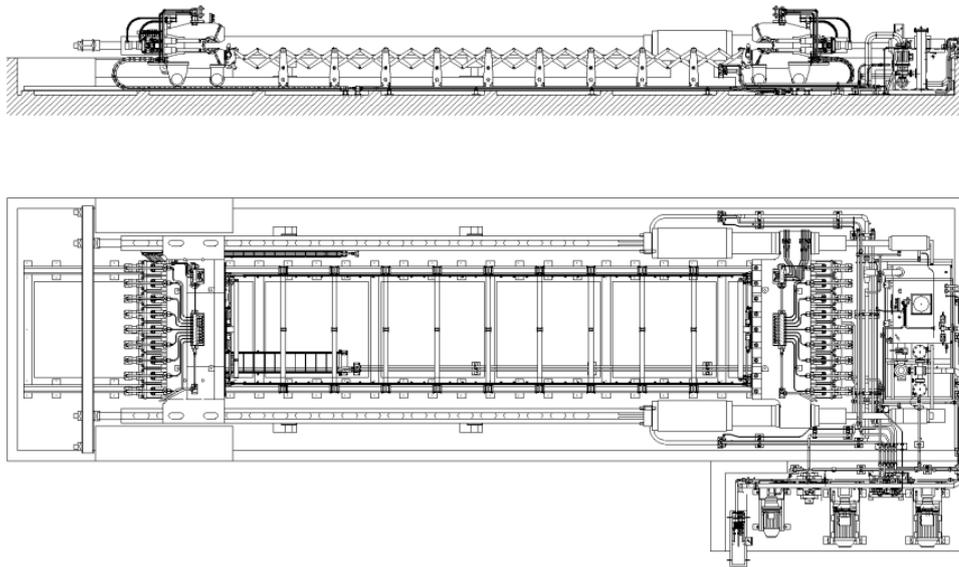


Figura 3.7: Macchina stiratrice.

In *Figura 3.8* sono mostrati i principali componenti della macchina. La stiratrice è costituita da una coppia di teste **(1)** il cui compito è quello di agganciare e trasferire lo sforzo di stiratura al materiale da raddrizzare. Le teste sono collegate per mezzo di una coppia di colonne orizzontali **(2)**. La testa stirante ha una corsa limitata attorno alla sua posizione di riposo; al contrario, la testa traslante può muoversi e fermarsi in numerose posizioni. I perni di bloccaggio della testa traslante si inseriscono in una serie di cavità **(3)** distribuite lungo entrambe le colonne. Questa caratteristica permette la lavorazione di lamiere di lunghezza molto diverse. Tutti i movimenti della testa stirante sono attuati tramite azionamento oleodinamico sfruttando i due cilindri al di fuori della macchina. Il posizionamento della testa traslante lungo l'area di lavoro avviene grazie a un motore elettrico in combinazione con un riduttore.

Una serie di rulli **(4)** è installata tra le teste; i rulli creano una superficie di supporto alle lamiere di alluminio rilasciate su di essi dalla gru di trasporto. Per adattare la rulliera alla lunghezza dell'area di lavoro è stata prevista una struttura a pantografo **(5)**. Per poter stirare le lamiere sul proprio asse centrale, entrambe le teste sono equipaggiate con sistemi centra lamiere **(6)**. Quando il materiale grezzo viene caricato sulla rulliera, la testa stirante **(7)**

chiude le ganasce senza bloccare la lamiera. Quindi, le ganasce chiuse vengono impiegate per spingere la lamiera verso la testa traslante (8), causando l'introduzione della sua estremità all'interno dell'area di lavoro delle ganasce. Il sistema di centraggio allinea la parte terminale della lamiera all'asse di stiratura. Una volta centrata dai rispettivi dispositivi, la testa traslante aggancerà la lamiera chiudendo le proprie ganasce. Infine, il dispositivo di centraggio della testa stirante libera la lamiera; le ganasce si aprono e la testa si muove in avanti per permettere il bloccaggio della lamiera. A questo punto la stiratura può essere eseguita. Quando le ganasce di entrambi le teste si aprono, il ciclo di centratura viene rieseguito, questo assicura il miglior allineamento del materiale stirato ed il suo accurato accatastamento sul pallet di rimozione.

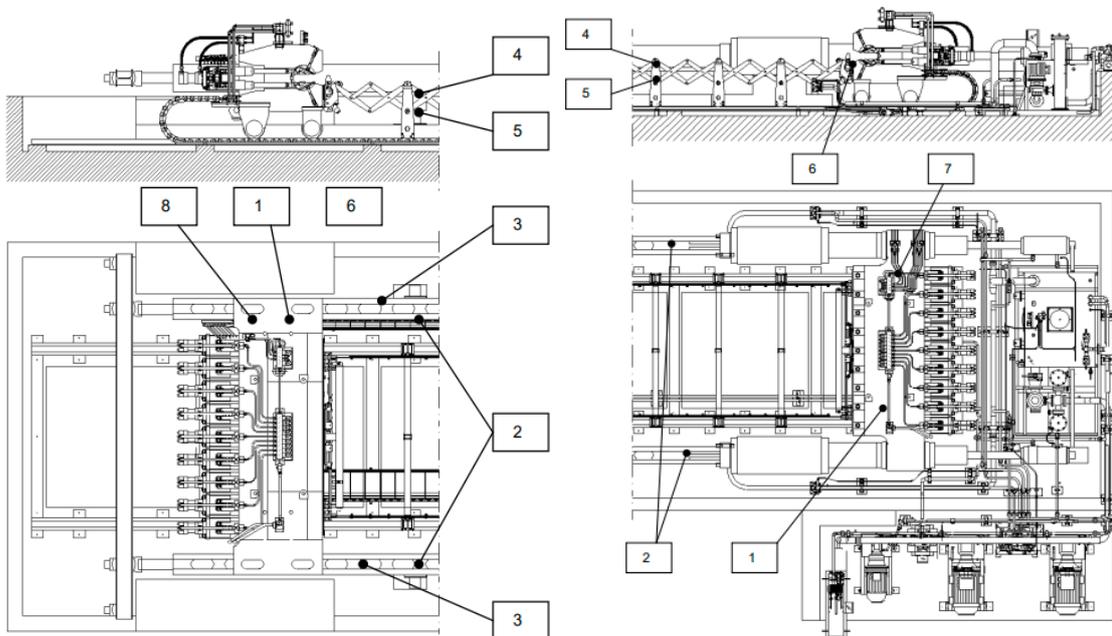


Figura 3.8: Testa traslante (a sinistra) e la testa stirante (a destra).

3.3 Caratterizzazione del prodotto e del processo

Una fase importante del lavoro è stata dedicata a caratterizzare i prodotti in piastra attualmente prodotti sottoposti al processo di stiratura. Sono stati esaminati i prodotti realizzati in lega 5083 nei due stati fisici H111 e O. L'obiettivo principale è stato quello di indagare l'influenza del processo di stiratura sia sulle piastre provenienti direttamente dalla laminazione a caldo, sia su quelle provenienti dallo stesso processo ma con l'aggiunta di un trattamento di ricottura subito dopo. La caratterizzazione dei prodotti è stata condotta attraverso approcci meccanici, metallografici e mediante l'analisi dei parametri di processo utilizzati. L'analisi del processo di stiratura ha coinvolto piastre in un'ampia gamma di spessori, considerati fondamentali per comprendere il comportamento della macchina.

Alcune analisi specifiche, come le analisi metallografiche e le misure di microdurezza sono state eseguite presso il laboratorio di metallurgia dell'Università degli Studi di Padova, con sede a Vicenza (VI). Le analisi di processo e le prove di trazione sono state eseguite presso lo stabilimento di Niche Fusina Rolled Products.

3.3.1 Analisi di processo

L'obiettivo del processo di stiratura è migliorare le proprietà meccaniche, come resistenza e duttilità, e la qualità superficiale del materiale. Mediante l'applicazione di pressione e forza meccanica alle piastre, la macchina stiratrice riduce spessori irregolari, corregge deformazioni e migliora l'uniformità del materiale. Ciò rende il materiale idoneo per ulteriori lavorazioni o applicazioni specifiche.

Per ogni sbozzato sono stati attentamente monitorati vari parametri che definiscono il processo di produzione. Tra i parametri di maggior rilievo relativi alla macchina Stiratrice vi sono i valori di pressione dei cilindri di stiratura, misurati in bar, e l'allungamento del materiale misurato in millimetri, un parametro essenziale per conferire alla piastra il grado di incrudimento desiderato. La pressione massima, la percentuale massima di stiratura consentita, la velocità di lavorazione massima e altri fattori critici per garantire un funzionamento sicuro ed efficiente della macchina sono descritti nel manuale operativo. I principali fattori che influenzano il funzionamento della Stiratrice sono riassunti in *Tabella 3.1*.

Tabella 3.1: Alcune delle specifiche tecniche della macchina stiratrice 1500 T.

Specifiche tecniche	valore minimo	valore massimo
Lunghezza piastra [mm]	3300	9500
Larghezza piastra [mm]	1050	3300
Spessore piastra [mm]	6	60
Pressione cilindri stiratrice [bar]	1	315

Valori come larghezza, spessore e pressione dei cilindri sono di particolare importanza per stabilire i limiti operativi della macchina. È stata condotta un'indagine utilizzando i dati forniti dal manuale operativo ed esaminando la risposta della lega 5083 alle sollecitazioni applicate dalla macchina stiratrice. Per ciascuno sbozzato è stata determinata una forma semplificata della curva tensione - deformazione nominale (σ - ϵ) (Figura 3.9) [5], consentendo così una stima delle caratteristiche meccaniche a trazione della lega in esame.

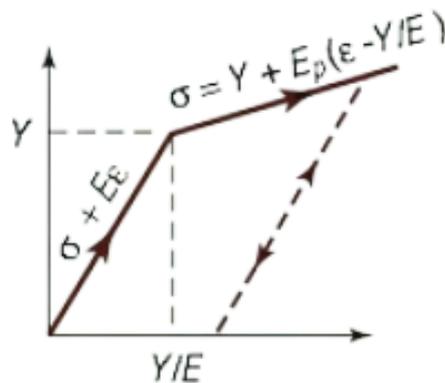


Figura 3.9: Forma semplificata della curva tensione – deformazione nominali elasto–plastico con incrudimento [5].

Nel grafico di Figura 3.9, Y è la tensione di snervamento e E il modulo elastico di Young. Il coefficiente E_p è riferito al modulo plastico e rappresenta la pendenza della curva tensione – deformazione dopo la tensione di snervamento.

3.3.2 Analisi metallografica

Su alcuni campioni sono state condotte analisi micrografiche per studiare la struttura interna del materiale metallico. Le valutazioni della struttura a livello microscopico sono state condotte utilizzando un microscopio ottico (*Figura 3.10*), reso disponibile dall'Università degli Studi di Padova.

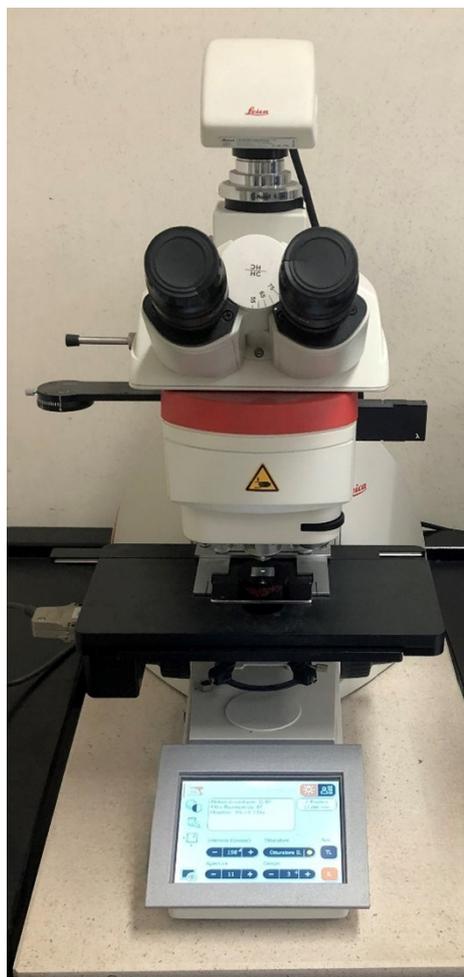


Figura 3.10: Microscopio ottico dell'Università degli Studi di Padova.

Le analisi metallografiche mediante microscopio ottico hanno consentito lo studio dettagliato della distribuzione dei grani, permettendo stime sulle dimensioni dei grani cristallini presenti nel materiale. La dimensione dei grani è stata stimata con il calcolo del rapporto di aspetto (RA) definito dalla formula:

$$RA = \frac{LARGHEZZA}{ALTEZZA}$$

Le dimensioni della larghezza e dell'altezza sono associate al grano cristallino. Un rapporto RA prossimo a uno indica una condizione di grano equiassiale, mentre un RA superiore a uno denota una morfologia di grano allungata. Le dimensioni dei grani cristallini rappresenta una caratteristica fondamentale in grado di influenzare le proprietà meccaniche e termiche del materiale.

Sono stati selezionati dei campioni per analizzare la microstruttura lungo l'intero spessore della piastra, con particolare attenzione alla morfologia microstrutturale lungo la direzione di laminazione. In *Tabella 3.1* sono riassunti i campioni prelevati per i prodotti piastra in lega 5083 H111 e lega 5083 O, evidenziando i diversi processi applicati e i relativi spessori nominali delle piastre. Questa analisi dettagliata mira a fornire una comprensione approfondita delle caratteristiche microstrutturali in relazione ai processi di lavorazione impiegati.

Tabella 3.2: Tipologia di prodotti sottoposti ad analisi metallografica.

Tipologia di Prodotto	Modalità di lavorazione	Spessore nominale del laminato [mm]
Lega 5083 H111	Laminazione a caldo	60
		17
	Laminazione a caldo e Stiratura al 1%	60
	Laminazione a caldo e Stiratura al 2 % - 7%	17
Lega 5083 O	Laminazione a caldo, Trattamento termico di ricottura e stiratura al 1,6%	17

La condizione necessaria per poter osservare la microstruttura del campione al microscopio ottico è quella di ottenere una superficie a specchio per poi essere attaccata con metodo elettrolitico. Per prima cosa i campioni devono essere preparati con operazioni di taglio e poi con una successiva inglobatura.

L'inglobatura è un requisito essenziale per la manipolazione dei campioni destinati all'analisi e può essere realizzata sia a caldo che a freddo. Nel contesto specifico, è stata eseguita un'inglobatura a caldo su campioni con uno spessore di 17 mm e a freddo su campioni con uno spessore di 60 mm (*Figura 3.11*).



Figura 3.11: Campioni inglobati a freddo (a sinistra) e campioni inglobati a caldo (a destra).

La spianatura iniziale si esegue con macchine utensili dette lappatrici: consiste in una serie di passaggi su carte abrasive in carburo di silicio di granulometria controllata decrescente P80, P180, P600, P1200, P2400. Ogni carta avrà il compito di eliminare eventuali graffi provocati dalla carta precedente. Durante la procedura è sempre richiesto l'utilizzo di acqua per ammorbidire l'azione delle carte abrasive. Una volta terminata questa sequenza, si passa alla lucidatura vera e propria. Essa avviene mediante dischi di tessuto sui quali vengono spruzzate soluzioni acquose facilmente volatili di polveri abrasive a base di allumina/pasta diamantata di 6 μm . L'ultimo passo, se necessario, è fatto utilizzando un panno bagnato di silice, il quale ha permesso l'eliminazione degli ultimi graffi. Durante la procedura il provino non viene mai tenuto in posizione fissa ma si fanno leggere rotazioni in modo da distribuire le rigature, qui molto più fini, in tutte le direzioni.

Dopo la fase di lucidatura, i campioni vengono sottoposti a un trattamento con attacco elettrolitico utilizzando 120 ml di acqua. Durante questa procedura vengono attentamente monitorati i parametri di tensione e corrente, eseguendo approssimativamente 5 cicli da 40 secondi per ciascun campione, al fine di evitare la bruciatura del bordo dei grani cristallini. L'obiettivo dell'attacco elettrolitico è evidenziare la struttura, consentendo la differenziazione selettiva dei vari grani cristallini presenti nella lega.

3.3.3 Microdurezza Vickers

La prova di durezza Vickers (HV) si basa sulla creazione di un'incisione sulla superficie metallica mediante la compressione di un penetratore costituito da un materiale più duro. Il materiale del penetratore, nominalmente indeformabile (diamante) è caratterizzato da una forma piramidale. Le misure dell'impronta forniscono una stima delle caratteristiche di resistenza del materiale e un semplice metodo di controllo della qualità. Lo strumento utilizzato è il microdurometro in *Figura 3.12*: esso è dotato di lenti da microscopio a diverso ingrandimento.

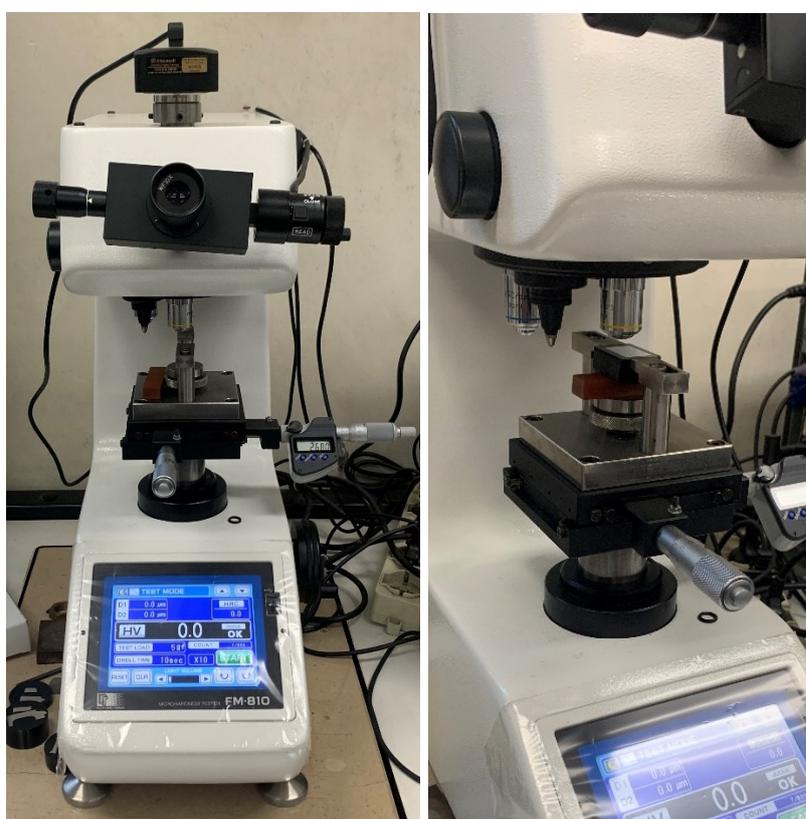


Figura 3.12: Microdurometro dell'Università degli Studi di Padova.

La prova di microdurezza interessa una piccolissima parte del volume di materiale o addirittura un solo grano cristallino. L'impronta è visibile soltanto tramite un microscopio ed il carico applicato sul penetratore è di pochissimi Newton.

L'impronta prodotta dal test di durezza Vickers risulta avere la forma di diamante piramidale a base quadrata con angolo al vertice fra due lati di $136^\circ \pm 0,5^\circ$ (*Figura 3.13*) e le diagonali nominalmente uguali.

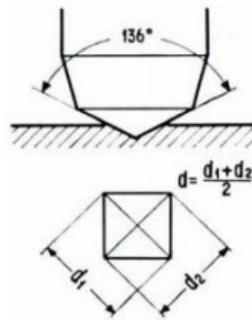


Figura 3.13: Schematizzazione dell'impronta Vickers.

Ottenuto il valore di “d” e utilizzando le apposite tabelle abbinate all'apparecchio penetratore, si risale al valore di microdurezza Vickers, ricavabile alternativamente anche con la formula matematica:

$$HV = 0,1891 \frac{F}{d^2}$$

Dove F è il carico della prova in Newton e d è la media aritmetica in millimetri delle lunghezze d_1 e d_2 delle due diagonali. Nel caso studio, essendo una lega di alluminio 5083 è stato utilizzato un carico di 100 gF (1 N). La *Figura 3.14* rappresenta la tipica impronta lasciata da una prova Vickers.

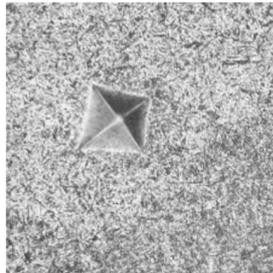


Figura 3.14: Tipica impronta lasciata da una prova di durezza Vickers.

Le prove vengono eseguite sui campioni osservati nell'analisi metallografica (*Tabella 3.2*). Il primo step comprende il posizionamento del campione nell'apposito ripiano e la messa a fuoco, dopo di che si cambia lente e si procede con l'ingrandimento.

Si andrà ad osservare l'andamento della durezza dalla superficie, zona in cui la piastra era a contatto con i cilindri di laminazione, fino al cuore della piastra. Verranno fatte 10 indentazioni per i campioni di spessore 17 mm e 17 indentazioni per i campioni di spessore 60 mm, partendo da una distanza di 20 micron dalla superficie e andando verso il cuore a

determinata distanza l'una dall'altra. Il tutto è stato eseguito con ripetibilità tre e deve essere accompagnato da una necessaria regolazione di luminosità.

3.3.4 Test di trazione

La prova di trazione rappresenta la metodologia di prova più comune per la determinazione delle caratteristiche di resistenza – deformazione dei materiali. Questa consiste nell'applicazione di uno stato di tensione di trazione monoassiale ad un provino opportunamente sagomato mediante un apparato di prova (*Figura 3.15*).

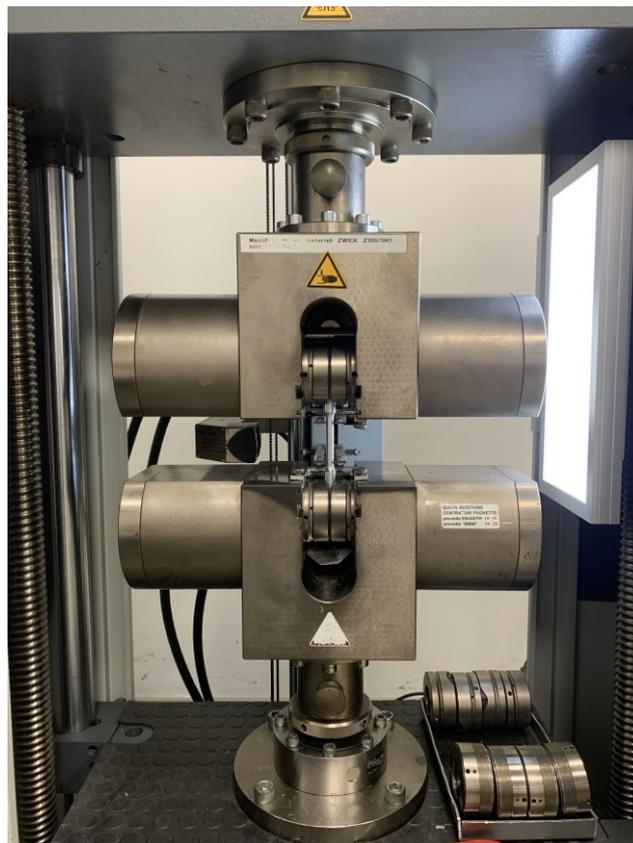


Figura 3.15: Dettaglio macchina di trazione Zwick Z100.

I risultati di una prova di trazione permettono di costruire il diagramma che correla tensioni σ e deformazioni ϵ . La tensione ingegneristica σ_t , o tensione nominale, è definita come il rapporto fra la forza di trazione monoassiale applicata F_t e l'area della sezione iniziale del provino A_0 .

$$\sigma_t = \frac{F_t}{A_0} [MPa]$$

L'applicazione del carico determina sul provino una deformazione ε , parametro adimensionale, dato dalla formula:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0}$$

Dove δ rappresenta l'allungamento, L la lunghezza del tratto utile del provino al momento della rottura e L_0 la lunghezza iniziale del tratto utile del provino.

