

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali
Corso di laurea in Ingegneria dell'Innovazione del Prodotto

Tesi di laurea

Applicazione della tecnologia PDT allo stampaggio di leghe di alluminio per settore automotive

Relatore

Ch. mo Prof. Franco Bonollo

Correlatrice

Ing. Marzia Zanesco

Laureando

Massimiliano Molin

Anno accademico 2019/2020

A chi rende questa vita un'incredibile avventura

Premessa

L'elaborato si propone di studiare, analizzare e approfondire il processo di laminazione con cilindri PDT (Pomini Digital Texturing) e non rettificati. L'esigenza nasce dalla necessità di fronte ad una sempre crescente richiesta di alluminio con lavorabilità maggiorata in campo automotive, al fine di ottenere componenti per i quali non siano necessari assemblaggi successivi, e quindi minimizzandone il peso, oggi fattore determinante nel mondo delle automobili.

La tecnologia in oggetto è abbastanza recente, e benché venga utilizzata anche da altri costruttori, in letteratura si trovano scarsi riferimenti sull'argomento dato che per ora è ancora patrimonio del know how aziendale.

Prendendo quindi come base di riferimento le specifiche fornite da FCA, riguardo ai laminati con cilindri PDT, si è proceduto attraverso prove reiterate di laminazione, affiancate da analisi in laboratorio, a testare il processo ed il prodotto.

Successivamente alle prime forniture di prova sarà necessaria l'approvazione da parte del cliente finale (FCA) per iniziare a realizzare il prodotto in modalità standard, con la prospettiva di poter soddisfare in futuro anche le richieste di altre case costruttrici oltre a FCA. I test sul processo/prodotto sono stati svolti per conto di Slim Fusina Rolling s.r.l., leader in Italia nella laminazione dell'alluminio, che ultimamente sta ampliando la propria quota nel mercato dell'automotive.

Indice

Introduzione	1
1. Slim Fusina Rolling	3
1.1 Storia	3
1.2 Impianto Fusina.....	5
a. Fonderia	5
b. Laminatoio	6
c. Leghe e prodotti.....	10
d. Certificazioni	15
2. Alluminio nel settore automotive.....	17
2.1 Caratteristiche principali alluminio.....	17
2.2 Storia	19
a. Telaio monoscocca	22
b. Telaio spaceframe.....	26
c. Telaio in alluminio e abitacolo separati.....	28
d. Approccio multi-materiale.....	30
2.3 Leghe già utilizzate e in quali componenti.....	33
2.4 Possibili applicazioni future	37
3. Tecnologia PDT	39
3.1 Laminazione	41
a. Struttura laminatoio	42
b. Teoria della laminazione.....	44
3.2 Descrizione e caratteristiche tecnologia PDT	46
a. Electric Discharge Texturing (EDT)	46
b. Pomini Digital Texturing (PDT).....	50
c. Tipologia e applicazione lubrificante	53

d. Capitolato FCA.....	56
4. Realizzazione prodotto innovativo	59
4.1 Prove in modalità <i>Skin Pass</i> con cilindri rettificati	60
4.2 Realizzazione cilindri di lavoro con finitura PDT	61
4.3 Prove di laminazione PDT con differenti riduzioni	64
4.4 Prova di laminazione PDT su nastro in lega 6082 T4.....	67
4.5 Prova di laminazione PDT su nastro in lega 6181 O (2,5 mm)	71
4.6 Prova di laminazione PDT su nastri in lega 6181 T4 (4,26 mm e 3,8 mm).....	72
5. Conclusioni	77
Appendice A: processi produttivi alluminio	79
Idroformatura	79
Appendice B: scheda tecnica ANTICORIT PL 39 SX.....	81
Appendice C: parametri rugosità	83
Rugosità media (Ra)	83
Numero di picchi nell'unità di lunghezza (RPc).....	83
Appendice D: laminazione a freddo in modalità <i>skin pass</i> – Report Slim Fusina Rolling	85
Appendice E: prove con differenti riduzioni – Analisi rugosità Pomini Tenova	89
Appendice F: prova su nastro intero scarto – Report Slim Fusina Rolling	97
Appendice G: prova di laminazione PDT su nastri in lega 6181 T4 (4,26 mm e 3,8 mm) – Report IBK.....	103
Appendice H: composizione delle leghe utilizzate nelle prove	107
EN AW-5754	107
EN AW-6181	107
EN AW-6082	107
Riferimenti	109

Lista delle immagini

Figura 1.1 - Logo Slim Fusina Rolling	3
Figura 1.2 - Logo Lavorazione Leghe Leggere	3
Figura 1.3 - Logo Alumix	4
Figura 1.4 - Logo ALCOA.....	4
Figura 1.5 - Cicli prodotti interni Slim Fusina Rolling.....	5
Figura 1.6 - Fresa	6
Figura 1.7 - Sbozzatore	8
Figura 1.8 – Finitore IBK.....	9
Figura 2.1 - Reticolo CFC.....	17
Figura 2.2 – Schema di sviluppo delle leghe di alluminio.....	18
Figura 2.3 - Processo Bayer per passare da Bauxite ad Allumina, [1]	18
Figura 2.4 - Bugatti Type 10, 1908 [3]	19
Figura 2.5 - Pierce Arrow 48B Touring, 1917[4]	20
Figura 2.6 - Panhard Dyna Z1, 1953 [5].....	21
Figura 2.7 - Aluminium Special guidata da Mickey Thompson, 1963 [6].....	21
Figura 2.8 - Porsche 928, 1981 [7]	22
Figura 2.9 - Honda Acura NSX, 1989 [8].....	23
Figura 2.10 - Jaguar XJ (X350), 2003-2009 [8]	24
Figura 2.11 - Jaguar XJ (X351), 2009 [8].....	24
Figura 2.12 - Materiali utilizzati da X350 a X351 [8]	25
Figura 2.13 - Range Rover (L405), dettaglio laterale abitacolo, 2012 [8].....	25
Figura 2.14 - Audi A8 spaceframe, 1994 [8].....	26
Figura 2.15 - Audi A2, 1999 [8]	27
Figura 2.16 - B-pillar, A2 (sx), A8 (dx).....	27
Figura 2.17 - Lotus Elise, 1996 [8].....	28
Figura 2.18 - Lotus Evora telaio, 2009 [8].....	28
Figura 2.19 - Chevrolet Corvette Z06, 2006 [8]	29
Figura 2.20 - BMW LifeDrive Concept, modelli i3 e i8 [8].....	30
Figura 2.21 - Audi TT, 2006 [8]	31
Figura 2.22 - Utilizzo alluminio in base ai volumi	31
Figura 2.23 - Audi A6.....	32

Figura 2.24 - Utilizzo finale alluminio in Europa, 2008.....	33
Figura 2.25 - Utilizzo alluminio da colata o da deformazione plastica	34
Figura 2.26 - Contenuto di alluminio in base alla casa automobilistica, 2012	34
Figura 2.27 - Ferrari 548 Italia, telaio reticolare [8].....	36
Figura 2.28 - Andamento utilizzo alluminio nei veicoli europei, dettaglio per veicoli elettrici [10].....	37
Figura 3.1 – Imbutitura [13].....	39
Figura 3.2 - Esempio stampo per imbutitura poco profonda [14].....	39
Figura 3.3 - Prodotti di laminazione	41
Figura 3.4 - Laminazione a caldo [15].....	42
Figura 3.5 - Schema costruttivo azionamento cilindri	42
Figura 3.6 - Gabbia di laminazione.....	43
Figura 3.7 - Schematizzazione processo di laminazione [15].....	44
Figura 3.8 - Logo Pomini Tenova.....	46
Figura 3.9 – Schema funzionamento EDM.....	47
Figura 3.10 – Schema funzionamento EDT.....	48
Figura 3.11 - Superficie ottenuta con EDT.....	49
Figura 3.12 - Macchinario Digital Texturing.....	50
Figura 3.13 - Schematizzazione processo PDT [17].....	51
Figura 3.14 – Laser durante la lavorazione PDT	51
Figura 3.15 - Range Ra e RPc ottenibile con PDT [17].....	52
Figura 3.16 - Digital Simulation vs Roll Texture [17].....	52
Figura 3.17 – Differenze tra lubrificanti a base acquosa o meno	54
Figura 3.18 - Oleatrice Ravarini Castoldi & C. S. R. L.....	55
Figura 3.19 - Codifica FCA	56
Figura 3.20 - Range Ra e RPc.....	57
Figura 4.1 - Flow chart delle prove di laminazione svolte	59
Figura 4.2 - Differenti texture PDT vs Mill finish.....	62
Figura 4.3 - Cilindro con finitura PDT	63
Figura 4.4 - Micrografia superficie cilindro PDT	63
Figura 4.5 - Superficie con riduzione 5,7%.....	65
Figura 4.6 - Micrografia superficie PDT, parte iniziale nastro.....	68
Figura 4.7- Micrografia superficie PDT, parte finale nastro	68
Figura 4.8 - Bilancia analitica.....	69

Figura 4.9 - Condizione che ha portato a rottura del nastro.....	71
Figura 4.10 - Confronto piegatura Mill finish vs PDT	73
Figura 4.11 - Campione Mill Finish dopo punzonatura.....	74
Figura 4.12 - Campione PDT con cera dopo punzonatura.....	74
Figura 4.13 - Confronto Mill Finish vs PDT con e senza cera	75
Figura 4.14 - Campione PDT senza cera dopo punzonatura	75

Lista delle tabelle

Tabella 1.1 - Leghe principali e relative applicazioni.....	11
Tabella 3.1 - Gabbia di laminazione: componenti	43
Tabella 4.1 - Ra e RPc dei cilindri di lavoro.....	63
Tabella 4.2 - Rugosità cilindri	65

Introduzione

Slim Fusina Rolling è una azienda che si occupa di laminazione dell'alluminio dai primi anni '60. Azienda leader in Italia, è da sempre attenta alle novità del mercato, soprattutto in ambito automotive.

Nella sede di Fusina vengono prodotti esclusivamente semilavorati: nastri, piastre e lamiera. Conseguentemente alla richiesta da parte di un cliente di lamiera con finitura superficiale che migliorasse il successivo stampaggio del materiale, si è realizzato come quello specifico ramo di mercato non fosse coperto.

Per implementare lo stampaggio di lamiera, che generalmente vengono lavorate con cilindri rettificati, può essere applicata una cera sulla superficie, così da garantire maggiore scorrimento tra lamiera e stampo. Affinché sia garantita maggiore adesione della cera alle superfici si utilizzano finiture superficiali differenti da quelle rettificate, come quella ottenuta attraverso EDT (Electric Discharge Texturing), successivamente perfezionata dalla tecnologia PDT (Pomini Digital Texturing).

La superficie che si ottiene sui cilindri di lavoro, è caratterizzata da crateri di dimensione micrometrica, senza un ordine particolare (stocastica). L'applicazione della cera avviene per via elettrostatica, previa nebulizzazione, in modo da favorire le lavorazioni successive come l'imbutitura o lo stampaggio, riducendo l'attrito tra materiale e attrezzatura. Infatti i crateri aiutano a trattenere la cera, mentre con superficie rettificata ne viene favorito lo scivolamento.

Le varie prove di laminazione con cilindri PDT sono servite a definire le riduzioni da applicare al materiale per ottenere una superficie totalmente priva delle classiche creste di rettifica e verificare i limiti di lavorabilità della macchina. In particolare la prima prova è stata fatta con cilindri rettificati per definire la modalità di laminazione in *skin pass*, in modo da ottenere una riduzione minima senza incorrere in ulteriori problematiche (vibrazioni ad esempio). Dopo che i cilindri sono stati lavorati presso Pomini Tenova con tecnologia PDT (Pomini digital texturing, miglioramento della tecnologia EDT), è stata effettuata una prova di laminazione su una porzione di nastro e successivamente su un nastro intero. L'obiettivo era di verificare se fossero stati rispettati i vincoli previsti dal capitolato del cliente finale

1. Slim Fusina Rolling



Figura 1.1 - Logo Slim Fusina Rolling

È necessario contestualizzare lo studio in questione: viene descritta la realtà aziendale con il relativo background tecnologico e storico, per cogliere eventuali problematiche riscontrate durante lo sviluppo del progetto o l'importanza di certi dettagli. Si cercherà prima di disegnare una panoramica riguardante la storia di Slim Fusina Rolling, passando poi ad analizzare le tecnologie utilizzate e cosa viene generalmente prodotto.

1.1 Storia

Lo stabilimento di Fusina è situato nel polo industriale di Porto Marghera, che fin dal 1917 è un punto di riferimento a livello nazionale, oltre che per il petrolchimico anche per la produzione di energia elettrica (Centrale Andrea Palladio a Fusina) e il settore metallurgico. In quest'ultimo ambito l'alluminio la faceva da padrone fin dagli anni 1927-1929. L'impianto che attualmente è Slim Fusina Rolling è stato costruito nel 1964, quando è stato creato un reparto per la laminazione e un impianto per la produzione dell'alluminio



Figura 1.2 - Logo Lavorazione Leghe Leggere

attraverso elettrolisi, e quindi era in grado di produrre alluminio primario. Il laminatoio fu costruito da Lavorazione Leghe Leggere S. p. A (LLL) mentre la fonderia era di proprietà

della Montedison S. p. A. Nel corso della storia a Fusina ci sono stati vari cambi di proprietà (LLL, SAVA, Alumix e Alcoa) fino all'acquisizione nel 2017 da parte del gruppo Slim Aluminium.

LLL era una azienda nata per la produzione di componenti principalmente a utilizzo bellico, tanto che sulle spalle delle gabbie dei laminatoi negli anni '60 erano ancora visibili i fori dell'artiglieria della seconda guerra mondiale. Infatti le gabbie dei laminatoi erano quelle utilizzate negli stabilimenti di Marghera fin dagli anni '30.

Dal 1973 al 1988 la proprietà dell'impianto era nelle mani di SAVA (Società Alluminio Veneto Anonima), che aveva una forte compartecipazione statale (EFIM).



Figura 1.3 - Logo Alumix

EFIM mantiene l'impianto anche dal 1988, assorbendolo con l'azienda caposettore nella produzione di Alluminio, cioè Alumix, sempre a gestione in parte aziendale.



Figura 1.4 - Logo ALCOA

In seguito alle difficoltà economiche che necessitavano un sempre più ingente contributo statale, nel 1996 lo stabilimento di Fusina è stato rilevato da Alcoa (Aluminium Company of America), leader mondiale nella produzione di alluminio. Alcoa nasce addirittura da Charles Martin Hall, colui che ha per primo prodotto Alluminio attraverso elettrolisi, in contemporanea con Héroult, nel 1888. Nel 2010 è stata chiusa la produzione di alluminio primario attraverso elettrolisi, procedimento molto dispendioso soprattutto dal punto di vista energetico che ne ha determinato le sorti.

Nel 2017 c'è stata la vendita dello stabilimento di Fusina al gruppo Slim Aluminium. Slim Aluminium è composta anche da altri due stabilimenti: Cisterna di Latina, soprattutto produzione di foil (nastri di alluminio con spessore inferiore al millimetro) in un impianto acquistato da Hydro, e Merseburg in Germania, specializzato nella produzione di packaging in alluminio.

1.2 Impianto Fusina

L'impianto di Fusina si suddivide principalmente in due reparti: fonderia e laminatoio.

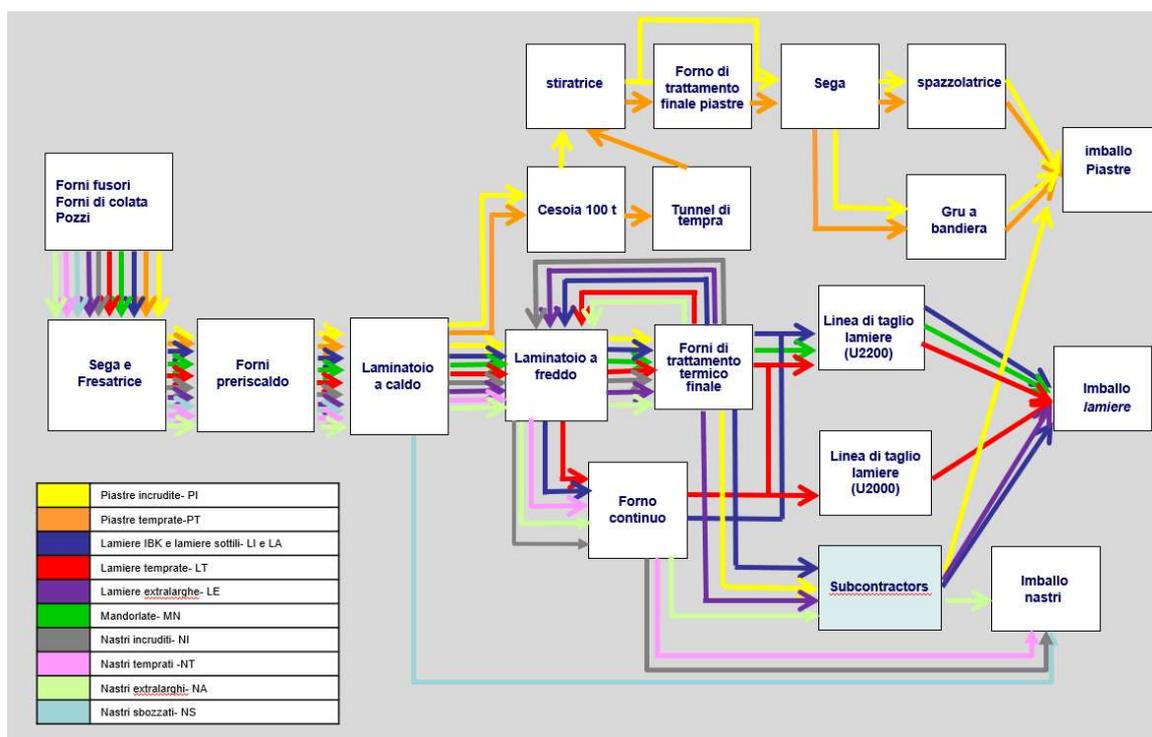


Figura 1.5 - Cicli prodotti interni Slim Fusina Rolling

Le tre principali famiglie di prodotti sviluppate nello stabilimento di Fusina sono:

- Piastre: spessore > 8 mm
- Lamiere: spessore < 8 mm
- Nastri interi

a. Fonderia

Nella fonderia vengono prodotte placche, del peso massimo di 15 tonnellate, attraverso l'utilizzo di alluminio ad elevata purezza (prime), alluminio con elevato grado di purezza, e materiale riciclato, in colata semicontinua. Dal 2010 non viene più prodotto alluminio attraverso il processo elettrolitico. La fonderia si compone di 4 forni di colata, 2 pozzi di colata, 2 presse per scorie e 1 sega placche. Alla parte produttiva è affiancato un laboratorio

analisi, costituito da 2 quantometri, che permette di verificare se i valori delle leghe prodotte rispettano i vincoli normativi, e quindi certificano il materiale. Nei forni di rifusione viene inserito l'alluminio proveniente da riciclo e quello ad alto grado di purezza, quindi si fanno aggiunte in base alla lega che si vuole ottenere, e si va a colare nei pozzi di colata, dove vengono inserite le matrici che permettono di ottenere vari formati di placca, cambiando le dimensioni della sezione e la lunghezza della placca.

b. Laminatoio

Il laminatoio, in particolare nella parte di laminazione a freddo, costituisce il cuore di questo elaborato, per cui verrà analizzato con maggior dettaglio. Il prodotto iniziale sono



Figura 1.6 - Fresa

le placche provenienti da fonderia o acquistate da terzi, che in ogni caso si presentano con lo strato corticale, sulla superficie, che deve essere rimosso. La prima lavorazione prevede quindi la fresatura di 10-20 mm delle placche sulle facce laterali, superiore e inferiore. Il truciolo che si crea durante questa lavorazione viene aspirato e compactato per essere rivenduto.

Una volta fresate, le placche devono essere portate a temperatura per eseguire la laminazione a caldo, subiscono quindi la fase di preriscaldamento, durante la quale il materiale viene omogeneizzato. Il preriscaldamento avviene in due tipologie di forno:

- Forni a pozzo: la placca viene inserita verticalmente nella camera, con imbocco dall'alto. La capacità massima è di 5 placche per pozzo.
- Forno a passaggio: le placche vengono fatte passare attraverso il forno, appoggiate su un lato lungo laterale. Ogni volta che se ne inserisce una ne esce un'altra.

Il trattamento di preriscaldamento è molto lungo, infatti in base alla lega può durare dalle 12 alle 24 ore, e mantenimento di una temperatura che varia dai 450°C fino a 600°C a seconda della lega.

Le placche vengono quindi trasferite alla laminazione a caldo, che, conferendo una prima deformazione al materiale più grossolana, viene chiamata sbazzatura. È svolta in un laminatoio quarto reversibile: due cilindri di lavoro (diametro 940 mm) e due di sostegno (diametro 1420 mm). Attraverso passate successive sotto i cilindri di lavoro lo spessore viene ridotto con limite inferiore dato dalla lunghezza della via rulli di 175 metri. Nella via rulli sono presenti delle docce di tempra che permettono di temprare i prodotti piastre di leghe che devono subire un trattamento termico (2xxx e 6xxx), precedute da una cesoia da 100 tonnellate, che serve per tagliare lo sbazzato alla lunghezza desiderata. A monte vi è un laminatoio verticale che viene utilizzato per allargare e contenere le placche così da arrivare a larghezze personalizzate e ridurre i difetti sui bordi come sdoppiature e frastagliature, e una cesoia da 800 tonnellate che permette di scattivare le estremità dello sbazzato.

Durante la laminazione a caldo i cilindri vengono lubrificati attraverso l'utilizzo di una emulsione, acqua demineralizzata e olio, questo per evitare che per il calore, generato dalle forze d'attrito, si deformino i cilindri di lavoro.



Figura 1.7 - Sbozzatore

In parallelo allo sbozzatore vi è la stiratrice: serve sia per imprimere una percentuale di incrudimento ai prodotti piastre, che per migliorare la planarità. È costituita da una testa fissa e una mobile, e il materiale viene fissato attraverso morse alle due teste per poi essere stirato.

Per i prodotti che non sono piastre è prevista anche la laminazione a freddo, che viene svolta in un altro laminatoio quarto, questa volta irreversibile, munito di doppio aspo (ingresso e uscita, mentre lo sbozzatore ha l'aspo soltanto in uscita). In questa parte dell'impianto si ottengono gli spessori finali dei prodotti lamiere e nastri, fino a 1 mm di spessore minimo. Anche in questo caso i cilindri di lavoro devono essere lubrificati, ma viene utilizzata una miscela, costituita principalmente da cherosene, che serve per limitare la deformazione termica dei cilindri di lavoro. Oltre alla laminazione è possibile effettuare la bordatura del nastro: subito dopo i cilindri di lavoro infatti vi è la bordatrice che permette di rimuovere

fino a 6 centimetri di materiale per lato, così da ottenere larghezze richieste o semplicemente eliminare difetti sui bordi. Può operare per spessori da 3,5 mm fino a 6,35 mm.

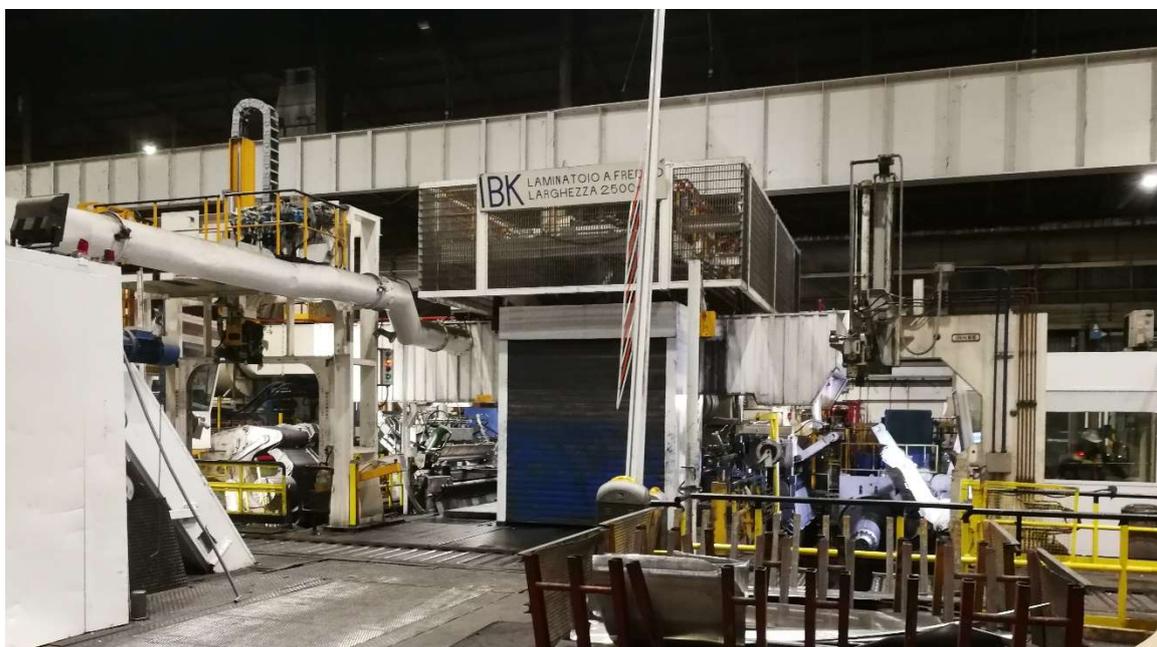


Figura 1.8 – Finitore IBK

I nastri in uscita dalla laminazione a freddo, svolta nell’impianto del finitore, possono subire un trattamento termico per ottenere determinati stati fisici richiesti dal cliente finale. In genere è sempre prevista una ricottura, che può essere parziale o finale e viene eseguita in forni a camera in cui vengono inseriti i nastri con carrelli dedicati e utilizzano azoto durante il trattamento. Oltre ai forni a camera vi è un forno continuo che serve per effettuare un trattamento di tempra sui nastri in lega 2xxx e 6xxx. Il forno continuo è costituito da una prima serie di rulli e un accumulatore in ingresso, che serve per fare da magazzino al materiale e permette di mantenere una velocità costante all’interno del forno. Oltre l’accumulatore inizia il forno vero e proprio che è costituito da 3 zone a temperature crescenti (dai 520°C ai 560°C) seguite dalla zona di rapido raffreddamento, nella quale si può utilizzare acqua oppure acqua e aria compressa. In uscita si ha un secondo accumulatore e quindi si riavvolge il nastro.

Altra tipologia di trattamento termico che si può svolgere all’interno di questo stabilimento è l’invecchiamento artificiale: viene effettuato nel forno EFCO, nel quale si lavora con atmosfera controllata. Il materiale che subisce questo trattamento ha lo stato fisico T6.

La fine del ciclo produttivo è costituita dal taglio del materiale: vi sono due linee di taglio in parallelo (Ungherer 2200 e Ungherer 2000), che possono trattare materiale rispettivamente fino a 2300 mm e 2100 mm di larghezza. Il funzionamento è analogo per queste due macchine: il nastro viene svolto lungo la linea e passa attraverso una spianatrice, che con snervamenti ripetuti del materiale va a migliorarne la planarità, e quindi con una cesoia volante si ottiene la lunghezza finita per i prodotti lamiere.

Per larghezze superiori ai 2300 mm, le così dette lamiere extralarghe, il taglio viene eseguito esternamente all'impianto, così come se si vuole slittare un nastro, ovvero creare dei nastri con larghezza molto ridotta (fino a 70 mm) da un nastro a larghezza standard.