I provini destinati ai test vengono comunemente prelevati al termine del ciclo produttivo, dopo aver completato ogni processo meccanico o trattamento termico che potrebbe influenzare le caratteristiche meccaniche del metallo. Nel caso di questo studio, i campioni sono prelevati dopo il processo di laminazione a caldo, dopo il trattamento termico di ricottura e dopo il processo di stiratura. I provini sono ricavati lungo la direzione di laminazione e devono essere preparati in conformità alla normativa ASTM B557M in modo che le proprietà del materiale non siano influenzate. La precisione nel campionamento riveste un ruolo cruciale per ottenere risultati affidabili e rappresentativi delle caratteristiche del materiale. Le specifiche dei prodotti oggetto di questo studio corrispondono alle dimensioni nominali descritte in *Tabella 3.3*.

Tabella 3.3: Dimensioni nominali dei laminati studiati

Prodotti laminati	Spessore [mm]	Larghezza [mm]	Lunghezza [mm]
Lega 5083 H111	60	1600	7000
	16	2150	6300
Lega 5083 O	16	2080	8800

I provini vengono estratti a una distanza adeguata dai bordi della piastra, selezionando posizioni diverse lungo la sua larghezza per ottenere una media rappresentativa in questa dimensione. Si prelevano due campioni dai lati e uno dal centro della piastra. La sezione trasversale del provino può variare a seconda dello spessore del laminato testato, ad esempio può assumere forme circolari, rettangolari, quadrate o altre forme particolari. Nel caso in esame le piastre hanno uno spessore superiore ai 12,5 mm e bisogna utilizzare provini circolari. I provini ricavati da piastre con spessore inferiore a 16 mm devono presentare un diametro del tratto utile di 9 mm, mentre per quelli ricavati da spessori superiori a 16 mm il diametro del tratto utile deve essere 12,5 mm. Inoltre, per piastre di

spessore nominale maggiore di 40 mm bisogna prelevare il provino a metà dello spessore della piastra [10]. Al fine di garantire l'esecuzione corretta della prova, la geometria del campione deve favorire la rottura all'interno del tratto utile [5].

Durante la prova si misurano il valore del carico applicato e la lunghezza istantanea del provino tramite una cella di carico e degli estensimetri. I risultati vengono poi rappresentati in un diagramma tensione – deformazione ($\sigma - \varepsilon$) (Figura 3.16).

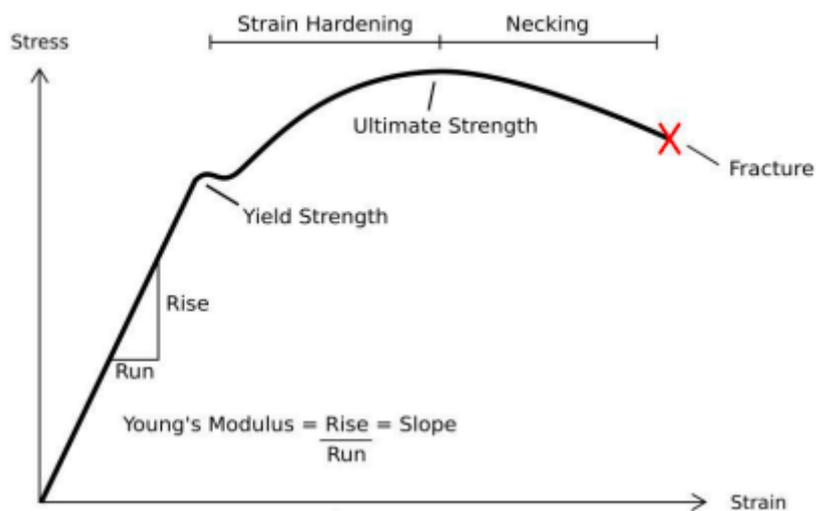


Figura 3.16: Curva tensione – deformazione.

Durante la fase iniziale di applicazione della forza, il provino si deforma proporzionalmente all'aumentare del carico fino al valore del carico limite di proporzionalità; questo intervallo definisce il campo di deformazione elastica del materiale.

Il materiale manifesta una deformazione elastica uniforme fino alla tensione di snervamento σ_y . Qualora il carico venga rimosso prima di aver raggiunto la tensione limite di snervamento del materiale, il provino ritornerà alla sua lunghezza originale. All'aumentare della forza applicata il provino comincia a snervare, ovvero subisce una deformazione plastica permanente e la relazione fra tensione e deformazione non è più lineare. Un ulteriore incremento del carico applicato determina l'allungamento del provino e la corrispondente diminuzione della sezione. Se la forza è incrementata ulteriormente la curva raggiunge un massimo e poi inizia a decrescere. La tensione massima raggiunta è detta resistenza ultima a trazione o tensione ultima a trazione (UTS) e rappresenta una misura semplice e pratica della resistenza globale del materiale.

Nel momento in cui un provino viene sottoposto ad un carico superiore al valore di UTS, esso manifesta strizione, l'allungamento fra gli estensimetri non è più uniforme e il cambiamento di sezione si concentra in una zona detta collo di strizione. La tensione ingegneristica, quindi, diminuisce fino alla rottura del provino. Il valore finale di tensione misurato alla rottura del provino viene definito tensione di rottura [5].

Il grafico tensione - deformazione ottenuto da una prova di trazione fornisce importanti informazioni sul comportamento meccanico di un materiale sottoposto a sollecitazioni di trazione. Lo stesso tipo di grafico può essere ottenuto dalla macchina Stiratrice, la quale, in questo contesto, applica una forza di trazione su una piastra, dove lo spessore e la larghezza svolgono un ruolo fondamentale. Nell'ambito del laboratorio aziendale, sono state eseguite prove di pre-stiro utilizzando la macchina di trazione Zwick Z100 su campioni appositamente ritagliati dalla piastra oggetto di studio (*Figura 3.17*).

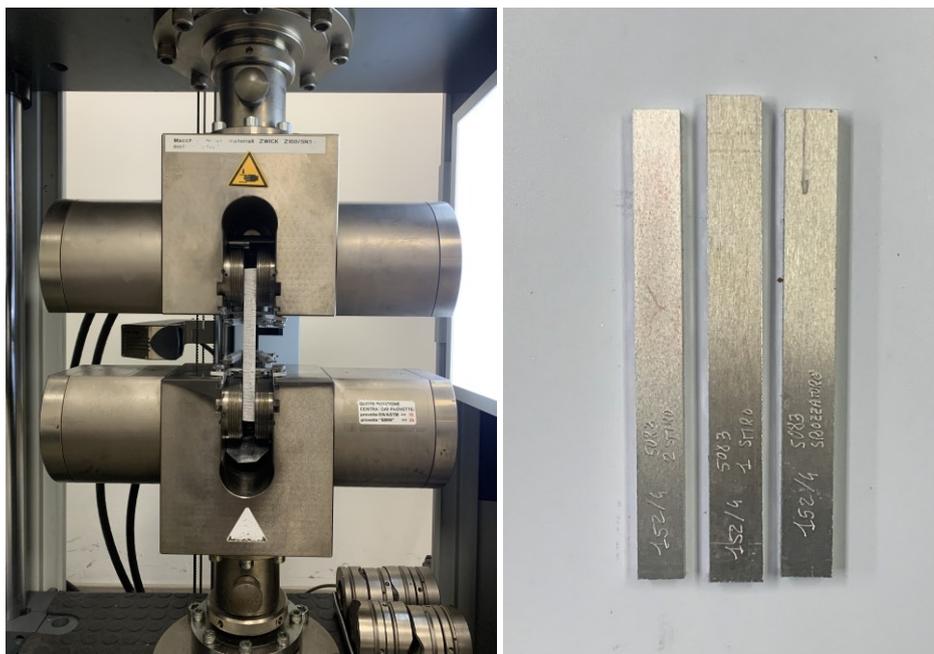


Figura 3.17: Dettaglio macchina di trazione Zwick 100 (a sinistra) ed esempi di provini da sottoporre a pre - stiro (a destra).

Per effettuare i test di pre-stiro sono stati prelevati dei campioni da una piastra in lega di alluminio 5083 H111 di spessore di 16 mm. I campioni hanno una sezione trasversale rettangolare con dimensioni di 22 mm di larghezza e 16 mm di altezza, al fine di conferire al materiale un grado di incrudimento simile a quello applicato durante il processo produttivo reale dalla macchina Stiratrice sulla piastra. L'obiettivo di questo esperimento è

stabilire una correlazione tra il processo di pre-stiro condotto in macchina Stiratrice e quello condotto in laboratorio, contribuendo così a comprendere meglio il comportamento del materiale in differenti condizioni di sollecitazione.

Capitolo 4 Analisi dei risultati

Nel presente capitolo vengono esposti i risultati e le prove effettuate per approfondire il funzionamento della macchina stiratrice. I dati vengono quindi analizzati, ricercando possibili correlazioni tra le variabili coinvolte.

4.1 Verifica del ciclo produttivo

La verifica del processo è orientata a esaminare il comportamento del materiale nel corso del ciclo produttivo, con particolare attenzione al processo di stiratura. Sono eseguite analisi metallografiche, test di resistenza alla trazione e misurazioni di microdurezza per caratterizzare le proprietà meccaniche dei prodotti analizzati.

4.1.1 Analisi metallografica

La laminazione a caldo è un processo di lavorazione dei metalli in cui il materiale viene deformato plasticamente a temperature superiori a quella di ricristallizzazione. L'obiettivo della laminazione a caldo è la graduale riduzione dello spessore della placca di partenza. Nella *Tabella 4.1* sono elencati alcuni parametri del processo di laminazione a caldo per le due leghe di alluminio considerate (5083 in stato fisico H111 e O). Vengono specificate le dimensioni iniziali delle placche, le temperature di inizio e fine laminazione, il numero di passaggi e le dimensioni finali delle piastre. Le dimensioni nominali del prodotto dopo la laminazione a caldo, evidenziate in rosso, rappresentano i prodotti che saranno oggetto di studio.

Tabella 4.1: Dimensioni e parametri di processo dei prodotti analizzati durante il processo di laminazione a caldo.

Parametro	Legga 5083 H111		Legga 5083 O
Formato placca L x W x t [mm]	3150 x 1600 x 566	2150 x 1350 x 566	3150 x 2100 x 440
Numero passi di laminazione	25	30	22
Spessore degli ultimi cinque passi di laminazione [mm]	140 - 110 - 83 - 71,3 - 60,7	45,5 - 36,2 - 26,9 - 19,6 - 16,7	55 - 40 - 30,3 - 22,5 - 17
Spessore degli ultimi cinque passi di laminazione [%]	/ - 21,4 - 24,5 - 14 - 14,8	/ - 20,4 - 25,7 - 27,13 - 14,7	/ - 27,2 - 24,25 - 25,7 - 24,4
Temperatura iniziale placca [°C]	530	440	480
Temperatura finale placca [°C]	427	430	450
Dimensioni piastra [mm]	7000 x 1600 x 60,7	6400 x 2140 x 16,7	8800 x 2080 x 17

Nel caso dell'alluminio, temperature prossime a 450 °C rappresentano la condizione ottimale per laminare il materiale a caldo [5]. Si riportano le immagini ricavate dai campioni prelevati lungo la sezione longitudinale rispetto al senso di laminazione con un numero di ingrandimenti pari a 50x. Le analisi sono state condotte attraverso lo spessore della piastra partendo dalla superficie fino alla mezzeria del laminato. In *Figura 4.1* si mostrano le immagini della piastra in lega 5083 H111, caratterizzata da uno spessore di 16,7 mm, dopo il processo di laminazione a caldo.

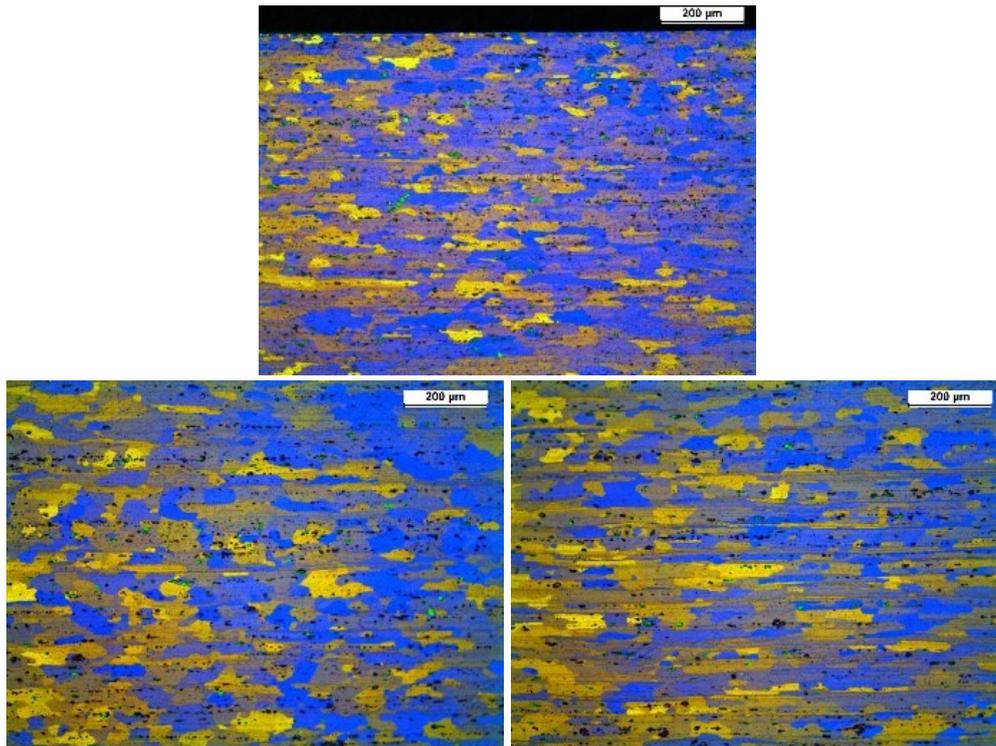


Figura 4.1: Sezione longitudinale rispetto al senso di laminazione della piastra in lega 5083 H111 con uno spessore di 16,7 mm dopo il processo di laminazione a caldo: superficie (in alto), quarto (a sinistra) e mezzeria (a destra).

Dopo il processo di laminazione a caldo la piastra viene normalmente lasciata raffreddare a temperatura ambiente. In corrispondenza della mezzeria del laminato si nota una forma allungata dei grani cristallini, mentre sulla superficie e in prossimità del quarto dello spessore si osserva una maggiore quantità di grani di forma meno allungata. Questo fenomeno è attribuibile al processo di ricristallizzazione dinamica che si verifica durante la laminazione a caldo. (vedi *Figura 3.2*). Nelle *Figure 4.2 – 4.3* si mostrano gli effetti del processo di stiratura con deformazione al 2% e poi al 7%.

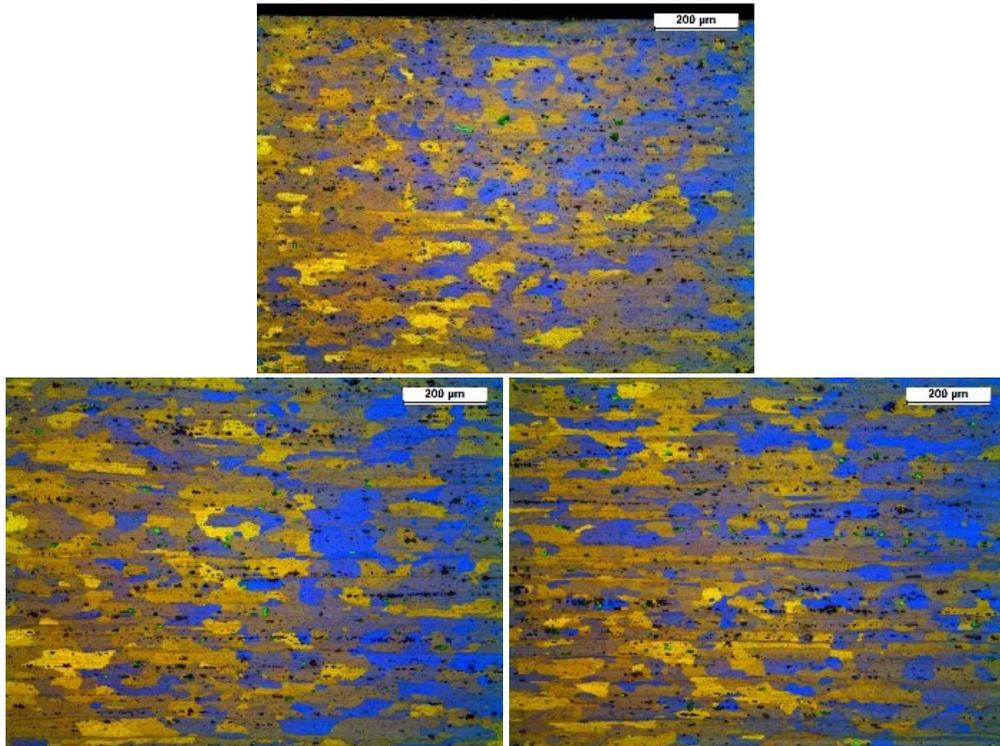


Figura 4.2: Sezione longitudinale rispetto al senso di laminazione della piastra in lega 5083 H111 con uno spessore di 16,7 mm dopo il processo di laminazione a caldo e stiratura al 2%: superficie (in alto), quarto (a sinistra) e mezzeria (a destra).

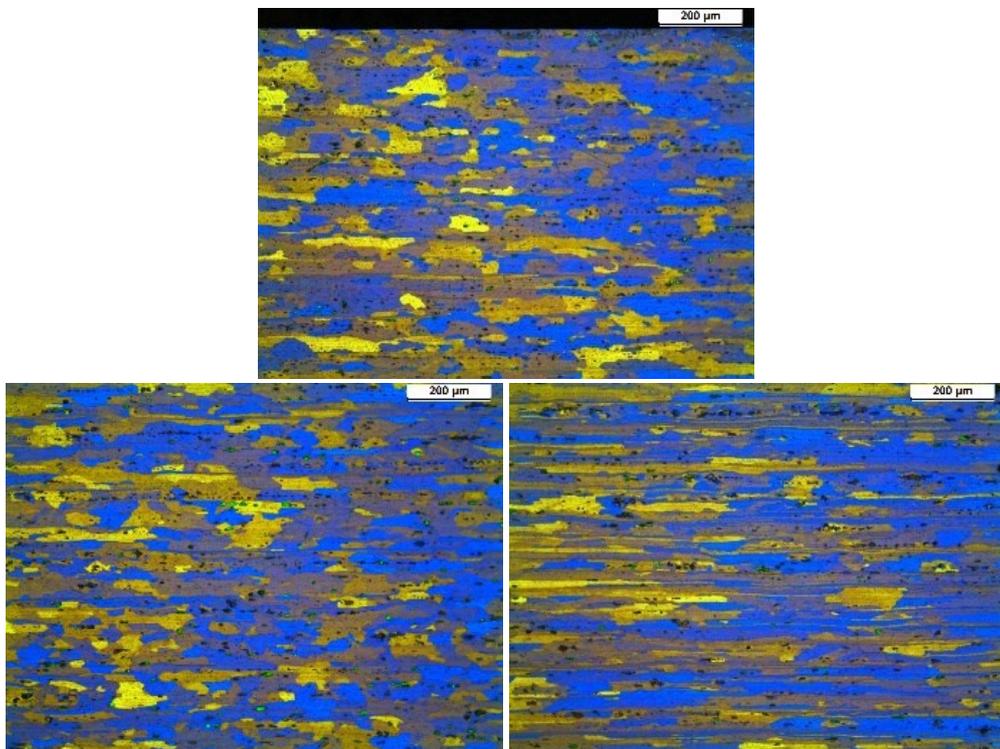


Figura 4.3: Sezione longitudinale rispetto al senso di laminazione della piastra in lega 5083 H111 con uno spessore di 16,7 mm dopo il processo di laminazione a caldo e stiratura al 7%: superficie (in alto), quarto (a sinistra) e mezzeria (a destra).

L'effetto del processo di stiratura influenza la forma del grano in superficie e anche in mezzeria, questa condizione è resa più evidente con ingrandimenti maggiori e con l'analisi della morfologia del grano che verrà presentata in seguito. In *Figura 4.4* viene mostrata la piastra in lega 5083 O, dopo trattamento termico di ricottura e deformazione per stiratura al 1,6%.

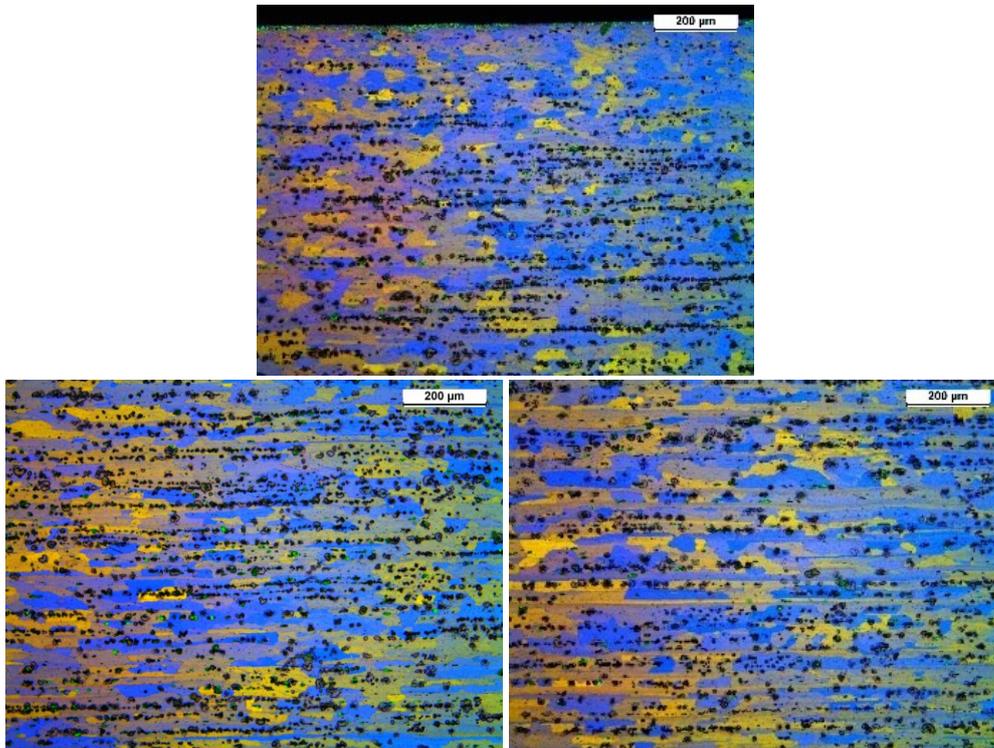


Figura 4.4: Sezione longitudinale rispetto al senso di laminazione della piastra in lega 5083 O con uno spessore di 17 mm dopo trattamento termico di ricottura e stiratura al 1,6 %: superficie (in alto), quarto (a sinistra) e mezzeria (a destra).

In *Figura 4.5* si mostrano le immagini della piastra in lega 5083 H111, caratterizzata da uno spessore di 60,6 mm.

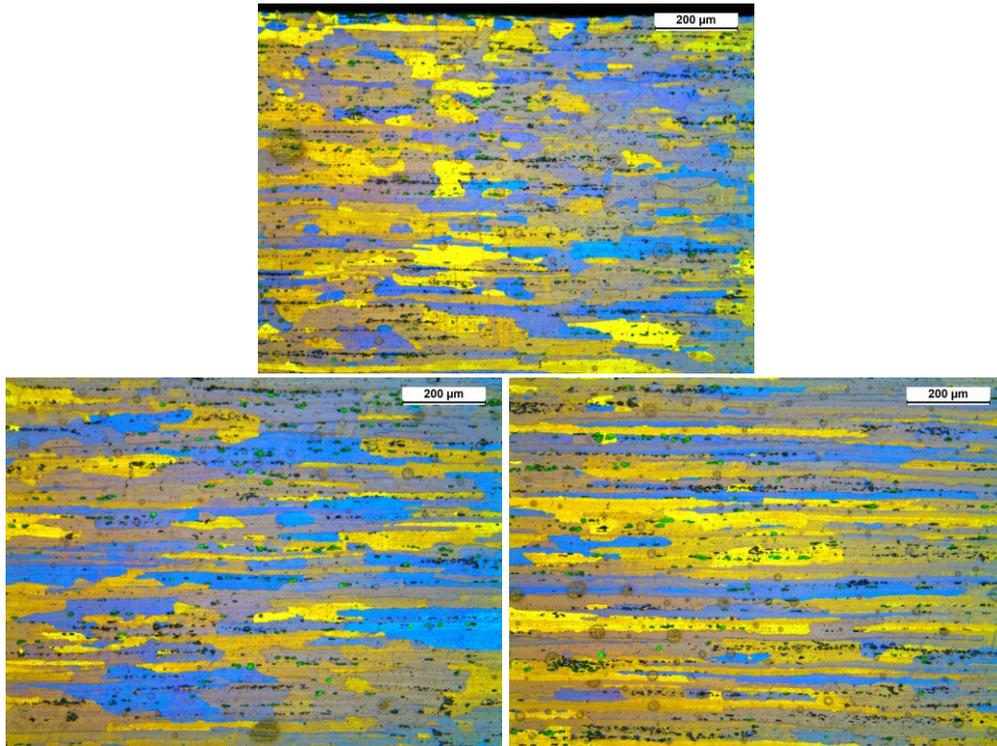


Figura 4.5: Sezione longitudinale rispetto al senso di laminazione della piastra in lega 5083 H111 con uno spessore di 60,6 mm dopo il processo di laminazione a caldo e stiratura al 1%: superficie (in alto), quarto (a sinistra) e mezzeria (a destra).

Tali differenze microstrutturali risultano ancor più evidenti per ingrandimenti superiori. Le immagini seguenti, a 100x, vengono utilizzate anche per determinare il rapporto di aspetto (RA) del grano cristallino in ogni sezione analizzata. Nelle *Figure 4.6 - 4.8* è rappresentata l'evoluzione microstrutturale su piastre in lega 5083 H111, con uno spessore di 16,7 mm, partendo dal processo di laminazione a caldo, stiratura al 2% e fino alla stiratura al 7%.

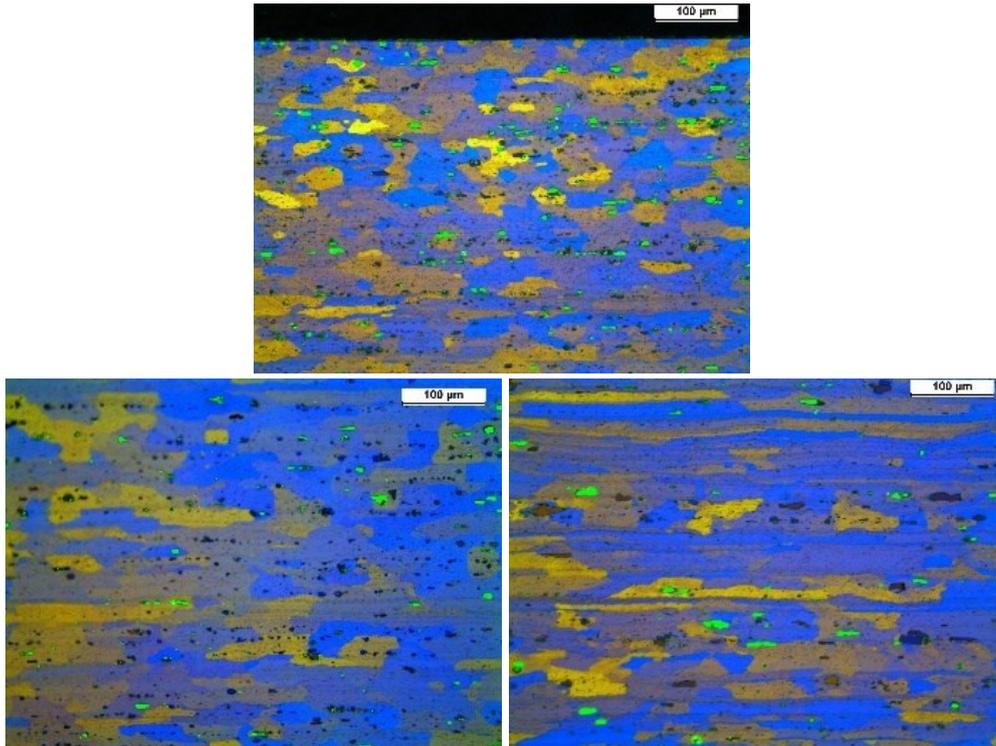


Figura 4.6: Sezione longitudinale rispetto al senso di laminazione della piastra in lega 5083 H111 con uno spessore di 16,7 mm dopo il processo di laminazione a caldo: superficie (in alto), quarto (a sinistra) e mezzeria (a destra).

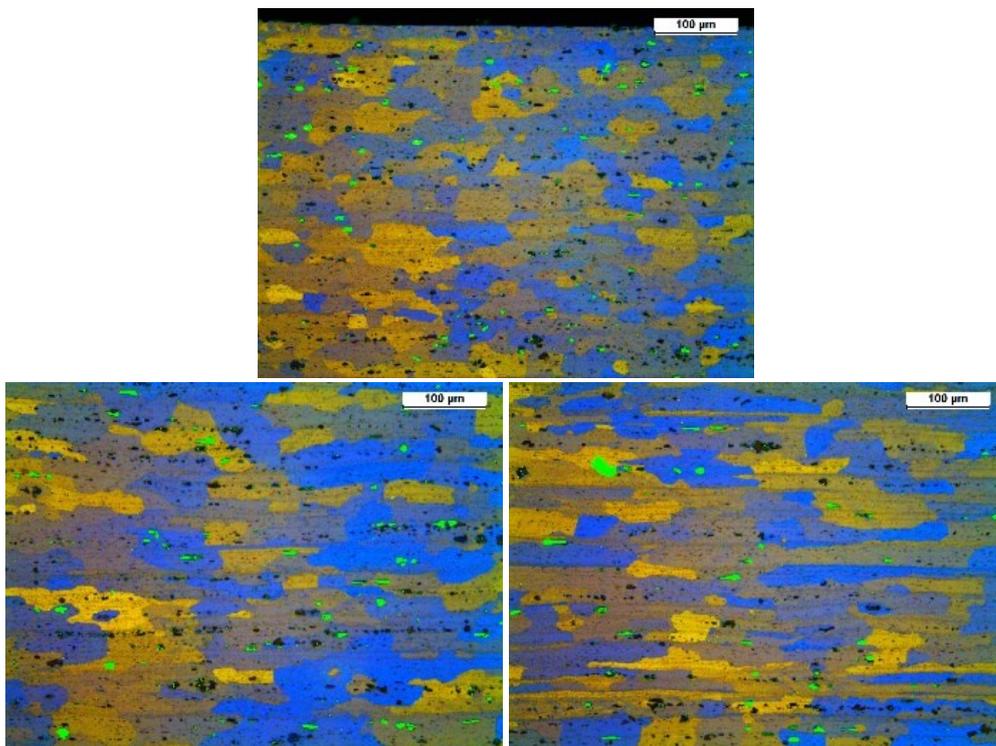


Figura 4.7: Sezione longitudinale rispetto al senso di laminazione della piastra in lega 5083 H111 con uno spessore di 16,7 mm dopo il processo di laminazione a caldo e stiratura al 2%: superficie (in alto), quarto (a sinistra) e mezzeria (a destra).

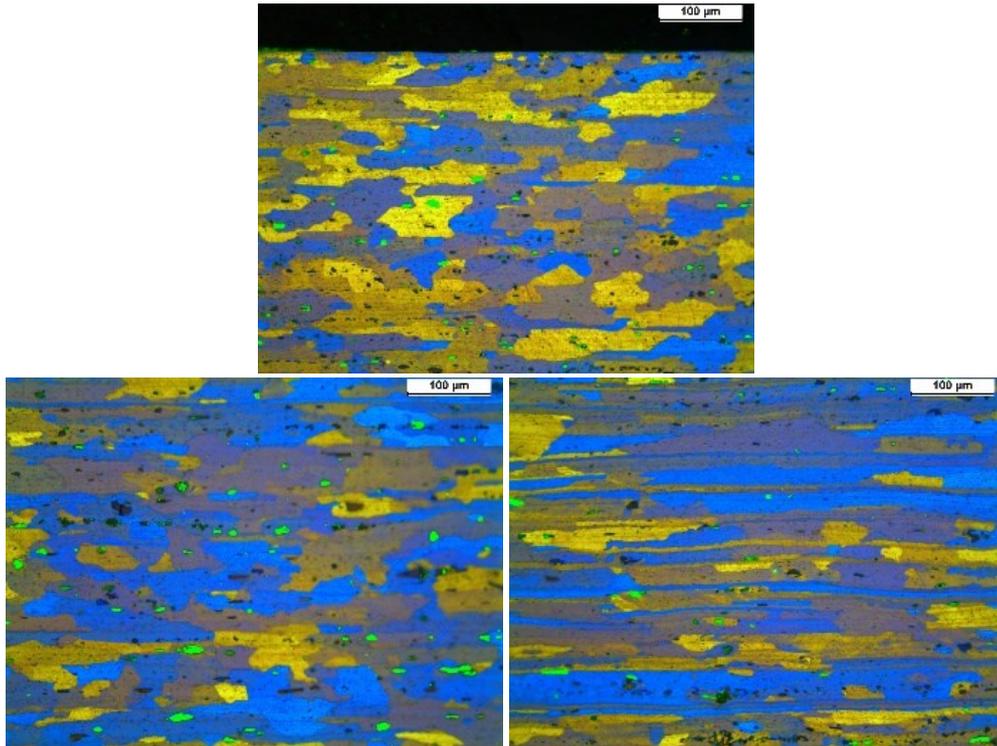


Figura 4.8: Sezione longitudinale rispetto al senso di laminazione della piastra in lega 5083 H111 con uno spessore di 16,7 mm dopo il processo di laminazione a caldo e stiratura al 7%: superficie (in alto), quarto (a sinistra) e mezzeria (a destra).

Per caratterizzare la morfologia della microstruttura sono stati misurati i valori di altezza e larghezza dei grani cristallini. Il metodo prevede la scelta della dimensione da stimare, che sia orizzontale o verticale. Viene quindi tracciata una linea, si misura la distanza e si conta il numero di grani intercettati. Il rapporto tra distanza e numero dei grani fornisce una stima della dimensione del grano. Questa operazione viene eseguita per ogni immagine, e per ottenere un valore rappresentativo della sezione analizzata sono state tracciate due linee verticali e due orizzontali. Il rapporto tra larghezza e altezza calcolate è indicato come rapporto di aspetto (RA), e i risultati sono dettagliati nelle *Tablelle 4.2 – 4.4* per la piastra in lega 5083 H111 di spessore 16,7 mm.

Tabella 4.2: Calcolo del rapporto di aspetto per la piastra in lega 5083 H111 con spessore 16,7 mm dopo laminazione a caldo.

LAMINAZIONE A CALDO								
Posizione	Numero prove	Orizzontale			Verticale			RA
		Distanza linea [µm]	N° grani	Dimensione grano [µm]	Distanza [µm]	N° grani	Dimensione grano [µm]	
SUPERFICIE	1	483	22	21,95	267	19	14,05	1,56
	2	499	20	24,95	284	18	15,78	1,58
	Media			23,45			14,92	1,57
QUARTO	1	372	8	46,50	309	16	19,31	2,41
	2	443	8	55,38	308	13	23,69	2,34
	Media			50,94			21,50	2,37
MEZZERIA	1	481	6	80,17	285	18	15,83	5,06
	2	506	4	126,50	292	13	22,46	5,63
	Media			103,33			19,15	5,35

Tabella 4.3: Calcolo del rapporto di aspetto per la piastra in lega 5083 H111 con spessore 16,7 mm dopo stiratura al 2%.

STRIRATURA AL 2%								
Posizione	Numero prove	Orizzontale			Verticale			RA
		Distanza linea [µm]	N° grani	Dimensione grano [µm]	Distanza [µm]	N° grani	Dimensione grano [µm]	
SUPERFICIE	1	493	15	32,87	278	17	16,35	2,01
	2	500	17	29,41	279	18	15,50	1,90
	Media			31,14			15,93	1,95
QUARTO	1	481	7	68,71	332	14	23,71	2,90
	2	480	9	53,33	321	13	24,69	2,16
	Media			61,02			24,20	2,53
MEZZERIA	1	503	7	71,86	314	21	14,95	4,81
	2	502	5	100,40	333	20	16,65	6,03
	Media			86,13			15,80	5,42

Tabella 4.4: Calcolo del rapporto di aspetto per la piastra in lega 5083 H111 con spessore 16,7 mm dopo stiratura al 7%.

STIRATURA AL 7%								
Posizione	Numero prove	Orizzontale			Verticale			RA
		Distanza [μm]	N° grani	Dimensione grano [μm]	Distanza [μm]	N° grani	Dimensione grano [μm]	
SUPERFICIE	1	540	12	45,00	255	18	14,17	3,18
	2	527	11	47,91	269	18	14,94	3,21
	Media			46,45			14,56	3,19
QUARTO	1	440	6	73,33	290	16	18,13	4,05
	2	454	7	64,86	305	17	17,94	3,61
	Media			69,10			18,03	3,83
MEZZERIA	1	442	6	73,67	306	29	10,55	6,98
	2	448	5	89,60	296	27	10,96	8,17
	Media			81,63			10,76	7,58

Dopo il processo di laminazione a caldo è stato calcolato un rapporto di aspetto di 1,57 sulla superficie della piastra. Questa stima indica la presenza di grani cristallini con forma quasi equiassiale (i grani equiassiali ideali hanno un RA di 1). Con una deformazione per stiratura del 2%, in superficie il rapporto di aspetto aumenta da 1,57 a 1,95, registrando così un incremento del 24%, mentre tale variazione è trascurabile sulla mezzeria. Per deformazioni del 7%, sulla superficie si passa da 1,57 a 3,19, evidenziando una variazione del 103%, mentre nella zona di mezzeria si passa da 5,35 a 7,58, con un incremento del 42% (si veda Figura 4.9). L'impatto del processo di stiratura sulla microstruttura è più significativo vicino alla superficie rispetto alla zona centrale della piastra. Tale effetto sulla superficie è attribuibile alla presenza di una maggiore quantità di grani più piccoli e facilmente deformabili, formati durante la laminazione a caldo.



Figura 4.9: Rappresentazione del rapporto di aspetto della piastra in lega 5083 H111 con spessore 16,7 mm in diverse condizioni di processo: laminazione a caldo, stiratura 2% e stiratura 7%.

Nelle Figure 4.10 – 4.12, le panoramiche illustrano qualitativamente la variazione della microstruttura lungo lo spessore della piastra.

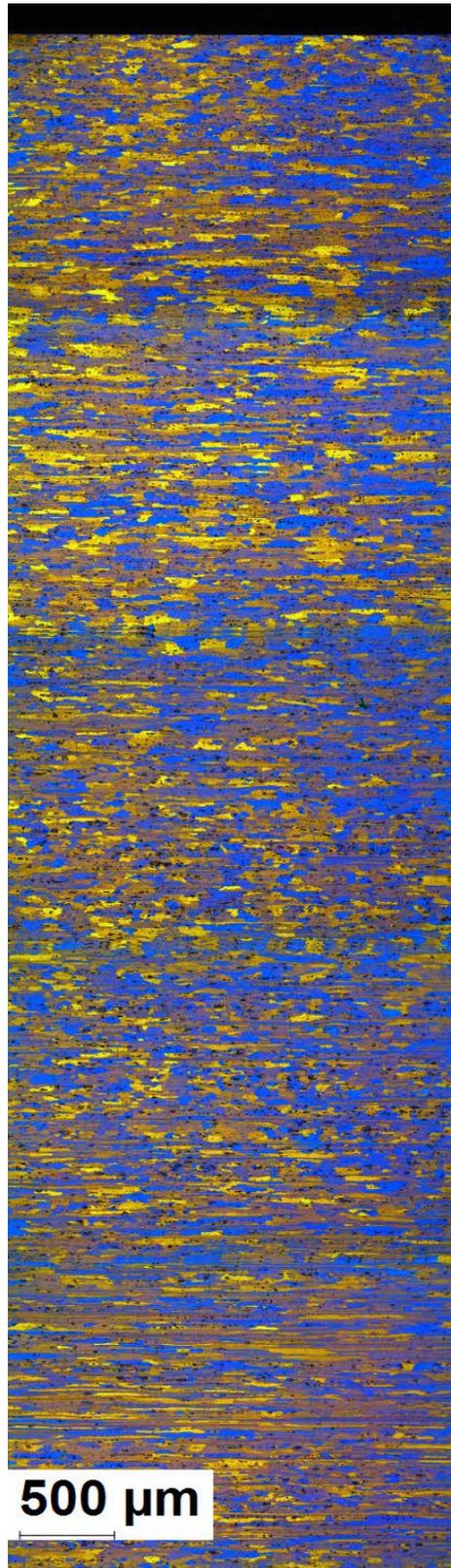


Figura 4.10: Panoramica fino a 8 mm di spessore della piastra in lega 5083 H111 di spessore 16,7 dopo laminazione a caldo.

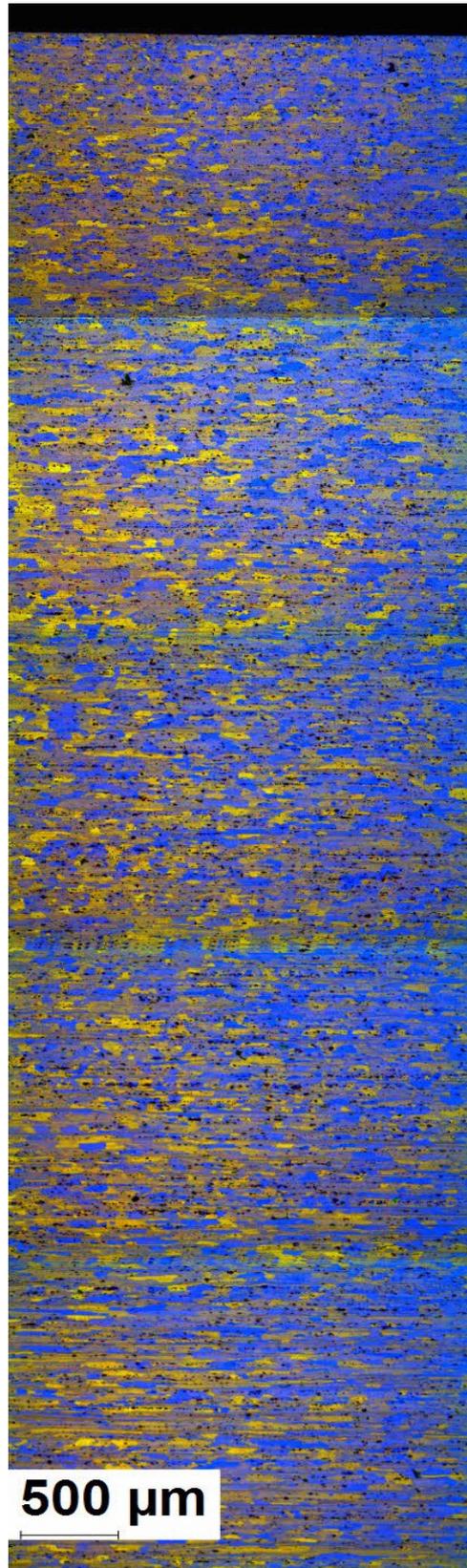


Figura 4.11: Panoramica fino a 8 mm di spessore della piastra in lega 5083 H111 di spessore 16,7 mm laminata a caldo e stirata al 2%.

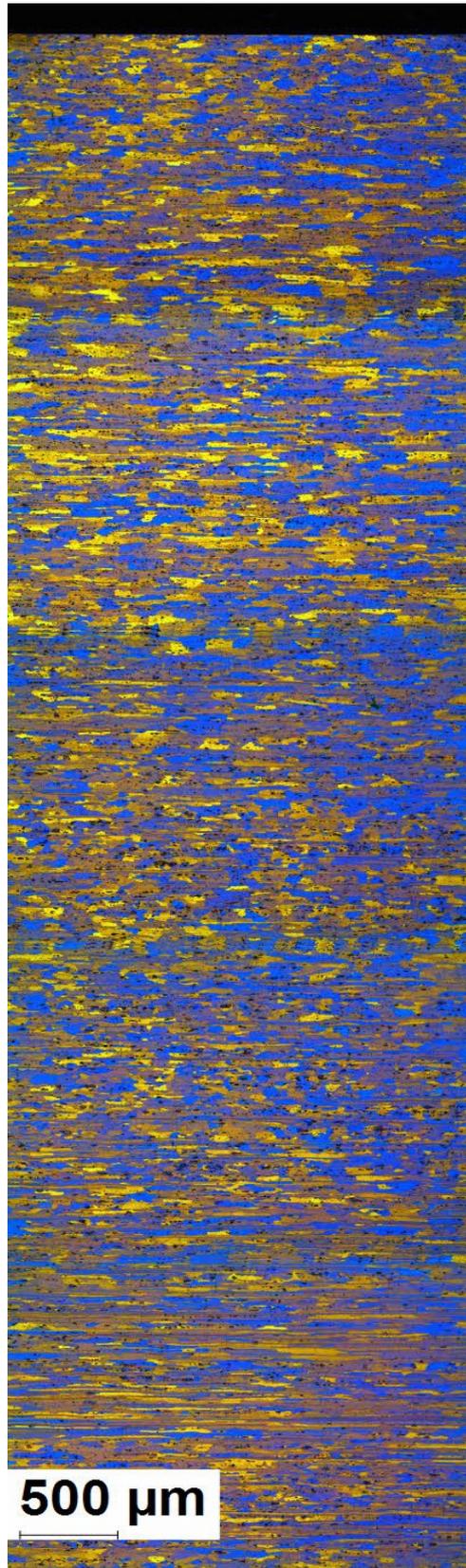


Figura 4.12: Panoramica fino a 8 mm di spessore della piastra in lega 5083 H111 di spessore 16,7 mm laminata a caldo e stirata al 7%.

In *Figura 4.13* è mostrata la panoramica del prodotto in lega di alluminio 5083 O di spessore 17 mm, successivamente vengono mostrati gli ingrandimenti 100x (*Figura 4.14*) per il calcolo del rapporto di aspetto per ogni sezione analizzata (*Tabella 4.5*).

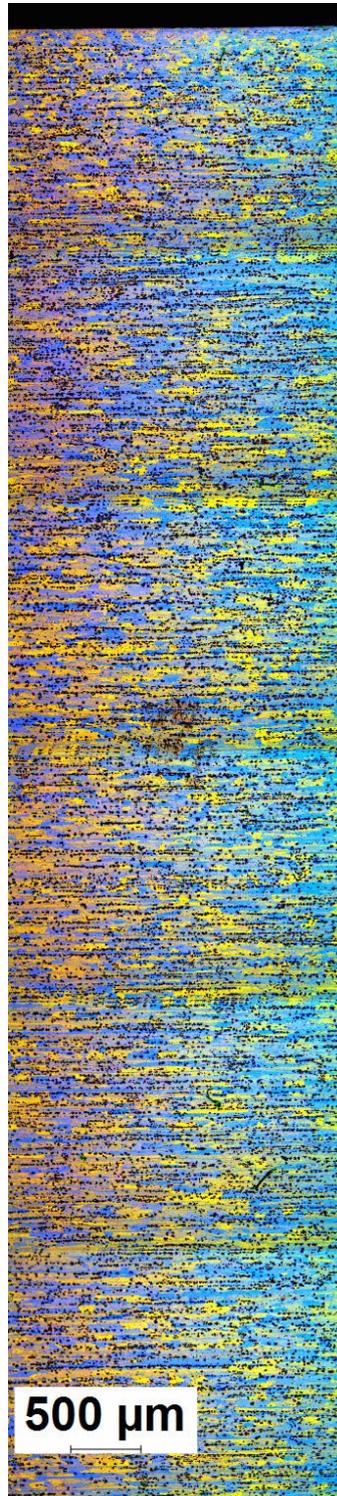


Figura 4.13: Panoramica fino a 8 mm di spessore della piastra in lega 5083 O di spessore 17 mm dopo trattamento termico di ricottura e stiratura al 1,6%.