Per quanto riguarda invece il taglio a lunghezza finita dei prodotti piastre si utilizzano due seghe, una con lama a nastro e una con lama circolare, che possono essere utilizzate anche per modificare la larghezza del prodotto.

c. Leghe e prodotti

La caratteristica principale dell'alluminio è la leggerezza: $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$, circa un terzo di quella dell'acciaio. Questo permetterebbe in via teorica una riduzione delle masse in ambito progettuale. Tuttavia l'alluminio puro ha caratteristiche meccaniche scarse, per cui in genere si adatta alle varie esigenze attraverso le leghe, ovvero aggiungendo piccole quantità di altri materiali per incrementare determinate caratteristiche, senza avere perdite di duttilità sostanziali. Alta conducibilità termica ed elettrica sono due caratteristiche dell'alluminio che ne hanno aiutato la diffusione, dato che la maggior parte delle linee di trasmissione di potenza elettrica sono in alluminio. Oltre a questo si contraddistingue per essere impermeabile e inodore ma soprattutto può essere riciclato senza perdere le caratteristiche. Nello stabilimento di Fusina la produzione è finalizzata a soddisfare parte del mercato dell'alluminio e non la sua totalità, in particolare il settore nautico, automotive e uso generico. Di seguito vengono riportate le leghe che vengono prodotte a Fusina, con un breve accenno alle caratteristiche che vanno a ottimizzare.

Tabella 1.1 - Leghe principali e relative applicazioni

Lega	Proprietà principali	Applicazioni principali
1050	Ottima resistenza alla corrosione Elevata deformabilità Conducibilità termica ed elettrica Alto potere riflettente Particolare attitudine all'ossidazione anodica	Pentolame e utensileria domestica Apparecchiature per industria chimica e farmaceutica Coperture e rivestimenti in edifici civili ed industriali Conduttori elettrici e sbarre di connessione per centrali e sottostazioni Pannelli anodizzati Riflettori
2017A	Ottima resistenza alla corrosione Ottima conducibilità termica ed elettrica	Prodotti per torneria Strutture per aeronautica Stampi per materie plastiche
3003	Buona resistenza alla corrosione Ottima resistenza meccanica Attitudine all'ossidazione anodica	Semilavorati per l'industria alimentare
3103 3105	Elevata resistenza alla corrosione Ottima saldabilità Buona resistenza meccanica	Apparecchiature per industria alimentare e chimica Coperture e rivestimenti per edifici civili ed industriali Contenitori alimentari
5005	Elevata resistenza alla corrosione Buone caratteristiche meccaniche	Apparecchiature per industria alimentare e chimica Utensileria domestica

	Elevata plasticità ed attitudine particolare alla sagomatura	
5251 5052	Elevata resistenza alla corrosione Buone caratteristiche meccaniche Elevata plasticità Attitudine particolare alla imbutitura Buona saldabilità	Tubi per irrigazione Antenne Sostegni per illuminazione Mobili metallici Particolari imbutiti Imbarcazioni da diporto Parti di carrozze ferroviarie passeggeri e merci Paratie, strutture idrauliche e di depurazione
5083	Elevate caratteristiche meccaniche Buona resistenza alla corrosione Buona saldabilità	Recipienti a pressione Industria dei trasporti Costruzioni idrauliche Costruzioni navali Piastre balistiche
5086	Elevata resistenza meccanica Elevata resistenza alla corrosione in ambiente marino Buona saldabilità	Costruzioni navali, recipienti, serbatoi Paratoie di depurazione e strutture idrauliche Uso tipico per lamiere mandorlate
5182 RTSG1	Versione migliorata della lega 5182 sviluppata da ALCOA, buona resistenza meccanica e duttilità, ottimo comportamento in caso d'urto	Cisterne per il trasporto di merci pericolose in accordo ai requisiti delle norme ADR (Accordo europeo sul trasporto stradale di merci pericolose)

<p>5456 H34 ENDURAL</p>	<p>Ottima resistenza meccanica ed elevata durezza Resistenza a corrosione Saldabilità</p>	<p>Cassoni Pianali di camion</p>
<p>5754</p>	<p>Buona resistenza meccanica allo stato ricotto Alta resistenza alla corrosione anche all'acqua di mare Buona imbutibilità e saldabilità</p>	<p>Imbarcazioni Lamiere antisdrucchiolo mandorlate per carrozzerie e costruzioni navali Elementi di veicoli di media sollecitazione Tubi elettrosaldati</p>
<p>6016 6181</p>	<p>Alta resistenza meccanica Buon rapporto resistenza/formabilità Buona colabilità e saldabilità Ottimo rapporto resistenza/leggerezza</p>	<p>Automotive</p>
<p>6061</p>	<p>Buona formabilità Elevata resistenza meccanica Buona resistenza alla corrosione</p>	<p>Applicazioni strutturali che richiedono buona resistenza alla corrosione Serbatoi e containers aviotrasportati Pareti mobili per carri ferroviari Segnaletica stradale Imbarcazioni leggere</p>
<p>6082</p>	<p>Analoghe alla lega 6061</p>	<p>Parti fortemente sollecitate di carrozzerie e mezzi di trasporto Strutture portanti dove occorra elevata resistenza alla corrosione Lamiere goffrate Tubi elettrosaldati</p>

7020	Resistenza elevata allo stato T6 Buona saldabilità Lega autotemprante	Costruzioni saldate molto sollecitate Piastre balistiche
-------------	---	---

Tutte queste leghe possono essere prodotte principalmente sotto forma di lamiere, piastre e nastri interi:

- **Lamiere:** costituiscono la fetta principale di mercato, e sono disponibili in molte varietà. Hanno dimensioni che vanno dai 1000 mm ai 2560 mm di larghezza, mentre per la lunghezza possono variare da 1000 mm a 12000 mm. Gli spessori invece possono essere da 1 mm a 8 mm. Oltre i 2300 mm di larghezza oppure i 9000 mm di lunghezza le lamiere vengono portate a misura finita presso terzisti che hanno impianti con capacità adeguate. Varietà importante di lamiera è quella gofrata, che può essere a 1, 2 o 5 mandorle, che viene utilizzata per applicazioni antiscivolo ad esempio in ambito navale o pianali per autotrasporti. Attraverso apposito collaudo visivo ne viene verificata la qualità durante il taglio o di ritorno dai terzisti.
- **Piastre:** vengono considerate tali con spessore superiore a 8 mm, e in genere vengono prodotte fino a 50 mm di spessore. Per quanto riguarda le lunghezze si va da 2000 mm fino a 12000 mm, mentre le larghezze sono più ampie rispetto a quanto si può ottenere con le lamiere, dato che la tavola dello sbozzatore è larga 3000 mm mentre quella del finitore è di 2620 mm. Le piastre possono uscire dalla laminazione a caldo con lunghezze multiple di quella finita perché si porterà a lunghezza finita utilizzando le seghe. Se il cliente lo richiede è possibile spazzolare il materiale, così da ottenere una finitura superficiale leggermente aumentata.
- **Nastri interi:** possono essere prodotti sia direttamente da laminazione a caldo che dopo laminazione a freddo. Le misure in larghezza e spessore sono le stesse delle lamiere. Si possono ottenere anche larghezze inferiori al metro attraverso lo slittaggio presso terzisti, che consente di svolgere il nastro, dividerlo in nastri a larghezza personalizzata, e quindi riavvolgere questi nastri più stretti. L'operazione di slittaggio viene svolta presso l'azienda Alluminio di Qualità, e lo stesso impianto è necessario per delle fasi che verranno spiegate in questo elaborato.

La capacità produttiva annua dell'impianto è di circa 75000 tonnellate di materiale.

d. Certificazioni

L'azienda nel suo complesso, e quindi laminatoio e fonderia, è certificata secondo le correnti normative ISO 9001 e IATF 16949, che riconoscono la qualità del sito.

Per quanto riguarda invece la certificazione dei prodotti in generale vengono seguite le seguenti normative:

- Normative europee EN (ad esempio EN 485 o EN 573)
- Normative americane ASTM o ASME

Inoltre attraverso vari controlli e prove di laboratorio, possono essere garantite le certificazioni emesse dalle seguenti società di classifica:

- Rules marino delle società di appartenenza:
 - DNV-GL
 - Lloyd's Register
 - RINA
 - American Bureau of Shipping
 - Bureau Veritas
 - Korea Register
 - Nippon Kaiji Kiokai
 - China Classification
- Regolamenti industriali:
 - TUV

2. Alluminio nel settore automotive

2.1 Caratteristiche principali alluminio

L'alluminio è un metallo con struttura cubica a facce centrate (CFC), con una densità di $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$ che in linea teorica permetterebbe di alleggerire le strutture rispetto all'acciaio ($\rho = 7,8 \text{ g/cm}^3$).

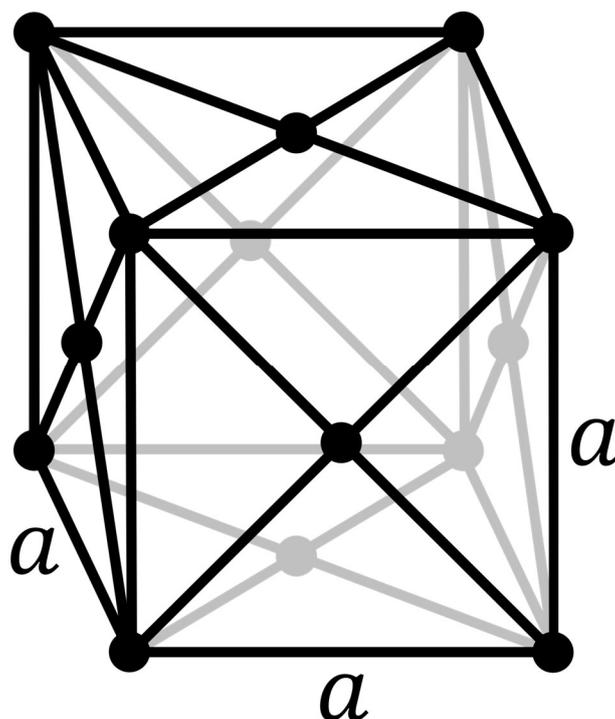


Figura 2.1 - Reticolo CFC

In genere viene alligato con altri materiali (Mg, Cu, Si, ...) così da ottenere caratteristiche per determinati utilizzi. Infatti l'alluminio puro in genere è molto duttile e quindi presenta delle caratteristiche meccaniche scarse ma elevato allungamento percentuale, così come ottima conducibilità termica ed elettrica e resistenza a corrosione (autopassivante).

A seconda della caratteristica che si ricerca nel materiale vengono aggiunti vari materiali: ad esempio per migliorare la resistenza specifica si aggiunge rame, e in genere trova impiego in ambito aeronautico.

Può essere utilizzato anche per la costruzione di strutture (edifici o telai) perché nel tempo mantiene le proprie caratteristiche e non degrada, come invece succede in molti casi con i materiali plastici. Mantiene le proprietà anche dopo lavorazioni successive, per cui è

particolarmente adatto a essere riciclato, facendo attenzione ovviamente al grado di impurezza presente nel materiale.

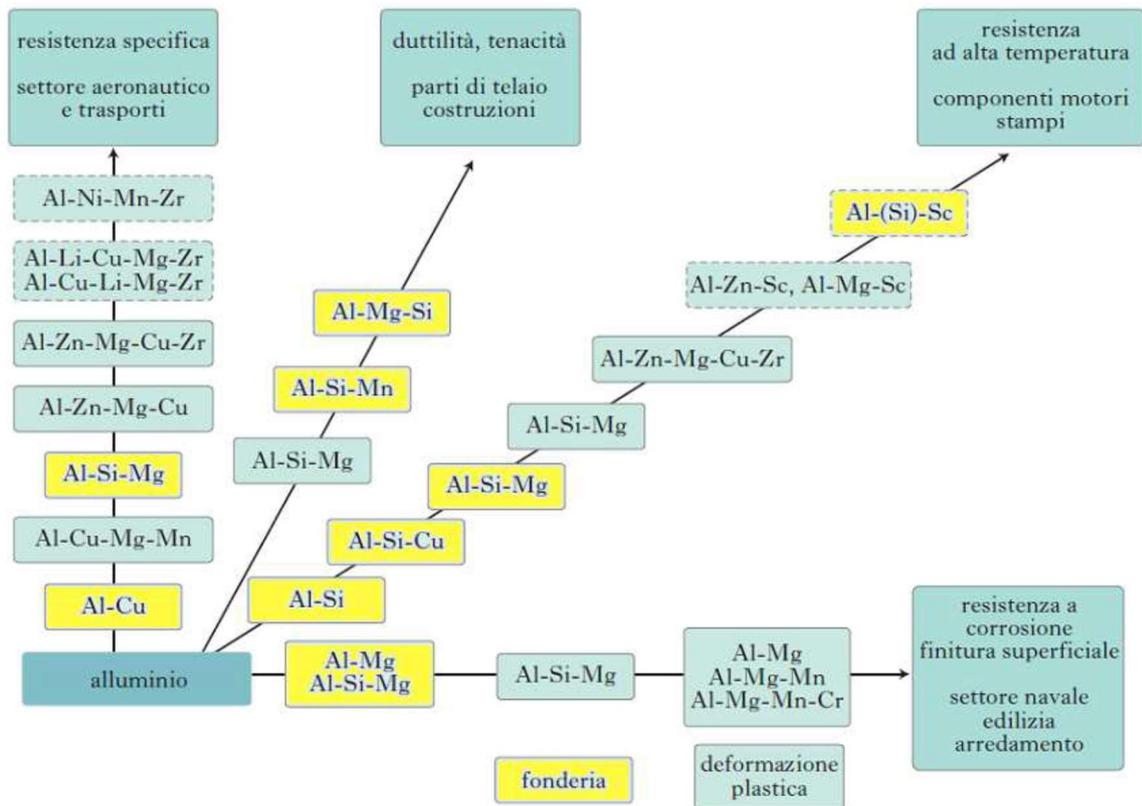


Figura 2.2 – Schema di sviluppo delle leghe di alluminio

In natura non si trova allo stato metallico, prevalentemente viene ricavato dalla bauxite: dal minerale si passa all'allumina (ossido di alluminio, Al_2O_3) con processo chimico Bayer, quindi attraverso elettrolisi si ottiene l'alluminio primario.

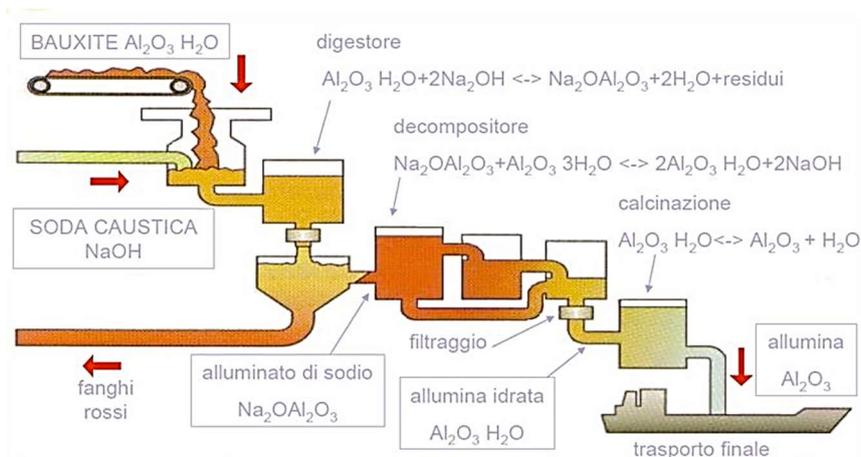
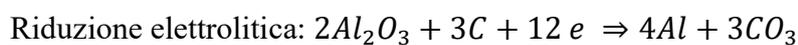


Figura 2.3 - Processo Bayer per passare da Bauxite ad Allumina, [1]



2.2 Storia

L'alluminio, rispetto agli altri materiali metallici di normale utilizzo, è da considerarsi uno tra i più recenti: scoperto nel 1807 da Sir Humphrey Davy, divenne tecnologicamente ed economicamente accessibile soltanto dal 1886, anno in cui Charles Martin Hall e Paul Heroult misero a punto la produzione dell'alluminio, attraverso elettrolisi, partendo dall'allumina.

Iniziò quindi ad essere utilizzato in svariate applicazioni, dal navale, con la prima imbarcazione parzialmente in alluminio (Le Migron, 1891, ideata da Alfred Nobel), al trasporto su rotaia con le prime carrozze in alluminio (1894).

Viste le potenzialità di riduzione delle masse, anche il settore automobilistico non rimase estraneo all'utilizzo dell'alluminio, così nel 1899 fu presentata all'esibizione internazionale di Berlino la prima auto con telaio in alluminio: prodotta dalla Dürkopp e considerata un'autovettura sportiva. Successivamente nel 1901 Karl Benz, fondatore dell'azienda che sarebbe diventata Mercedes, produsse il primo motore in alluminio, che venne utilizzato per gareggiare a Nizza. Dai primi anni del '900 le scatole della trasmissione e i pistoni venivano prodotti attraverso colata d'alluminio. Nel 1908 Bugatti produce il modello Type 10 che, oltre a componenti in colata in sabbia di alluminio, era allestita con lamiere formate, saldate e lucidate a mano [2].

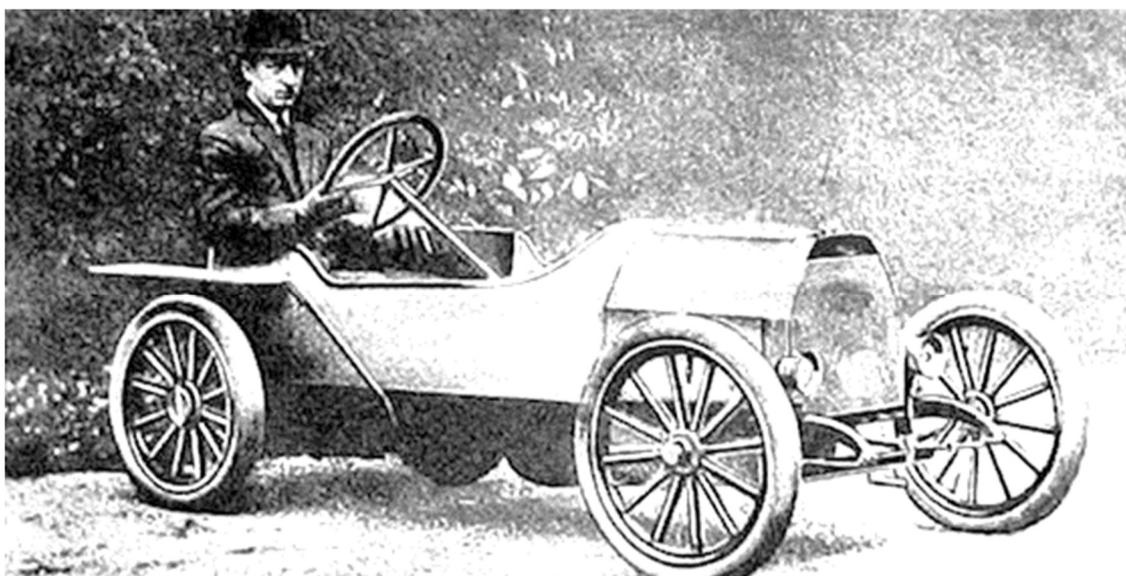


Figura 2.4 - Bugatti Type 10, 1908 [3]

Durante la Prima Guerra Mondiale vennero prodotti, attraverso colate in sabbia accompagnate da saldature, le carrozzerie dei veicoli di lusso della Pierce Arrow, casa automobilistica americana che fornì le auto presidenziali per molti anni. Si raggiungevano



Figura 2.5 - Pierce Arrow 48B Touring, 1917[4]

in colata spessori fino a 3 mm, ma l'utilizzo dell'alluminio trasmetteva robustezza. Inoltre Pierce Arrow utilizzava l'alluminio anche per costruire i blocchi motori a 6 cilindri.

Grazie all'affinamento delle lavorazioni del metallo, negli anni 20' e 30', in Europa, vennero sviluppate forme più artistiche ed elaborate, che trovarono applicazione specialmente in carrozzerie di auto da competizione o da esposizione.

Con l'avvento della Seconda Guerra Mondiale si ha una notevole diminuzione dei costi di produzione dell'alluminio, dato che veniva ampiamente utilizzato in ambito aeronautico. Fu quindi possibile utilizzare l'alluminio per la produzione di massa dei veicoli.

L'utilizzo intensivo dell'alluminio nelle automobili richiede in primis una produzione di massa, per poter ammortizzare le spese di presse e utensili, mentre risultava abbastanza economica la lavorazione delle lamiere, dato che si facevano già su lamiere in acciaio.

Il primo esempio di produzione in serie con utilizzo di lamiere in alluminio è la Panhard Z1, che fu lanciata nel 1953.



Figura 2.6 - Panhard Dyna Z1, 1953 [5]

L'obiettivo era quello di trasportare un'intera famiglia, ma allo stesso tempo di ridurre i consumi, e quindi utilizzo della carrozzeria in alluminio (EN AW-5754) affiancata a propulsori che guardassero sia ai consumi che alle prestazioni.

Nel mondo delle gare di automobilismo l'utilizzo dell'alluminio non si limitava alla carrozzeria in alluminio, ma consisteva soprattutto nella produzione del motore per intero. Sfruttando questa novità tecnologica introdotta dal V8 Land Rover del 1961, con anche i cilindri in alluminio, nel 1963 il pilota Mickey Thompson gareggiò nella 500 miglia di Indianapolis. Le caratteristiche di questo motore furono utilizzate in seguito per sviluppare anche i propulsori per le autovetture di Formula 1.



Figura 2.7 - Aluminium Special guidata da Mickey Thompson, 1963 [6]

In seguito alla crisi energetica del 1973, provocata dall'aumento del prezzo del greggio dell'OPEC, l'industria globale si trovò per la prima volta a dover affrontare il problema del risparmio energetico. Questo ebbe delle conseguenze anche nella progettazione delle automobili, perché il focus principale diventava la riduzione dei consumi, favorendo quindi l'utilizzo dell'alluminio, a discapito di materiali più pesanti come l'acciaio, ad esempio anche nelle sospensioni e testate.

Dagli anni '80 la progettazione si concentra su trovare soluzioni che permettano di utilizzare l'alluminio anche per il telaio. Le principali alternative a livello costruttivo sono costituite da:

- Telaio monoscocca, utilizzo intensivo di lamiere in alluminio
- Telaio spaceframe o reticolare
- Telaio in alluminio e abitacolo separati
- Approccio multi-materiali

a. Telaio monoscocca



Figura 2.8 - Porsche 928, 1981 [7]

Nel 1981 Porsche produce un concept di auto sportiva, Porsche 928, che è principalmente in lega leggera. Tutta la carrozzeria autoportante è prodotta in alluminio (portiere, tettuccio, bagagliaio, cofano, ...), così come blocco motore e cilindri.

Nonostante il progetto sviluppato da Porsche fosse promettente, venne abbandonato con la motivazione ufficiale che fosse troppo rumorosa durante la marcia [7].

Le orme di Porsche vennero seguite da altre case costruttrici come Audi che nello stesso periodo sviluppò l'Audi 100. Per trovare una produzione di autovetture con struttura e carrozzeria interamente in alluminio non limitata ad un unico veicolo, bisogna aspettare il 1989 con la Honda Acura NSX: auto sportiva della casa giapponese, assemblata a mano e caratterizzata da una monoscocca con l'aggiunta di qualche estruso al telaio e alle sospensioni. Questa applicazione permetteva di risparmiare quasi 200 kg rispetto ad una soluzione equivalente in acciaio. In questo caso venne combinato l'utilizzo di una lega d'alluminio alto resistenziale con speciali tecniche di costruzione, come la saldatura MIG per unire i vari componenti della struttura. La versione NSX-T prevedeva l'utilizzo di alluminio anche per il tettuccio rimovibile [8].



Figura 2.9 - Honda Acura NSX, 1989 [8]

Negli anni '90, in America si sviluppava il concept della Ford P2000 (produzione limitata a circa 40 autovetture, 907 kg contro 1505 kg della Taurus originale), basato sulla berlina Taurus. Utilizzando i risultati ottenuti dal progetto P2000, si implementò anche in veicoli ibridi (HEV → Hybrid Electric Vehicle) della famiglia della Ford Prodigy, con un peso di 1083 kg, circa 454 kg in meno di una berlina del segmento medio.

La produzione in serie (più di 100000 veicoli all'anno) di automobili con telaio monoscocca interamente in alluminio inizia nel 2003, con la Jaguar XJ (X350). Componenti estrusi, da fonderia o lamiere sono uniti attraverso rivettatura o resina epossidica strutturale. Rispetto al modello precedente l'autovettura pesa circa 200 kg in meno, questo oltre che sui consumi si riflette anche sulla guidabilità, che risulta essere migliorata [8].



Figura 2.10 - Jaguar XJ (X350), 2003-2009 [8]

Il nuovo modello di Jaguar XJ (X351), uscito nel 2009 e ancor oggi in produzione, prevede per la costruzione della struttura il 50% di materiale riciclato, e rispetto ai principali competitors risulta più leggera in media di 150 kg.

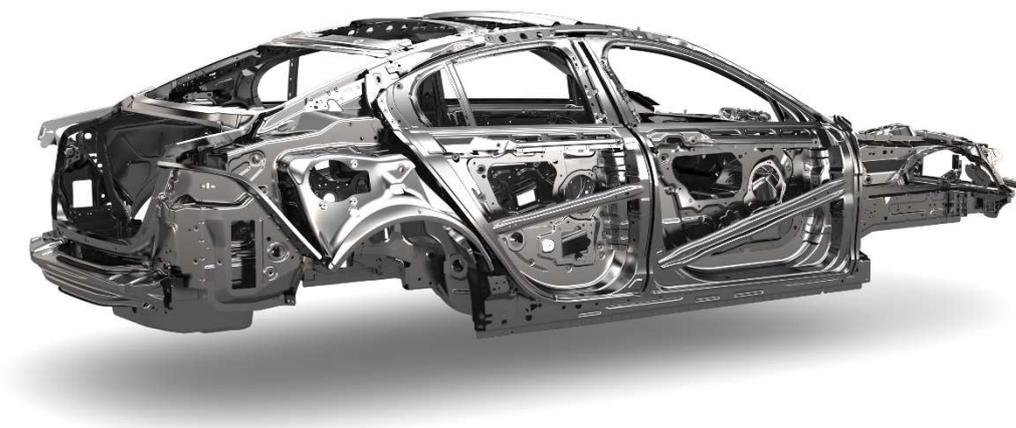


Figura 2.11 - Jaguar XJ (X351), 2009 [8]

Con lo sviluppo del modello X351, la casa costruttrice anglosassone si è adattata alla tendenza di progettare in multi-materiale, strategia che verrà studiata in dettaglio nel seguito.

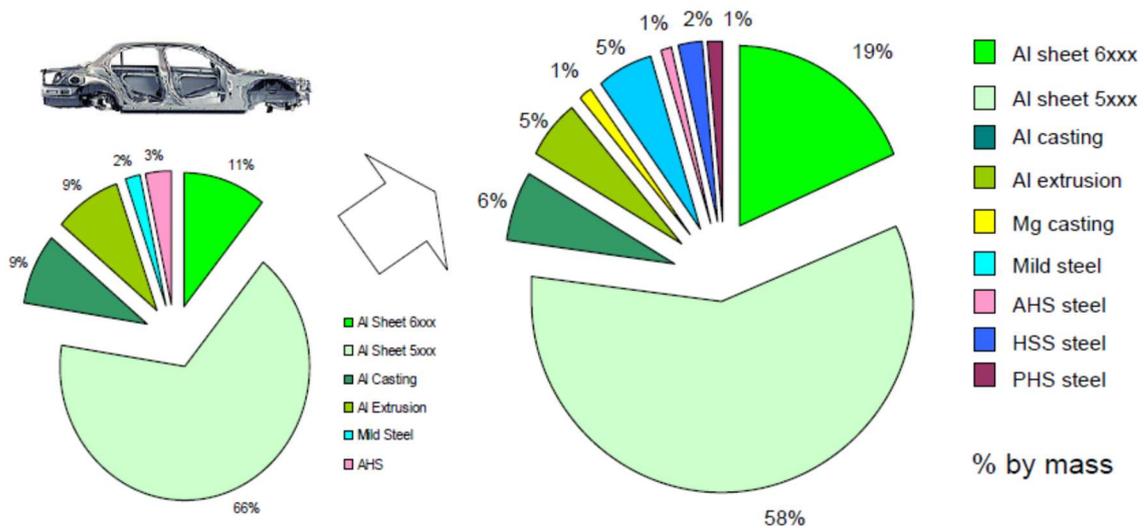


Figura 2.12 - Materiali utilizzati da X350 a X351 [8]

Si nota come vengano introdotti dei componenti in Magnesio o prodotti con acciai speciali (HSS e PHS). I componenti da fonderia in alluminio vengono utilizzati in punti chiave dove si hanno geometrie complesse, garantendo maggiore rigidità ai carichi maggiori. Con questo modello viene eliminata la saldatura MIG dall'impianto di assemblaggio.