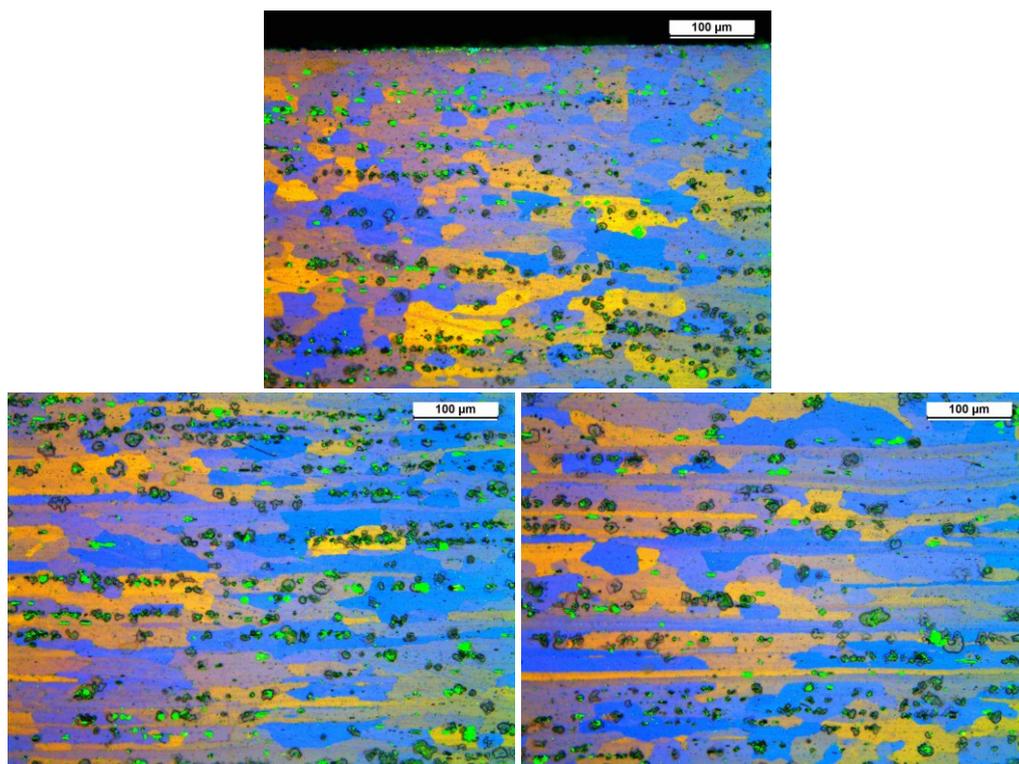


Figura 4.14: Sezione longitudinale rispetto al senso di laminazione della piastra in lega 5083 O con uno spessore di 17 mm dopo il trattamento termico di ricottura e stiratura al 1,6 %: superficie (in alto), quarto (a sinistra) e mezzeria (a destra).

Tabella 4.5: Calcolo del rapporto di aspetto per piastra di spessore 17 mm stirata al 1,6% in lega 5083 O.

Posizione	Numero prove	Orizzontale			verticale			RA
		Distanza [µm]	N° grani	Dimensione grano [µm]	Distanza [µm]	N° grani	Dimensione grano [µm]	
SUPERFICIE	1	429,66	13	33,05	311,67	17	18,33	1,80
	2	431,14	12	35,93	293,12	12	24,43	1,47
	Media			34,49			21,38	1,64
QUARTO	1	471,96	9	52,44	304,26	19	16,01	3,27
	2	42,01	10	4,20	292,51	21	13,93	0,30
	Media			28,32			14,97	1,79
MEZZERIA	1	431,9	9	47,99	316,88	20	15,84	3,03
	2	443,04	8	55,38	302,76	14	21,63	2,56
	Media			51,68			18,73	2,79

In Figura 4.15 è rappresentato il confronto tra la lega 5083 H111 e la lega 5083 O. Vengono mostrati gli andamenti del rapporto di aspetto per la piastra processata con stiratura al 2% (5083 H111) e per la piastra sottoposta a trattamento termico più successiva stiratura al 1,6% (5083 O). Dopo il trattamento termico di ricottura e la stiratura, il RA della piastra

5083 O è di 1,64 in superficie e di 2,79 in mezzeria. Confrontando i valori di RA per le due piastre (il cui processo di produzione si differenzia solo per il trattamento termico) si osserva che il RA in superficie della piastra non trattata termicamente (5083 H111) è superiore del 15% rispetto alla piastra ricotta (5083 O), mentre sulla mezzeria l'aumento di RA è del 48%. La differenza tra le due piastre è evidente nella zona centrale: si osserva un incrudimento maggiore nella piastra non trattata termicamente, come confermato dal diverso valore di RA.



Figura 4.15: Confronto tra lega 5083 O e lega 5083 H111, caratterizzate da uno spessore di 17 mm.

La Figura 4.16 mostra la microstruttura della piastra in lega 5083 H111, con uno spessore di 60,6 mm, dopo il processo di laminazione a caldo e una stiratura dell'1%. Le analisi correlate sono riportate nella Tabella 4.6.

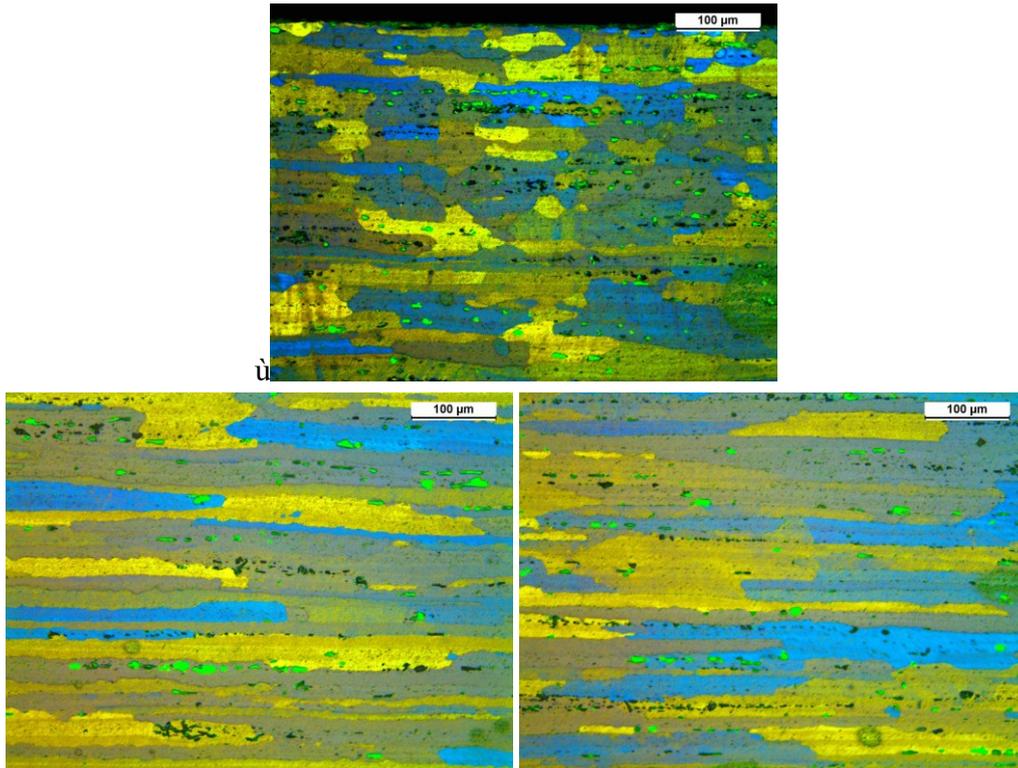


Figura 4.16: Sezione longitudinale rispetto al senso di laminazione della piastra con uno spessore di 60,6 mm dopo il processo di laminazione a caldo e stiratura al 1%: superficie (in alto), quarto (a sinistra) e mezzeria (a destra).

Tabella 4.6: Calcolo del rapporto di aspetto per piastra di spessore 60,6 mm stirata al 1% in lega 5083 H111.

Posizione	Numero prove	Orizzontale			verticale			RA
		Distanza [µm]	N° grani	Dimensione grano [µm]	Distanza [µm]	N° grani	Dimensione grano [µm]	
SUPERFICIE	1	397,77	9	44,20	290,15	15	19,34	2,28
	2	409,63	8	51,20	275,34	13	21,18	2,42
	Media			47,70			20,26	2,35
QUARTO	1	412,6	5	82,52	329,5	20	16,48	5,01
	2	466	8	58,25	305	17	17,94	3,25
	Media			70,39			17,21	4,13
MEZZERIA	1	414,1	4	103,53	317,63	19	16,72	6,19
	2	394,78	4	98,70	319,1	18	17,73	5,57
	Media			101,11			17,22	5,88

Si è stimato in superficie un RA di 2,35 e in mezzeria 5,88. La variazione del RA tra superficie e mezzeria è del 150%, e l'andamento è mostrato in *Figura 4.17*.

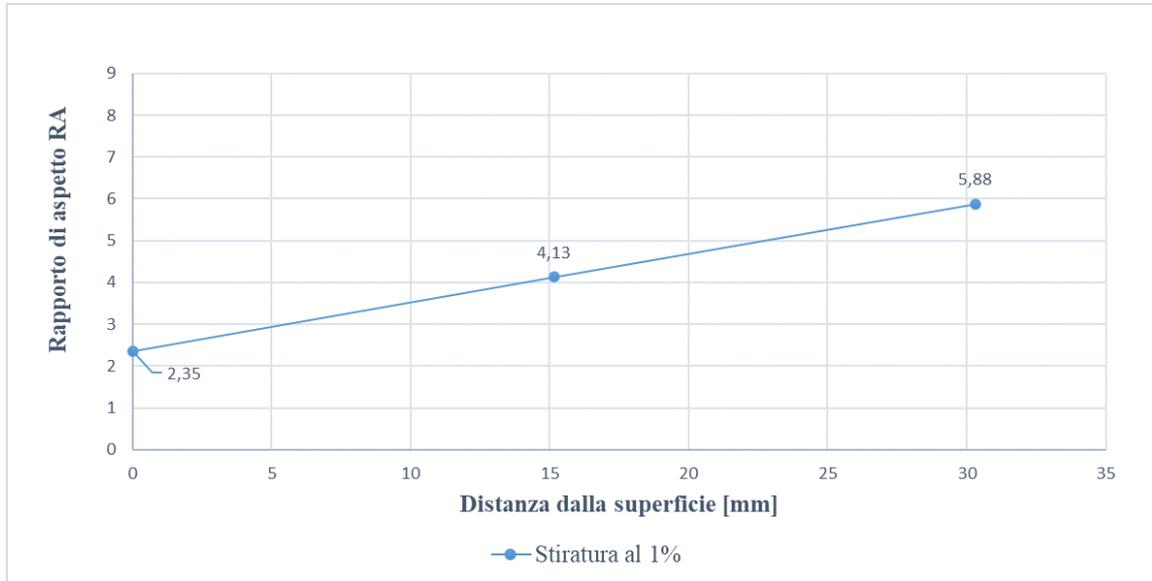


Figura 4.17: Rappresentazione del rapporto di aspetto per la piastra stirata al 1% in lega 5083 H111.

La stiratura dell'1% non induce modifiche microstrutturali rilevanti alla piastra in esame, in quanto, nell'analisi della microdurezza e resistenza a trazione non sono emerse variazioni evidenti delle proprietà meccaniche.

Dopo laminazione a caldo la piastra con spessore di 60,6 mm mostra un incrudimento più pronunciato rispetto alla piastra da 16,7 mm, con un incremento di RA del 50% in superficie e del 10% nella zona di mezzeria. Il formato iniziale della placca, il numero di passi di laminazione e le dimensioni finali del prodotto emergerebbero come fattori determinanti per le caratteristiche microstrutturali del prodotto finale.

In *Figura 4.18* è mostrata la panoramica lungo lo spessore della piastra in lega 5083 H111 a spessore 60,6 mm, dopo laminazione a caldo e stiratura al 1%.



Figura 4.18: Panoramica fino a 20 mm di spessore della piastra 5083 H111 sp. 60,6 mm laminata a caldo e stirata al 1%.

4.1.2 Test di trazione

Si riportano i risultati delle prove di trazione su provini prelevati in direzione longitudinale rispetto al senso di laminazione. In *Figura 4.19 – 4.21* si mostrano le curve tensione – deformazione del prodotto in lega 5083 H111, caratterizzato da uno spessore di 16,7 mm, nelle condizioni di processo: laminazione a caldo, stiratura al 2% e stiratura al 7%.

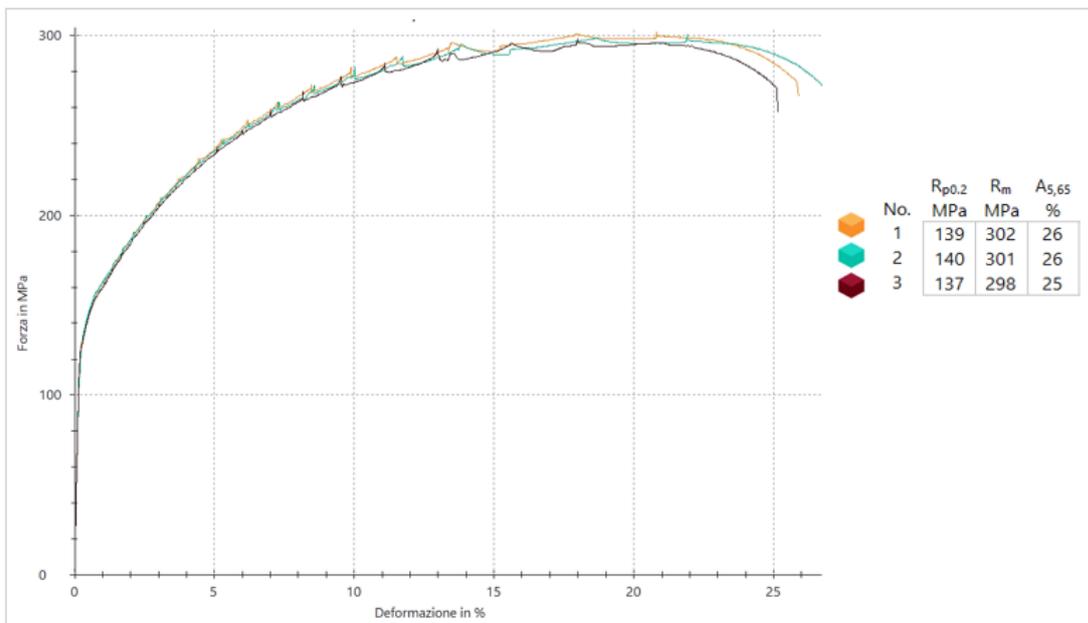


Figura 4.19: Curva tensione - deformazione su piastra di spessore 16,7mm in lega 5083 H111 dopo laminazione a caldo.

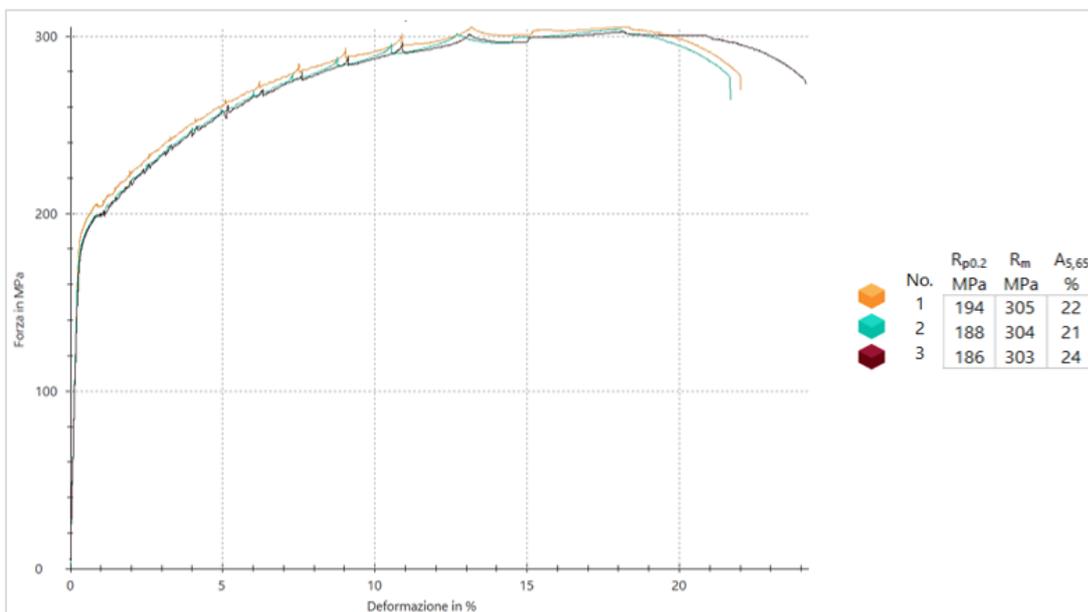


Figura 4.20: Curva tensione - deformazione su piastra di spessore 16,7 mm in lega 5083 H111 dopo stiratura al 2%.

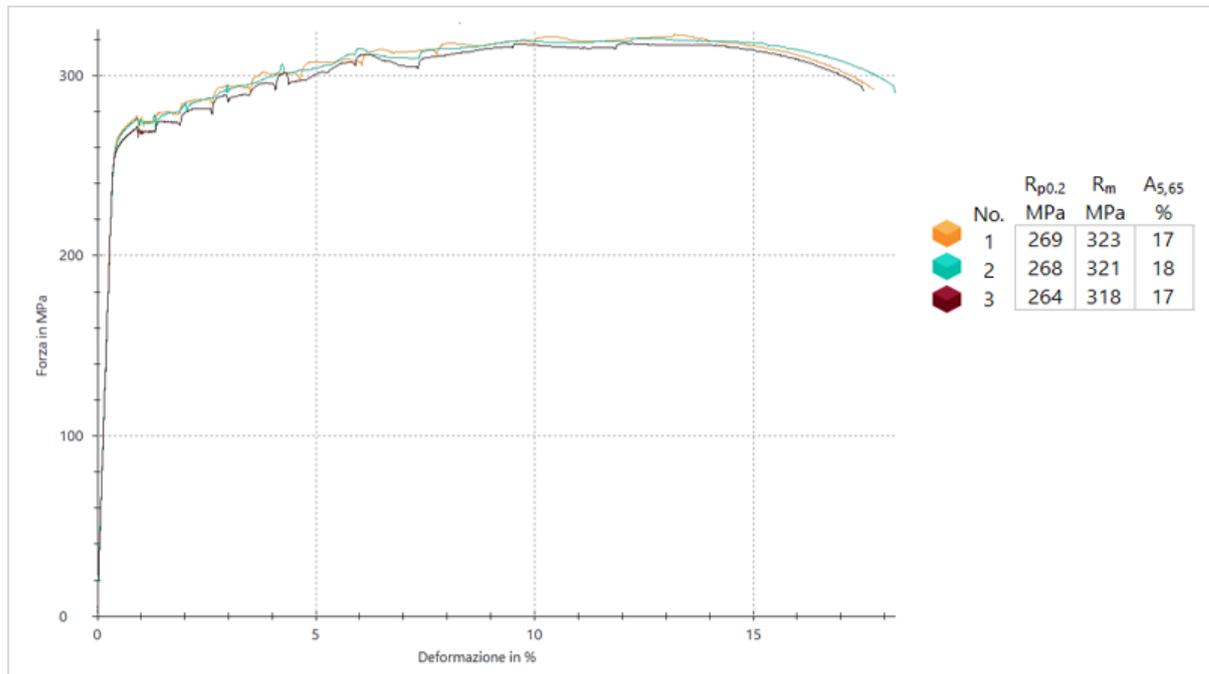


Figura 4.21: Curva tensione - deformazione su piastra di spessore 16,7 mm in lega 5083 H111 dopo stiratura al 7%.

La tensione di snervamento e l'allungamento a rottura mostrano variazioni in relazione alla percentuale di deformazione, mentre il comportamento della tensione a rottura rimane sostanzialmente costante (vedi la Figura 4.22).

Con una deformazione del 7%, la tensione di snervamento aumenta del 92%, passando da 139 MPa a 267 MPa. Tuttavia, questo incremento è associato a una diminuzione dell'allungamento a rottura a 17%. Nel caso di una deformazione del 2%, la tensione di snervamento raggiunge i 189 MPa, mostrando un aumento del 36%, mentre l'allungamento a rottura si riduce a 22 %.

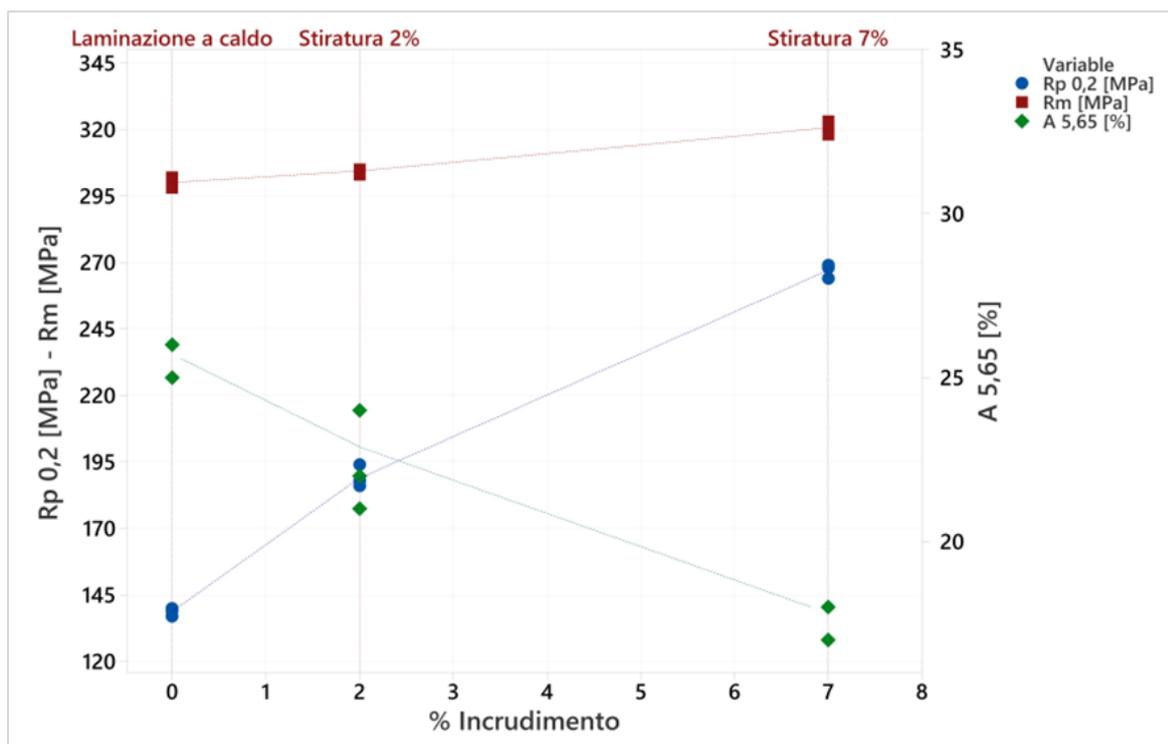


Figura 4.22: Andamento della tensione di rottura (R_m), tensione di snervamento ($R_{p0,2}$) e allungamento percentuale a rottura ($A\%$) in funzione del grado di incrudimento.

Prodotto di spessore 16,7 mm in lega 5083 H111 in diverse condizioni di processo: laminazione a condizioni di processo: laminazione a caldo, stiratura 2% e stiratura 7%.

Sono state condotte analisi della resistenza a trazione su tre piastre di spessore 17 mm in lega 5083 O al fine di investigare l'influenza del processo di stiratura successivo al trattamento termico. Dopo il processo di laminazione a caldo, le otto costituenti il lotto di produzione sono state sottoposte a trattamento termico di ricottura totale. Per caratterizzare il materiale, sono stati prelevati i provini dalle piastre numero uno, quattro e otto. Da ciascuna piastra sono stati prelevati tre provini al fine di ottenere un valore medio delle caratteristiche meccaniche. I risultati delle prove sulle proprietà meccaniche sono presentati in Figura 4.23.