Nel 2012 la tecnologia che consente l'alleggerimento del veicolo introdotta da Jaguar, viene utilizzata anche da Range Rover (L405), diventando il primo SUV (Sport Utility Vehicle) ad utilizzare il telaio monoscocca in alluminio. In questa occasione si registra un'implementazione per quanto riguarda l'utilizzo di lamiere, riuscendo a produrre in un pezzo unico la struttura laterale dell'abitacolo.



Figura 2.13 - Range Rover (L405), dettaglio laterale abitacolo, 2012 [8]

b. Telaio spaceframe

Nel 1994 Audi lanciava sul mercato l'A8 con telaio reticolare (o spaceframe) interamente in alluminio, per compensare la trazione integrale 100 kg più pesante della concorrenza. Il progetto era stato iniziato già nel 1982, siglando un accordo con Alcoa, per rinnovare la berlina V8, che già utilizzava motore in alluminio (testata e basamento), ma viene portato a termine soltanto nel 1993, anno in cui viene presentata la nuova A8 al salone di Francoforte: presentata appositamente con carrozzeria grezza, non verniciata, per evidenziare l'utilizzo di alluminio. L'A8 rappresenta una svolta rispetto al passato perché è la prima auto di serie (circa 160 unità al giorno) con telaio spaceframe in alluminio, oltre ovviamente alla carrozzeria [9].

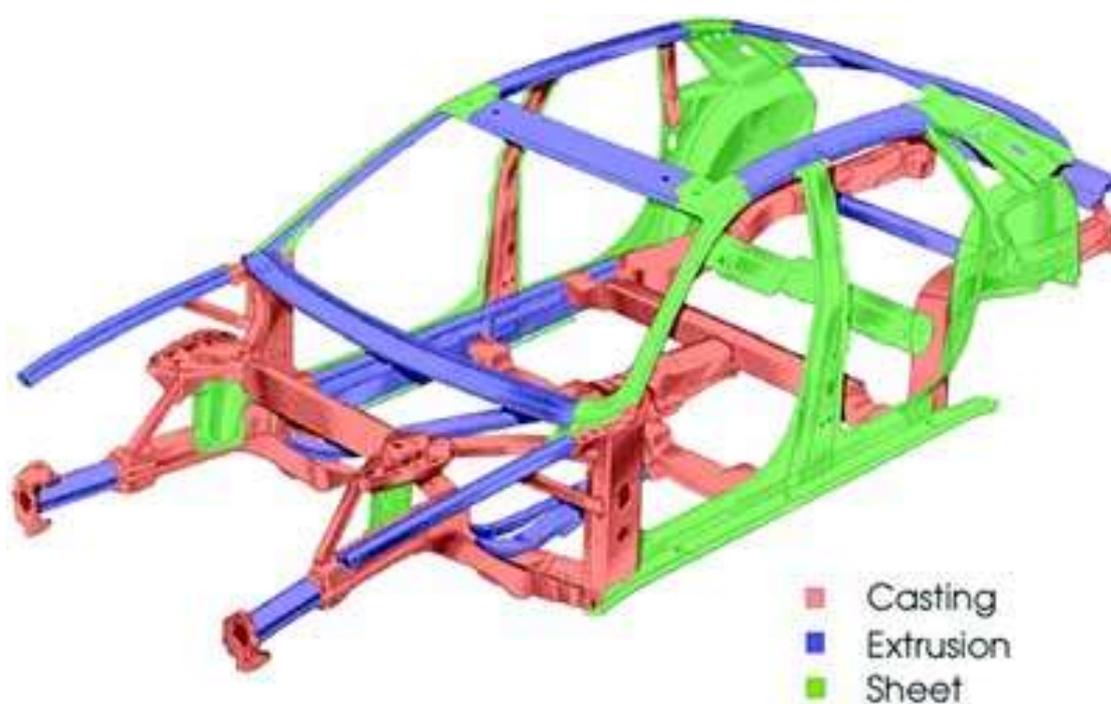


Figura 2.14 - Audi A8 spaceframe, 1994 [8]

La prima utilitaria a entrare nel mercato (1999) con il telaio in alluminio, sviluppato insieme ad Alusuisse, è l'Audi A2. Utilizzando anche cerchi forgiati in alluminio e speciali copertoni, la versione 1.2 TDI pesava solamente 825 kg, con un consumo medio dichiarato di 2,99 l/100 km.

Rispetto al modello A8, questa utilitaria doveva garantire volumi produttivi più elevati, per cui vennero combinati vari componenti per realizzarne di più grandi e complessi, ad



Figura 2.15 - Audi A2, 1999 [8]

esempio il B-pillar, nella A8 era il risultato di un assemblaggio di 8 pezzi, mentre nell'utilitaria viene prodotto con un pezzo unico, garantendo un peso minore e un minor tempo di assemblaggio. Questa soluzione venne adottata anche con l'aggiornamento dell'A8 nel 2002.

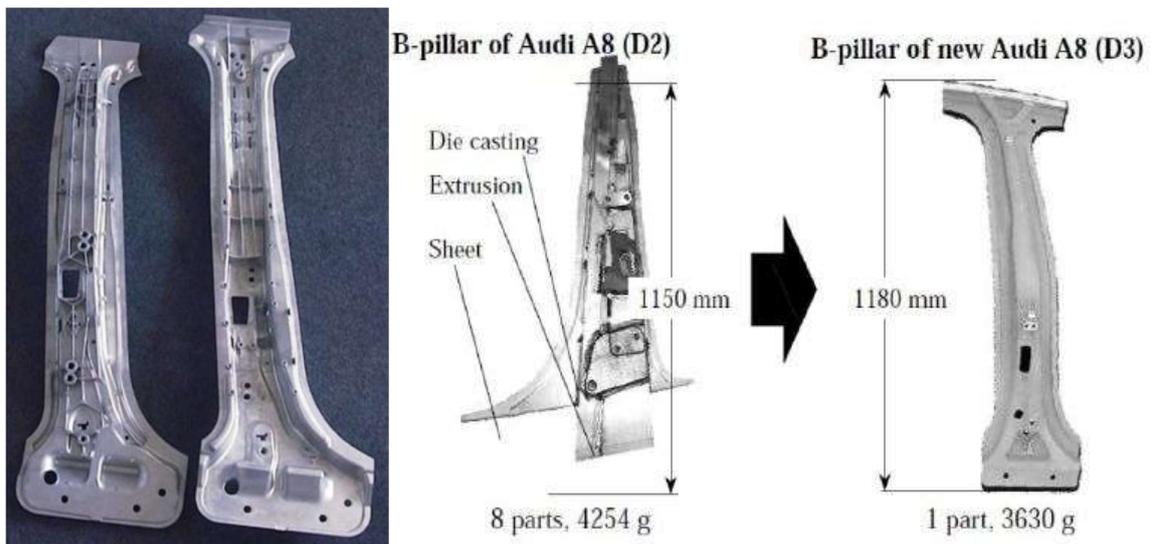


Figura 2.16 - B-pillar, A2 (sx), A8 (dx)

La pressocolata sotto vuoto permette di ottenere componenti da fonderia che possono essere saldati agevolmente, sia con saldatura al laser che con quella al MIG, ai laminati e agli estrusi che compongono il telaio. Per ottenere invece geometrie complesse anche con gli estrusi, i componenti venivano realizzati attraverso idroformatura.

c. Telaio in alluminio e abitacolo separati

Il telaio in alluminio, separato dall'abitacolo (VVA, Versatile Vehicle Architecture), che quindi può essere anche in materiali differenti rispetto all'alluminio, come polimeri o compositi, permette di ottenere grande flessibilità a livello produttivo, senza avere bisogno di investimenti ingenti in apparecchiature. In genere viene utilizzato in produzioni di bassi volumi.

Tra i primi costruttori ad adottare questa soluzione vi fu Lotus che nel 1996 la applicò alla Elise: telaio composto da componenti estrusi in alluminio con abitacolo in composito rinforzato in fibra di vetro, lavorato a mano.



Figura 2.17 - Lotus Elise, 1996 [8]

Il telaio della Elise (chiamato Lotus Small Car Platform), venne successivamente adottato anche in altri modelli come ad esempio Exige, Europa S e 2eleven, o addirittura da altre case automobilistiche: Opel Speedster, Tesla Roadster o Melkus RS2000.

Lotus nel 2009 costruisce il modello Evora, di dimensioni maggiori rispetto alla Elise, il cui telaio viene pensato adatto anche all'alloggiamento della propulsione ibrida o elettrica senza dover introdurre modifiche progettuali.



Figura 2.18 - Lotus Evora telaio, 2009 [8]

La parte frontale è intercambiabile, così che in caso di incidente frontale possa essere sostituito se danneggiato, oppure nel caso siano stati danneggiati i punti di ancoraggio delle sospensioni. Discorso analogo per la parte posteriore, mentre quella centrale determina la resistenza torsionale del veicolo.

Aston Martin prese come punto di partenza la struttura della Lotus Elise per sviluppare il telaio del modello Vanquish, prodotto dal 2001 a 2004, che successivamente si evolverà nella piattaforma VH (vertical/horizontal), utilizzata in quasi tutti i modelli futuri.

Con l'introduzione dei modelli DBS si ha un progressivo incremento nell'utilizzo di pannelli in plastica rinforzati da fibre di carbonio, che permettevano una riduzione fino a 30 kg rispetto alla carrozzeria totalmente in alluminio.

Altro esempio di separazione tra telaio e abitacolo si trova nella Chevrolet Corvette Z06, che dal 2006 va a sostituire il telaio in acciaio, con uno analogo ma in alluminio completando la carrozzeria con pannelli di plastica rinforzata da fibre di carbonio. Con questa semplice modifica la casa americana si è garantita una massa totale inferiore del 30% rispetto al modello precedente.



Figura 2.19 - Chevrolet Corvette Z06, 2006 [8]

Lo sviluppo delle auto elettriche diede la possibilità, all'inizio del nuovo millennio, di riprogettare completamente la struttura delle autovetture, così da alloggiare al meglio la propulsione elettrica. Con questo obiettivo venne sviluppato il BMW LifeDrive Concept, che sviluppa due moduli orizzontali: modulo di guida, in cui c'è il telaio che fa da sede per batterie e motori, e il modulo di vita, dove siedono i passeggeri, e estremizza il concetto di light weight design, con plastiche rinforzate da fibre di carbonio.



Figura 2.20 - BMW LifeDrive Concept, modelli i3 e i8 [8]

d. Approccio multi-materiale

Tutte le soluzioni viste finora utilizzano come caposaldo della progettazione l'applicazione intensiva dell'alluminio in tutta la parte strutturale. Tuttavia non è detto che sia la soluzione ottimale o che non ce ne siano di più performanti, ecco su cosa si basa la progettazione in multi materiali. Per avere come risultati finali una riduzione di costi e una progettazione più leggera si cerca di utilizzare il materiale che ottimizza al meglio una determinata funzione. Le alternative all'alluminio possono essere svariate:

- Acciai ad alta o altissima resistenza
- Magnesio
- Plastiche
- Compositi

BMW nel 2003 presenta i nuovi modelli 5xx e 6xx nei quali la parte anteriore della struttura è interamente in alluminio, mentre dopo il cofano si passa all'utilizzo di acciai alto resistenti. Alla fine i materiali distribuiti sull'auto si riscontrano nelle seguenti quantità:

- Leghe di alluminio → 18%
- Acciaio da stampaggio → 20%
- Acciai alto resistenti → 42%
- Acciai alto resistenti avanzati → 20%

Costruzione ibrida tra alluminio e acciaio viene utilizzata da Audi per la seconda generazione del modello TT, lanciato nel 2006. Si hanno dei vantaggi anche dal punto di vista della maneggevolezza, dato che il baricentro risulta essere più basso, e della sicurezza, performance nel crash test migliorate.

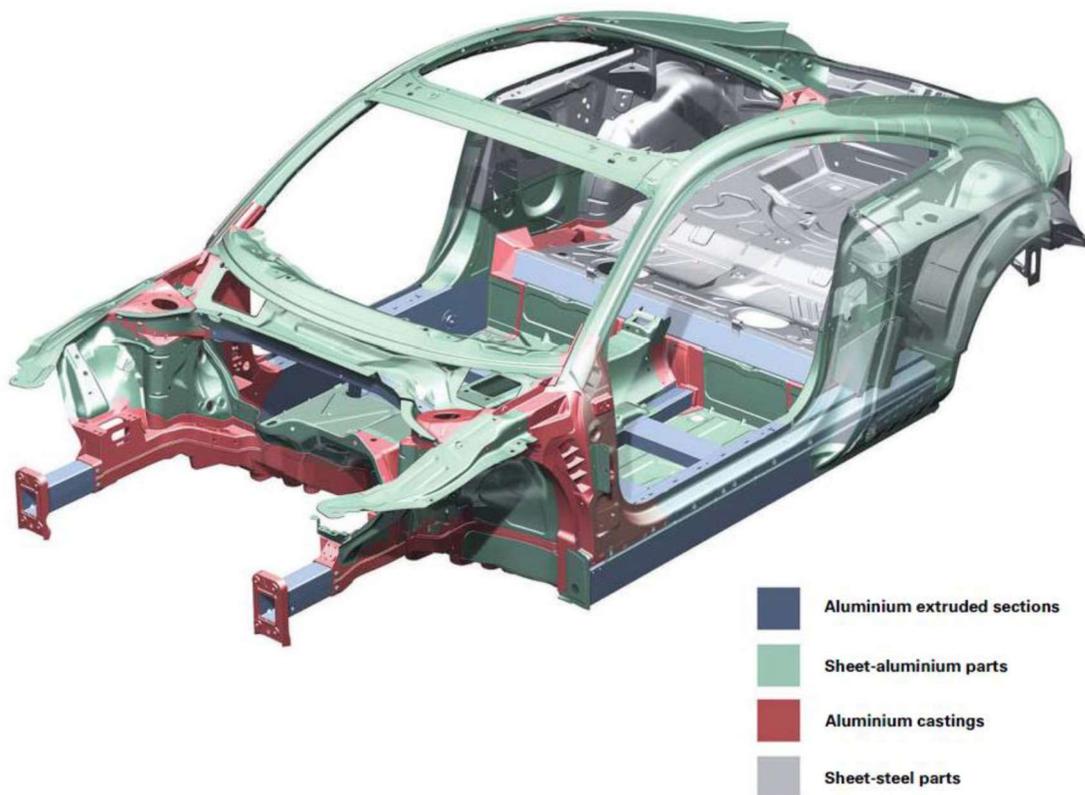


Figura 2.21 - Audi TT, 2006 [8]

In genere risulta più conveniente utilizzare questa strategia con alti volumi di produzione, quindi mentre per l'A8 (160 unità al giorno) con l'A6 (1400 unità al giorno) si ha un utilizzo di alluminio limitato a laminati con funzione strutturale.



Figura 2.22 - Utilizzo alluminio in base ai volumi

Guardando nel dettaglio si può notare che per ottenere gli obiettivi di leggerezza l'Audi A6 prevede un utilizzo intensivo di acciaio, mentre l'alluminio è concentrato nella parte frontale.

Steel intensive lightweight design of the Audi A6

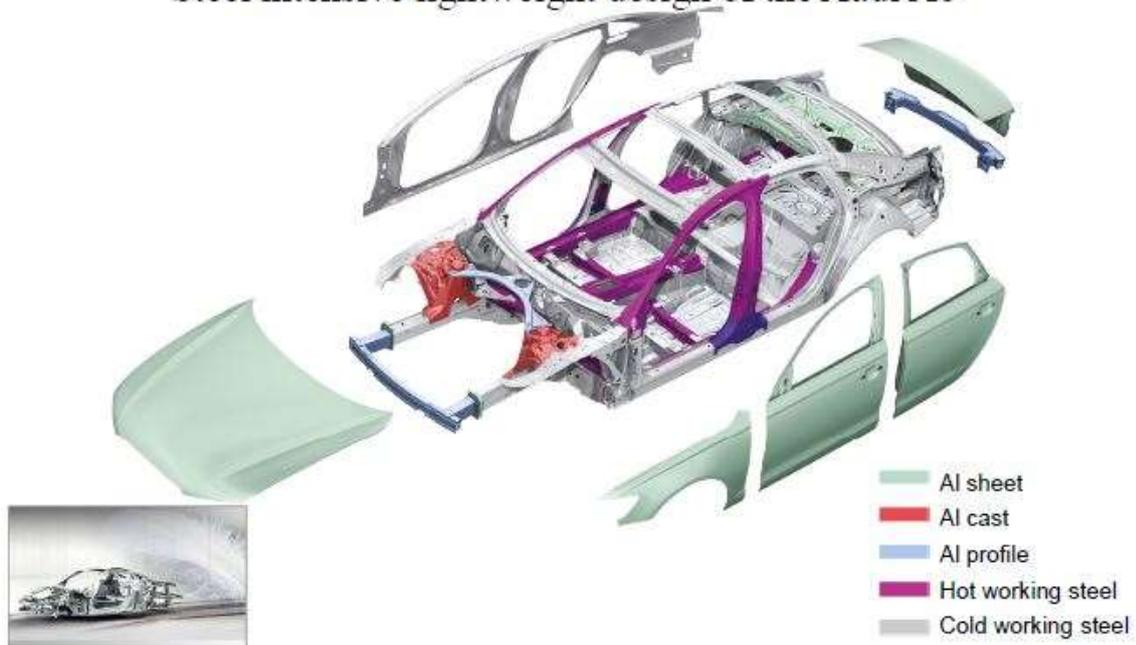


Figura 2.23 - Audi A6

2.3 Leghe già utilizzate e in quali componenti

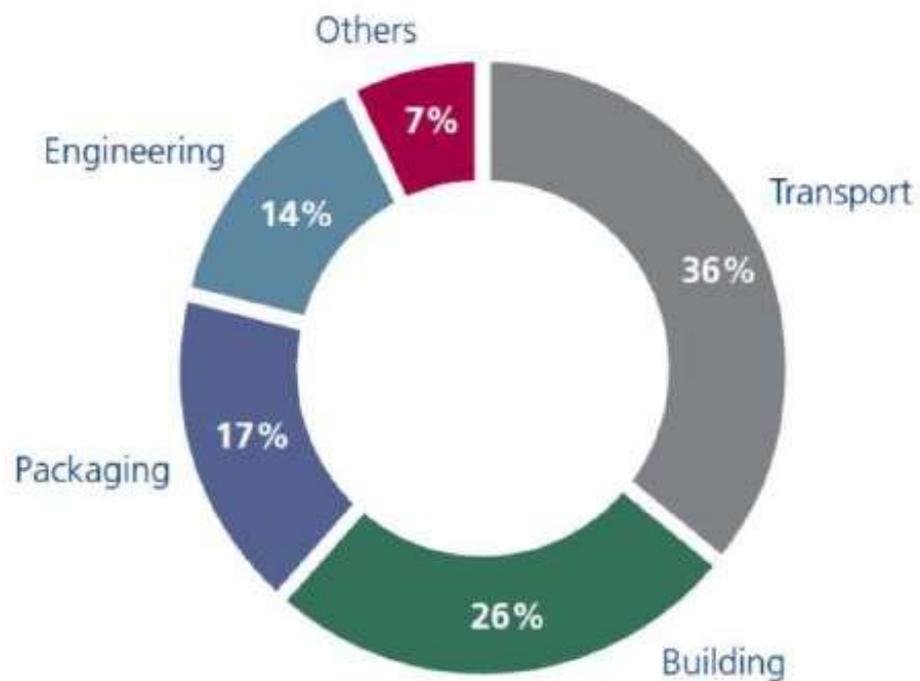


Figura 2.24 - Utilizzo finale alluminio in Europa, 2008

La maggior parte di prodotti finiti (36%) in alluminio che vengono introdotti nel mercato europeo, sono destinati al settore dei trasporti, che quindi comprende anche l'automotive. All'interno di questa macro famiglia andiamo a distinguere i prodotti ottenuti da colata o da deformazione plastica.

Concentrandosi soprattutto sul settore dei trasporti si può notare come la maggioranza delle leghe da colata è destinata a tale settore mentre soltanto un 19% delle leghe da deformazione plastica.

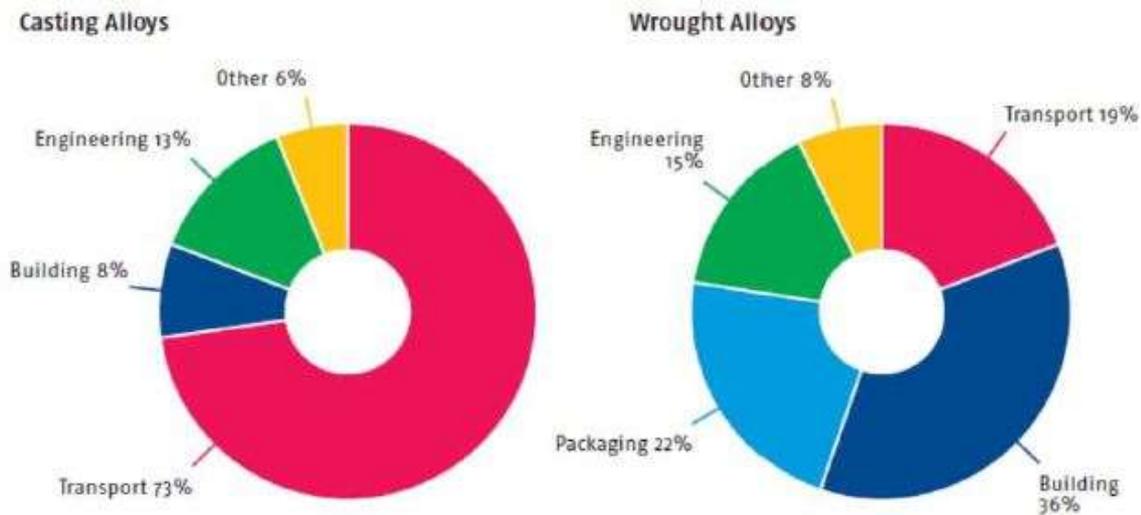


Figura 2.25 - Utilizzo alluminio da colata o da deformazione plastica

Analizzando il settore automotive, la casa automobilistica che in media utilizza più alluminio per ciascun veicolo è Jaguar (342,7 kg), mentre Fiat è quella che ne utilizza meno (82,6 kg).

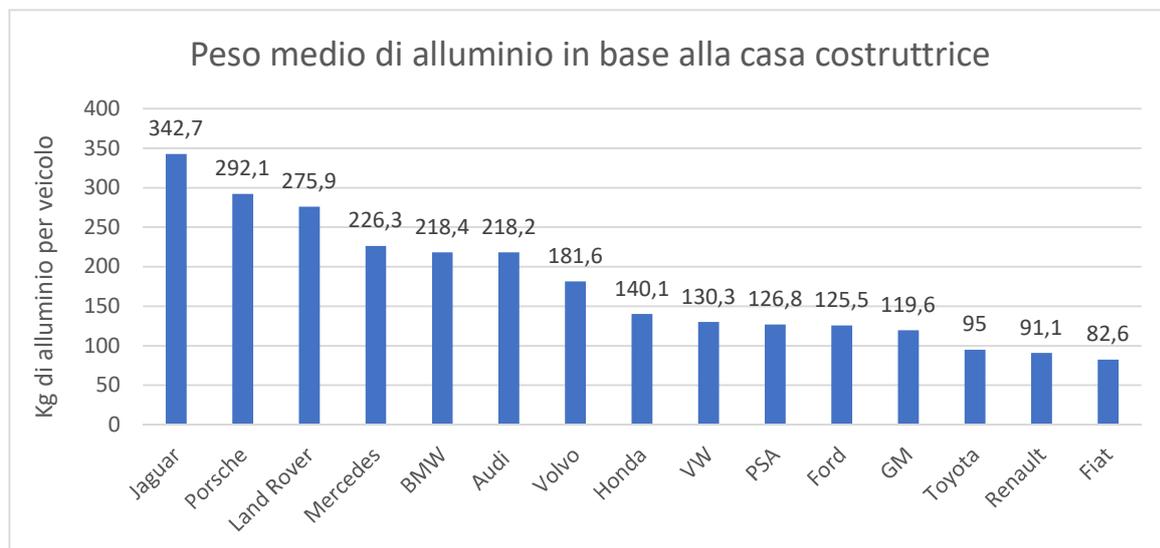


Figura 2.26 - Contenuto di alluminio in base alla casa automobilistica, 2012

Vediamo ora i principali componenti in lamiera di alluminio che lega utilizzano, in genere appartenente alle famiglie 5xxx e 6xxx con qualche sporadico esempio di applicazione in lega 7xxx e 3xxx.

In base alle varie tipologie di struttura sono identificabili le leghe che vengono generalmente utilizzate per adempiere vari scopi.

❖ Telaio con utilizzo intensivo di lamiera

- Lamiere interne con funzioni anche funzioni strutturali, non richiedono caratteristiche estetiche dato che non sono a vista:
 - EN AW-5754
 - EN AW-5182
- Lamiere o pannelli esterni, devono svolgere principalmente funzioni estetiche, non hanno impieghi strutturali:
 - EN AW-6016
 - EN AW-6111
 - EN AW-6181
 - EN AW-6451

❖ Telaio reticolare

- Lamiere interne, a volte completano la funzione di sostegno della struttura reticolare:
 - EN AW-6009
 - EN AW-5182
 - EN AW-6181
 - EN AW-5754
- Pannelli esterni che compongono principalmente la carrozzeria, e quindi svolgono soprattutto funzioni estetiche e devono avere buona resistenza a corrosione:
 - EN AW-6016

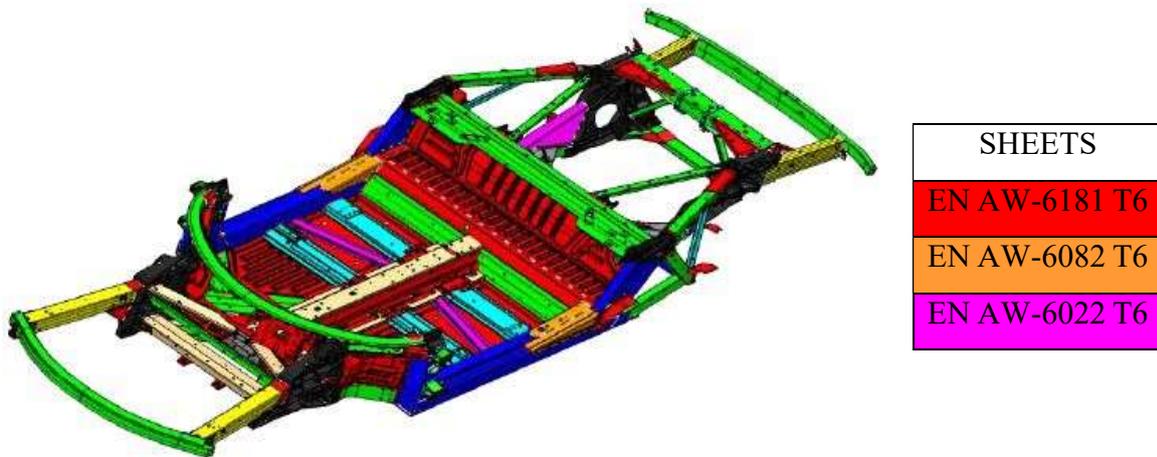


Figura 2.27 - Ferrari 548 Italia, telaio reticolare [8]

- ❖ Telaio separato da abitacolo: con questa soluzione in genere l'abitacolo e in particolare la carrozzeria vengono studiate in materiali che permettono di ottenere una leggerezza maggiore rispetto all'alluminio
 - Lamiere interne con funzione strutturale:
 - EN AW-5754
- ❖ Approccio multi-materiali
 - Lamiere interne con scopi strutturali o di sicurezza:
 - EN AW-5042
 - EN AW-5182
 - Lamiere esterne con requisiti estetici e resistenza a corrosione:
 - EN AW-6008 T4

La sostanziale differenza tra leghe 5xxx e 6xxx è che le leghe Al-Mg non vengono invecchiate, come accade invece per le leghe Al-Si-Mg, per avere un innalzamento delle caratteristiche meccaniche. L'invecchiamento avviene dopo trattamento termico e i più utilizzati sono T4 (invecchiamento naturale) o T6 (invecchiamento artificiale), mentre nelle leghe 5xxx si ottiene un rafforzamento attraverso incrudimento.

2.4 Possibili applicazioni future

L'utilizzo di alluminio nel settore automotive sarà in aumento nei prossimi anni: si stima infatti che si arriverà a circa 250 kg di alluminio di media su ciascun veicolo, guardando il trend progettuale degli ultimi concept.

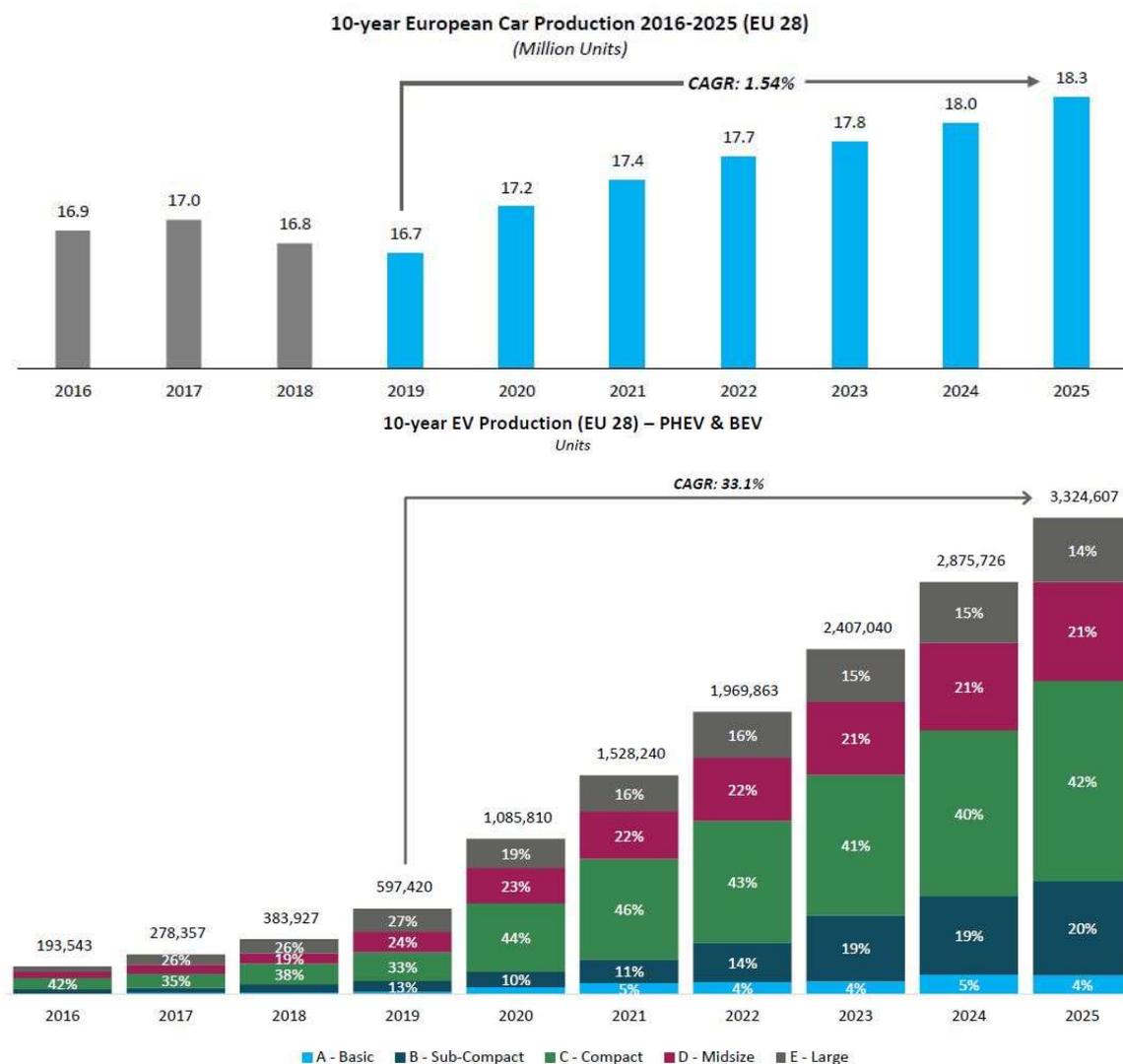


Figura 2.28 - Andamento utilizzo alluminio nei veicoli europei, dettaglio per veicoli elettrici [10]

L'alluminio riesce a mantenere e incrementare la propria quota di utilizzo grazie all'elevata disponibilità, all'ottima capacità di essere riciclato e alla possibilità di garantire una produzione di massa a prezzi ragionevoli [11].

Nell'ottica di ottimizzare i materiali che costituiscono i vari componenti (principio alla base del Light Weight Design), la tendenza è quella di progettare con multi materiali: l'alluminio si trova a dover competere con altri materiali leggeri (magnesio, acciai ultra resistenti, plastiche rinforzate da fibre), che possono performare meglio in determinate condizioni di carico o sotto il punto di vista della leggerezza. Nell'ultimo decennio alcune case

automobilistiche hanno deciso di tornare a riutilizzare componenti in acciaio. Infatti, in seguito all'avvento degli acciai ad ultra-alta resistenza (UHSS) che garantiscono carichi di rottura fino a 1500 MPa, nonostante la densità dell'alluminio sia circa 1/3 dell'acciaio, con valori così alti delle caratteristiche meccaniche, si riescono a raggiungere spessori che rendono la struttura più leggera rispetto ad una in alluminio, a parità di sollecitazioni. Generalmente l'alluminio utilizzato nel Body In White (BIW¹) è in lega 6xxx per le strutture esterne, o 5xxx per i pannelli interni, e raggiunge valori di carico di rottura tra i 250 MPa e 400 MPa [12].

¹ Body in white: si intende quando il telaio di un'auto è stato assemblato (saldato, rivettato, incollato, ...).

3. Tecnologia PDT

Per sfruttare al massimo gli spazi ridotti, uno dei processi produttivi più utilizzati per ottenere pannelli per automobili è sicuramente l'imbutitura. La lamiera viene formata e lavorata per mezzo di un punzone attraverso uno stampo, di cui ne esistono varie forme, fino a ottenere quella finale.

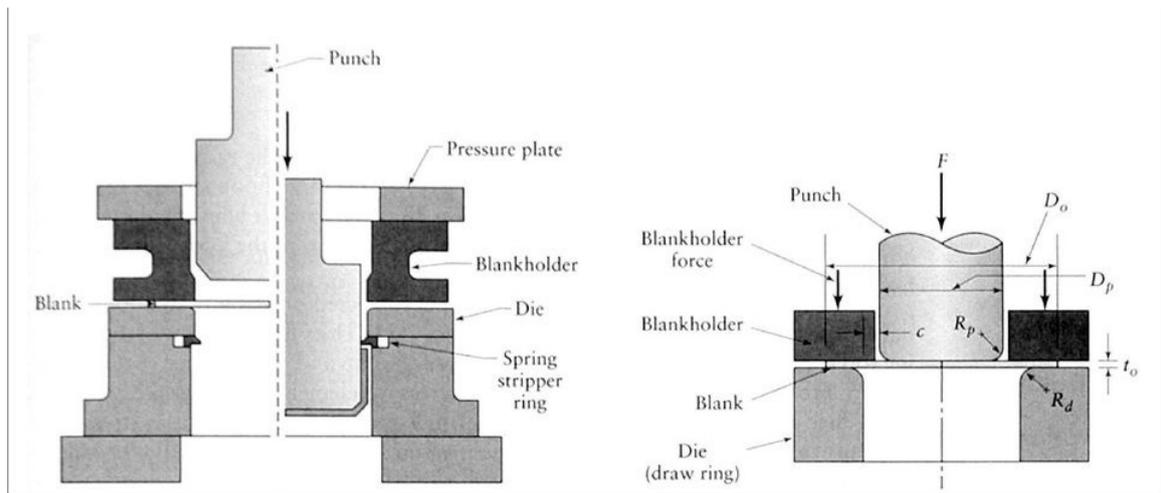


Figura 3.1 – Imbutitura [13]

Con questo nome, generalmente utilizzato per descrivere il raggiungimento di cavità profonde, si possono intendere anche componenti meno marcati.



Figura 3.2 - Esempio stampo per imbutitura poco profonda [14]

Le principali variabili indipendenti di questo procedimento produttivo sono [13]:

- Proprietà della lamiera
- Rapporto tra diametro della lamiera e il punzone
- Spessore della lamiera
- Gioco tra punzone e lamiera
- Raggi di raccordo di punzone e matrice
- Forza del premilamiera
- Attrito e lubrificazione nelle interfacce tra punzone, matrice e lamiera
- Velocità del punzone

L'idea alla base dello sviluppo della tecnologia EDT, e della successiva PDT, è di aumentare la rugosità superficiale così da intrappolare lubrificante che permetta di migliorare nello specifico proprio la lavorazione di imbutitura.

In questo capitolo si vuole approfondire quest'ultima tecnologia, descrivendo le varie implementazioni., fino ad arrivare all'attuale stato dell'arte.

3.1 Laminazione

Dato che la lavorazione PDT viene applicata sui cilindri di laminazione, è necessario in primis descrivere questo processo. Vengono riportati i principi generali, senza distinzioni tra caldo e freddo, nonostante in questo elaborato la tecnologia PDT venga applicata solo sui cilindri di lavoro del finitore.

La laminazione è un processo di deformazione plastica che viene applicato a placche o coils e permette di ridurre lo spessore, variando in minima parte anche la larghezza del profilo.

I prodotti finali che si ottengono sono piatti (piastre) o lamiere, se sotto gli 8 mm di spessore.

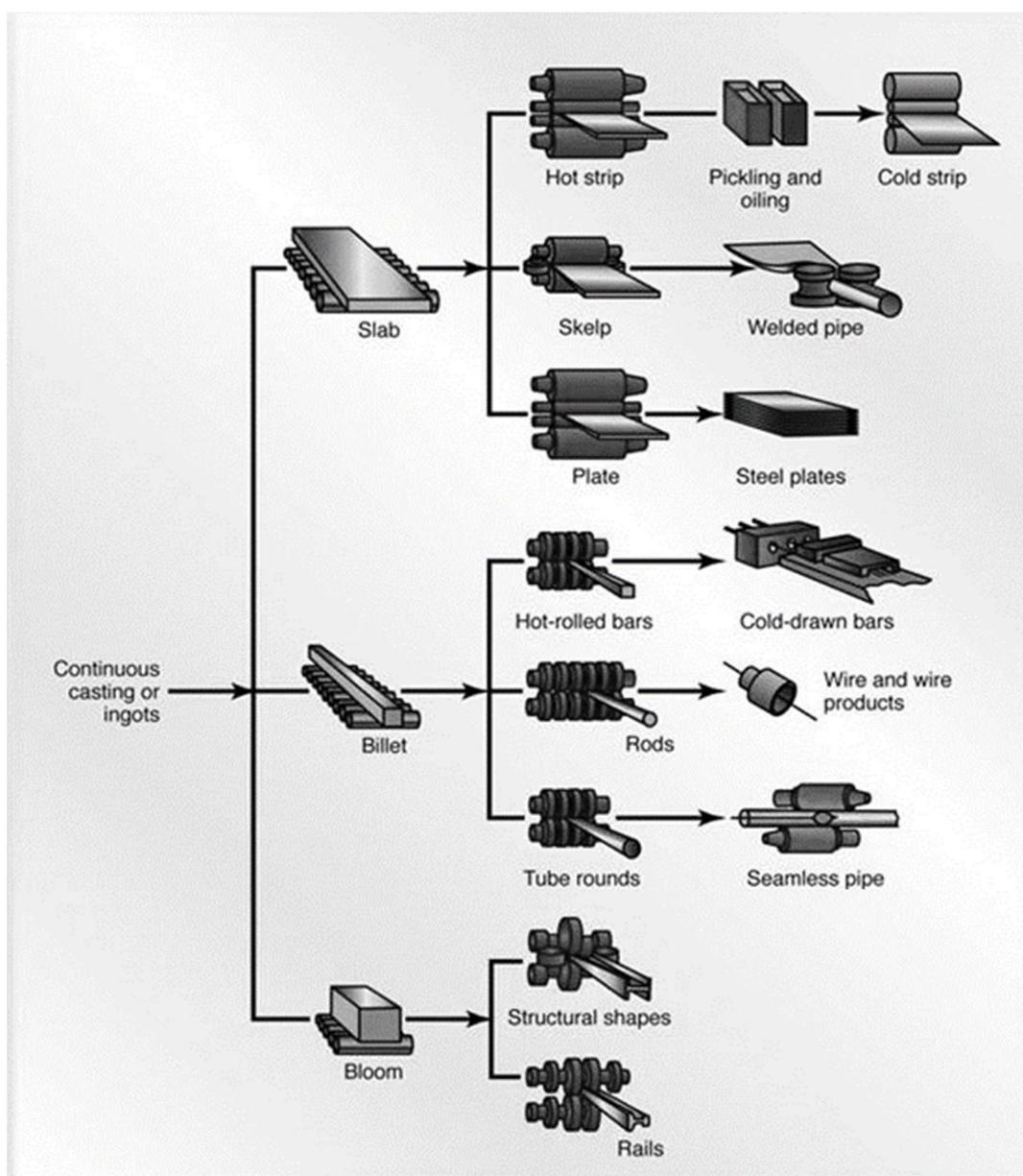


Figura 3.3 - Prodotti di laminazione

La laminazione si definisce a caldo quando il materiale viene laminato alla temperatura di ricristallizzazione, circa $2/3$ di quella di fusione, e per le leghe di alluminio varia tra i 400°C e i 600°C . Ai carichi minori e al minor assorbimento di energia bisogna contrapporre una finitura superficiale più scadente rispetto alla laminazione a freddo.

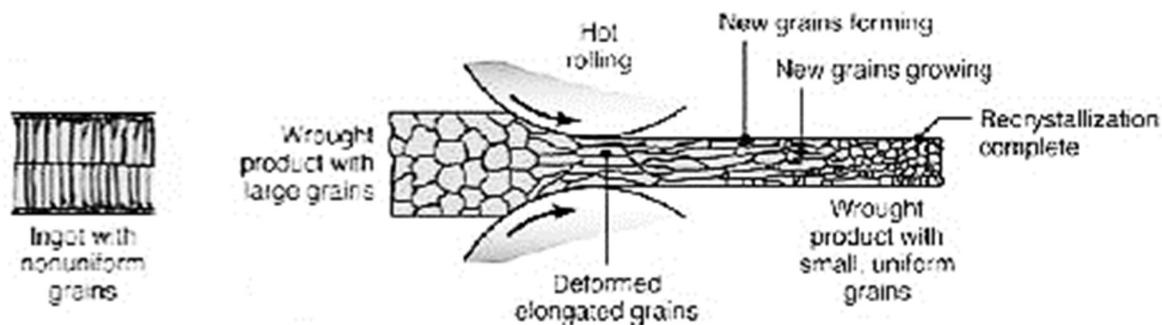


Figura 3.4 - Laminazione a caldo [15]

a. Struttura laminatoio

Entrambi i laminatoi a Fusina sono a quarto: due cilindri di lavoro e due di sostegno. Questa semplice configurazione è stata utilizzata per diminuire gli eccessivi costi d'impianto e allo stesso tempo contenere le deformazioni dei cilindri di lavoro.

I cilindri di lavoro hanno un diametro minore rispetto a quelli di sostegno, e sono forgiati con un acciaio che ha caratteristiche meccaniche più elevate; gli altri sono in acciaio più dolce, poiché vengono sfruttati soprattutto per la loro inerzia.

Le allunghe collegano i cilindri di lavoro con il blocco che ne permette il moto: in ordine sdoppiatore, riduttore e motore elettrico.

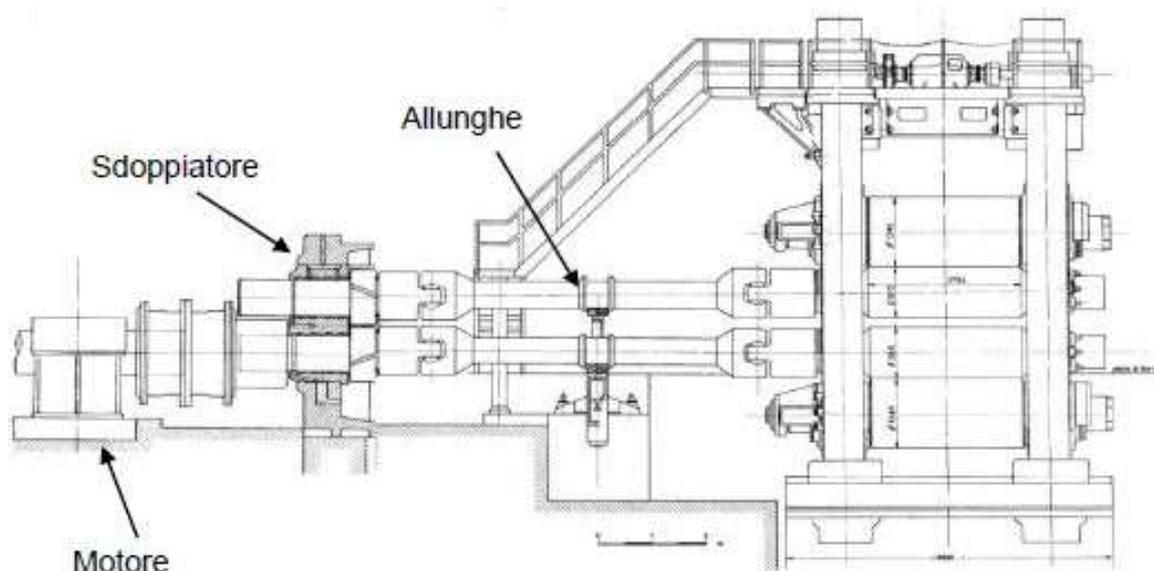


Figura 3.5 - Schema costruttivo azionamento cilindri

Tabella 3.1 - Gabbia di laminazione: componenti

1	Vitone	7	Capsule idrauliche
2	Guarnitura cilindro di sostegno superiore	8	Cunei
3	Guarnitura cilindro di lavoro superiore	9	Scarpe
4	Allunghe	10	Passline
5	Guarnitura cilindro di lavoro inferiore	11	Traversa superiore
6	Guarnitura cilindro di sostegno inferiore		

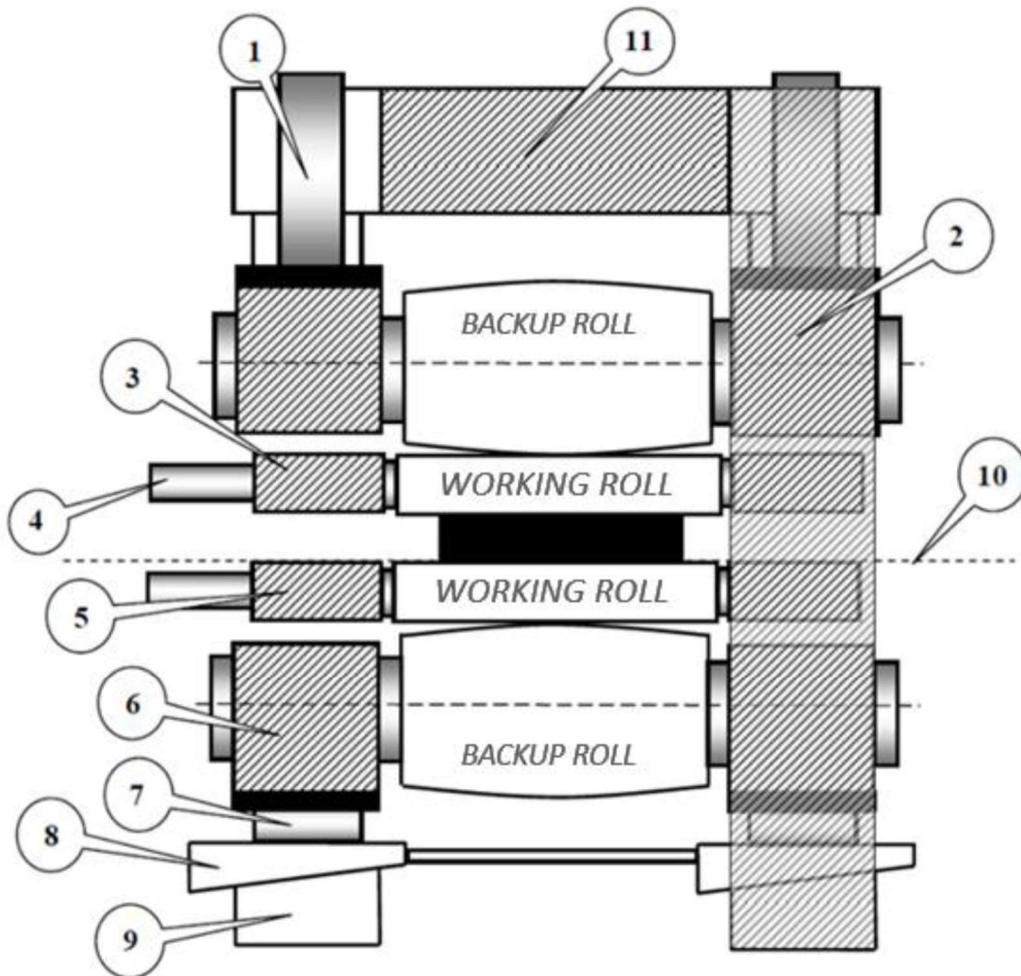


Figura 3.6 - Gabbia di laminazione

b. Teoria della laminazione

Lo scopo della laminazione è trasformare un semiprodotto, bramme o nastri, in un prodotto con uno spessore inferiore. Il materiale entra con uno spessore h_0 , larghezza w_0 alla velocità V_0 ; dopo i cilindri di lavoro presenta lo spessore finale h_f , mantenendo la stessa larghezza, si ha la conservazione della massa:

$$h_0 * w_0 * l_0 = h_f * w_f * l_f$$

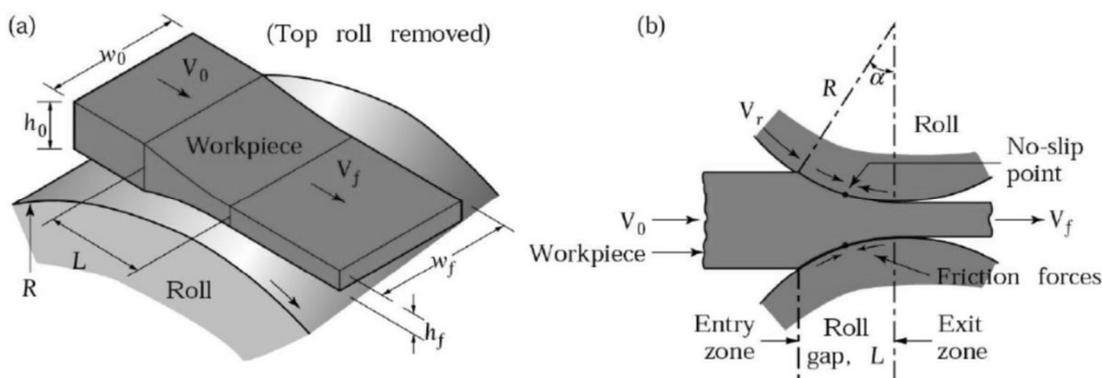


Figura 3.7 - Schematizzazione processo di laminazione [15]

Mentre la velocità periferica dei cilindri V_r rimane costante, la velocità del laminato varia da V_0 iniziale fino alla V_f dopo i cilindri: soltanto in un punto dell'arco di contatto (L) la velocità del materiale è la stessa dei cilindri, e quindi in questo punto (Punto Neutro) non si ha scorrimento tra le due superfici.

Il processo di laminazione è possibile perché la forza d'attrito che agisce a monte dell'asse neutro è maggiore rispetto a quella a valle, in questo modo la risultante delle forze trascina il materiale.

Il carico generato dalla macchina crea una pressione che dipende dall'area di contatto tra superficie dei cilindri e del materiale. Quest'area è individuata dalla larghezza, che si può ragionevolmente pensare uguale tra inizio e fine laminazione sebbene sia inevitabile un minimo allargamento, moltiplicata per la lunghezza di contatto. Quest'ultima è direttamente proporzionale al raggio dei cilindri e alla riduzione che si vuole imporre: fissata una riduzione se si aumenta il raggio R di conseguenza aumenta anche l'arco di contatto, e quindi l'area di contatto, per cui è necessaria una pressione maggiore per mantenere la stessa deformazione.

Per ottenere le lamiere con la finitura superficiale PDT non si possono utilizzare le stesse riduzioni che si applicherebbero durante i tradizionali passi di laminazione perché con carichi eccessivi le creste della superficie dei cilindri di lavoro si deformerebbero plasticamente, perdendo le caratteristiche richieste da FCA.

Per risolvere questo problema si adopera la laminazione in modalità *Skin Pass*: si arriva in prossimità dello spessore richiesto attraverso laminazione tradizionale, e l'ultimo passo viene eseguito molto scarico, con una riduzione inferiore al 10%, con i cilindri PDT. Successivamente verrà spiegata che riduzione si è scelto di adottare con questi cilindri.

Per utilizzare la modalità *Skin Pass* vengono attuate delle modifiche, specialmente a livello di software all'impianto di laminazione a freddo. Esso può lavorare in controllo di forza o di spessore: controllo di forza quando lo spessore in uscita viene lasciato soltanto come consuntivo ma non svolge alcuna azione retroattiva, e l'operatore va a modificare direttamente la forza agente sul nastro attraverso l'*Automatic Gauge Control (AGC)* per ottenere lo spessore desiderato. Quando invece è attivo il controllo di spessore, il laminatoio lavora in retroazione: attraverso un misuratore a raggi X viene ricavato lo spessore in uscita dalla gabbia di laminazione e in base all'errore rispetto allo spessore impostato la macchina si autoregola per centrare il target.

Lo *Skin Pass* lavora in controllo di forza, quindi l'operatore deve costantemente regolare i carichi in base allo spessore in uscita, inoltre attraverso il software si va a creare un carico fittizio, così da evitare che la macchina vada in allarme al raggiungimento del carico minimo di lavoro. Avendo una bassa riduzione infatti i carichi di lavoro risultano essere molto inferiori rispetto a quelli usuali, per cui è stata necessaria questa modifica.