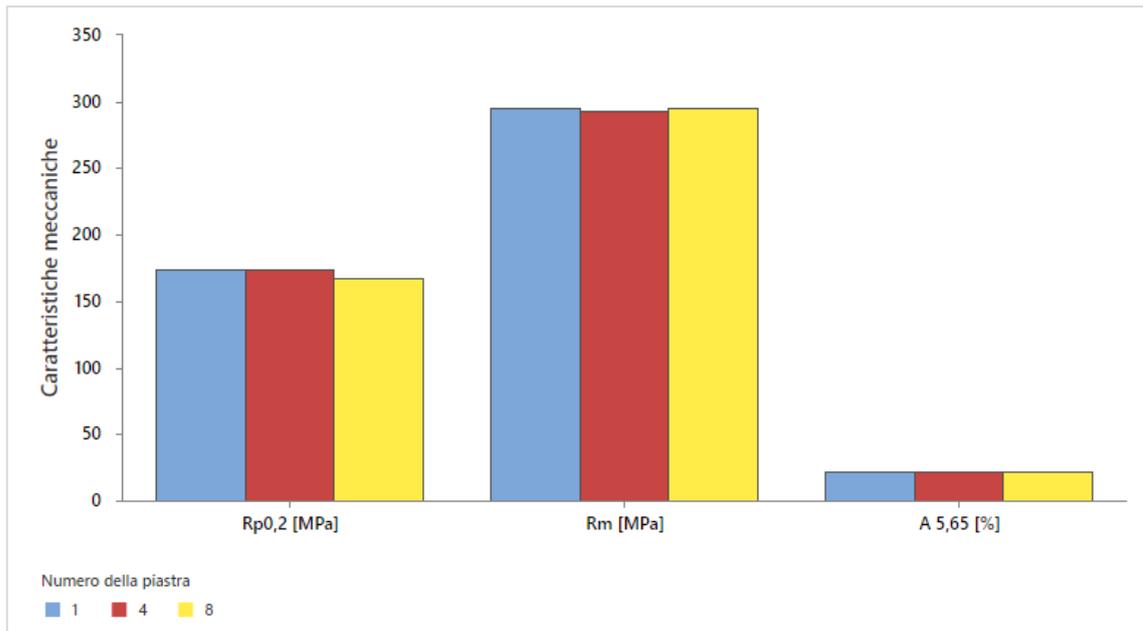


Figura 4.23: Caratteristiche meccaniche su piastre di spessore 17 mm in lega 5083 O.

Non emergono differenze significative nelle caratteristiche meccaniche delle tre piastre in lega 5083 O, si misura un valor medio di tensione di snervamento di 172 MPa, una tensione di rottura di 294 MPa e allungamento a rottura del 22%. I risultati sono mostrati in *Tabella 4.7*.

Tabella 4.7: Risultati caratteristiche meccaniche su piastre di spessore 17 mm in lega 5083 O.

N. piastra	RP _{0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A _{5,65} [%]
1	175	295	22
	186	298	22
	162	294	22
4	174	295	22
	185	294	20
	163	292	22
8	170	294	23
	168	295	21
	165	296	20

In *Figura 4.24* vengono confrontate le caratteristiche meccaniche delle piastre in lega 5083 H111 (in azzurro) e 5083 O (in rosso), rispettivamente a spessore 16,7 mm e 17 mm, dopo il processo di stiratura. La lega 5083 H111 mostra una tensione di snervamento di 189 MPa, rispetto ai 172 MPa della lega 5083 O. Per quanto riguarda la tensione di rottura, la lega 5083 H111 presenta 304 MPa, mentre 294 MPa con il trattamento termico. Tuttavia, entrambe presentano un allungamento a rottura del 22%, suggerendo una capacità di deformazione simile.

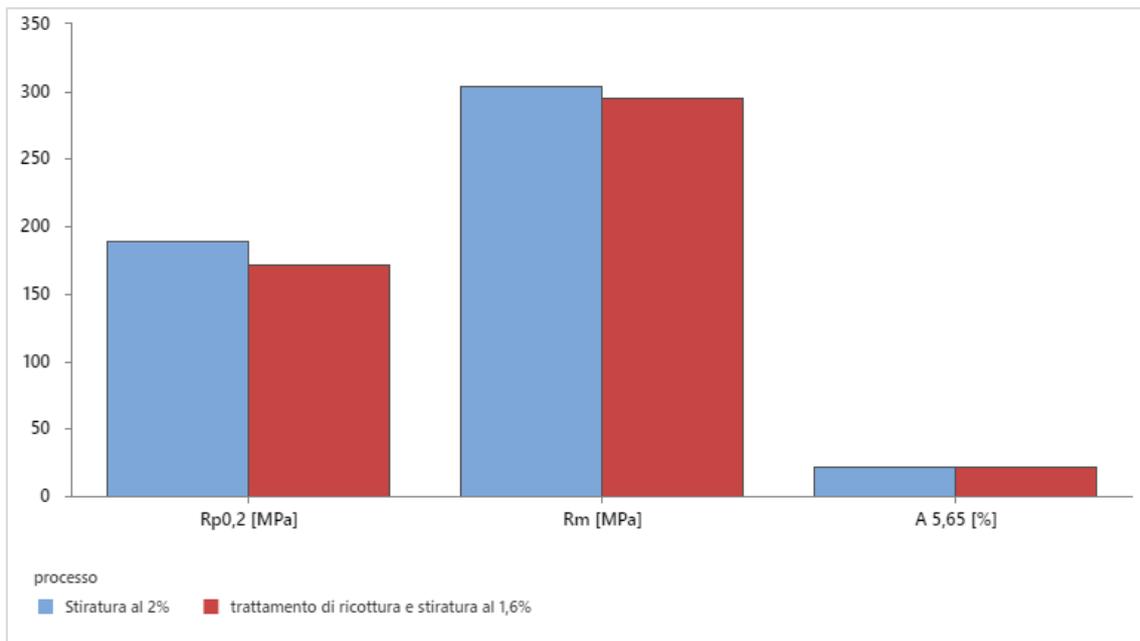


Figura 4.24: Confronto tra la lega 5083 H111 e la lega 5083 O in termini di tensione di rottura, tensione di snervamento e allungamento percentuale a rottura.

Si mostrano i risultati della piastra di spessore 60,6 mm in lega 5083 H111, dopo processo di laminazione a caldo (Figura 4.25) e dopo deformazione al 1% (Figura 4.26).

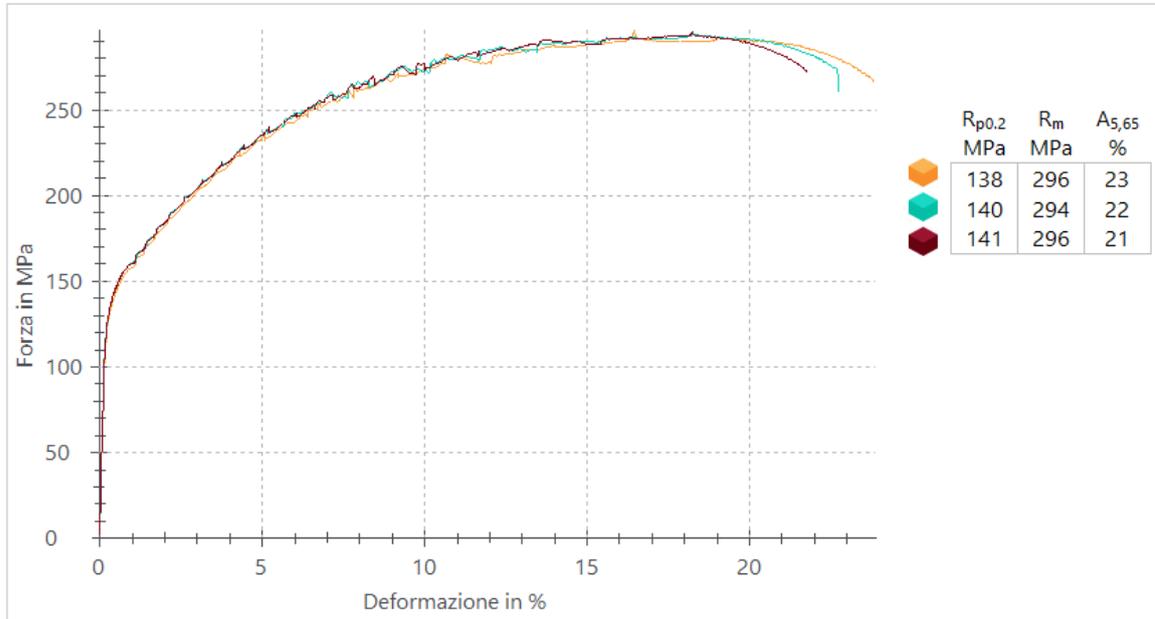


Figura 4.25: Curva tensione - deformazione su piastra di spessore 60,6 mm in lega 5083 H111 dopo laminazione a caldo.

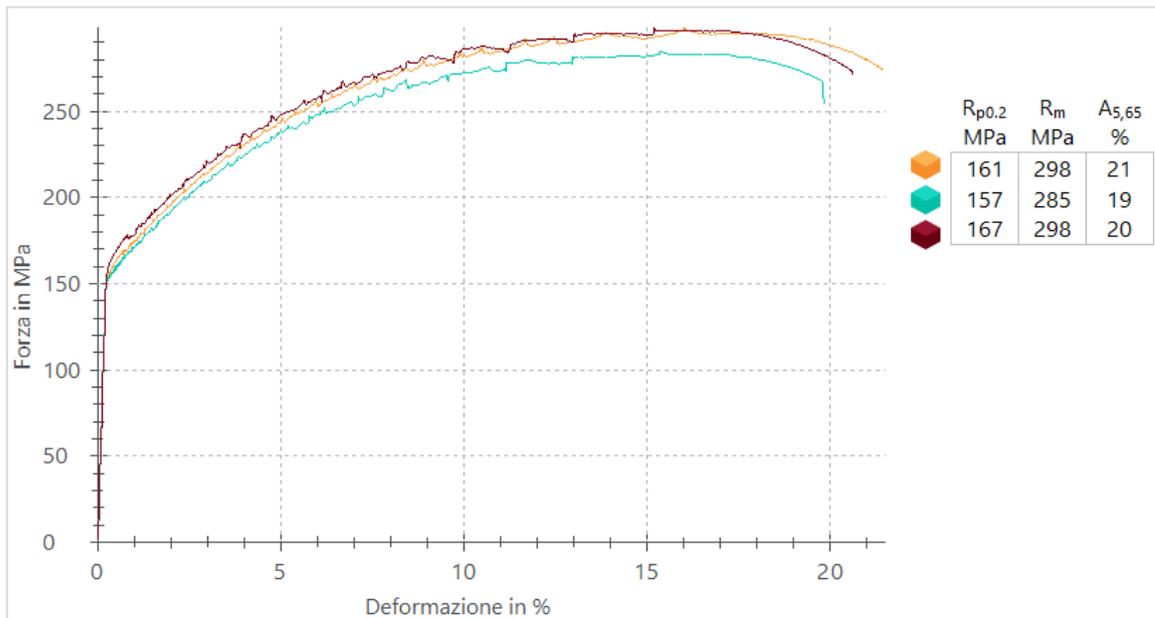


Figura 4.26: Curva tensione - deformazione su piastra di spessore 60,6 mm in lega 5083 H111 dopo stiratura al 1%.

L'1% di deformazione non ha un impatto significativo sulla tensione di rottura e sull'allungamento. Per quanto riguarda la tensione di snervamento, dai 140 MPa dopo laminazione a caldo si passa a 162 MPa dopo stiratura, evidenziando un incremento del 16% (vedi *Figura 4.27*).

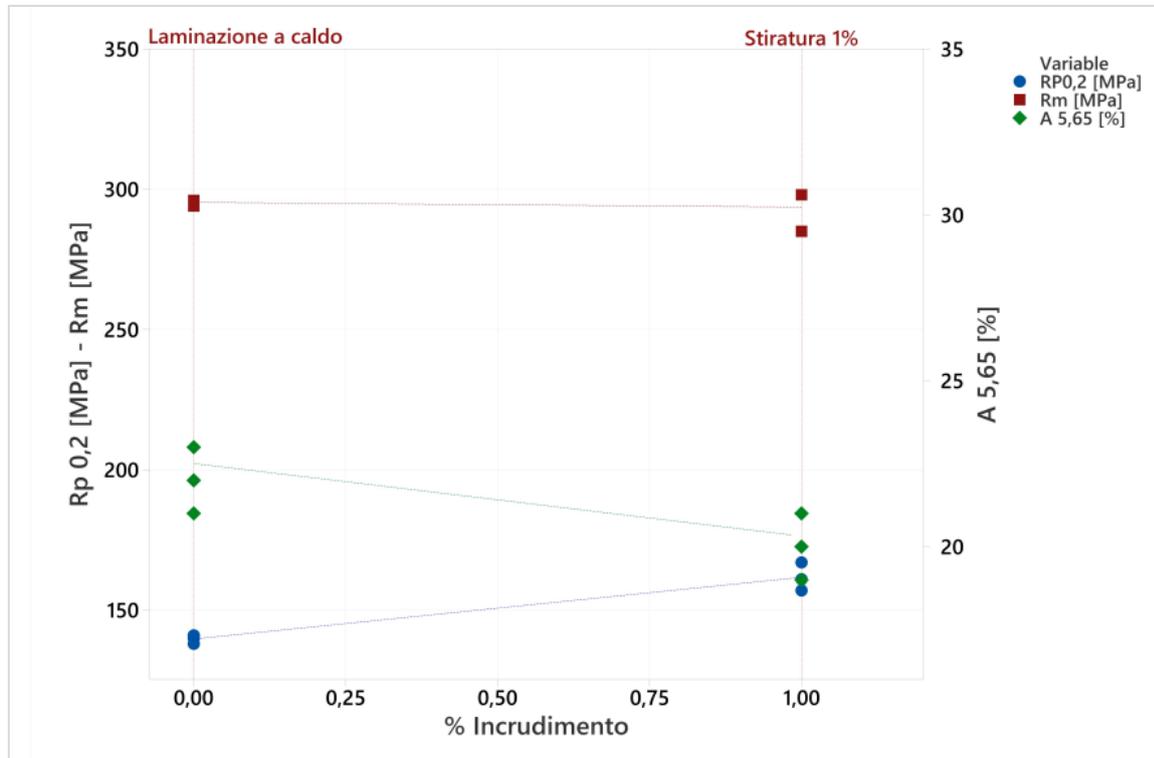


Figura 4.27: Tensione di rottura, tensione di snervamento e allungamento percentuale a rottura della lega 5083 H111. Su materiale laminato a caldo e materiale deformato al 1%.

4.1.3 Analisi microdurezza

L'analisi dei valori di durezza, misurati dalla superficie fino alla mezziera dello spessore, ha rispecchiato quanto emerso dall'analisi micrografica e test di trazione: l'incrudimento subito dal materiale durante la stiratura si è tradotto in aumento della durezza. In *Figura 4.28* sono mostrati i risultati dell'analisi sulla piastra in lega 5083 H111 con spessore 16,7 mm. Si riportano di seguito i risultati mediati da superficie a mezziera per ogni condizione di processo:

- dopo la laminazione a caldo, la durezza è di 79 HV;
- dopo la stiratura del 2%, la durezza è di 82 HV;
- dopo la stiratura del 7%, la durezza è di 87 HV.

Con una deformazione del 2%, la durezza aumenta da 79 HV a 82 HV, registrando un incremento del 4%. Invece, con una deformazione del 7%, la durezza passa da 82 HV a 87 HV, evidenziando un incremento del 6%.

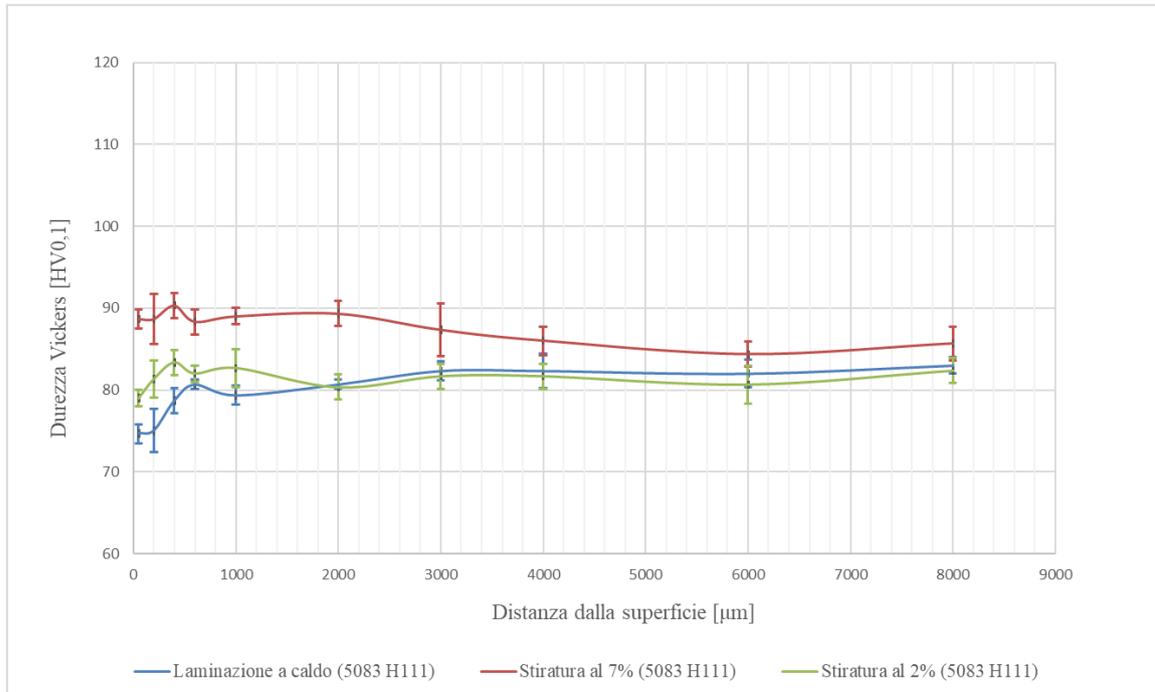


Figura 4.28: Durezza lungo lo spessore, dalla superficie fino alla mezzeria. Piastra di spessore 16,7 mm in lega 5083 H111, campioni prelevati dopo laminazione a caldo, stiratura al 2% e stiratura al 7%.

Il calcolo del profilo di microdurezza per ciascuna lavorazione è stato ottenuto attraverso la media di tre profili selezionati in posizioni rappresentative del campione. In Figura 4.29 si mostra uno schema del procedimento utilizzato per effettuare le misurazioni di microdurezza. Ogni misurazione ha avuto inizio dalla superficie del laminato (zona in cui i cilindri di lavoro sono a contatto) e si è conclusa al centro della piastra.

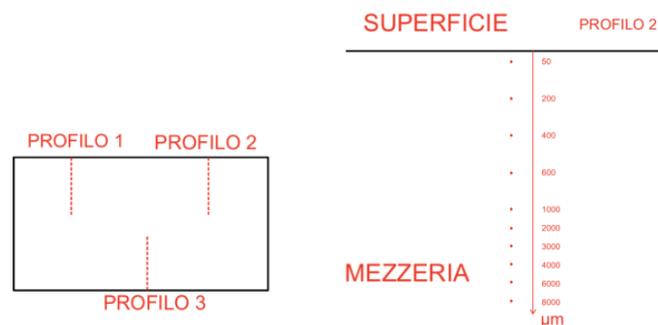


Figura 4.29: Schema del procedimento delle prove di microdurezza.

Nelle Tabelle 4.8 – 4.10 si riassumono i dati raccolti.

Tabella 4.8: Analisi di microdurezza su piastra di spessore in 16,7 mm in lega 5083 H111 dopo laminazione a caldo.

LAMINAZIONE A CALDO					
Distanza dal bordo [μm]	Profilo 1	Profilo 2	Profilo 3	Media	Dev Standard
	[HV _{0.1}]				
50	74	74	76	75	1,15
200	76	72	77	75	2,65
400	77	80	79	79	1,53
600	81	80	81	81	0,58
1000	78	80	80	79	1,15
2000	81	80	81	81	0,58
3000	83	81	83	82	1,15
4000	84	83	80	82	2,08
6000	84	81	81	82	1,73
8000	82	83	84	83	1

Tabella 4.9: Analisi di microdurezza su piastra di spessore in 16,7 mm in lega 5083 H111 dopo stiratura al 2%.

STIRATURA 2%					
Distanza [μm]	Profilo 1	Profilo 2	Profilo 3	Media	Dev Standard
	[HV _{0.1}]				
50	78	79	80	79	1
200	80	80	84	81	2,31
400	83	82	85	83	1,53
600	82	81	83	82	1
1000	80	84	84	83	2,31
2000	80	79	82	80	1,53
3000	82	80	83	82	1,53
4000	83	80	82	82	1,53
6000	82	78	82	81	2,31
8000	81	82	84	82	1,53

Tabella 4.10: Analisi di microdurezza su piastra di spessore in 16,7 mm in lega 5083 H111 dopo stiratura al 7%.

STIRATURA 7%					
Distanza [μm]	Profilo 1	Profilo 2	Profilo 3	Media	Dev Standard
	[HV _{0.1}]				
50	88	90	88	89	1,15
200	88	92	86	89	3,06
400	89	92	90	90	1,53
600	87	90	88	88	1,53
1000	90	88	89	89	1
2000	89	88	91	89	1,53
3000	91	85	86	87	3,21
4000	87	87	84	86	1,73
6000	86	83	84	84	1,53
8000	85	84	88	86	2,08

L'analisi di microdurezza è stata estesa alle piastre in lega 5083 O a spessore 17 mm, che sono state sottoposte a trattamento termico di ricottura e stiratura al 1,6%. Le piastre n°1 e n°8 sono state esaminate, e come mostrato nella *Figura 4.30*, non emergono differenze significative nei valori. La piastra n°1 presenta una durezza media di 78,7 HV, e la piastra n°8 presenta una durezza media di 76,1 HV.

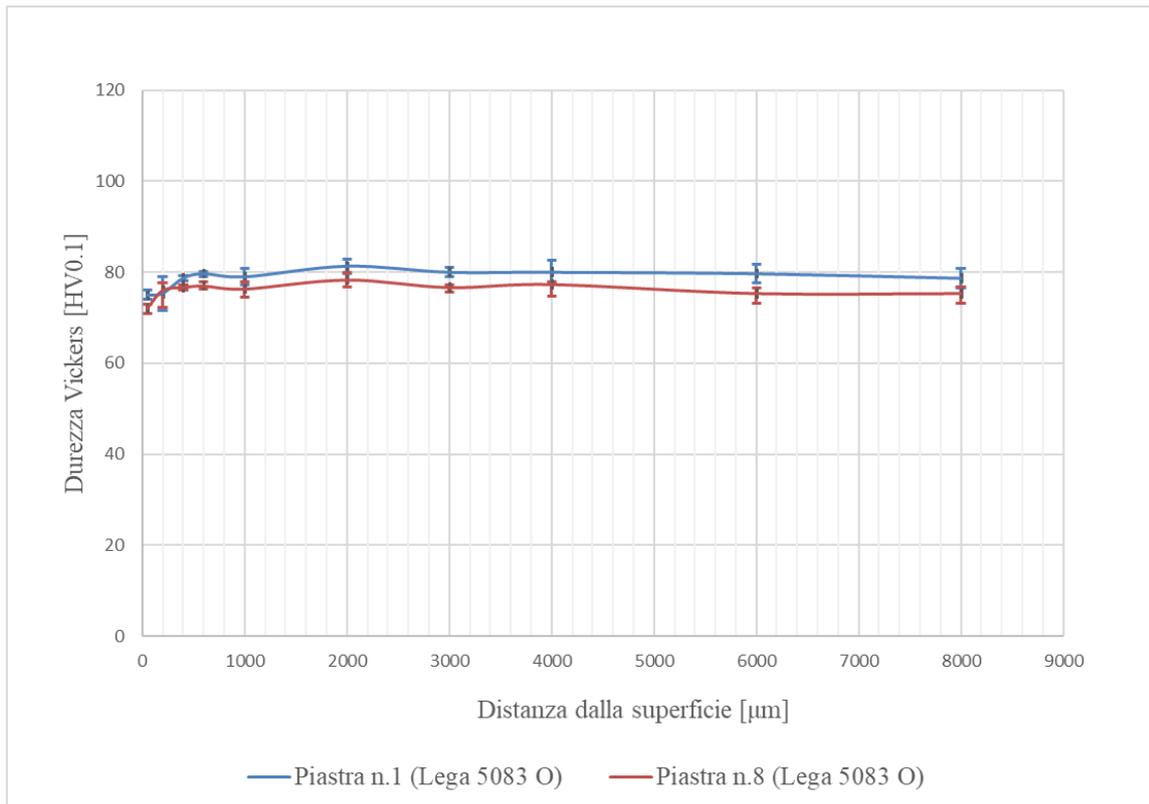


Figura 4.30: Durezza lungo lo spessore, dalla superficie fino alla mezzeria. Piastra di spessore 17 mm in lega 5083 O processata per trattamento termico di ricottura e stiratura al 1,6%.

Nelle Tabelle 4.11 – 4.12 vengono riassunti tutti i dati raccolti per le due piastre n°1 e n°8.

Tabella 4.11: Analisi di microdurezza su piastra n° 1 di spessore 17 mm in lega 5083 O processata per trattamento termico di ricottura e stiratura al 1,6%.

PIASTRA N° 1					
Distanza [μm]	Profilo 1	Profilo 2	Profilo 3	Media	Deviazione Standard
	[HV _{0.1}]				
50	76	74	75	75	1,00
200	71	77	78	75	3,79
400	79	78	79	79	0,58
600	80	80	79	80	0,58
1.000	81	78	78	79	1,73
2.000	80	81	83	81	1,53
3.000	80	81	79	80	1,00
4.000	81	82	77	80	2,65
6.000	78	79	82	80	2,08
8.000	81	78	77	79	2,08

Tabella 4.12: Analisi di microdurezza su piastra n° 8 di spessore 17 mm in lega 5083 O processata per trattamento termico di ricottura e stiratura al 1,6%.

PIASTRA N° 8					
Distanza [μm]	Profilo 1	Profilo 2	Profilo 3	Media	Deviazione Standard
	[HV _{0.1}]				
50	72	73	71	72	1
200	77	74	77	76	1,73
400	77	77	76	77	0,58
600	77	78	76	77	1
1.000	76	75	78	76	1,53
2.000	78	80	77	78	1,53
3.000	77	76	77	77	0,58
4.000	77	78	77	77	0,58
6.000	74	76	76	75	1,15
8.000	77	74	75	75	1,53

Nel grafico di *Figura 4.31* viene messo a confronto l'andamento della microdurezza delle piastre in 5083 O a spessore 17 mm con quello delle piastre in 5083 H111 a spessore 16,7 mm. Dopo la stiratura al 2%, la lega 5083 H111 mostra un incremento di durezza da 79 HV a 82 HV (valori medi), mentre il prodotto in lega 5083 O registra una durezza di 78 HV. Tuttavia, si nota una differenza del 5% nelle proprietà di durezza tra lega 5083 H111 e 5083 O dopo il processo di stiratura. (vedi *Figura 4.31*).

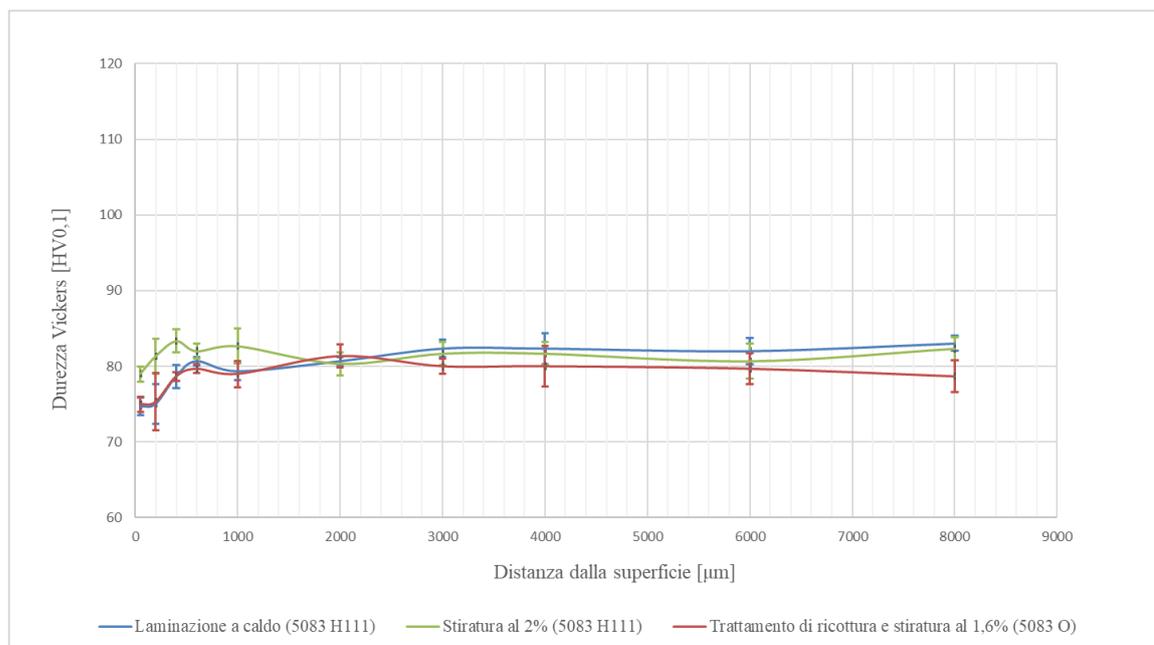


Figura 4.31: Confronto tra lega 5083 H111 e lega 5083 O, con piastre di spessore 17 mm.

L'analisi condotta sulla piastra in lega 5083 H111 con spessore di 60,6 mm non ha evidenziato differenze significative tra laminazione a caldo e stiratura al 1%: la durezza passa da 77 HV a 81 HV, mostrando un incremento del 5% (vedi Figura 4.32). Nelle *Tablelle 4.13 – 4.14* si mostrano i risultati.

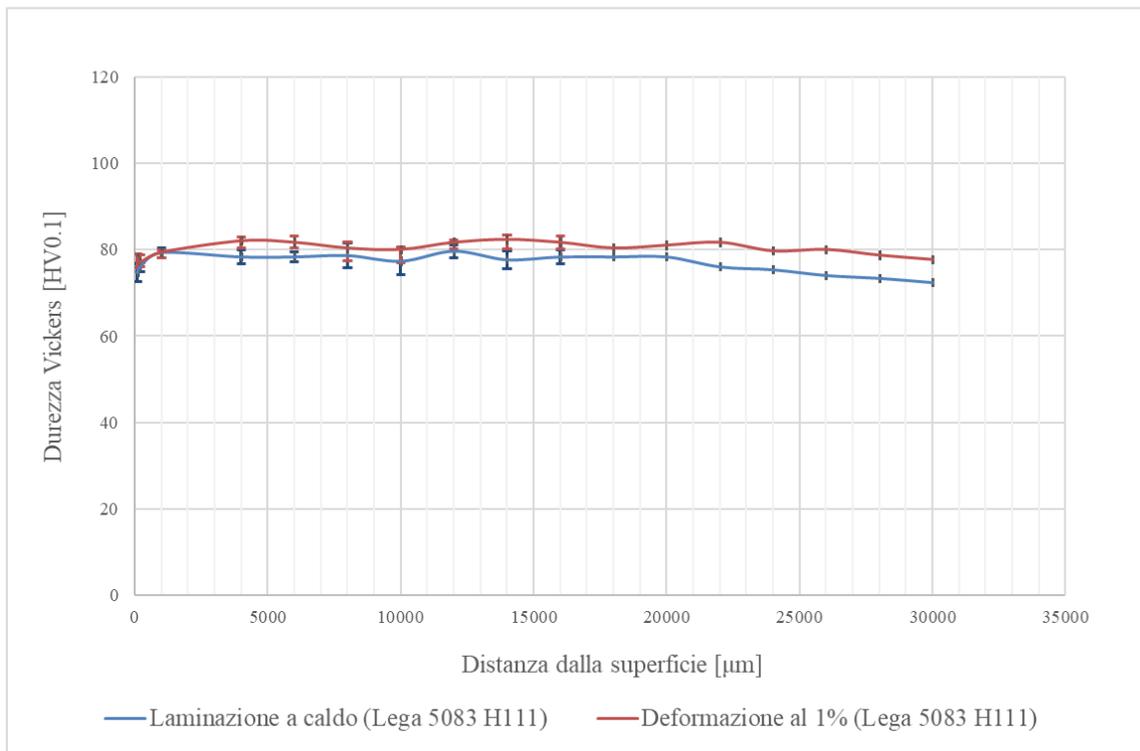


Figura 4.32: Durezza lungo lo spessore, dalla superficie fino alla mezzeria. Piastra di spessore 60,6 mm in lega 5083 H111 processata per laminazione a caldo e stiratura al 1%.

Tabella 4.13: Analisi di durezza su piastra di spessore 60,6 mm in lega 5083 H111 dopo laminazione a caldo.

LAMINAZIONE A CALDO					
Distanza [μm]	Profilo 1	Profilo 2	Profilo 3	Media	Dev Stand.
	[HV _{0.1}]				
100	74	77	73	75	2,08
200	76	75	77	76	1,00
1.000	80	78	80	79	1,15
4.000	77	80	78	78	1,53
6.000	79	79	77	78	1,15
8.000	77	77	82	79	2,89
10.000	78	74	80	77	3,06
12.000	81	78	80	80	1,53
14.000	77	76	80	78	2,08
16.000	80	77	78	78	1,53
18.000	78	80	77	78	1,53
20.000	80	77	78	78	1,53
22.000	77	75	76	76	1,00
24.000	75	75	76	75	0,58
26.000	74	75	73	74	1,00
28.000	73	75	72	73	1,53
30.000	72	73	72	72	0,58

Tabella 4.14: Analisi di durezza su piastra di spessore 60,6 mm in lega 5083 H111 dopo stiratura al 1%.

STIRATURA 1%					
Distanza [μm]	Profilo 1	Profilo 2	Profilo 3	Media	Deviazione Standard
	[HV _{0.1}]				
100	77	79	78	78	1,00
200	76	76	79	77	1,73
1.000	79	79	80	79	0,58
4.000	81	83	82	82	1,00
6.000	83	80	82	82	1,53
8.000	82	79	80	80	1,53
10.000	81	79	80	80	1,00
12.000	83	82	80	82	1,53
14.000	82	82	83	82	0,58
16.000	82	80	83	82	1,53
18.000	79	82	80	80	1,53
20.000	83	80	80	81	1,73
22.000	83	83	79	82	2,31
24.000	80	79	80	80	0,58
26.000	79	81	80	80	1,00
28.000	78	80	78	79	1,15
30.000	78	77	78	78	0,58

4.2 Modello sperimentale stiratrice

Viene analizzato in dettaglio il processo di stiratura, individuando i parametri chiave che influenzano direttamente l'operazione. Questo studio consente di esplorare i limiti operativi della macchina, interpretare i risultati ottenuti e condurre verifiche mirate a spiegare tali risultati. Inoltre, viene dimostrato come il modello sviluppato possa essere applicato per valutare la fattibilità del processo di stiratura, focalizzandosi sullo studio di piastre in lega 5083 sottoposte a uno o due cicli di stiratura. La macchina Stiratrice è in grado di processare il materiale in modo analogo ad una macchina di trazione.

4.2.1 Studio della macchina stiratrice

L'impianto è predisposto per effettuare la stiratura in "controllo di pressione". In questa modalità l'operatore deve configurare il valore massimo di pressione da raggiungere durante il processo di stiratura, insieme all'allungamento da applicare alla piastra. La macchina si autolimita in termini di pressione ed esegue la stiratura fino a ottenere un allungamento della piastra pari a quanto impostato, rispettando contemporaneamente la massima lunghezza di stiratura consentita dai cilindri principali. La stiratrice è dotata di quattro cilindri oleodinamici posizionati esternamente alla macchina, responsabili del controllo del movimento della testa stirante. La somma totale dell'area dei cilindri è pari a $480.506,6 \text{ mm}^2$, e sono in grado di operare a una pressione massima di 315 bar. Durante il processo di stiratura, i quattro cilindri operano simultaneamente. Un'analisi della struttura dei cilindri principali e secondari della stiratrice ha rivelato che la forza massima di stiratura è di 15.135.957,78 Newton, equivalente a 15,13 meganewton. Questo risultato conferma la precisione delle specifiche riportate nel manuale operativo della macchina, il quale afferma che la stiratrice può sviluppare una forza massima di 1500 tonnellate.

Una volta che la piastra è stata posizionata in macchina ed è stata avviata la procedura di centratura e stiratura, la forza applicata genera una tensione uniformemente distribuita sull'intera superficie del materiale. Gli aspetti da considerare per valutare questa tensione sono lo spessore e la larghezza del materiale. Poiché la stiratrice è in grado di trattare prodotti con diverse combinazioni di spessori e larghezze, sono state calcolate varie aree resistenti della piastra. Questi calcoli sono stati eseguiti considerando spessori crescenti da 8 a 60 mm e tre larghezze caratteristiche: la prima a 1050 mm, una intermedia a 2200 mm e l'ultima a 3300 mm. (vedi *Tabella 4.15*).

Tabella 4.15: Calcolo dell'area del prodotto al variare dello spessore e larghezza.

s [mm]	A [mm ²](W=1050mm)	A [mm ²](W=2200mm)	A [mm ²](W=3300mm)
8	8.400	17.600	26.400
9	9.450	19.800	29.700
10	10.500	22.000	33.000
11	11.550	24.200	36.300
12	12.600	26.400	39.600
13	13.650	28.600	42.900
14	14.700	30.800	46.200
15	15.750	33.000	49.500
16	16.800	35.200	52.800
17	17.850	37.400	56.100
18	18.900	39.600	59.400
19	19.950	41.800	62.700
20	21.000	44.000	66.000
21	22.050	46.200	69.300
22	23.100	48.400	72.600
23	24.150	50.600	75.900
24	25.200	52.800	79.200
25	26.250	55.000	82.500
26	27.300	57.200	85.800
27	28.350	59.400	89.100
28	29.400	61.600	92.400
29	30.450	63.800	95.700
30	31.500	66.000	99.000
31	32.550	68.200	102.300
32	33.600	70.400	105.600
33	34.650	72.600	108.900
34	35.700	74.800	112.200
35	36.750	77.000	115.500
36	37.800	79.200	118.800
37	38.850	81.400	122.100
38	39.900	83.600	125.400
39	40.950	85.800	128.700
40	42.000	88.000	132.000
41	43.050	90.200	135.300
42	44.100	92.400	138.600
43	45.150	94.600	141.900
44	46.200	96.800	145.200
45	47.250	99.000	148.500
46	48.300	101.200	151.800
47	49.350	103.400	155.100
48	50.400	105.600	158.400
49	51.450	107.800	161.700
50	52.500	110.000	165.000
51	53.550	112.200	168.300
52	54.600	114.400	171.600
53	55.650	116.600	174.900
54	56.700	118.800	178.200
55	57.750	121.000	181.500
56	58.800	123.200	184.800
57	59.850	125.400	188.100
58	60.900	127.600	191.400
59	61.950	129.800	194.700
60	63.000	132.000	198.000

Dopo aver determinato l'area resistente della piastra, è stata calcolata la tensione massima sviluppata nel materiale per ogni combinazione di larghezza e spessore:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A} = \frac{F_{max}}{W*s} \quad (1)$$

F_{MAX} è la forza di stiratura massima precedentemente calcolata, W è la larghezza della piastra, mentre s è lo spessore della piastra (vedi *Tabella 4.16*)

Tabella 4.16: Tensione massima in funzione dello spessore e larghezza della piastra.

s [mm]	σ_{\max} [MPa] (W=1050 mm)	σ_{\max} [MPa] (W=2200 mm)	σ_{\max} [MPa] (W=3300 mm)
8	1.801,90	860,00	573,33
9	1.601,69	764,44	509,63
10	1.441,52	688,00	458,67
11	1.310,47	625,45	416,97
12	1.201,27	573,33	382,22
13	1.108,86	529,23	352,82
14	1.029,66	491,43	327,62
15	961,01	458,67	305,78
16	900,95	430,00	286,67
17	847,95	404,70	269,80
18	800,84	382,22	254,81
19	758,69	362,10	241,40
20	720,76	344,00	229,33
21	686,44	327,62	218,41
22	655,24	312,73	208,48
23	626,75	299,13	199,42
24	600,63	286,67	191,11
25	576,61	275,20	183,47
26	554,43	264,61	176,41
27	533,90	254,81	169,88
28	514,83	245,71	163,81
29	497,08	237,24	158,16
30	480,51	229,33	152,89
31	465,01	221,93	147,96
32	450,47	215,00	143,33
33	436,82	208,48	138,99
34	423,98	202,35	134,90
35	411,86	196,57	131,05
36	400,42	191,11	127,41
37	389,60	185,95	123,96
38	379,35	181,05	120,70
39	369,62	176,41	117,61
40	360,38	172,00	114,67
41	351,59	167,80	111,87
42	343,22	163,81	109,21
43	335,24	160,00	106,67
44	327,62	156,36	104,24
45	320,34	152,89	101,93
46	313,37	149,56	99,71
47	306,71	146,38	97,59
48	300,32	143,33	95,56
49	294,19	140,41	93,61
50	288,30	137,60	91,73
51	282,65	134,90	89,93
52	277,22	132,31	88,20
53	271,98	129,81	86,54
54	266,95	127,41	84,94
55	262,09	125,09	83,39
56	257,41	122,86	81,90
57	252,90	120,70	80,47
58	248,54	118,62	79,08
59	244,33	116,61	77,74
60	240,25	114,67	76,44

In *Figura 4.33* sono riportati i risultati della tensione massima al variare dello spessore (s) e larghezza (W) della piastra. Si osserva che all'aumentare della larghezza, le curve si posizionano nella parte inferiore del grafico. La larghezza massima trattabile dalla stiratrice è di 3300 mm. Per questa dimensione, la tensione massima nel materiale, applicando la forza di stiratura massima, oscilla tra 573 MPa (per spessore 8 mm) e 76 Mpa (per spessore 60 mm). Mentre per larghezza di 1050 mm, nelle stesse condizioni, la tensione massima oscilla tra 1801 e 240 MPa.

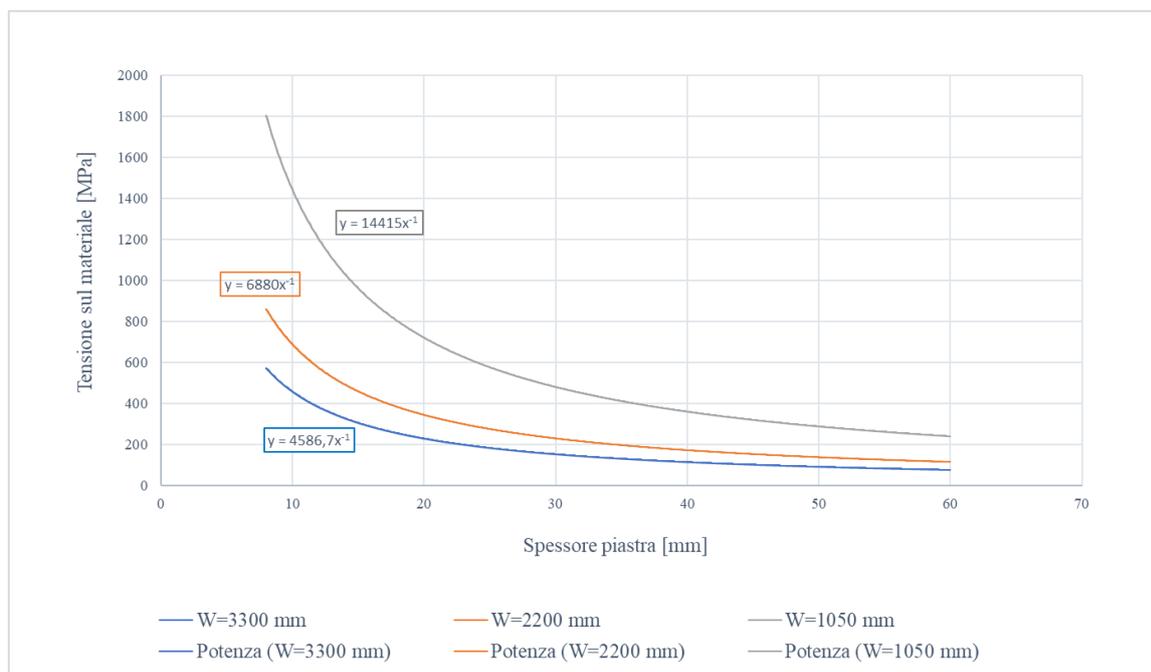


Figura 4.33: Andamento della tensione nel materiale - spessore della piastra.

Al fine di semplificare le variabili coinvolte e instaurare una relazione tra di esse, si stabilisce un legame tra la tensione sviluppata nel materiale e l'area resistente della piastra, come illustrato nella *Figura 4.34*. Questo grafico è essenziale per determinare, in base alla tensione massima del materiale, la capacità di effettuare o meno la stiratura in relazione alla geometria della piastra. I limiti operativi della macchina sono chiaramente rappresentati nel grafico, e sono stati determinati con una pressione operativa di 315 bar (pressione massima raggiungibile dalla macchina).

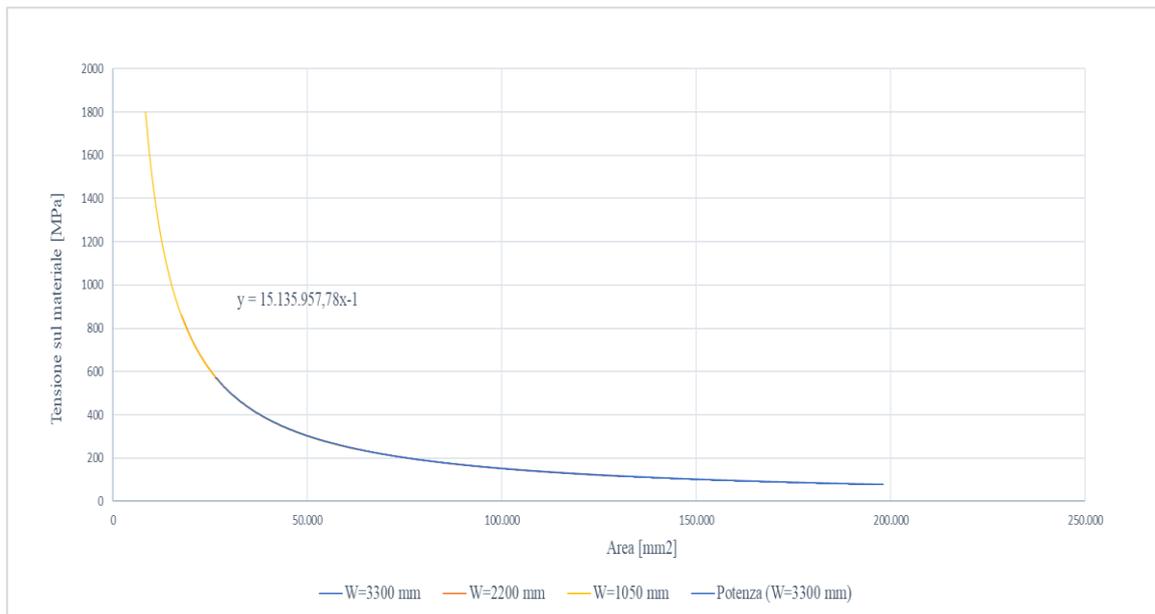


Figura 4.34: Andamento della tensione del materiale - area resistente della piastra.

Si è ricavata la seguente relazione:

$$\sigma_{max} = \frac{C}{A} [MPa] \quad (2)$$

dove C è una costante di valore $e^{16,532583781} = 15.135.957,78$, A è l'area resistente ottenuta da spessore e larghezza della piastra.

4.2.2 Verifica del modello sperimentale

Sono state sottoposte alla verifica del modello piastre in lega 5083 con spessore 60 mm e 16 mm. L'analisi condotta sulla piastra da 60 mm consente di valutare le prestazioni della macchina in condizioni operative limite, con una pressione dei cilindri di 315 bar. Diversamente, con la piastra da 16 mm viene effettuato un confronto tra il processo di stiratura e prove in laboratorio condotte su provini prelevati dal medesimo materiale.

Sulla macchina stiratrice vengono configurati diversi parametri, tra cui le dimensioni della piastra da stirare (lunghezza, larghezza e spessore), la percentuale di allungamento desiderata e i set di pressione pre-stiro e pressione durante la stiratura. Durante la lavorazione, la macchina produce come output alcuni parametri importanti, tra cui la pressione media esercitata dai cilindri e l'allungamento del materiale misurato durante la stiratura. Questi valori di output forniscono informazioni sul rendimento del processo e consentono di monitorare la corretta esecuzione delle operazioni di stiratura.