3.2 Descrizione e caratteristiche tecnologia PDT

Si vuole ora presentare una panoramica sulla tecnologia che si è scelto di utilizzare per ottenere il nuovo prodotto. È un processo che si va ad applicare ai cilindri di lavoro, in sostituzione della tradizionale rettifica, e viene realizzato con un macchinario apposito, prodotto da Pomini Tenova, azienda specializzata nella produzione di rettificatrici.



Figura 3.8 - Logo Pomini Tenova

L'obiettivo del progetto è migliorare la formabilità delle lamiere destinate all'ambito automotive, e soddisfare le richieste di tale mercato in ambito di finitura superficiale: isotropica e stocastica, ripetibile e precisa, rugosità adatta a trattenere i lubrificanti per l'imbutitura. Si applica il PDT, pensato come implementazione della tecnologia EDT (Electrical Discharge Texturing).

a. Electric Discharge Texturing (EDT)

È un processo di finitura superficiale che viene applicato alla superficie dei cilindri di laminazione che appartiene alla famiglia delle lavorazioni EDM (Electrical Discharge Machining).

Questa macro famiglia ottiene la forma finale rimuovendo il materiale attraverso una rapida successione di scariche elettriche tra due elettrodi (utensile e pezzo) separati da un liquido

dielettrico e alimentati in corrente continua. Generalmente viene applicato a materiali conduttori che sono complicati da lavorare con processi tradizionali.

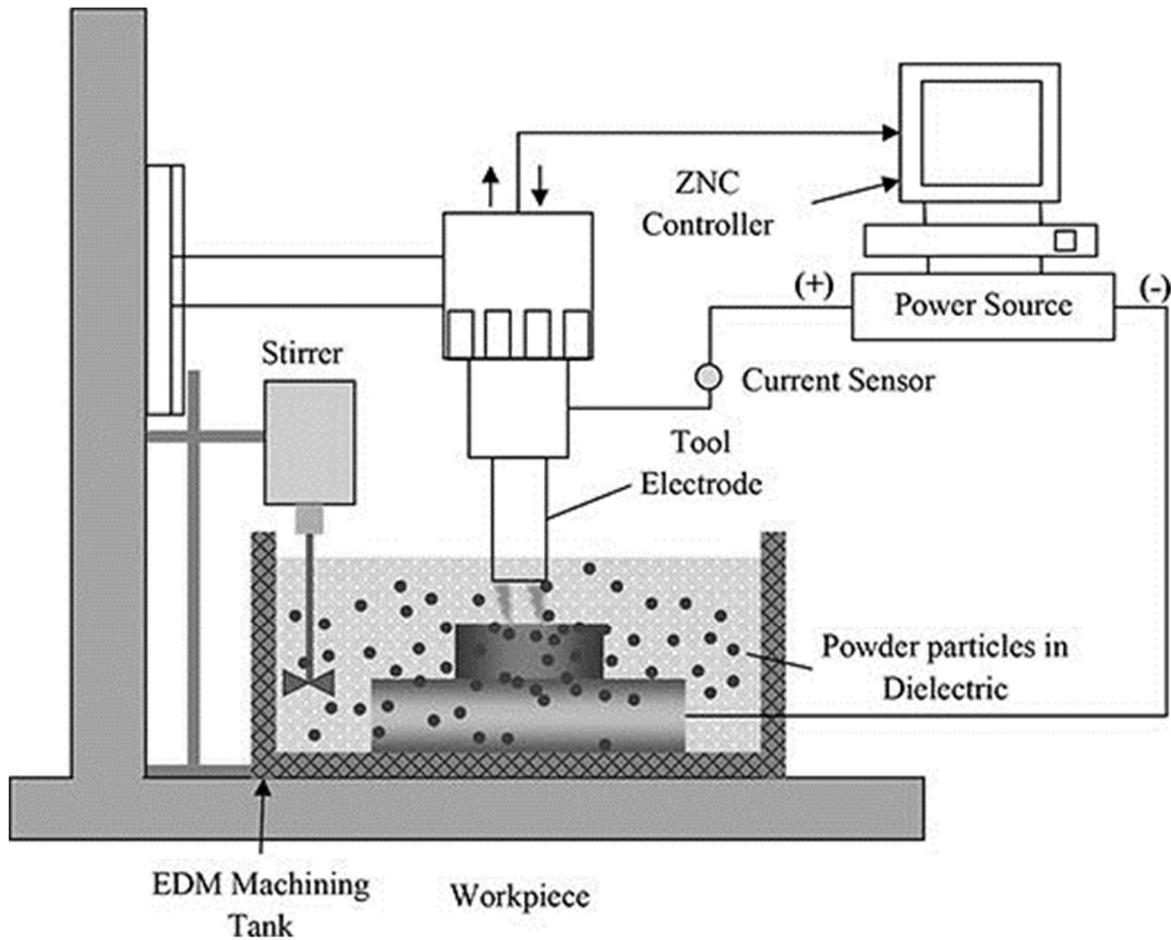


Figura 3.9 – Schema funzionamento EDM

All'aumentare della differenza di potenziale tra i due elettrodi aumenta l'intensità del campo elettrico compreso tra i due elettrodi, fino a superare la resistenza del dielettrico; si crea quindi una scarica elettrica da un elettrodo all'altro, che rimuove il materiale.

Per effetto dell'arco elettrico si va a fondere una porzione di materiale, mentre il liquido dielettrico evapora istantaneamente. Sulla superficie del componente vengono generati dei crateri che possono andare da dimensione nanometrica fino a qualche centinaia di micrometri, mentre il materiale asportato viene rimosso dal liquido dielettrico. Spostando l'utensile sulla superficie del materiale si può creare la geometria desiderata, mentre la velocità di asportazione viene regolata variando la frequenza o l'energia della scarica: velocità e rugosità aumentano all'aumentare della densità di corrente.

Il liquido dielettrico svolge le seguenti funzioni:

- Agisce da isolante finché il potenziale non è sufficientemente alto
- Funge da lavaggio per allontanare i residui della lavorazione
- È il principale mezzo di raffreddamento

Adattando quindi la tecnologia EDM si può ottenere su un pezzo di dimensioni importanti come un cilindro di laminazione una superficie uniforme, non direzionale e senza uno

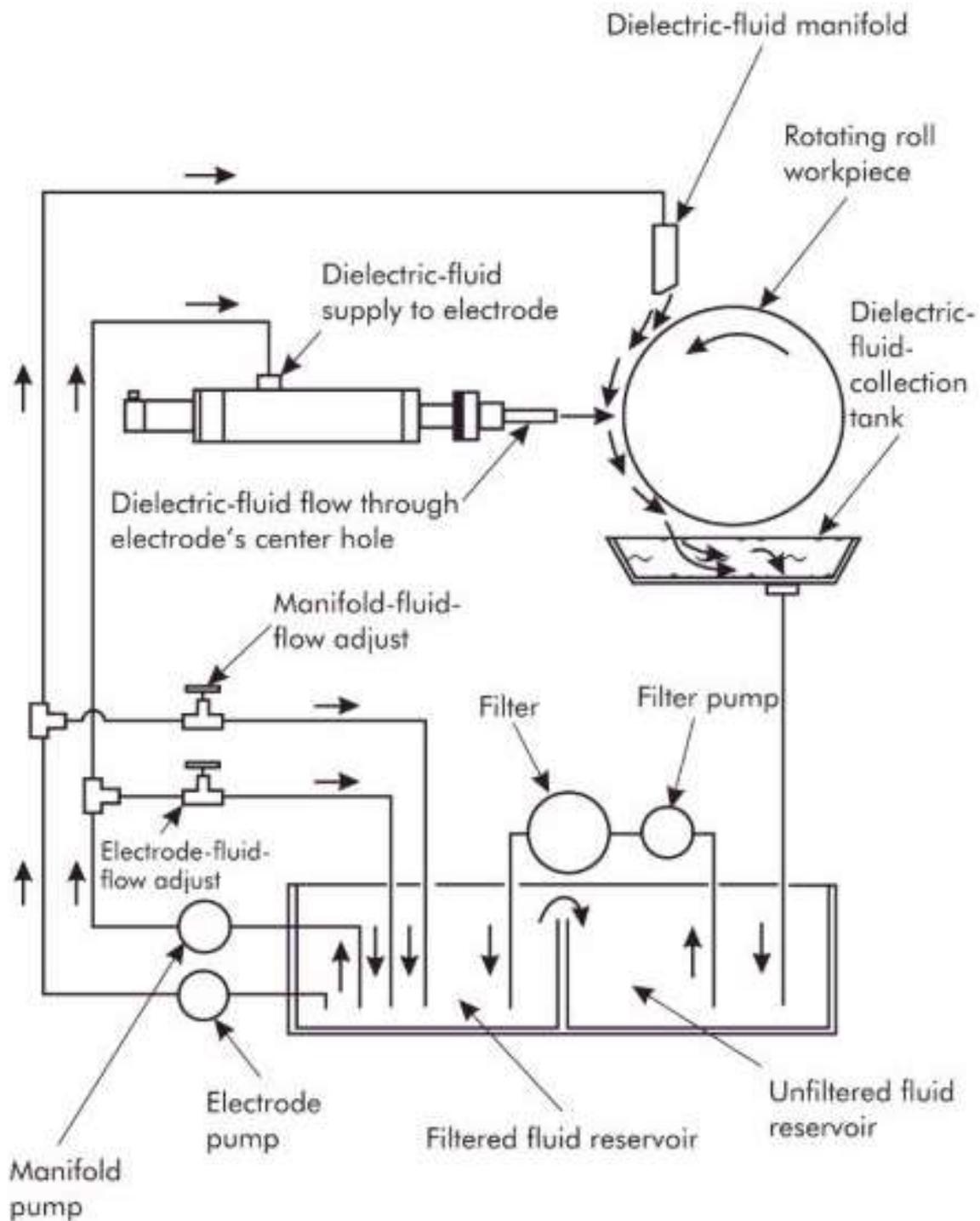


Figura 3.10 – Schema funzionamento EDT

schema. Dato che si va a creare lo strato superficiale è stato rinominato come Electrical Discharge Texturing [16].

Vediamo quindi quali sono i principali vantaggi nell'utilizzo di questa tecnologia:

- Si possono lavorare materiali alto resistenziali e con elevata durezza, dato che non vi è contatto tra materiale e utensili
- Non vi è danneggiamento termico della superficie
- Superficie non direzionale
- Superficie molto uniforme
- Utilizzando più teste autonome si vanno a ridurre i tempi di lavorazione
- La superficie può trattenere più facilmente lubrificanti per migliorare la formabilità

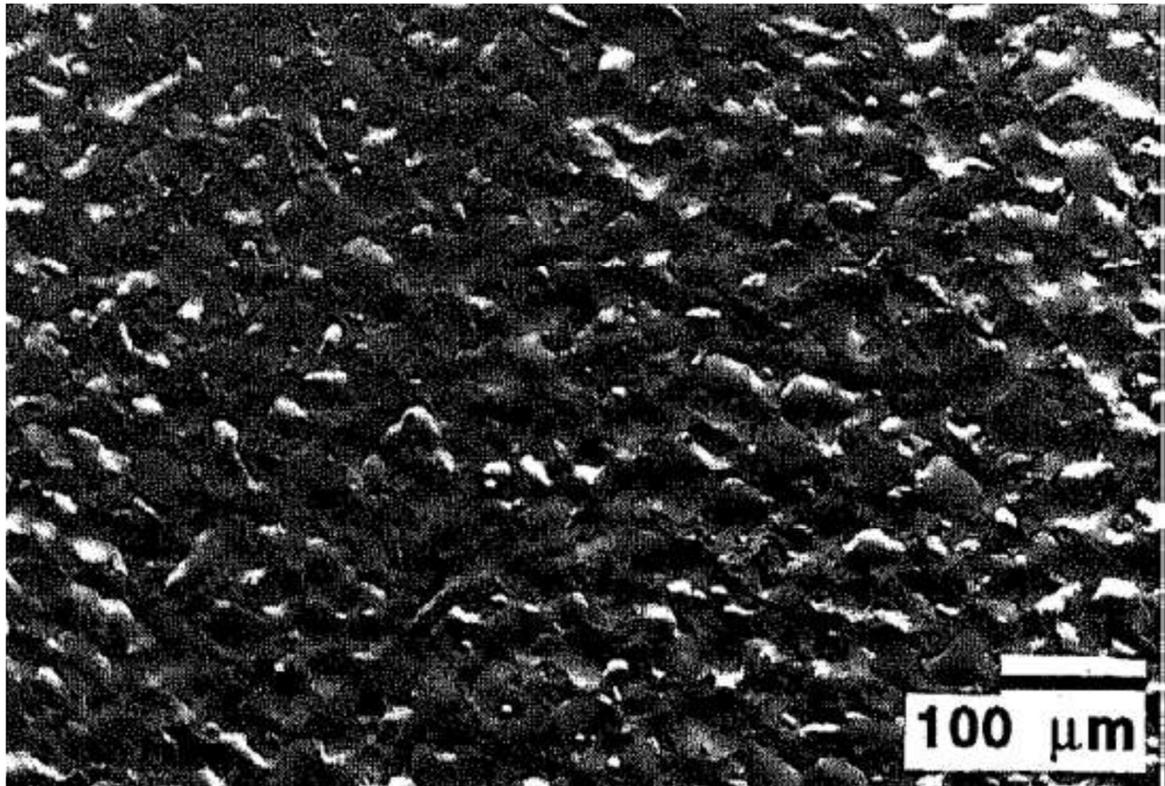


Figura 3.11 - Superficie ottenuta con EDT

D'altro canto vi sono delle controindicazioni da affrontare:

- Difficile trovare esperti della tecnologia
- Pericolo d'incendio con l'utilizzo di liquidi dielettrici basati su combustibili
- Consumo specifico di energia molto elevato

b. Pomini Digital Texturing (PDT)

Pomini Tenova prende come punto di partenza per lo sviluppo della nuova tecnologia proprio il processo EDT, cercando quindi di risolverne le lacune e implementarlo. Si pensa ad un concept che possa garantire alta qualità, controllo accurato e flessibilità.

Allo stesso tempo si ricercava di eliminare la generazione di rifiuti, tossici o da discarica, e ridurre i consumi, così come una progressiva diminuzione della complessità, con il passaggio da analogico a digitale.

Nel 2015 viene prodotta la prima macchina per realizzare la Digital Texturing, da allora questa tecnologia ha visto una notevole espansione, fino a competere con la precedente EDT.

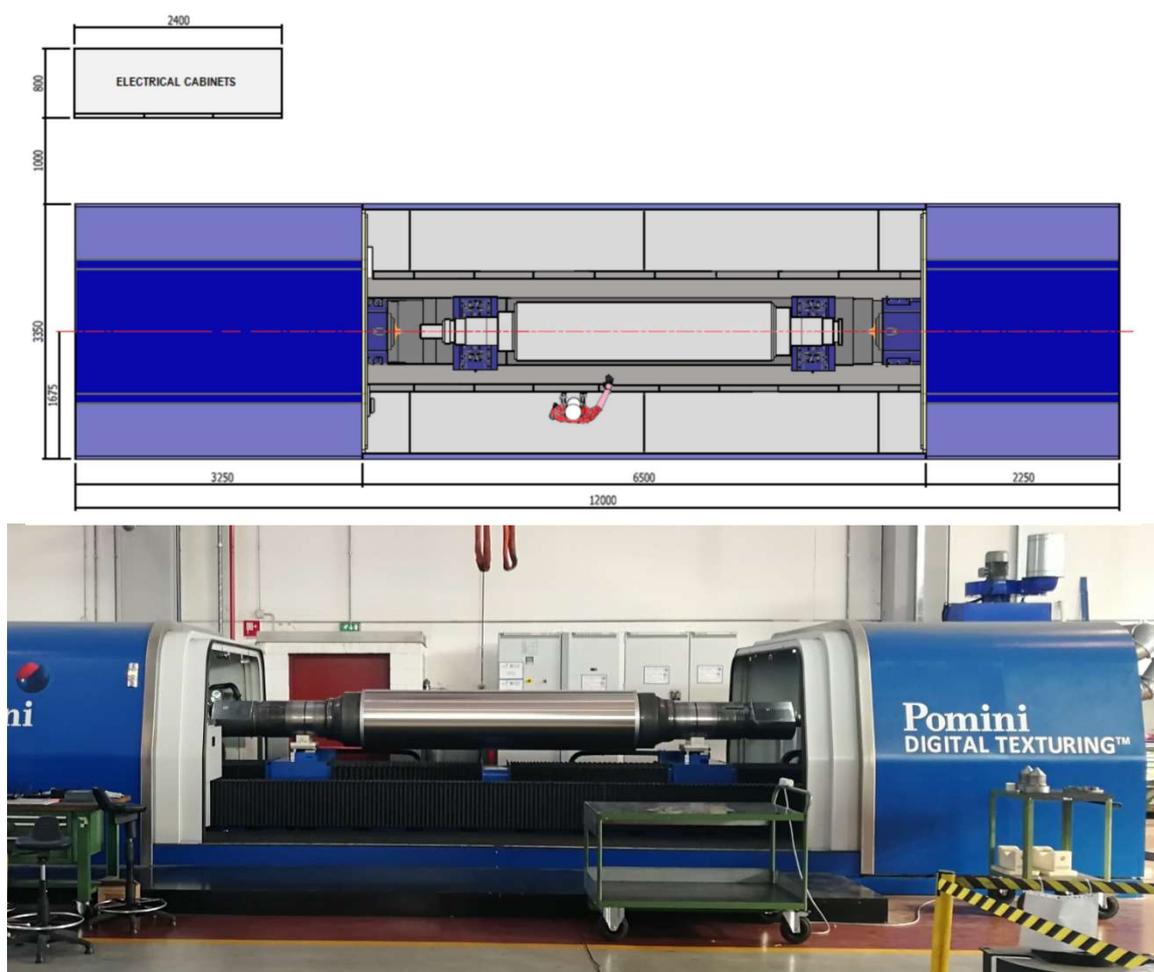


Figura 3.12 - Macchinario Digital Texturing

La texture superficiale viene realizzata sui cilindri di lavoro attraverso un raggio laser ad alta frequenza controllato da un software.

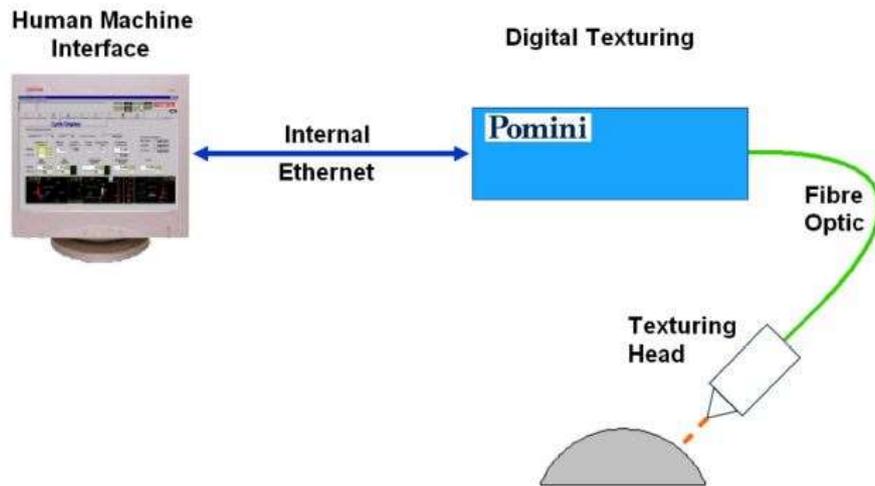


Figura 3.13 - Schematizzazione processo PDT [17]

Cambiando i parametri relativi al laser è possibile raggiungere la flessibilità ambita: modificando la lunghezza d'onda si possono ottenere le finiture richieste dalle principali applicazioni industriali minimizzando le operazioni di manutenzione e set up del macchinario [18].

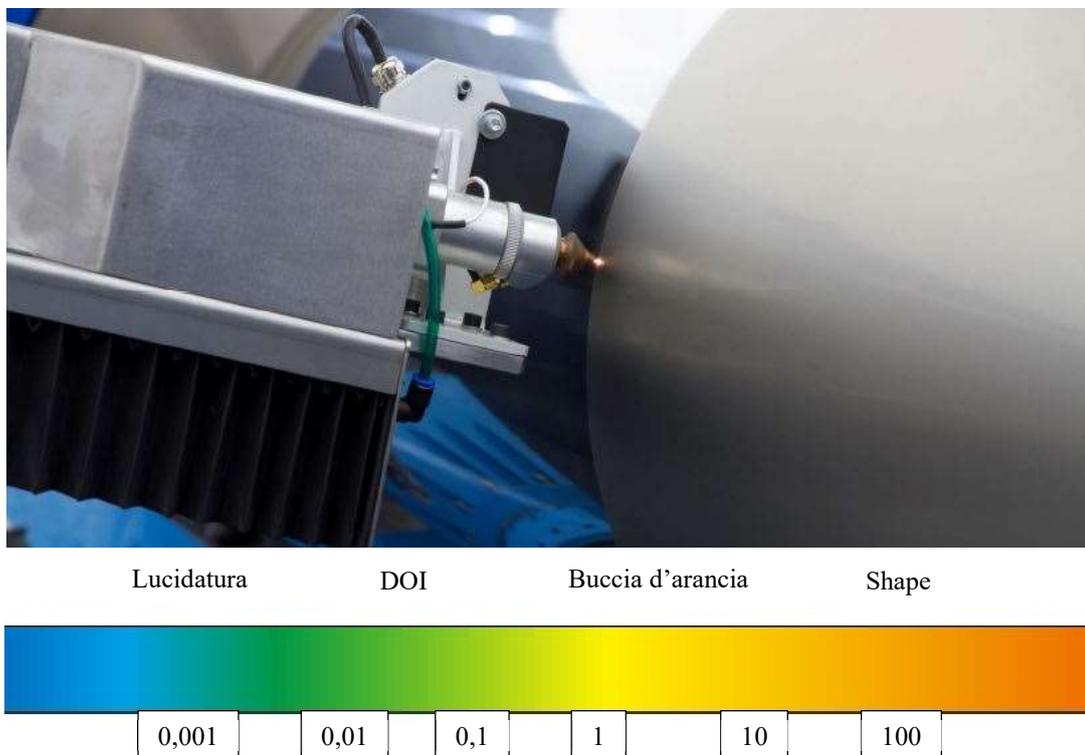


Figura 3.14 – Laser durante la lavorazione PDT

La superficie può essere realizzata attraverso una simulazione al computer per valutare la texture desiderata; possono essere variate le dimensioni dei crateri e il numero dei picchi,

indipendentemente l'uno dall'altro, due parametri della rugosità essenziali per la caratterizzazione della superficie.

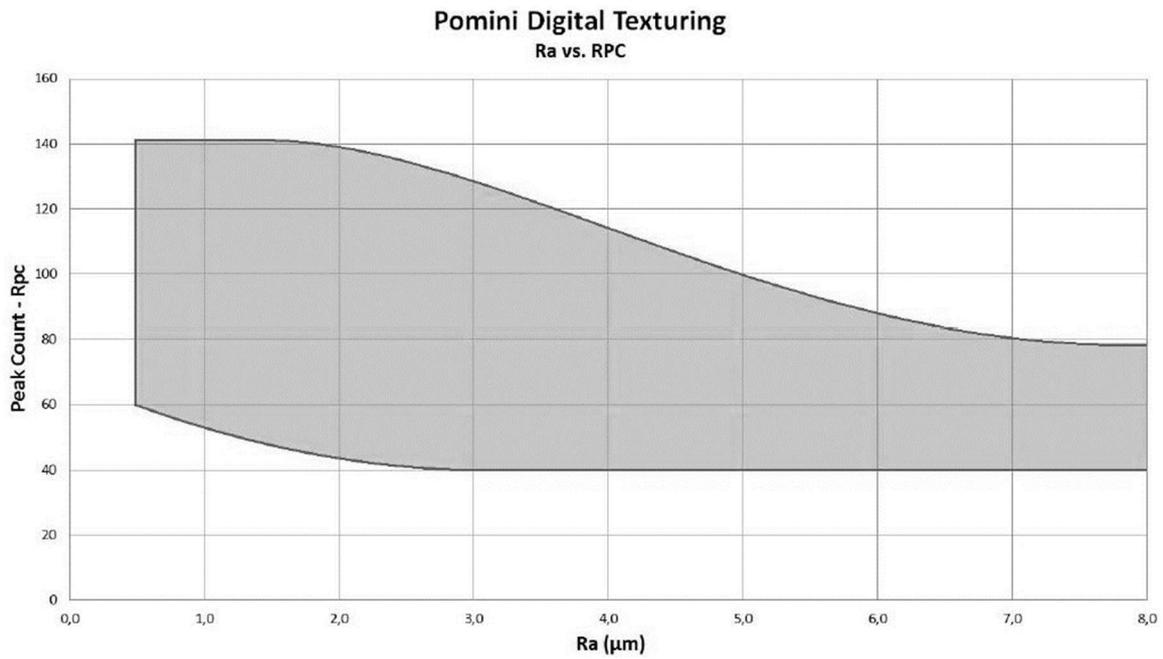


Figura 3.15 - Range Ra e R_{Pc} ottenibile con PDT [17]

Una volta digitalizzato il modello di superficie che si vuole ottenere si vanno a impostare i relativi parametri di macchina, il risultato finale è molto fedele rispetto a quanto impostato.

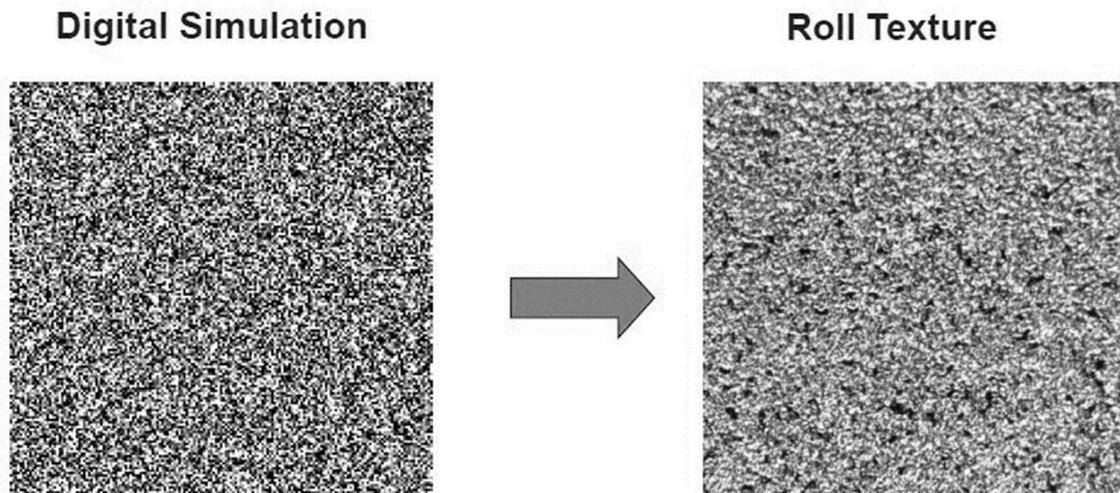


Figura 3.16 - Digital Simulation vs Roll Texture [17]

c. Tipologia e applicazione lubrificante

Definita la superficie che si vuole ottenere, anche secondo il capitolato FCA, si passa all'applicazione della cera al materiale per migliorare la formabilità.

Grazie alla particolare texture a rugosità aumentata dovrebbe aumentare la quantità di cera che il materiale riesce a trattenere e così da diminuire l'attrito con le pareti della matrice durante l'imbutitura.