Il primo prodotto esaminato presenta uno spessore di 60 mm, una larghezza di 1600 mm e una lunghezza di 6900 mm: in *Figura 4.35* si mostra l'andamento nel tempo della pressione media dei cilindri e dell'allungamento misurato durante la stiratura.

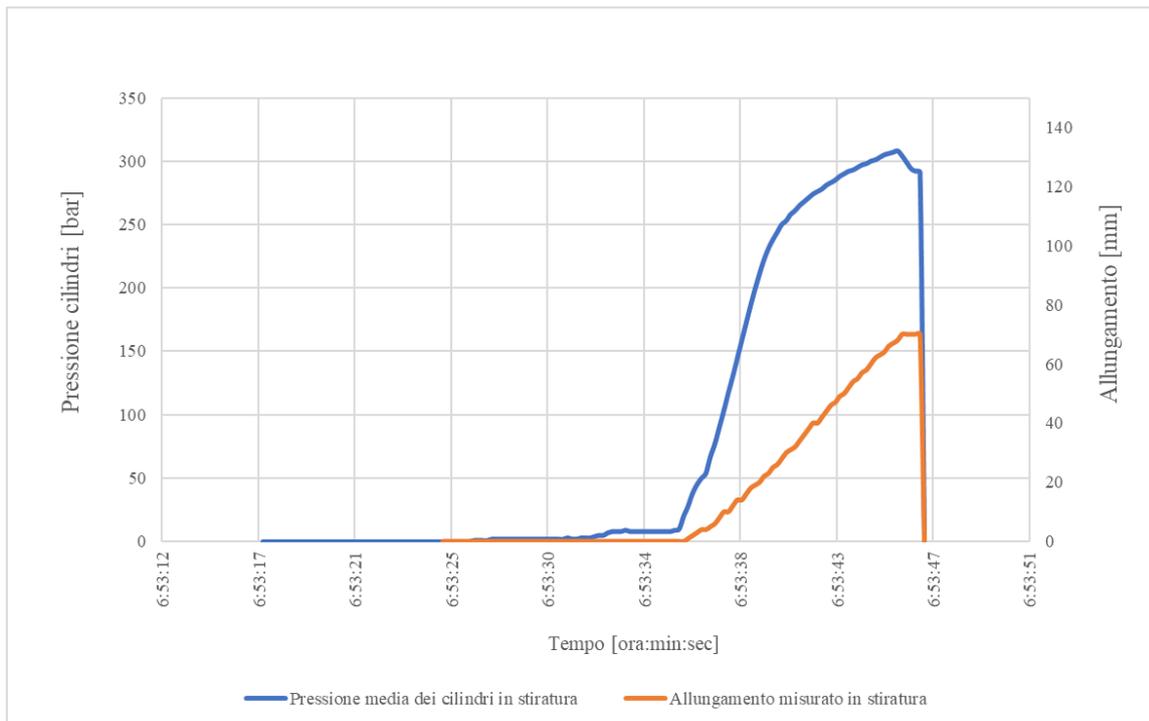


Figura 4.35: Andamento della pressione dei cilindri e allungamento misurato dalla stiratrice. Prodotto in lega 5083H111 caratterizzato da spessore 60 mm e larghezza 1600 mm.

È stata misurata una pressione massima di 310 bar e un allungamento di 70 mm, corrispondente ad un allungamento dell'1 % della lunghezza della piastra. Al fine di ottenere una relazione tra pressione e allungamento, si determina la curva tensione – deformazione (vedi *Figura 4.36*).

Per determinare la tensione del materiale (σ_{mat}) si applicano le seguenti formule:

$$F = \frac{P_{cil}/10}{A_{cil}} [N] \quad (3)$$

$$\sigma_{mat} = \frac{F}{A} [MPa] \quad (4)$$

dove F è la forza di stiratura, P_{cil} è la pressione media dei cilindri di stiratura e A_{cil} è l'area totale dei cilindri della stiratrice ($480.506,6 \text{ mm}^2$). Per determinare la deformazione (ε) si utilizza la formula:

$$\varepsilon = \frac{A_l}{L_0} * 100 \text{ [%]} \quad (5)$$

Dove A_l è l'allungamento misurato in stiratura e L_0 è la lunghezza iniziale della piastra.

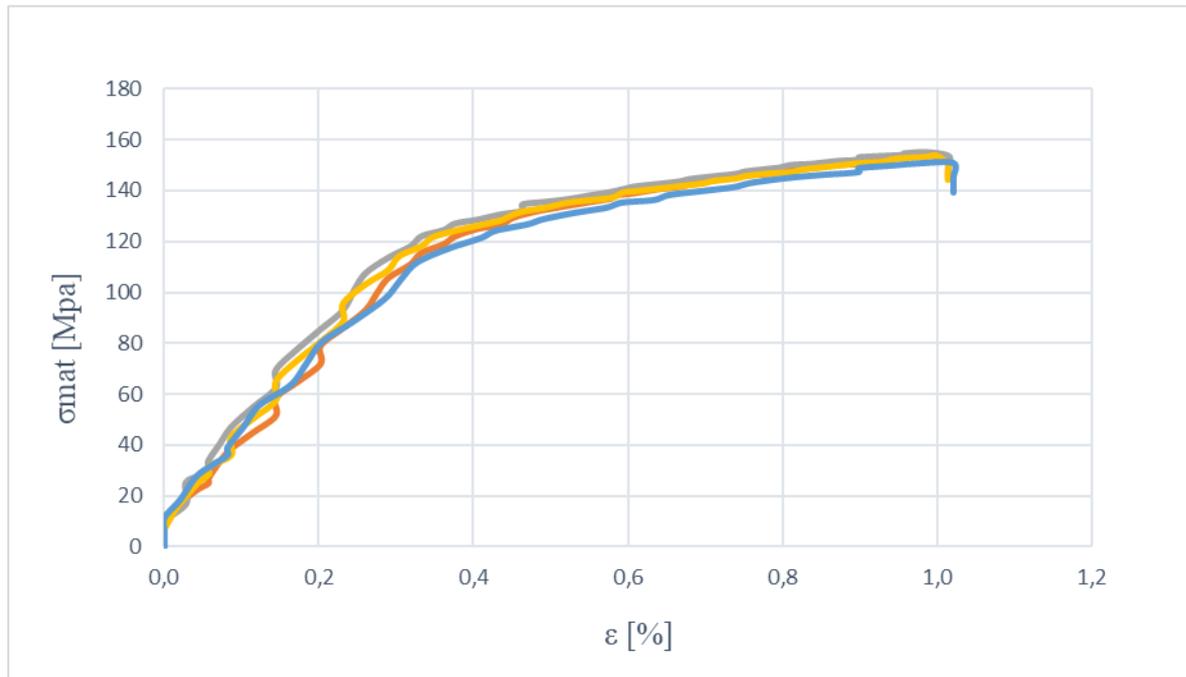


Figura 4.36: Curve tensione - deformazione ottenute durante il processo di stiratura di piastre in lega 5083 H111, con spessore di 60 mm e larghezza di 1600 mm.

Per valutare la tensione di snervamento e la tensione massima dalla curva tensione–deformazione ottenuta dalla macchina stiratrice viene impiegata una rappresentazione semplificata composta da due segmenti rettilinei (*Figura 4.37*). L'obiettivo di questa

visualizzazione è descrivere sia il comportamento elastico che plastico della curva. La tensione massima rappresenta il valore necessario per completare la stiratura della piastra.

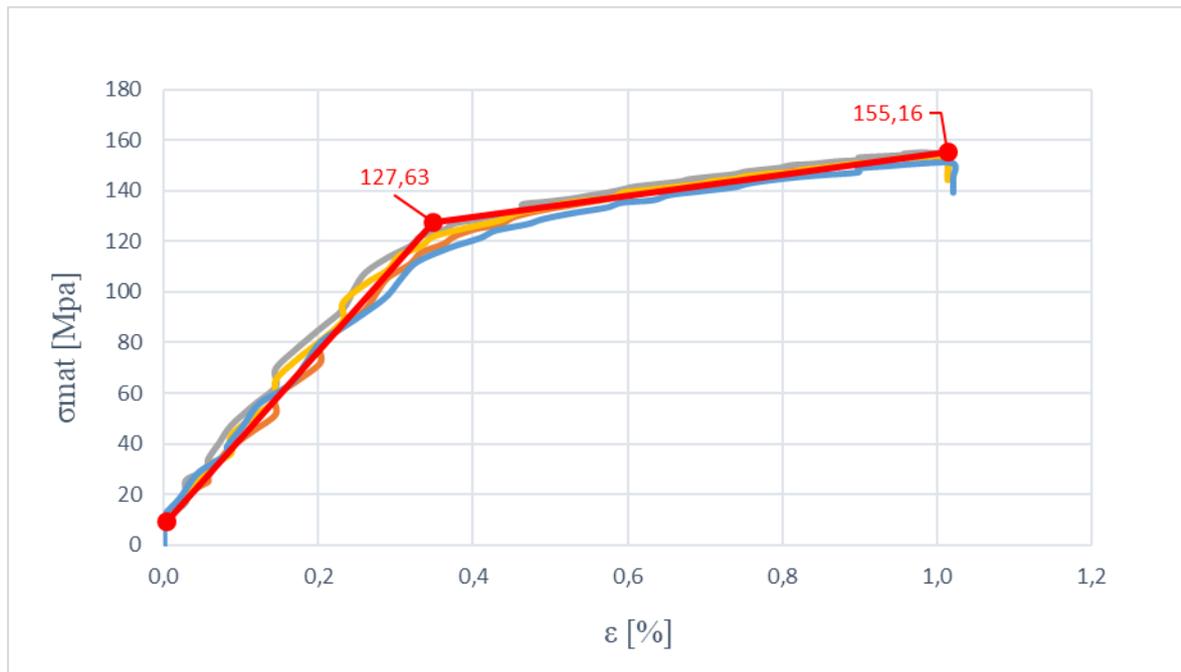


Figura 4.37: Curva tensione – deformazione semplificata dello sbizzato in lega 5083H111, caratterizzato da spessore di 60 mm e larghezza 1600mm.

È stata stimata una tensione di snervamento di 127 MPa, un coefficiente angolare del tratto plastico di 41,29 e una tensione massima di 155 MPa. Sfruttando l'equazione (2) dedotta dalla curva di *Figura 4.34*, in condizioni operative di limite massimo della macchina si ottiene una tensione del materiale pari a 157 MPa, che conferma che l'allungamento ottenuto sperimentalmente in impianto rappresenta il massimo raggiungibile dalla macchina.

Il secondo prodotto esaminato presenta uno spessore di 15 mm, una larghezza di 2200 mm e una lunghezza di 6500 mm: come obiettivo viene impostata una deformazione del 2%. In *Figura 4.38* si mostra la curva tensione - deformazione ottenuta dalla macchina

stiratrice, da cui sono stati ricavati i seguenti parametri: una tensione di snervamento di 142 MPa, un coefficiente angolare di 25,62 e una tensione massima di 198 MPa.

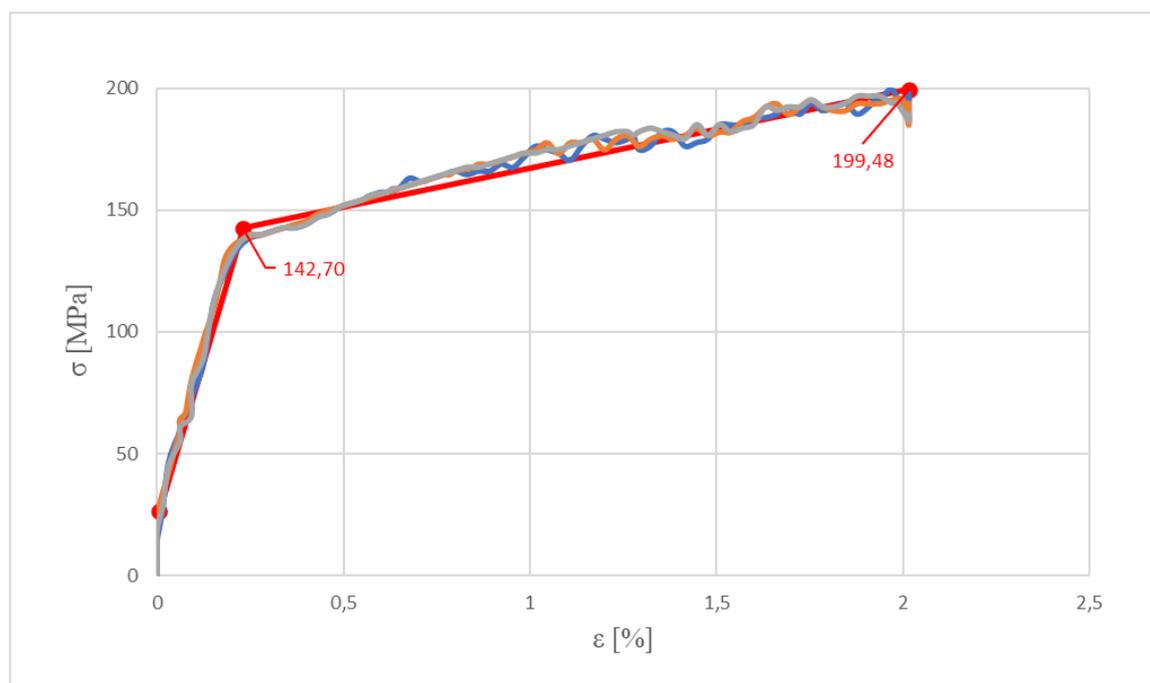


Figura 4.38: Curve tensione-deformazione ottenute durante il processo di stiratura di piastre in lega 5083 H111, con spessore di 15 mm e larghezza di 2200 mm.

Al fine di valutare e confermare i risultati ottenuti dalla curva tensione - deformazione nel processo di stiratura, sono state condotte prove in laboratorio utilizzando la macchina di trazione Zwick Z100. I provini prelevati dalla piastra sono stati pre-stirati al 2%, riproducendo le stesse condizioni del ciclo di produzione reale. In *Figura 4.39* è rappresentato il pre-stiro ottenuto in laboratorio, con una tensione di snervamento misurata di 135 MPa e una tensione massima di 188 MPa. Tali valori presentano una deviazione del 5% rispetto a quelli ottenuti nel processo di stiratura reale.

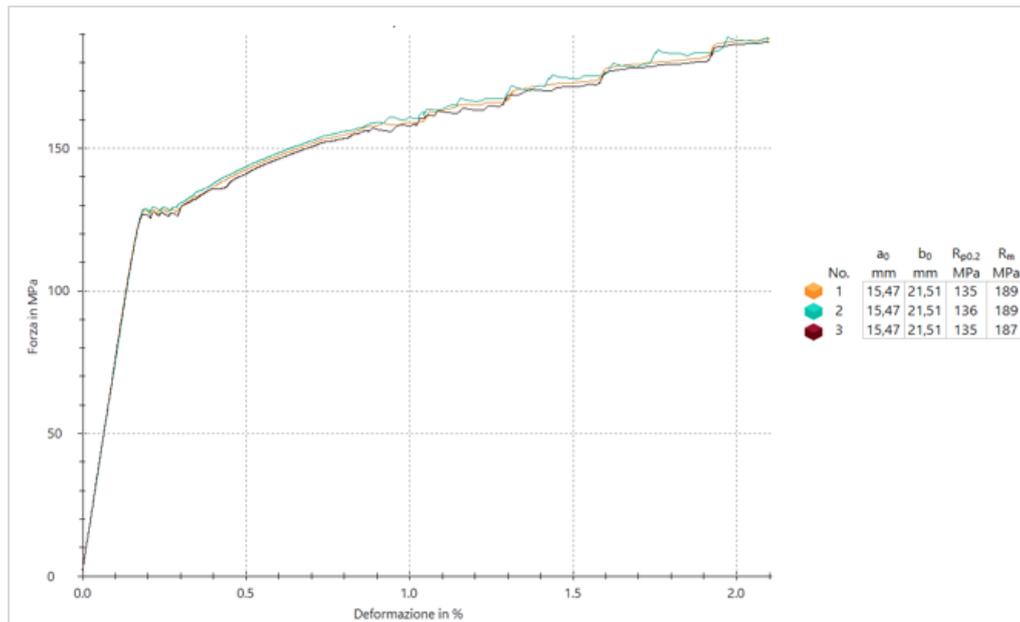


Figura 4.39: Curva tensione – deformazione ottenuta con la macchina di trazione Zwick Z100. Sono stati eseguiti pre-stiri sui provini in lega 5083H111 con spessore 15 mm.

Le curve sforzo – deformazione ottenute nei due processi (reale e in laboratorio) sono simili.

4.2.3 Applicazione del modello sperimentale

Sono stati analizzati molteplici sbazzati in lega 5083. Per ciascuno sbazzato sono stati determinati i valori della tensione di snervamento e del coefficiente angolare del tratto plastico attraverso la curva tensione – deformazione semplificata (Figura 4.40 – 4.41).

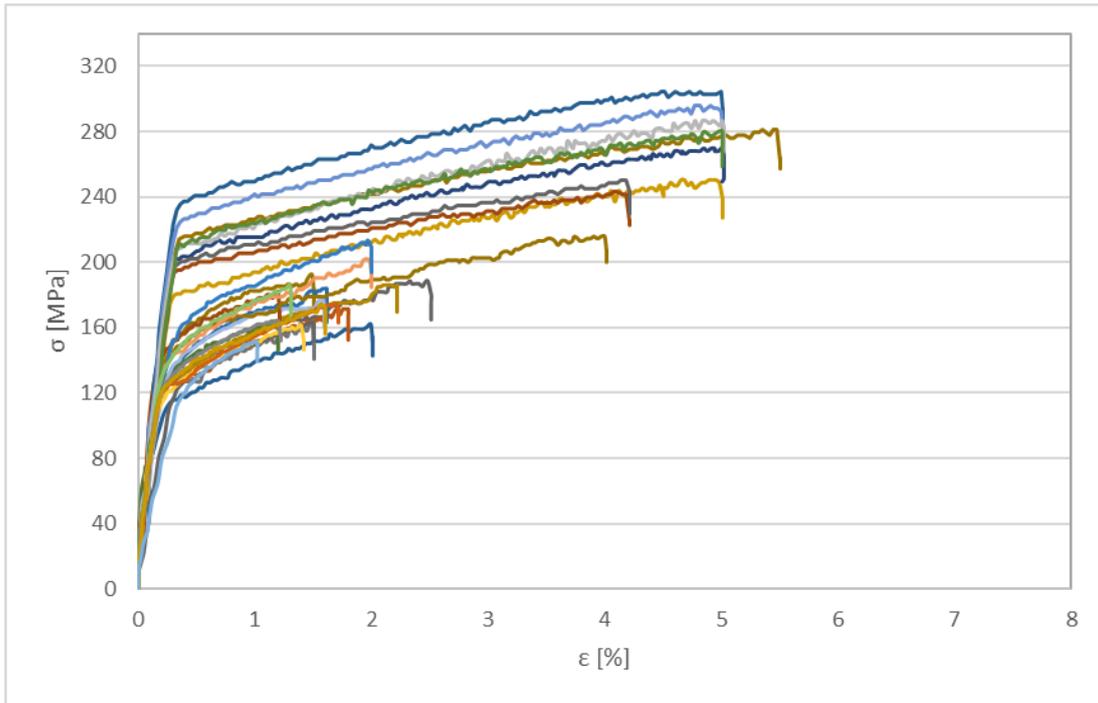


Figura 4.40: Curva tensione – deformazione per alcuni degli sbozzati analizzati.

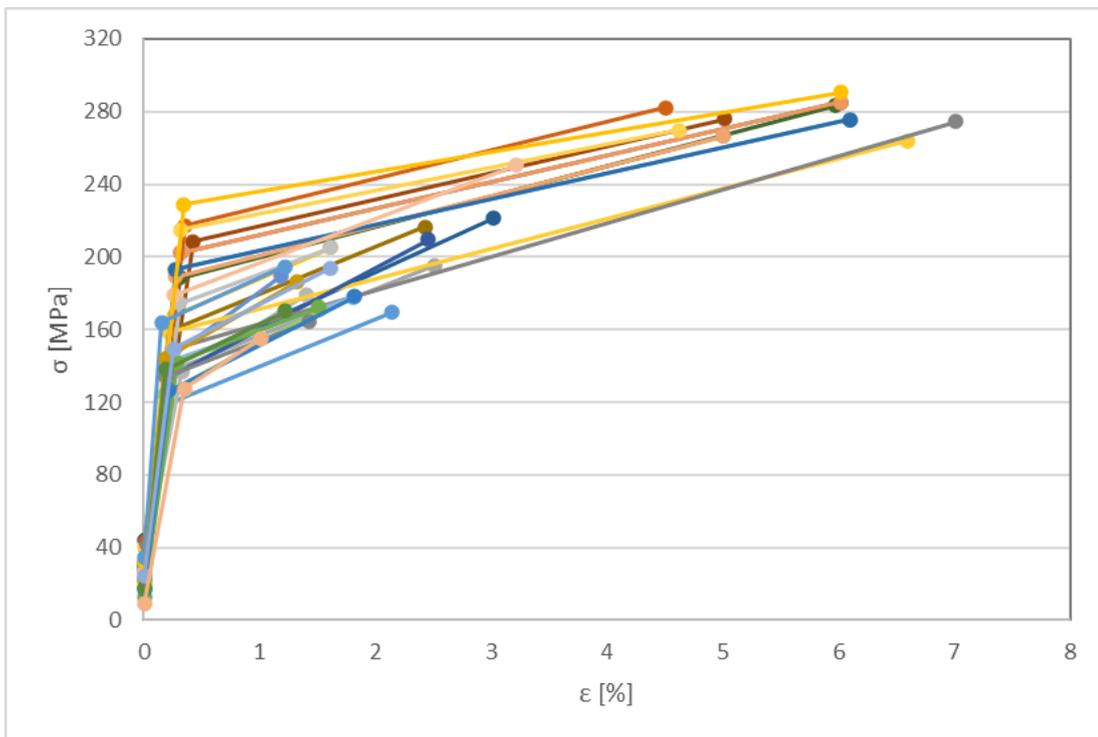


Figura 4.41: Curva tensione – deformazione semplificata per alcuni degli sbozzati analizzati.

I risultati sono mostrati in Figura 4.42 - 4.43, suddivisi in funzione del numero di stirature, che possono essere una o due: tutte le piastre in lega 5083 con spessore fino a 60 mm

vengono sottoposte ad una stiratura, mentre per le sole piastre fino ad uno spessore massimo di 17 mm è prevista anche una seconda stiratura (doppia stiratura). Questo considerando sempre una larghezza della piastra adeguata, la quale può variare tra 1050 e 3300 mm.

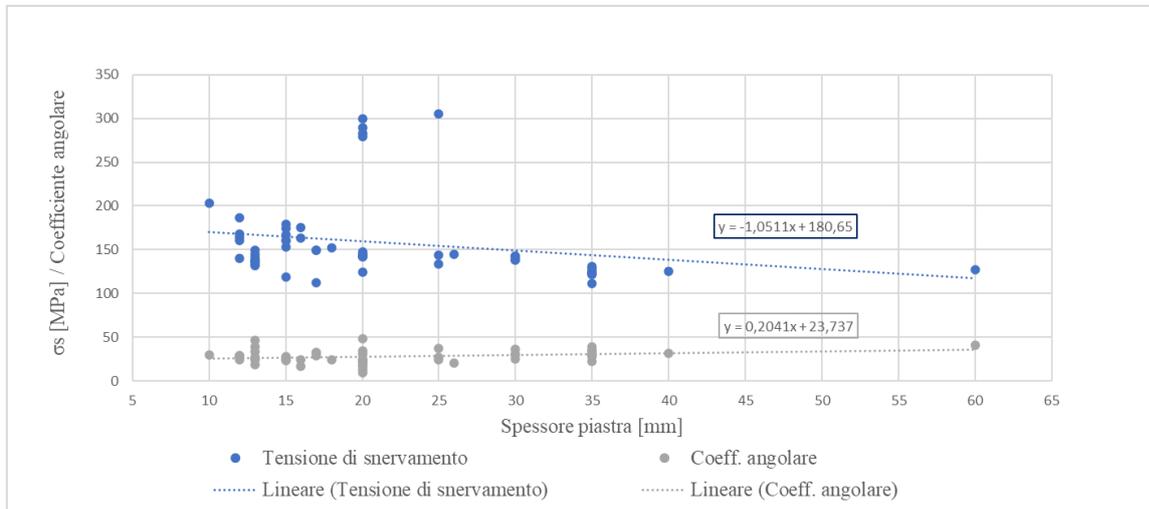


Figura 4.42: Prima stiratura lega 5083.

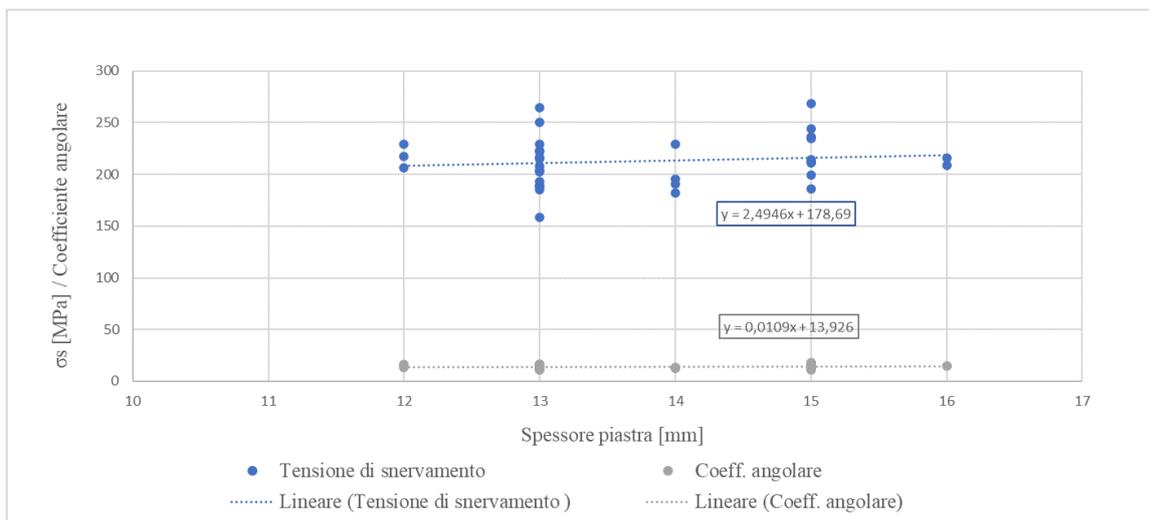


Figura 4.43: Seconda stiratura lega 5083.

Per quanto riguarda la prima stiratura, si osserva una significativa variazione della tensione di snervamento e del coefficiente angolare in funzione dello spessore. Al contrario, per la stiratura doppia, l'andamento di entrambi i parametri rimane costante al variare dello spessore.

I risultati della tensione di snervamento e del coefficiente angolare sono approssimati mediante equazioni, specifiche per prodotti in lega 5083, che descrivono le variazioni in funzione dello spessore. Queste equazioni sono impiegate per determinare la tensione massima in grado completare la stiratura del prodotto. La tensione massima (σ_{max}) è calcolata mediante l'equazione fondamentale della curva tensione - deformazione semplificata:

$$\sigma_{max} = \sigma_s + \alpha * \varepsilon \text{ [MPa]} \quad (6)$$

dove σ_s tensione di snervamento, α coefficiente angolare del tratto plastico e ε è la deformazione percentuale scelta per il prodotto. Data la formula del limite operativo della macchina:

$$\sigma_{max} = \frac{C}{A} = \frac{C}{W*s} \text{ [MPa]} \quad (7)$$

dove C è una costante di valore $e^{16,532583781}$ e A è l'area data da spessore e larghezza della piastra, si determinare la larghezza massima a cui si può processare il prodotto:

$$W_{max} = \frac{C}{\sigma_{max}*s} = \frac{C}{(\sigma_s + \alpha*\varepsilon)*s} \quad (8)$$

Le *Figure 4.44 – 4.45* mostra l'andamento della larghezza massima stirabile in funzione dello spessore. Questo è un grafico di notevole importanza per valutare la fattibilità del processo in diverse combinazioni dimensionali. La regione sotto la curva assicura la stiratura efficace dei prodotti in lega 5083, sottoposti a una o due stirature.

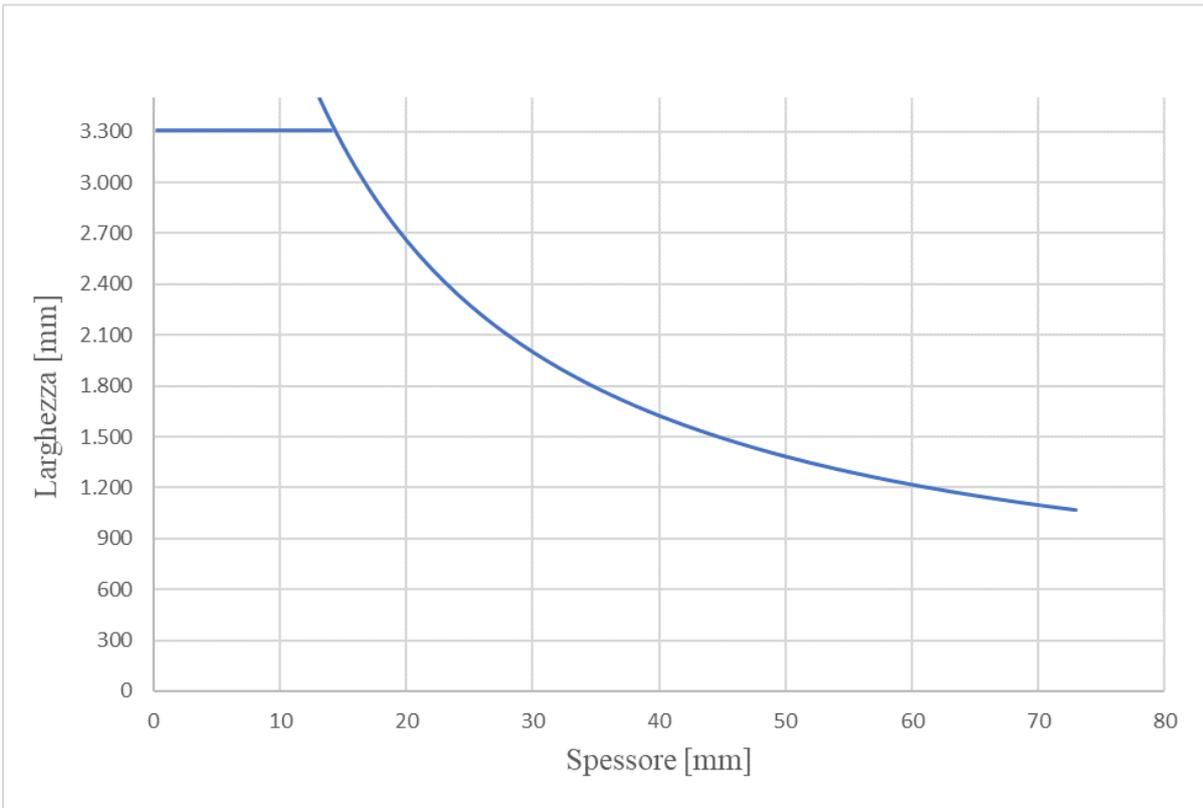


Figura 4.44: Prima stiratura: andamento della larghezza massima stirabile in funzione dello spessore.

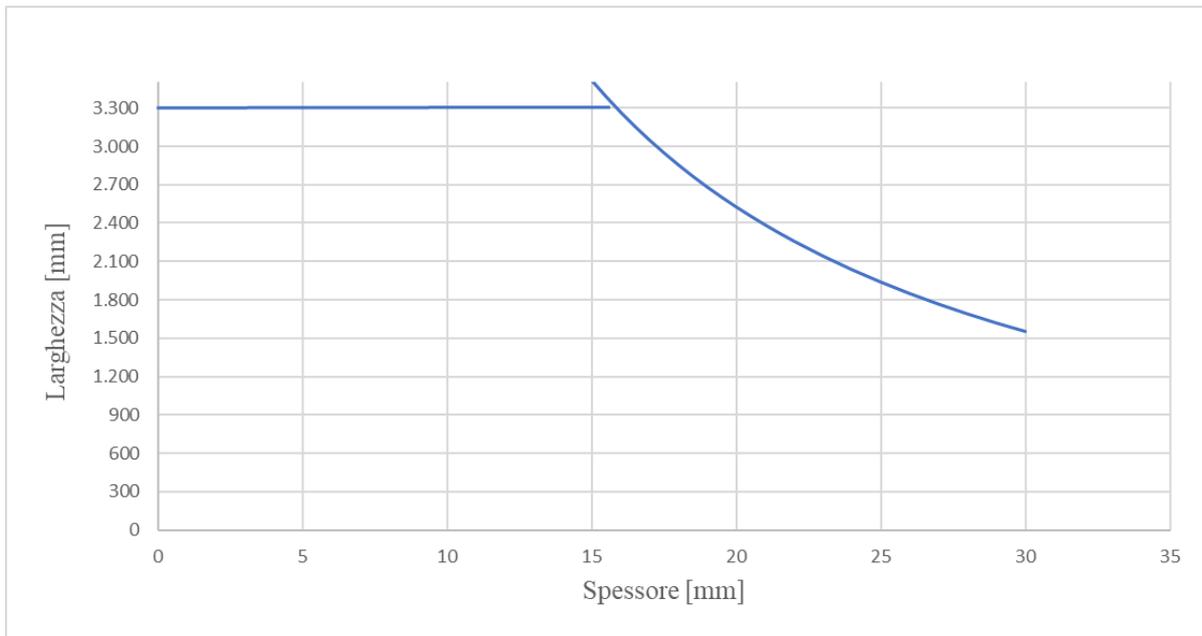


Figura 4.45: Seconda stiratura: andamento della larghezza massima stirabile in funzione dello spessore.

In Tabella 4.17 – 4.18 sono riassunti i risultati ottenuti.

Tabella 4.17: Prima stiratura, risultati ottenuti dalle equazioni da (6) a (8).

Spessore [mm]	Coeff. Angolare	σ_s [MPa]	σ_{max} [MPa]	A max [mm ²]	Wmax [mm]
8	25,37	172	223	67.880	8.485
9	25,57	171	222	68.076	7.564
10	25,78	170	222	68.274	6.827
11	25,98	169	221	68.472	6.225
12	26,19	168	220	68.672	5.723
13	26,39	167	220	68.873	5.298
14	26,59	166	219	69.075	4.934
15	26,80	165	218	69.278	4.619
16	27,00	164	218	69.483	4.343
17	27,21	163	217	69.688	4.099
18	27,41	162	217	69.895	3.883
19	27,61	161	216	70.103	3.690
20	27,82	160	215	70.313	3.516
21	28,02	159	215	70.523	3.358
22	28,23	158	214	70.735	3.215
23	28,43	156	213	70.948	3.085
24	28,64	155	213	71.163	2.965
25	28,84	154	212	71.379	2.855
26	29,04	153	211	71.596	2.754
27	29,25	152	211	71.814	2.660
28	29,45	151	210	72.034	2.573
29	29,66	150	209	72.255	2.492
30	29,86	149	209	72.477	2.416
31	30,06	148	208	72.701	2.345
32	30,27	147	208	72.926	2.279
33	30,47	146	207	73.153	2.217
34	30,68	145	206	73.381	2.158
35	30,88	144	206	73.610	2.103
36	31,08	143	205	73.841	2.051
37	31,29	142	204	74.074	2.002
38	31,49	141	204	74.307	1.955
39	31,70	140	203	74.543	1.911
40	31,90	139	202	74.779	1.869
41	32,11	138	202	75.018	1.830
42	32,31	137	201	75.258	1.792
43	32,51	135	200	75.499	1.756
44	32,72	134	200	75.742	1.721
45	32,92	133	199	75.986	1.689
46	33,13	132	199	76.232	1.657
47	33,33	131	198	76.480	1.627
48	33,53	130	197	76.729	1.599
49	33,74	129	197	76.980	1.571
50	33,94	128	196	77.233	1.545
51	34,15	127	195	77.487	1.519
52	34,35	126	195	77.743	1.495
53	34,55	125	194	78.000	1.472
54	34,76	124	193	78.259	1.449
55	34,96	123	193	78.520	1.428
56	35,17	122	192	78.783	1.407
57	35,37	121	191	79.048	1.387
58	35,57	120	191	79.314	1.367
59	35,78	119	190	79.582	1.349
60	35,98	118	190	79.852	1.331

Tabella 4.18: Seconda stiratura, risultati ottenuti dalle equazioni da (6) a (8).

Spessore [mm]	Coeff. angolare	σ_s [MPa]	σ_{max} [MPa]	A max [mm ²]	W _{max} [mm]
8	14,01	199	269	56.328	7.041
9	14,02	201	271	55.798	6.200
10	14,04	204	274	55.279	5.528
11	14,05	206	276	54.769	4.979
12	14,06	209	279	54.268	4.522
13	14,07	211	281	53.777	4.137
14	14,08	214	284	53.294	3.807
15	14,09	216	287	52.820	3.521
16	14,10	219	289	52.354	3.272
17	14,11	221	292	51.897	3.053
18	14,12	224	294	51.447	2.858
19	14,13	226	297	51.005	2.684
20	14,14	229	299	50.571	2.529

Conclusioni

L'analisi condotta ha permesso di caratterizzare il processo di stiratura delle piastre in lega di alluminio 5083. Come confermano i dati ottenuti, la stiratura è una lavorazione in grado di migliorare le caratteristiche meccaniche del materiale. Scopo del presente lavoro è dimostrare come tali caratteristiche vengano influenzate dalle diverse condizioni di processo e di illustrare come sia possibile prevedere il comportamento delle piastre sottoposte a tale lavorazione, considerando come parametri significativi lo spessore, larghezza e le caratteristiche meccaniche.

Nel presente studio è stato esaminato l'impatto del processo di stiratura su piastre da incrudimento lavorate per laminazione a caldo, con aggiunta di un ulteriore ciclo di stiratura oppure con trattamento termico di ricottura pre-stiratura. Le piastre analizzate, aventi uno spessore di 16 mm e 60 mm, sono state caratterizzate attraverso analisi metallografiche, prove di resistenza alla trazione e misurazioni di microdurezza. Il processo di stiratura è stato sottoposto a un'analisi dettagliata, e di seguito vengono presentati i principali risultati ottenuti:

- Dall'analisi metallografica emerge che su piastre in lega 5083 H111 il processo di stiratura ha un impatto significativo sulla morfologia della microstruttura vicino alla superficie della piastra: aumentando la deformazione al 2%, si osserva un cambiamento nel rapporto di aspetto (RA) dei grani cristallini, passando da 1,57 (piastra laminata a caldo) a 1,95, e successivamente a valori di 3,19 con deformazioni del 7%. La stiratura influenza la microstruttura in modo non uniforme lungo lo spessore della piastra, e al crescere della deformazione (fino al 7%) si registra un notevole aumento del rapporto di aspetto (RA) sulla superficie, con un incremento del 103%, mentre nella zona di mezzzeria tale incremento è del 42%. Il trattamento termico di ricottura ha un impatto quasi uniforme sulla microstruttura lungo lo spessore della piastra, misurando un RA di 1,64 in superficie e 2,79 in mezzzeria. Tale trattamento termico influenza in modo significativo la microstruttura nella zona di mezzzeria. Infatti, nella piastra deformata al 2% (non trattata termicamente) è stato misurato un RA in superficie di 1,95 e in mezzzeria di 5,42.

Confrontando i valori di RA per le due piastre (il cui processo di produzione si differenzia solo per il trattamento termico) si osserva che il RA in superficie della piastra non trattata termicamente (5083 H111) è superiore del 15% rispetto alla piastra ricotta (5083 O), mentre sulla mezzeria l'aumento di RA è del 48%.

La stiratura all'1% su spessori di 60 mm non influenza la morfologia del grano, di conseguenza le proprietà di durezza e resistenza a trazione non manifestano variazioni evidenti. La piastra in lega 5083 H111 con spessore 60 mm stirata all'1% mostra un RA in superficie di 2,35 e in mezzeria di 5,88, valori superiori a quelli ottenuti dalla piastra in lega 5083 H111 di spessore 16 mm dopo sola laminazione a caldo. Il formato iniziale della placca, il numero di passi di laminazione e le dimensioni finali del prodotto si confermano fattori determinanti per le caratteristiche microstrutturali del prodotto finale.

- Dall'analisi della resistenza a trazione emerge che la stiratura della piastra in lega 5083 H111 ha un impatto significativo sulla tensione di snervamento e sull'allungamento a rottura. Dopo la laminazione a caldo la piastra presenta una tensione di snervamento di 139 MPa, una tensione di rottura di 301 MPa e un allungamento a rottura del 25%. Applicando una deformazione del 2%, la tensione di snervamento aumenta a 189 MPa, registrando un incremento del 36%. La variazione della tensione di rottura è trascurabile, mentre l'allungamento a rottura si riduce al 22%. Con una deformazione del 7%, si osserva un notevole aumento della tensione di snervamento del 92%, passando da 139 MPa a 267 MPa. La tensione di rottura aumenta da 301 MPa a 320 MPa, registrando un incremento del 6%. Ciò comporta una diminuzione dell'allungamento a rottura al 17%. Le tre piastre in lega 5083 O dopo il trattamento termico di ricottura presentano una tensione di snervamento di 172 MPa, una tensione di rottura di 294 MPa e un allungamento a rottura del 22%. La lega 5083 H111 con stiratura al 2% mostra una maggiore resistenza rispetto alla lega 5083 O. Nonostante tale differenza, entrambe le leghe conservano una buona duttilità, come indicato dall'allungamento a rottura del 22%. La stiratura dell'1% su piastre di spessore 60 mm non mostra un impatto significativo sulla tensione di rottura e sull'allungamento. La tensione di rottura è di 294 MPa e l'allungamento a rottura 22%. Per quanto riguarda la tensione di snervamento, si passa da 140 MPa dopo laminazione a caldo a 162 MPa dopo stiratura, evidenziando un incremento del 16%.

- La deformazione subita dal materiale durante la stiratura della piastra in lega 5083 H111 ha determinato un aumento della durezza: dopo una stiratura del 2%, la durezza passa da 79 HV a 82 HV, misurando un incremento del 4% mentre con una deformazione del 7% raggiunge 87 HV, con incremento del 10%. Il trattamento termico influenza la durezza del materiale: il prodotto in lega 5083 O (spessore 17 mm) presenta una durezza media di 79 HV, inferiore rispetto alla piastra in lega 5083 H111, di pari spessore, con stiratura al 2%, la cui durezza misurata è di 82 HV. La stiratura del 1% sulla piastra di spessore 60 mm non ha modificato in modo significativo le proprietà di durezza. La durezza passa da 77 HV a 80 HV, mostrando un incremento del 4% di tali proprietà.
- Nel processo di stiratura le caratteristiche meccaniche e le dimensioni delle piastre (larghezza e spessore) giocano un ruolo cruciale per il successo della lavorazione. La piastra in lega 5083 H111 di spessore 60 mm e larghezza 1600 mm, stirata all'1%, è stata analizzata per valutare il comportamento della macchina Stiratrice. La pressione dei cilindri raggiunta è di 310 bar, prossima al limite di 315 bar definito dal manuale operativo. Attraverso l'analisi di processo dei dati sperimentali sono stati stimati una tensione di snervamento di 127 MPa, un coefficiente angolare del tratto plastico di 41,29 e una tensione massima di 155 MPa. È stato quindi dedotto un modello in grado di prevedere i risultati ottenuti dalla lavorazione. L'equazione derivata dalla curva tensione piastra – geometria piastra, ottenuta dalle elaborazioni sperimentali, ha permesso di calcolare una tensione massima di 157 MPa, in linea con la stima derivante dall'analisi di processo. La congruenza tra i risultati forniti dal modello e i risultati sperimentali suggerisce una buona capacità di previsione e comprensione del comportamento del materiale durante il processo di stiratura. Per confermare ulteriormente l'affidabilità del modello teorico nella predizione del comportamento del materiale sotto sforzo di trazione sono stati eseguiti test su provini prelevati da piastre in lega 5083 H111 con uno spessore di 16 mm, sottoposti a stiratura al 2%. Utilizzando la macchina di trazione Zwick Z100, tali provini hanno generato una curva tensione-deformazione con andamento simile a quello ottenuto nel processo di stiratura reale. I test di pre-stiro condotti in laboratorio hanno determinato una tensione di snervamento di 135 MPa e una tensione massima di 188 MPa. Con il modello sperimentale si ottiene una curva tensione-deformazione caratterizzata da una tensione di snervamento di 142 MPa, un coefficiente angolare di 25,62 e una tensione massima di 198 MPa, evidenziando una differenza del 5% tra i risultati ottenuti. La tensione massima

rappresenta lo sforzo massimo per cui si ottiene la stiratura completa della piastra o della provetta. Sono state esaminate le caratteristiche meccaniche di 90 sbozzati in varie condizioni operative, considerando sia uno, sia due cicli di stiratura e differenti spessori. È emerso che la tensione di snervamento e il coefficiente angolare del tratto plastico variano in funzione dello spessore. Il modello sviluppato è in grado di predire la tensione massima necessaria per portare a termine con successo la fase di stiratura. I risultati conseguiti sono specifici per la lega 5083 e, attraverso il diagramma larghezza-spessore, è possibile identificare le combinazioni ottimali dei due parametri per garantire l'efficacia del processo di stiratura delle piastre.

I risultati ottenuti lasciano spazio ad alcune riflessioni sulle proprietà meccaniche: l'analisi complessiva mette in evidenza l'importanza del numero di cicli di stiratura, poiché, a causa dei limiti operativi della macchina, le piastre con uno spessore di 60 mm non possono raggiungere caratteristiche meccaniche simili a quelle delle piastre con uno spessore di 16 mm sottoposte a un doppio ciclo di stiratura. Nei campioni prelevati secondo la normativa ASTM B557M, il processo di laminazione a caldo determina, per entrambi i prodotti, caratteristiche meccaniche comparabili in termini di resistenza alla trazione e durezza. Questo suggerisce che tutti i processi e trattamenti precedenti sono stati eseguiti correttamente per ciascun prodotto. La stiratura ha un impatto sulle proprietà di snervamento e durezza: la tensione di snervamento aumenta del 16% con una deformazione dell'1%, mentre con una deformazione del 2% aumenta del 36%. La variazione di durezza è del 5% con una deformazione dell'1% e del 4% con una deformazione del 2%. Di conseguenza, a basse percentuali di deformazione la microstruttura non mostra evidenti variazioni dal prodotto ottenuto da laminazione a caldo.

L'analisi del processo ha determinato uno strumento in grado di predire il comportamento delle piastre durante la stiratura. Per migliorare la precisione del modello, sarebbe opportuno considerare lo studio di un numero più ampio di prodotti al fine di perfezionare la capacità predittiva del modello stesso. In futuro, sarebbe vantaggioso estendere lo studio a leghe diverse da quella oggetto di indagine, al fine di approfondire la comprensione del comportamento del processo di stiratura.

Bibliografia

- [1] Franco Bonollo, “Leghe di alluminio”, Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali, Università degli studi di Padova – Sede di Vicenza (2020);
- [2] UNI EN 573-1, “Alluminio e leghe di alluminio – Composizione chimica e forma dei prodotti semilavorati – Parte 1: Sistema di designazione numerica”;
- [3] J.R. Davis, “Aluminum and Aluminum Alloys”, *ASM International*, pp351-416, (2001);
- [4] Marco. V. Boniardi, A. Casaroli, “L’alluminio e le sue leghe”, Dipartimento di meccanica, Politecnico di Milano, versione 4, (2013);
- [5] Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid, “Manufacturing Engineering and Technology”, 7th ed. SI Edition, *Pearson Education*, (2014);
- [6] UNI EN 573-3:2019 Alluminio e leghe di alluminio – Composizione chimica e forma dei prodotti semilavorati – Parte 3: Composizione chimica e forma dei prodotti;
- [7] UNI EN 515:2017, Alluminio e leghe di alluminio - Semilavorati - Designazione degli stati metallurgici;
- [8] EN 485-1, Alluminio e leghe di alluminio-lamiere, nastri e piastre- parte 1: condizioni tecniche per ispezione e consegna;
- [9] EN 485- 2, Alluminio e leghe di alluminio – lamiere, nastri e piastre – parte 2: proprietà meccaniche;
- [10] ASTM B557M-10, Standard test methods for tension testing wrought and cast aluminum – and magnesium – alloy products;