Poiché impatteranno sulle lavorazioni successive di assemblaggio (saldatura, rivettatura, ...) i lubrificanti da applicare al materiale vengono valutati anche in base alla facilità di rimozione o effetti su assemblaggio e verniciatura e quindi non solo per la capacità di migliorare le operazioni di imbutitura.

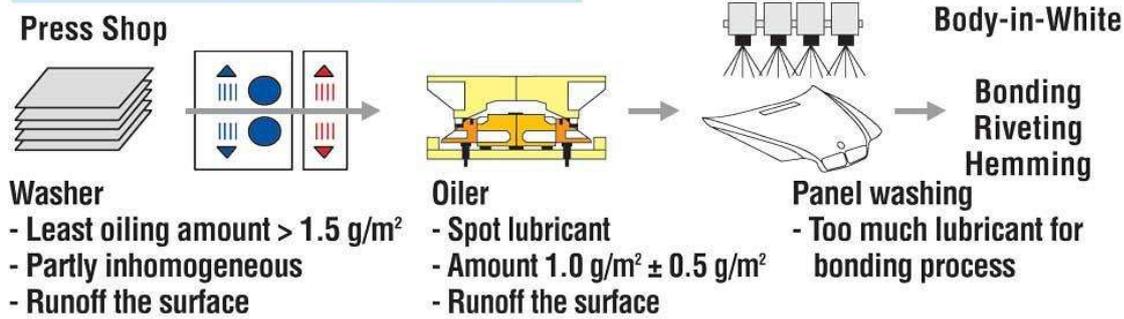
Si possono distinguere essenzialmente due tipologie di lubrificante:

- Lubrificanti solubili in acqua: quantità compresa tra 0,5 e 1,5 g/m², applicata durante la laminazione. Danno sufficiente protezione da corrosione, ma non sono compatibili con la maggior parte di adesivi utilizzati durante la costruzione dell'abitacolo.
- Lubrificanti senza acqua: applicati sempre in piccole quantità alle lamiere, consentono buone performance durante imbutitura e sono compatibili con la maggior parte degli adesivi utilizzati nell'assemblaggio.

Il grande vantaggio dei lubrificanti senza acqua consiste nel fatto che non necessitano di essere rimossi prima delle operazioni di assemblaggio e applicazione di adesivi.

Durante lo stampaggio profondo l'effetto principale dell'utilizzo del lubrificante si apprezza nelle pareti laterali a contatto con il punzone, evitando l'assottigliamento o rottura del materiale. Si può valutare il loro effetto misurando la massima forza applicata dal punzone senza riscontrare rotture [19].

Process With Oil-based Liquid Lubricants



Process With Dry Film Lubricants

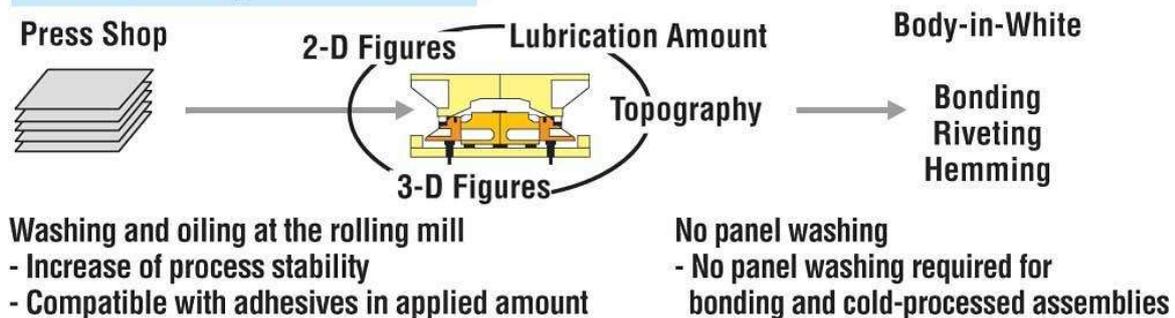


Figura 3.17 – Differenze tra lubrificanti a base acquosa o meno

per lo sviluppo di questo prodotto si utilizza un lubrificante già utilizzato da FCA, già testato e validato, che non necessita di test per essere utilizzato: ANTICORIT PL 39 SX, cera compatibile con i principali adesivi utilizzati nell'automotive che garantisce buona resistenza a corrosione e proprietà di stampaggio.

Il lubrificante non può essere applicato nell'impianto di Fusina perché gli ingombri non permettono l'inserimento del macchinario di ceratura. Si utilizza quindi una oleatrice presente presso il sub contractor Alluminio di Qualità S. p. A. (AQ), impianto utilizzato per slittare a larghezza inferiore a 1 metro i nastri provenienti dal laminatoio.

L'impianto dedicato all'applicazione della cera è stato realizzato da Ravarini Castoldi & C. S. R. L., ed è installato nella parte finale dello slittaggio, in prossimità dell'aspo avvolgitore.

Il lubrificante è contenuto in due serbatoi da 500 l riscaldati a 50- 60°C perché sotto i 44°C solidifica. Per applicare la cera lubrificante al nastro viene fatto scorrere attraverso l'oleatrice, la quale al suo interno è composta da due lame di atomizzazione, a ridosso del materiale, alimentate da pompe dosatrici che in base alle impostazioni di grammatura, velocità del nastro e peso specifico vanno a regolarne la portata.



Figura 3.18 - Oleatrice Ravarini Castoldi & C. S. R. L.

L'olio viene quindi nebulizzato e per via elettrostatica viene fatto aderire al nastro, può essere applicato su entrambe le superfici e la quantità che non raggiunge il materiale viene raccolta sul fondo dell'impianto, che una volta raggiunto un livello minimo attiva una elettropompa di recupero che lo rimette in circolo.

Quando si ferma il nastro, in automatico subentra la modalità stand by che impone alle pompe dosatrici una portata che permetta una oliatura anche alla ripartenza del nastro, evitando di avere delle zone secche.

Affinché il prodotto aderisca bisogna che l'hot-melt sia adatto all'applicazione per via elettrostatica: attraverso le lame vengono create delle particelle che vengono caricate elettricamente per aderire al nastro.

d. Capitolato FCA

Le caratteristiche del prodotto finale vengono imposte dal cliente che deve assemblare i vari componenti che gli giungono dopo lavorazioni intermedie. Tra le varie case automobilistiche che utilizzano prodotti con finitura EDT si è scelto di seguire le linee guida imposte attraverso un capitolato da FCA.

In generale i costruttori più noti utilizzano dei parametri simili con ampi intervalli di sovrapposizione, per cui è possibile individuare una specifica generica, che in caso è possibile adattare leggermente.

Attraverso il capitolato, FCA vuole definire gli standars per le lamiere di alluminio per utilizzo a vista o meno nel veicolo, essenzialmente alle leghe 5xxx e 6xxx, ovvero le più utilizzate in questi ambiti.

Le caratteristiche del materiale devono essere idonee a quanto indicato da *Aluminium Association* per leghe 6000 (Al-Si-Mg) e 5000 (Al-Mg), e regola la nomenclatura che bisogna utilizzare:

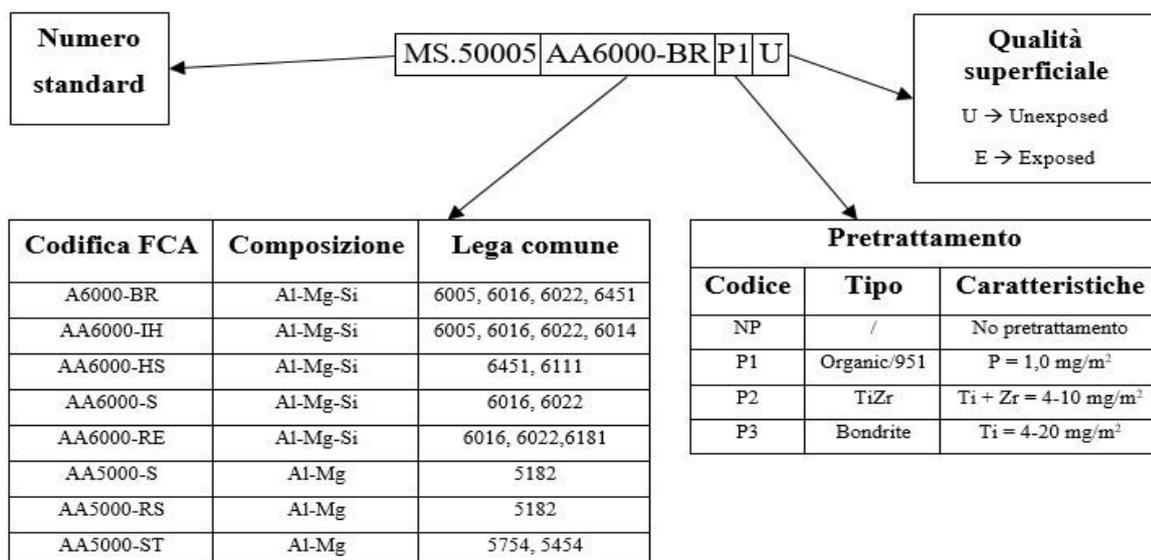


Figura 3.19 - Codifica FCA

Altro aspetto che va a definire il capitolato FCA sono le proprietà dei materiali, che oltre a fornire dei limiti per le caratteristiche meccaniche, delinea anche le proprietà fisiche che può assumere la lamiera.

Sia che la finitura sia mill finish o EDT si vanno a distinguere le lamiere esposte da quelle nascoste, specificando che se sono utilizzate per componenti a vista devono essere esenti da difetti come graffi di piccola entità, mentre per pannelli interni si accettano leggere rigature o graffiature, impronte, marchio, finché non compromettono le operazioni di stampaggio. I parametri principali che vengono fissati da FCA per caratterizzare la superficie sono Ra^2 e RPc^3 :

Ra compreso $0,7 \mu m \leftrightarrow 1,3 \mu m$

RPc compreso 50 picchi/cm \leftrightarrow 100 picchi/cm



Figura 3.20 - Range Ra e RPc

Altro parametro fondamentale che viene fissato e che quindi diventa un obiettivo nello sviluppo del nuovo prodotto, è la quantità di hot melt che si vuole applicare alle superfici della lamiera: il target è $0,8 g/m^2$ con una tolleranza di $\pm 0,3 g/m^2$, quantità molto ridotta, appena apprezzabile al tatto.

² Ra : rugosità superficiale media [μm]

³ RPc : conteggio numero di picchi nell'unità di lunghezza [picchi/cm]

4. Realizzazione prodotto innovativo

Definite le caratteristiche che deve avere il nuovo prodotto bisogna verificare che si riescano ad ottenere, andando a soddisfare il cliente con un prodotto concreto.

Per cercare di conseguire questo risultato sono state svolte varie prove di laminazione affiancate da opportune misurazioni. In questo capitolo verranno elencate le varie prove svolte, step by step in ordine temporale.

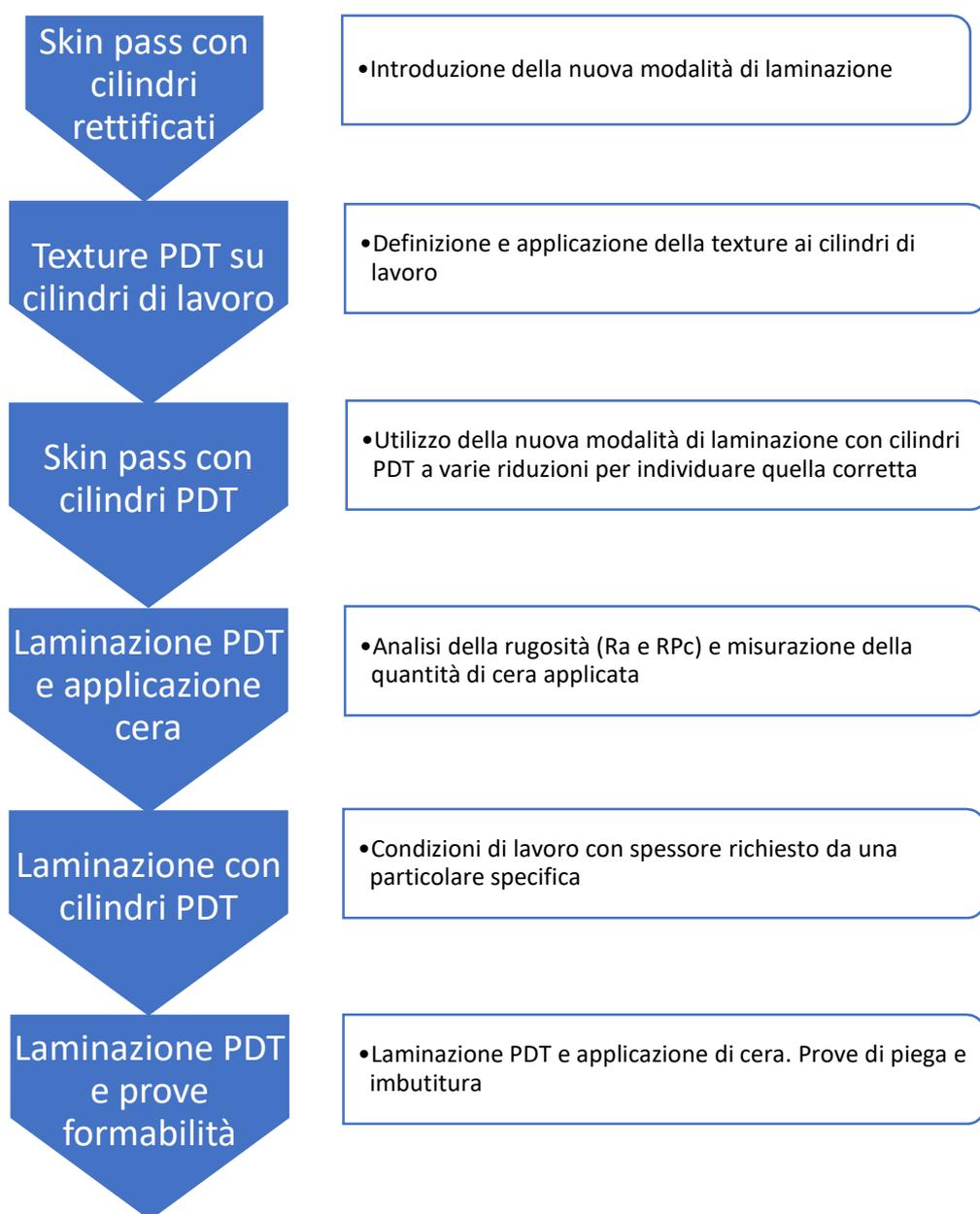


Figura 4.1 - Flow chart delle prove di laminazione svolte

4.1 Prove in modalità *Skin Pass* con cilindri rettificati

Oltre a individuare e creare la superficie dei cilindri di lavoro era necessario introdurre e consolidare la modalità *skin pass* nella laminazione a freddo. Questa condizione di lavoro infatti veniva introdotta appositamente per utilizzare i cilindri di lavoro con finitura PDT, per cui necessitava di test e successive verifiche per valutare il risultato e la fattibilità.

Per prima cosa è stata implementata la modalità *skin pass*, operazione eseguita dall'automazione con l'aiuto di un tecnico DMAT, che aveva realizzato l'impianto di automazione del finitore.

Successivamente sono stati provati dei nastri, utilizzando dei cilindri rettificati, con riduzioni percentuali basse (2,2%-2,5%), per vedere la risposta dell'impianto. Si è notato che se la modalità veniva applicata ad un passo iniziale (primo passo dopo sbizzatore), il coil presenta delle variazioni di spessore troppo marcate, inoltre per alcuni tratti della laminazione si doveva abbassare il carico di lavoro al di sotto delle 150 tonnellate, azione non concessa dai sistemi di autoprotezione dell'impianto.

Quest'ultimo evento è stato notato anche in un passo intermedio, per cui si è deciso di cambiare questa soglia minima e spostarla a 100 tonnellate, sotto le quali la macchina imposta automaticamente tiro in ingresso e uscita pari a zero e viene bloccato il bending, condizione che viene utilizzata quando non è pronta per la laminazione.

4.2 Realizzazione cilindri di lavoro con finitura PDT

Per la realizzazione della texture sui cilindri di lavoro è stata incaricata l'azienda Pomini Tenova (Castellanza, VA), che detiene il know how di questa tecnologia.

Per quanto riguarda invece i cilindri di lavoro, la scelta è ricaduta su una coppia a bassa rotazione, con diametro (586,25 mm) quasi al limite minimo.

I parametri corretti da impostare nel PLC della macchina *Digital Texturing* sono stati impostati secondo l'esperienza maturata da Pomini Tenova, basandosi sulla tipologia di prodotto finito che si vuole produrre.

Una superficie verniciata non può presentarsi con ombreggiature o disomogeneità, motivo per cui si adotta una tipologia di texture leggermente differente rispetto al materiale interno, con Ra più basso e differente distribuzione dei crateri.

Il componente da realizzare è un componente non a vista, e deve rispettare i limiti Ra e RPc definiti nel capitolato FCA. A questo proposito è stata decisa la texture da applicare ai cilindri di lavoro e di conseguenza la digitalizzazione da applicare.

Prima di realizzare l'intera superficie della tavola di lavoro, sono state fatte varie prove per verificare il risultato ottenuto, e correggere eventuali parametri, vedi figura 4.1.

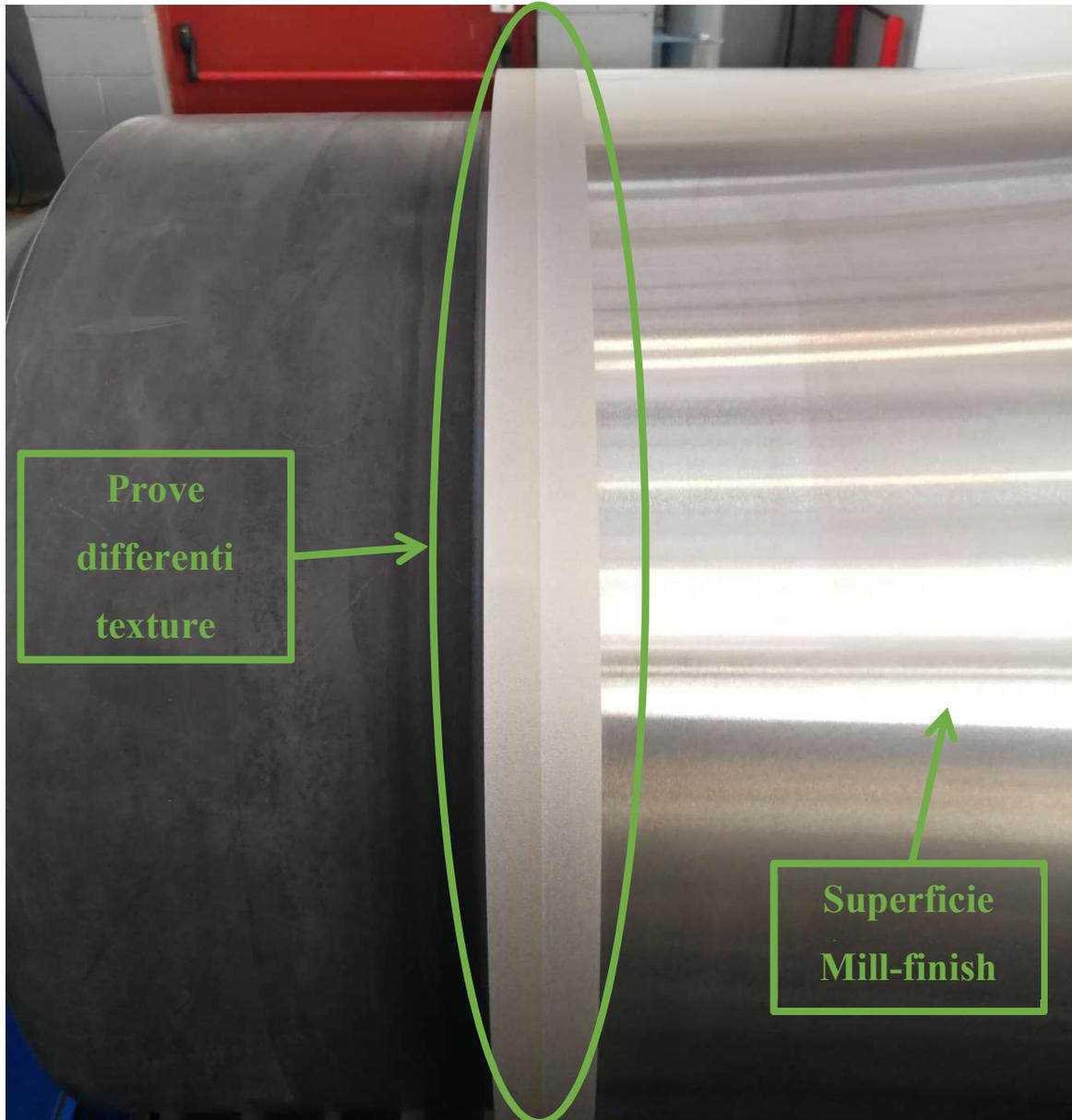


Figura 4.2 - Differenti texture PDT vs Mill finish

Trovato il giusto compromesso tra i vari parametri di lavorazione sono stati eseguiti entrambi i cilindri di lavoro.

Vengono riportati di seguito le foto (figure 4.2 e 4.3) e le caratteristiche principali di come appaiono i cilindri e una micrografia della superficie.

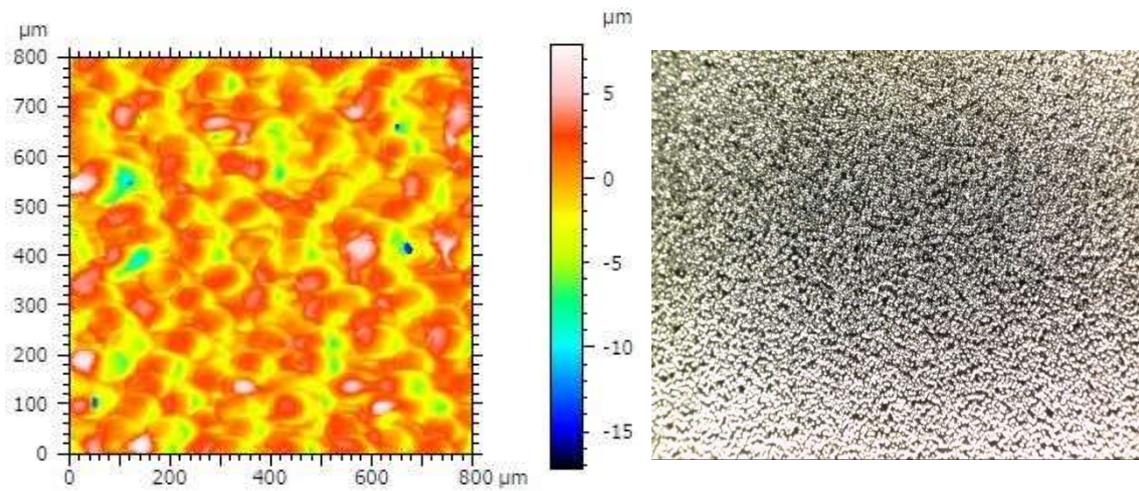


Figura 4.4 - Micrografia superficie cilindro PDT

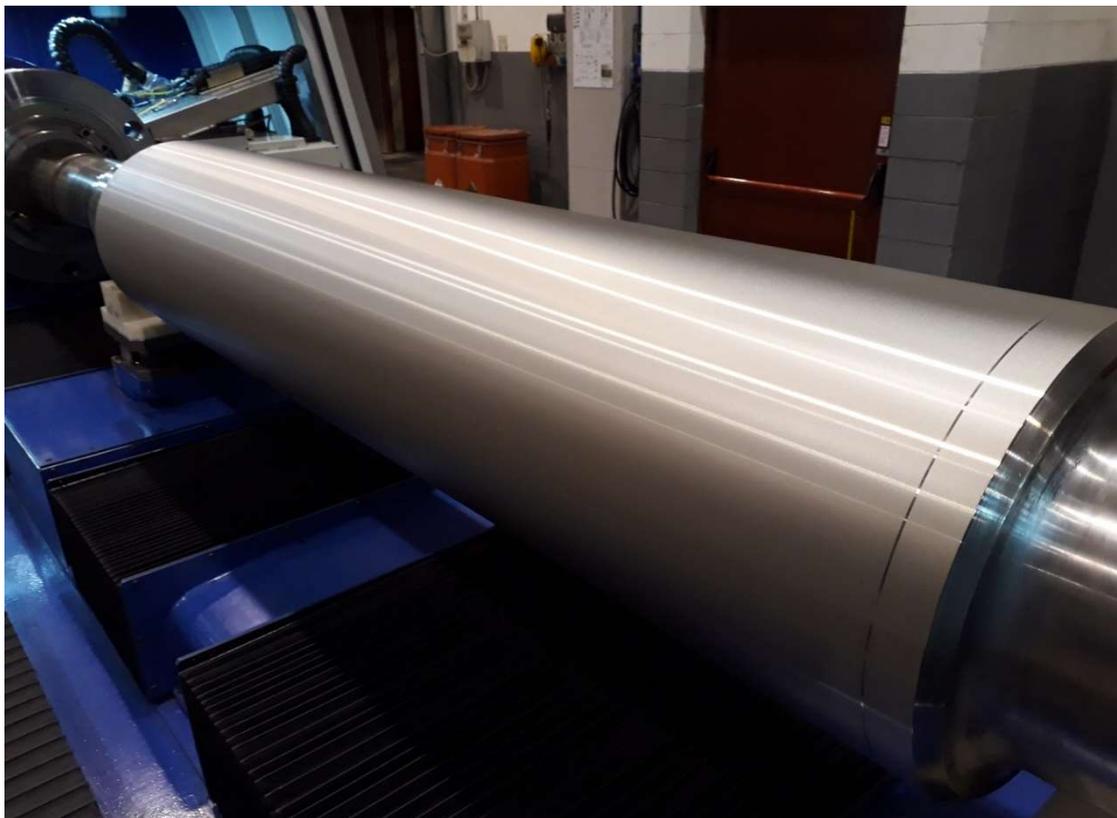


Figura 4.3 - Cilindro con finitura PDT

Tabella 4.1 - Ra e R_{Pc} dei cilindri di lavoro

	Media	Dev. Stand.	Min	Max
Ra [μm]	1,84	0,133	1,45	2,40
R_{Pc} [1/cm]	96,5	8,68	77,3	124

4.3 Prove di laminazione PDT con differenti riduzioni

Una volta verificato che l'impianto è in grado di effettuare la laminazione in *skin pass* e ottenuta la texture sui cilindri di lavoro è stato necessario individuare la riduzione ideale affinché, dopo la laminazione, il materiale si presentasse con una superficie idonea a quanto richiesto dal cliente.

Se la riduzione è troppo bassa si può incorrere in una superficie non del tutto PDT, ma con residui di mill finish; se invece il carico è troppo elevato i rischi sono che la rugosità sia oltre il range richiesto da FCA ($Ra_{max} = 1,3 \mu m$) e soprattutto che la finitura superficiale sui cilindri si deteriori troppo velocemente.

È stata quindi eseguita una prova di laminazione con i cilindri PDT su un coil in lega 5754, utilizzando varie riduzioni durante lo svolgimento di un nastro, dal quale sono stati prelevati dei campioni analizzati presso Pomini Tenova per valutare il risultato e valutare eventuali modifiche.

La laminazione a passo finale si è svolta a bassa velocità (≤ 30 m/min), impostando una portata ridotta della miscela al 30% e utilizzando le cannette per eliminare il residuo di miscela dalla superficie del nastro.

Durante questa fase l'operatore ha dovuto modificare manualmente il carico della macchina per mantenere lo spessore all'interno delle tolleranze richieste dal cliente, poiché, nella modalità *skin pass*, vengono automaticamente disattivati i segnali di controllo automatico dello spessore.

Per prelevare i pezzi dal nastro è stata fermata la laminazione dopo circa 30 metri (necessari per raggiungere la stabilità della lavorazione) con lo scopo di prelevare un campione con riduzione pari a 1,8%, dopo altri 20 m il campione con riduzione pari a 3,4% e infine dopo ulteriori 10 m quello con riduzione pari a 5,7%.

In totale sono stati laminati circa 60 m con i cilindri PDT, per un totale di 920 kg.

Di seguito sono riportati i carichi, i tiri e le velocità applicate nelle tre fasi della lavorazione:

- Riduzione 1,8% → 150 tons, 20 MPa in uscita, 10 MPa in ingresso e 28 m/min
- Riduzione 3,4% → 315 tons, 20 MPa in uscita, 10 MPa in ingresso e 28 m/min

- Riduzione 5,7% → 440 tons, 19 MPa in uscita, 7,5 MPa in ingresso e 16 m/min

A cilindri di lavoro estratti è stato misurato il valore di Ra con il rugosimetro *Taylor-Hobson: Surtronic 3*. In tabella 4 viene riportata la media di 5 misurazioni per ciascuna zona dei cilindri.

Tabella 4.2 - Rugosità cilindri

	Lato motore	Centro	Lato operatore
Cilindro nr. 30	2,34	1,79	2,41
Cilindro nr. 29	1,73	1,52	1,96

I campioni prelevati dal nastro sono stati suddivisi in 3 porzioni in base alla loro posizione rispetto alla larghezza del laminato: lato motore (SIDE 3), lato operatore (SIDE 2) e porzione centrale (MIDDLE). Per ciascun campione è stata fatta un'analisi superficiale, riportate in *Appendice E: prove con differenti riduzioni – Analisi rugosità Pomini Tenova*.

Analizzando i dati forniti da Pomini Tenova è stata valutata come ottimale la riduzione applicata del 5,7%, con la quale si ottiene una superficie completamente PDT, dove sono visibili solamente i crateri e non si hanno residui di mill finish.

Surface – Sheet (5,7%Reduction)

3D CONFOCAL MEASUREMENTS

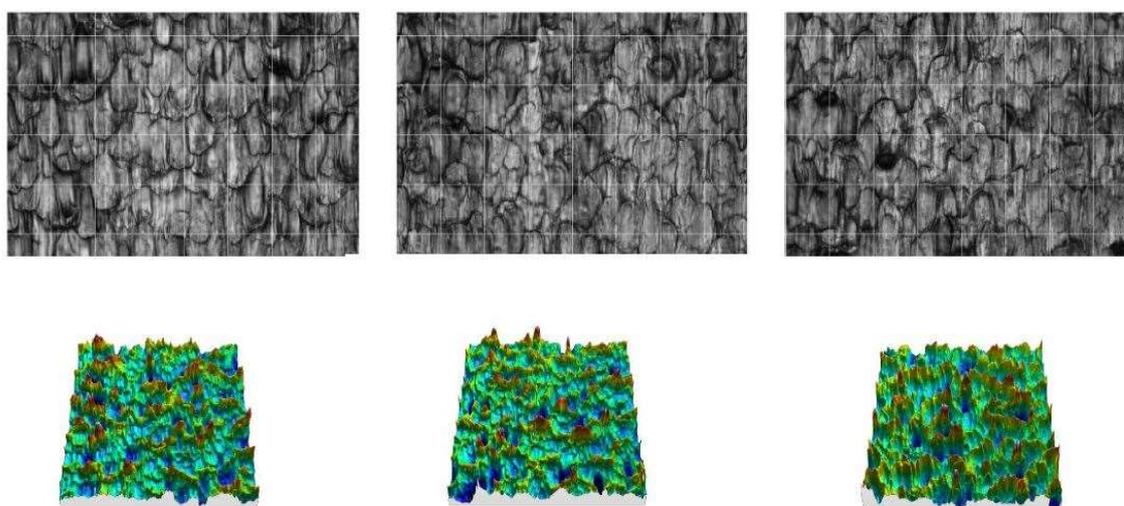


Figura 4.5 - Superficie con riduzione 5,7%

Tuttavia scegliendo questa riduzione si ottengono dei valori di Ra troppo alti rispetto a quanto richiesto dal capitolato FCA, in quanto Ra risulta in media pari a 1,60 μm . Il numero di picchi, risulta invece conforme in quanto mediamente pari a 74,1 picchi/cm.

Questi valori sono stati condivisi con FCA che ha comunque confermato l'accettazione all'utilizzo del prodotto, in quanto la deviazione non costituiva un problema allo stampaggio del materiale.

4.4 Prova di laminazione PDT su nastro in lega 6082 T4

Per consolidare il processo produttivo è stato necessario estendere la laminazione ad un nastro intero, per osservare eventuali criticità che in pochi metri di coil potevano non essere colte. Inoltre era necessario testare l'applicazione della cera sulla superficie del laminato con metodo drylube.

Il nastro prescelto aveva larghezza pari a 1110 mm e uno spessore pari a 5,03 mm. Per applicare la riduzione ottimale come da prove effettuate in precedenza lo spessore finale impostato è stato pari a 4,76 mm.

Nei primi metri la laminazione è risultata particolarmente difficoltosa in quanto la presenza di rotture interne, alature e graffi potrebbero aver causato, insieme a tiri troppo elevati, la rottura del coil durante la fase iniziale.

Una volta eliminata la parte scarta, è stato tagliato un secondo rotolino di materiale per permettere il prelievo dei campioni dalla testa del nastro (suddivisi in lato motore, lato operatore e centrale). Operazione analoga è stata eseguita in coda al coil.

La parte finale si presentava con uno spessore più basso di 5,03 mm (4,9 mm), quindi la riduzione applicata è stata minore (3,26% contro il 5,7% della parte iniziale).

I campioni sono stati quindi analizzati presso il laboratorio di metallurgia dell'Università di Padova, sede di Vicenza.

Nelle tabelle riportate in *Appendice F: prova su nastro intero scarto – Report Slim Fusina Rolling* sono riportati i valori misurati della rugosità, e quindi Ra e RPc.

Si può notare come, nel caso dei campioni in testa al nastro, i valori relativi al numero di picchi rispettano sempre le richieste del cliente mentre Ra è sempre elevato, oltre il limite superiore imposto da FCA, ma già accettati come visto in precedenza (vedi 4.3 *Prove di laminazione PDT con differenti riduzioni*).

Per quanto riguarda invece la parte finale si ha una situazione opposta: valori di Ra sempre in linea con quanto richiesto mentre RPc è troppo basso, condizione che risulta essere non accettabile.

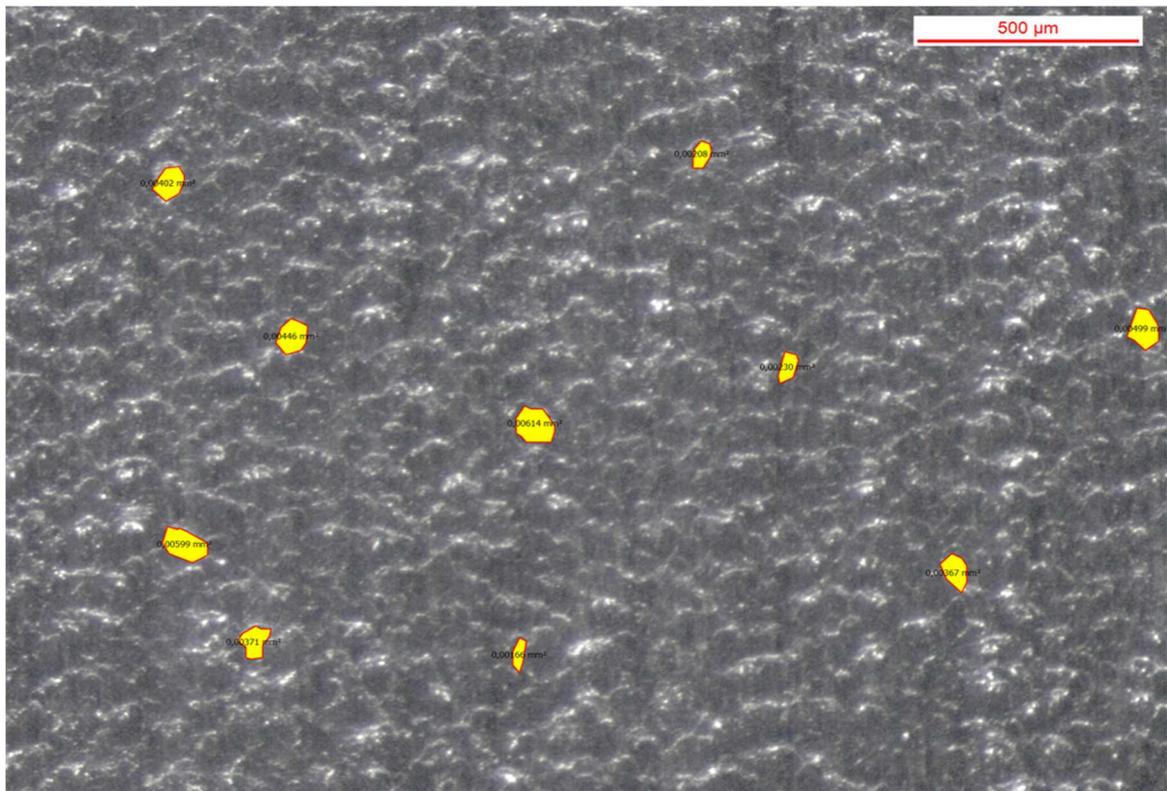


Figura 4.6 - Micrografia superficie PDT, parte iniziale nastro

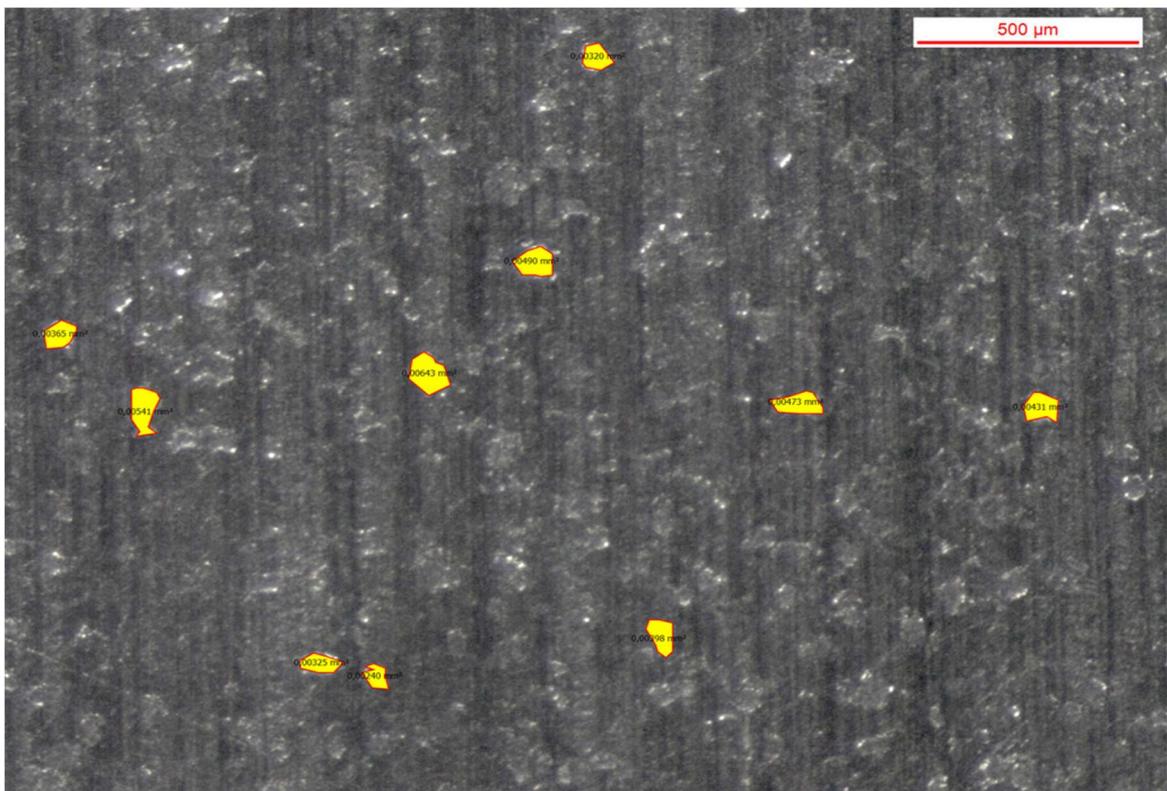


Figura 4.7- Micrografia superficie PDT, parte finale nastro

Le misurazioni sono state eseguite secondo la normativa BS EN 10049:2013, su campioni di misura 300X300 mm, a spessore 4,74 mm. Per ogni campione sono state eseguite 5 misure trasversali e 5 misure longitudinali rispetto alla direzione di laminazione, operazione ripetuta per entrambe le superfici.

Per completare la prova è stata applicata la cera sulla superficie del nastro: questa operazione è stata svolta presso Alluminio di Qualità S. p. A., dove è disponibile l'oleatrice che è stata descritta in precedenza.

I principali parametri impostati in macchina sono stati:

- Velocità del nastro → 15 m/min
- Quantità di cera da applicare → 0,8 g/m² con tolleranza +/- 0,3 g/m²
- Ceratura su entrambe le superfici → Sì

Da questa prova sono stati ricavati due campioni (con/senza un rullo di contrasto abbassato) sui quali è stato misurato il quantitativo di cera, così da verificare il rispetto dei requisiti minimi e massimi previsti da capitolato FCA.

Il metodo generalmente utilizzato per valutare la quantità di cera applicata consiste nella misura con rifrattometro portatile che viene avvicinato al nastro durante lo svolgimento e permette di acquisire il valore della grammatura in tempo reale.

In mancanza di tale strumento il capitolato FCA suggerisce un metodo alternativo basato su una doppia pesata. Si ricava un campione di misura 140X110 mm che viene pesato con bilancia analitica, con o senza cera. La cera viene rimossa attraverso una soluzione a base di Toluene. La semidifferenza delle due pesate indica la quantità di cera presente su ciascuna superficie.

- Pesata massima → 220 g
- Risoluzione → 0,1 mg



Figura 4.8 - Bilancia analitica

I risultati ottenuti sono i seguenti:

- Quantità di cera con utilizzo rullo $\rightarrow 0,5238 \text{ g/m}^2$
- Quantità di cera senza rullo $\rightarrow 0,5634 \text{ g/m}^2$

Entrambi i valori sono risultati conformi ai limiti imposti da FCA.

4.5 Prova di laminazione PDT su nastro in lega 6181 O (2,5 mm)

Per testare a spessori inferiori a 4 mm è stata svolta una prova a spessore finito 2,5 mm con lo scopo di valutare la fattibilità di specifiche alternative disponibili sul mercato automotive.

La prova è stata svolta su un nastro in lega 6181, stato fisico ricotto, larghezza 1110 mm e spessore iniziale 2,65 mm.

È stata seguita la stessa sequenza delle prove precedenti:

- Selezione modalità *skin pass*
- Riduzione miscela al minimo (15%)
- Utilizzo di cannette per asciugare il nastro

Nella fase iniziale della laminazione è stata superata la soglia inferiore del carico di lavoro (circa 100 tonnellate); ciò ha causato il blocco del bending⁴.

Questo ha portato al mancato controllo della planarità del nastro, che si presentava con ampie ondulazioni al centro. Questa condizione ha portato progressivamente alla rottura del nastro e conseguente sospensione della laminazione.

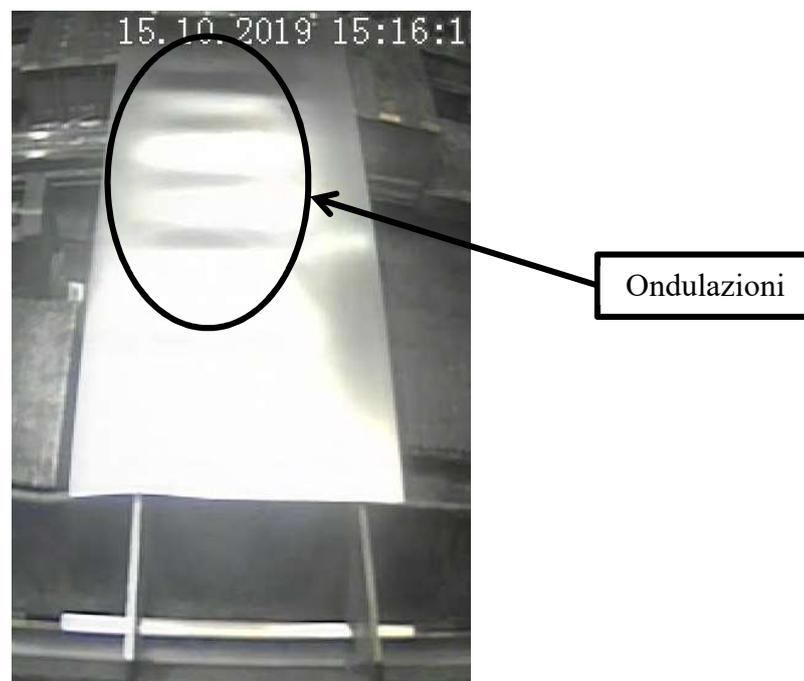


Figura 4.9 - Condizione che ha portato a rottura del nastro

⁴ Bending: curvatura del cilindro di lavoro per schiacciare di più il centro o i lati del nastro

4.6 Prova di laminazione PDT su nastri in lega 6181 T4 (4,26 mm e 3,8 mm)

L'ultima prova effettuata ha avuto lo scopo di verificare il comportamento del materiale durante le lavorazioni di formatura finale quali imbutitura o piegatura.

Per la prova sono stati utilizzati due nastri in lega 6181 in stato fisico T4, laminati a spessore 4,5 mm e 4 mm e successivamente rilaminati a spessori 4,26 mm e 3,8 mm.

In questo caso è stata impostata la miscela al 40%, più alta delle prove precedenti per evitare il surriscaldamento dei cilindri. Una volta raggiunta una lavorazione stabile in modalità *skin pass*, è stato possibile aumentare la velocità di laminazione a valori superiori a 60 m/min, con il vantaggio di ottenere una migliore planarità del nastro e il raggiungimento di una laminazione secondo gli standard previsti per il passo finale con cilindri mill finish.

Dal coil finito a 3,8 mm sono stati prelevati dei campioni con finitura superficiale mill finish. In AQ è stata applicata la cera, impostando il dosaggio dell'oleatrice a $0,8 \text{ g/m}^2$ e $\pm 0,3 \text{ g/m}^2$. Inoltre sono stati prelevati dei campioni con e senza drylube a misura 500 mm X1110-1080 mm. I pezzi sono stati tagliati a dimensione 500X500 mm per i successivi test di piegatura.

Le operazioni di piegatura e imbutitura sono state eseguite presso Coima S. R. L., azienda di carpenteria con sede nel trevigiano.

Lo scopo del test di piegatura è quello di verificare eventuali miglioramenti di prestazione sul materiale con superficie PDT al quale venga applicata della cera.

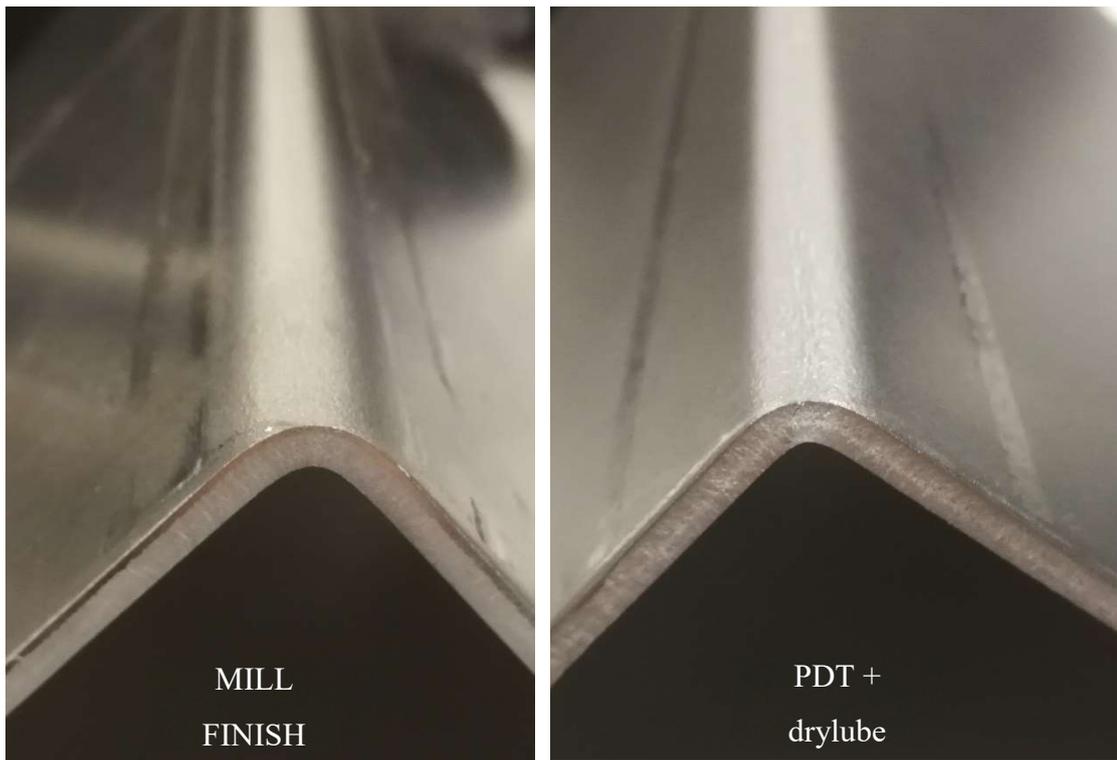


Figura 4.10 - Confronto piegatura Mill finish vs PDT

Come si può notare dalla figura 4.9 non ci sono evidenti differenze tra la superficie mill finish e la superficie PDT con applicazione drylube.

L'imbutitura è stata eseguita attraverso punzoni e matrice cilindrica su tre campioni (mill finish, PDT senza cera e PDT con cera) e successivamente è stata misurata l'altezza raggiunta dalla lamiera a contatto con il punzone.

Nell' Appendice G: prova di laminazione PDT su nastri in lega 6181 T4 (4,26 mm e 3,8 mm) – Report IBK sono riportati i risultati per esteso.



Figura 4.11 - Campione Mill Finish dopo punzonatura



Figura 4.12 - Campione PDT con cera dopo punzonatura



Figura 4.14 - Campione PDT senza cera dopo punzonatura

Dall'analisi delle misurazioni è risultato evidente che il comportamento durante lo stampaggio è influenzato prevalentemente dall'applicazione o meno della cera, in quanto il confronto tra la superficie mill finish (profondità media 16,105 mm) e solo PDT (profondità media 16,165 mm) ha dato risultati paragonabili; l'applicazione della cera ha permesso di raggiungere profondità medie pari a circa 19,68 mm.

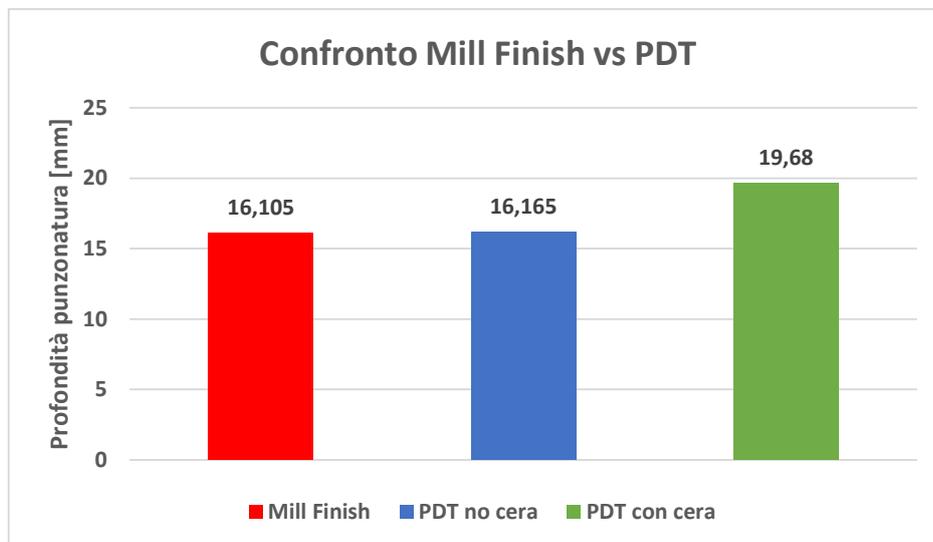


Figura 4.13 - Confronto Mill Finish vs PDT con e senza cera

5. Conclusioni

In questo lavoro di tesi è stato analizzato il processo di laminazione con tecnologia PDT e successiva applicazione di cera con metodo drylube secondo quanto definito dalle specifiche FCA. Le prove svolte nel processo e le analisi effettuate in laboratorio sul prodotto in lega di alluminio delle serie 6xxx e 5xxx hanno permesso di consolidare i parametri principali per una produzione conforme e soddisfacente i criteri del capitolato delle principali case automobilistiche sul mercato.

In questo elaborato vengono descritte nel dettaglio le prove di laminazione con la modalità *skin pass*, con lo scopo di studiare il comportamento dell'impianto con questa nuova modalità di lavoro. Successivamente la stessa modalità è stata provata con i cilindri di lavoro con finitura PDT per individuare la riduzione più adatta per ottenere una superficie omogenea. È stata quindi introdotta la laminazione su un nastro intero, e non parziale come nei casi precedenti, così da poter applicare la cera presso lo stabilimento di Alluminio di Qualità S. R. L. su questa prova sono state effettuate misurazioni sulla rugosità superficiale e sulla quantità di cera, per verificare che fossero stati rispettati i vincoli imposti dal cliente finale. Infine è stata svolta una prova finalizzata a valutare gli effetti sulla formabilità della lamiera con piegatura e imbutitura. valutare se l'utilizzo di tale tecnologia, insieme ad uno strato di cera, migliori la formabilità della lamiera.

A fronte dei risultati delle prove effettuate è stato deciso di limitare lo spessore di laminazione superiore a 3 mm. In futuro un ulteriore sviluppo di processo potrebbe essere analizzato per permettere all'impianto di lavorare anche sotto questa soglia.

La lavorazione con spessori superiori ai 3 mm con cilindri PDT è stata standardizzata nei parametri principali: velocità, modalità di lubrificazione, gestione del carico in macchina e dello spessore. In particolare la velocità di laminazione è risultata comparabile con un normale passo finale mill finish.

Dalle prove eseguite si evince inoltre come la qualità superficiale ottenuta rispecchi le indicazioni del cliente, relative a Ra e R_{Pc} oltre che rispetto all'aspetto estetico della lamiera anche con l'applicazione della cera.

La quantità di drylube presente sul materiale alla fine del processo produttivo risulta essere appena sufficiente per soddisfare le specifiche fornite dal cliente pertanto nei prossimi test

dovrà essere aumentata la quantità target e successivamente verificata l'efficacia attraverso le prove di stampaggio.

Il lavoro deve essere completato definendo il piano di rotazione e rettifica dei cilindri con finitura PDT, in quanto attualmente il laminatoio dispone di un'unica coppia di cilindri che difficilmente potrebbe supportare efficientemente una produzione di serie. La valutazione potrebbe comprendere anche l'acquisto di una nuova rettifica cilindri che permetta di effettuare la lavorazione PDT all'interno dello stabilimento senza la necessità di inviare coppie di cilindri ad un fornitore esterno.

La standardizzazione del processo e del prodotto ha permesso allo stabilimento di Slim Fusina Rolling S. R. L. di poter acquisire i primi ordini di prova con clienti automotive come BMW. Gli ordini attualmente sono in corso di lavoro e finora è stata effettuata la lavorazione con cilindri PDT; seguiranno l'applicazione della cera e successive analisi sul prodotto finale per verificare il rispetto del capitolato BMW.

Appendice A: processi produttivi alluminio

Idroformatura

Nell'idroformatura, processo di lavorazione della lamiera, viene applicata una pressione controllata su una membrana in gomma a contatto con la lamiera da deformare, in questo modo si ottiene una deformazione uniforme della lamiera, evitando grinze e/o strappi.

È stato riscontrato che si possono raggiungere imbutiture più profonde rispetto ai procedimenti convenzionali, perché la pressione attorno alla membrana in gomma forza la coppa contro il punzone. Si ritarda la formazione di eventuali fratture perché l'attrito tra coppa e punzone riduce gli sforzi longitudinali nella coppa che si sta formando.

Procedimento applicato per formare tubi, con geometrie più semplici fino a tubature concave con forme molto complicate; infatti viene utilizzato per produrre componenti strutturali e di scarico per autoveicoli.

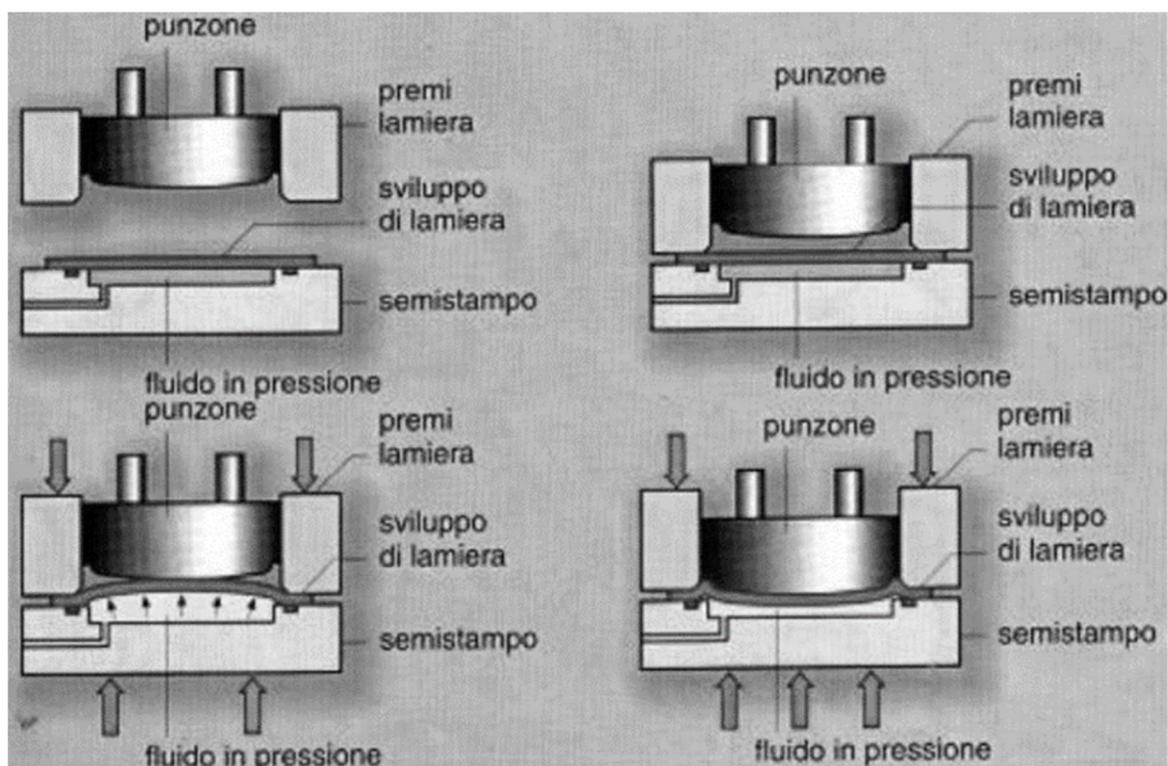


Figure 1 - Idroformatura

Appendice B: scheda tecnica ANTICORIT PL 39 SX

Hotmelt, thixotropic

Description

ANTICORIT PL 39 SX is a semi-dry corrosion protection lubricant with excellent drawing properties. Typically, ANTICORIT PL 39 SX is applied by aluminium and steel mills but can also be used with suitable equipment directly before the press.

ANTICORIT PL 39 SX is the consequent enhancement of the Prelube ANTICORIT PL 3802 39 S which has been established in steel and automotive industries for many years. Thus ANTICORIT PL 39 SX is compatible with all common downstream processes in automobile industry. ANTICORIT PL 39 SX is compatible with common Spot Lubricants, Prelubes and Washing Oils of the RENOFORM and ANTICORIT series.

Application

ANTICORIT PL 39 SX is applied by using conventional or preferably electrostatic spraying systems. It is also applied by roll cladding, typically with nonwoven rolls. The recommended application temperature for spraying and filtration ranges between 65 and 80 °C.

Storage conditions

If sealed in the original container ANTICORIT PL 39 SX can be stored at temperatures between + 5 and + 40 °C for at least 3 years.

The indication of a minimum period of storage does not include any guarantee of durability.

Advantages

- meets all requirements according to VDA 230213
- offers excellent metal forming properties, even in difficult drawing operations
- stands out due to optimal corrosion protection
- properties, even under extreme environmental conditions
- forms a semi-dry film that does not run off
- is compatible with conventional types of adhesives used in automotive industries

- can be removed using mild alkaline or neutral cleaning agents, even after ageing
- has a high KTL compatibility, even when in contact with paints of low solvent or pigment content
- is suitable for use on processed sheet metal (Z, ZE, ZNE, ZF with and without phosphating) as well as normal steel and aluminium excellently compatible with spot lubricants, such as RENOFORM MCO 3802-SN, RENOFORM MCO 3028, Prelube PL 3802-39 S and ANTICORIT washing oils.

ANTICORIT PL 39 SX

Hotmelt, thixotropic

Typical chemical and physical properties:

Property Unit Data Test method → Colour brown-beige, wax-like

Solidification point °C → 44 ISO 2207

Removability → OK VDA 230-213

Saponification number → mgKOH/g 46.4 DIN 51559-1

Corrosion protection →(St 1405)

Condensation climate cycles → > 20 DIN EN ISO 6270-2

Salt spray test hours → 24 DIN EN ISO 9227

The above data is typical of normal production and should not be taken as a specification.

Appendice C: parametri rugosità

Rugosità media (Ra)

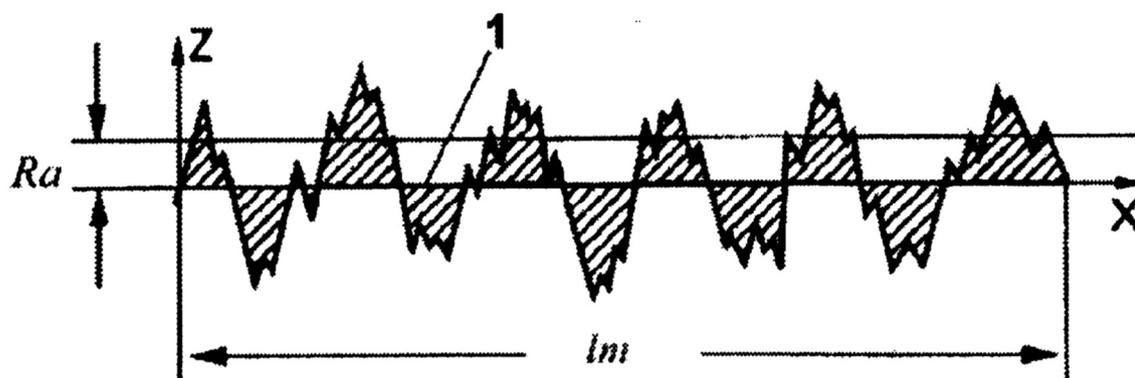


Figure 2 - Ra

La rugosità media Ra, espresso in μm , è il valore medio aritmetico degli scostamenti del profilo reale della superficie da quello medio. È riferito rispetto ad una lunghezza di base del profilo (l_m).

$$Ra = \frac{1}{l_m} * \int_0^{l_m} |z(x)| dx$$

Non è in grado di descrivere completamente la superficie perché i picchi e le valli possono avere profondità molto diverse, ma il discostamento dalla linea media e quindi Ra può essere lo stesso.

Normalmente la misura di Ra si effettua attraverso un semplice rugosimetro, nel quale si imposta la lunghezza di valutazione l_m sulla quale andrà a correre la puntina del tastatore.

Numero di picchi nell'unità di lunghezza (RPC)

Il numero di picchi non è altro che la quantità di creste che oltrepassano una bada costruita attorno al valore medio in un centimetro. Per conteggiare i picchi si esegue una misura sulla lunghezza di valutazione, per poi valutare all'interno di un centimetro quanti se ne trovavano. Se la lunghezza di valutazione è inferiore al centimetro, si utilizza un coefficiente moltiplicativo.

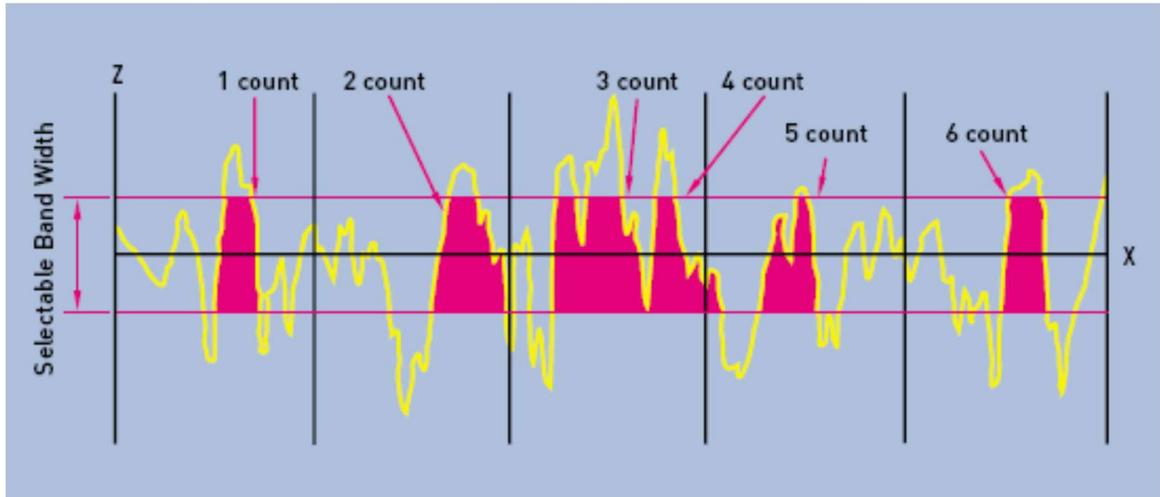


Figure 3 - RPC

$$RPC = \frac{\text{Numero di picchi}}{\text{Lunghezz di valutazione}}$$

L'unità di misura sarà quindi picchi/cm, essendo il numero di picchi adimensionale s'esprime semplicemente 1/cm.

Appendice D: laminazione a freddo in modalità *skin pass* – Report Slim Fusina Rolling

Scopo (Business case)

Nell'ambiente automotive può essere richiesta la qualità superficiale EDT – Electric Discharge Texture – ottenuta in laminazione a freddo durante un passo “skin” eseguito con una coppia di cilindri dotati di una particolare superficie/rugosità.

Si definisce “skinpass” un passo di laminazione a freddo che prevede una riduzione minima dello spessore – attorno a 4-5% – finalizzato a conferire al materiale un abbassamento del carico di snervamento e un conseguente miglioramento delle caratteristiche di stampabilità.

Lo scopo del progetto è quello di adattare il laminatoio a freddo IBK perché possa lavorare in modalità “skinpass” senza compromettere la qualità del nastro (vibrazioni, planarità, allineamento spire, ...) e ottenendo al contempo i benefici previsti da questa lavorazione.

Una volta realizzata la condizione macchina per poter ottenere questa qualità superficiale sul materiale, questo viene spedito presso Alluminio di Qualità dove verrà applicata su tutta la superficie (sia superficie superiore che inferiore) una lubrificazione particolare che aiuta lo stampaggio finale, DryLube.

Descrizione della condizione iniziale

Attualmente il laminatoio a freddo può lavorare in controllo di posizione o in controllo di forza. In entrambe le modalità è necessario effettuare una riduzione di spessore al materiale che preveda un carico di laminazione abbastanza sostenuto per evitare di degenerare in un fenomeno di vibrazione meccanica che si riflette sul materiale rendendolo non conforme. Una riduzione del 4-5% non è quindi sostenibile con l'attuale configurazione macchina.

Obiettivo

Creare una modalità macchina – che verrà di qui in avanti denominata appunto “skinpass” – con la quale si riuscirà a laminare il materiale con riduzione molto ridotta e quindi carichi molto bassi, coordinando anche in modo corretto i tiri in ingresso e uscita affinché le forze in gioco siano ben distribuite e non ci sia slittamento di materiale sotto i cilindri di lavoro.

Ottenere quindi con questa modalità di laminazione a freddo la qualità superficiale richiesta dal cliente finale.

Costi

Possibilità per Slim di entrare all'interno di un mercato automotive che richiede la qualità superficiale EDT, richiesta per un migliore stampaggio finale del materiale.

Descrizione dell'attività

L'attività viene realizzata secondo i seguenti passaggi:

1. Implementazione modalità "skinpass" al finitore IBK via software con tecnico DMAT
2. Test della modalità "skinpass" su materiale non destinato all'automotive su passi intermedi di laminazione
3. Risoluzione di eventuali problemi derivanti dall'utilizzo modalità "skinpass"
4. Esecuzione tessitura EDT su cilindri piani Slim presso Pomini Tenova
5. Test su materiale non destinato ad automotive con coppia cilindri EDT dedicata
6. Verifica rugosità superficiale ottenuta dal test
7. Test su materiale destinato ad automotive con coppia cilindri EDT dedicata
8. Supervisione applicazione drylube sul materiale (presso Alluminio di Qualità)

Si descrivono di seguito i dettagli per ognuna delle fasi elencate.

1. Implementazione modalità skinpass al finitore IBK con tecnico DMAT

2. Test modalità skinpass su materiale non automotive – prova 27/11/18

Condizione macchina: cilindri in uso +8, in servizio dalle 20 del giorno precedente (caldi)

Coil ID: RAL/5 – passo riduzione 9 – 8,8 mm (riduzione 2,2%)

Lo sbozzato arriva direttamente dalla laminazione a caldo.

Impostazioni iniziali da ricetta:

- Tiro ingresso: 5 N/mm²
- Tiro uscita: 10 N/mm²
- Velocità: 30 m/min
- Carico di laminazione: 200 tons

Dal momento che il materiale non ha subito passi di laminazione a freddo calibrati prima dello skinpass, si rileva una variazione eccessiva dello spessore in ingresso e quindi in

uscita dai cilindri di lavoro. Questo non consente di eseguire una prova soddisfacente. Durante la laminazione, tuttavia, si manifesta la necessità di abbassare il carico al di sotto delle 150tons e in questa condizione va in “stop” la macchina: perdita di entrambi i tiri e blocco del bending (condizione “macchina non pronta”).

Da metà laminazione in poi si osserva che il materiale in avvolgimento in uscita raggiunge una situazione di instabilità (ondeggia), pur mantenendo un allineamento pressoché perfetto.

Coil ID: RAL/5 – passo riduzione 4 – 3,9 mm (riduzione 2,5%)

Lo sbozzato ha subito due passi di riduzione a freddo prima del corrente.

Impostazioni iniziali da ricetta analoghe alla precedente prova.

Verso metà laminazione il materiale non rimane a centro gabbia e costringe gli operatori ad alzare i cilindri di lavoro, avanzare con il materiale “a vuoto” per circa 10 metri per poi riprendere la laminazione. Questo comporta una telescopatura molto marcata in avvolgimento (e una difficoltà di laminazione per i successivi passi).

Questo può essere dovuto ai tiri troppo bassi, che vengono modificati come segue:

- Tiro ingresso: 6 N/mm²
- Tiro uscita: 13 N/mm²

Nonostante queste modifiche si mantiene una difficoltà di allineamento spire sull’aspo in uscita.

Viste le difficoltà incontrate sui passi successivi su questo sbozzato sono state sospese le prove. Si consiglia di effettuare altri test con le seguenti modalità:

- Tiro ingresso: 8 N/mm²
- Tiro uscita: 15 N/mm²
- Coppia cilindri bombé +8 freddi (inizio campagna di laminazione)
- Materiale già incrudito a spessore possibilmente inferiore ai 3mm

Al termine di questa prova è stata fatta una verifica software e si è riscontrato che la quota carico di laminazione 150 tons era una sicurezza impostata. In data 29/11 è stata modificata questa quota, solo per la lavorazione in modalità skinpass, ed è stata portata a 100tons (db di riferimento all’interno del PLC: DB205.DBD428).

Appendice E: prove con differenti riduzioni – Analisi rugosità Pomini Tenova

Vengono riportati i risultati integrali prodotti dai laboratori presso Pomini Tenova, sui campioni a varie riduzioni.

Surface – Sheet (1,8%Reduction)

3D CONFOCAL MEASUREMENTS

tenova

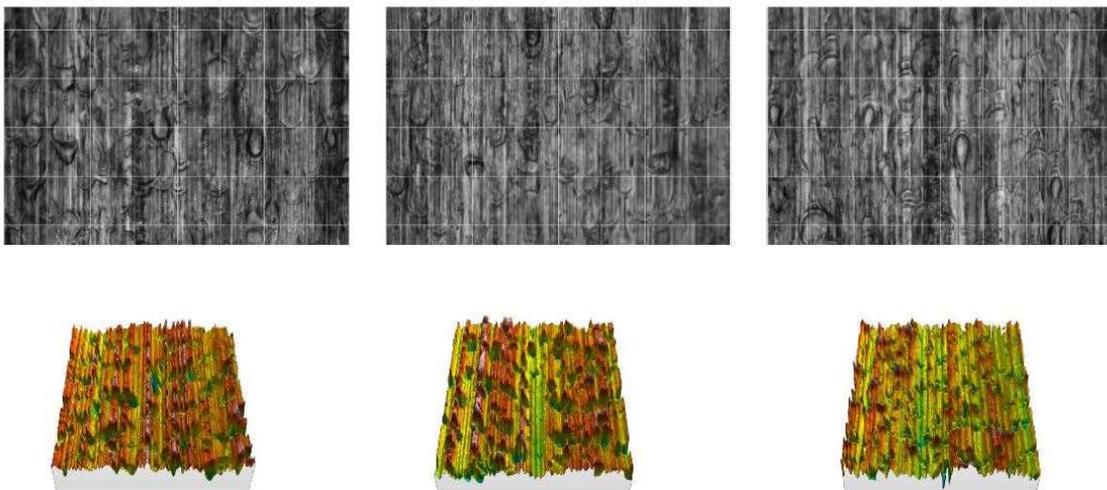
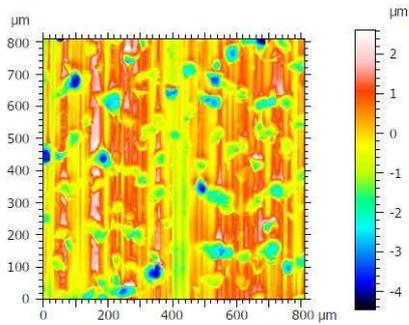


Figure 4 – Riduzione 1,8%: forma crateri

Surface – Sheet (1,8%Reduction)



SURFACE FROM ONE EDGE – MIDDLE

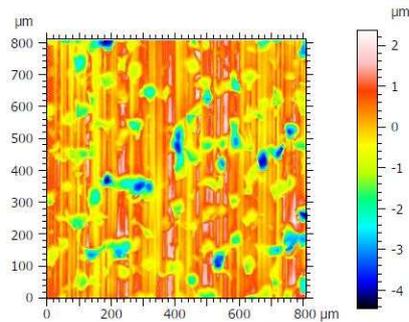


	Context	Mean	Std dev	Min	Max
ISO 4287					
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rz	μm Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	5.12	0.965	2.36	8.48
Ra	μm Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	0.554	0.127	0.277	1.01
Rsk	Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	-1.54	0.464	-3.29	0.161
Peak parameters - Roughness profile					
RPc	1/cm Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed,...	71.8	9.37	45.7	99.7
Amplitude parameters - Waviness profile					
Wa	μm Gaussian filter, 2.5 mm	0.189	0.094	0.0228	0.578
Wt	μm Gaussian filter, 2.5 mm	0.682	0.294	0.0832	1.70

Surface – Sheet (1,8%Reduction)



SURFACE FROM ONE EDGE – SIDE 2

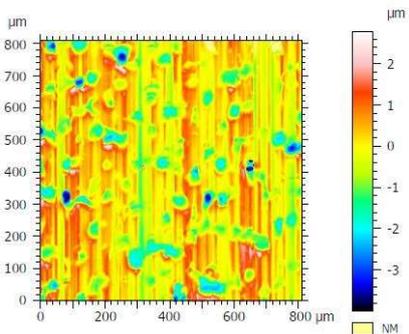


	Context	Mean	Std dev	Min	Max
ISO 4287					
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rz	μm Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	5.03	0.893	2.70	7.53
Ra	μm Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	0.602	0.139	0.310	1.04
Rsk	Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	-1.52	0.420	-2.89	-0.297
Peak parameters - Roughness profile					
RPc	1/cm Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed,...	73.6	8.71	41.4	95.0
Amplitude parameters - Waviness profile					
Wa	μm Gaussian filter, 2.5 mm	0.174	0.0858	0.0151	0.489
Wt	μm Gaussian filter, 2.5 mm	0.634	0.275	0.0986	1.76

Surface – Sheet (1,8%Reduction)



SURFACE FROM ONE EDGE – SIDE 3



	Context	Mean	Std dev	Min	Max
ISO 4287					
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rz	μm Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	5.19	0.968	2.97	8.28
Ra	μm Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	0.535	0.122	0.266	0.922
Rsk	Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	-1.41	0.508	-3.42	0.203
Peak parameters - Roughness profile					
RPc	1/cm Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed,...	70.9	9.66	43.5	95.8
Amplitude parameters - Waviness profile					
Wa	μm Gaussian filter, 2.5 mm	0.185	0.0917	0.0305	0.482
Wt	μm Gaussian filter, 2.5 mm	0.663	0.278	0.107	1.47

Figure 5 - Riduzione 1,8%: analisi rugosità

Surface – Sheet (3,4%Reduction)

3D CONFOCAL MEASUREMENTS

tenova

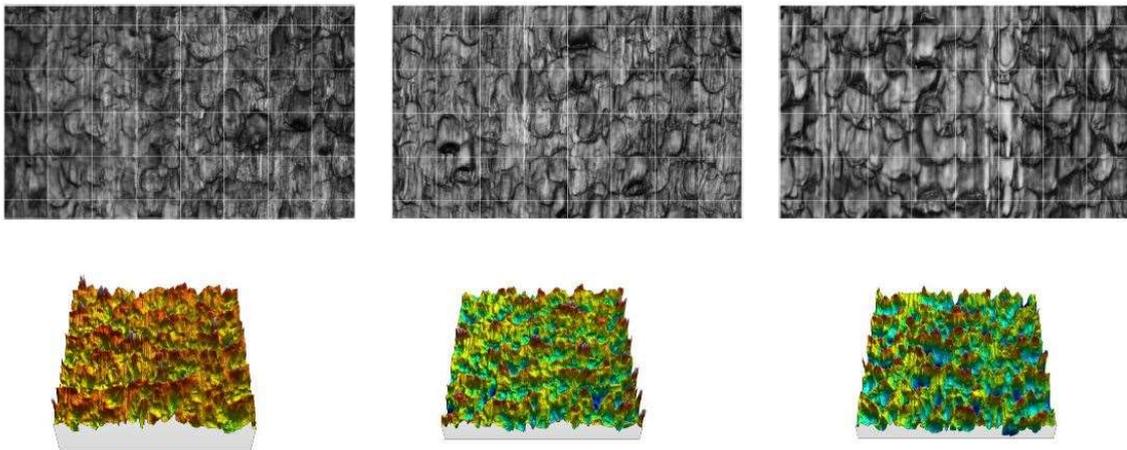
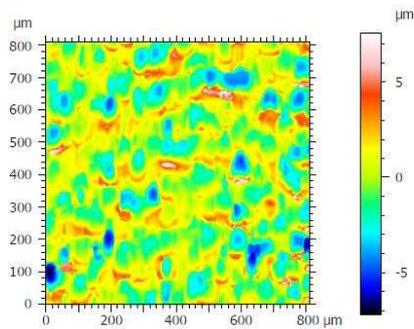


Figure 6 - Riduzione 3,4%: forma crateri

Surface – Sheet (3,4%Reduction)

tenova

SURFACE FROM ONE EDGE – MIDDLE

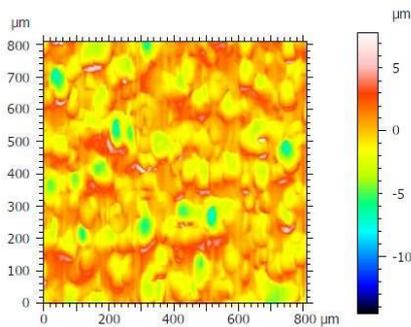


	Context	Mean	Std dev	Min	Max
ISO 4287					
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rz	μm Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	10.6	1.29	7.37	14.0
Ra	μm Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	1.37	0.155	0.730	1.88
Rsk	Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	-0.0368	0.247	-0.715	0.750
Peak parameters - Roughness profile					
RPc	1/cm Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed...	77.4	6.45	54.7	94.2
Amplitude parameters - Waviness profile					
Wa	μm Gaussian filter, 2.5 mm	0.182	0.100	0.0275	0.619
Wt	μm Gaussian filter, 2.5 mm	0.654	0.311	0.118	2.27

Surface – Sheet (3,4%Reduction)

tenova

SURFACE FROM ONE EDGE – SIDE 2

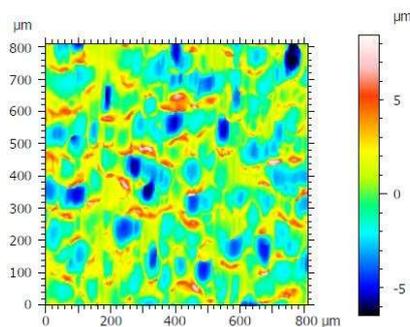


	Context	Mean	Std dev	Min	Max
ISO 4287					
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rz	μm Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	10.5	1.28	6.35	14.0
Ra	μm Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	1.32	0.144	0.929	1.76
Rsk	Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	-0.158	0.259	-0.928	0.745
Peak parameters - Roughness profile					
RPc	1/cm Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed,...	77.2	6.06	63.3	95.6
Amplitude parameters - Waviness profile					
Wa	μm Gaussian filter, 2.5 mm	0.182	0.0956	0.0288	0.684
Wt	μm Gaussian filter, 2.5 mm	0.638	0.277	0.142	2.01

Surface – Sheet (3,4%Reduction)

tenova

SURFACE FROM ONE EDGE – SIDE 3



	Context	Mean	Std dev	Min	Max
ISO 4287					
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rz	μm Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	12.0	1.17	8.33	15.1
Ra	μm Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	1.69	0.221	1.21	2.52
Rsk	Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	0.228	0.192	-0.287	0.874
Peak parameters - Roughness profile					
RPc	1/cm Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed,...	76.0	5.68	61.6	90.3
Amplitude parameters - Waviness profile					
Wa	μm Gaussian filter, 2.5 mm	0.189	0.0999	0.0302	0.579
Wt	μm Gaussian filter, 2.5 mm	0.704	0.312	0.149	2.03

Figure 7 - Riduzione 3,4%: analisi rugosità

Surface – Sheet (5,7%Reduction)

3D CONFOCAL MEASUREMENTS

tenova[®]

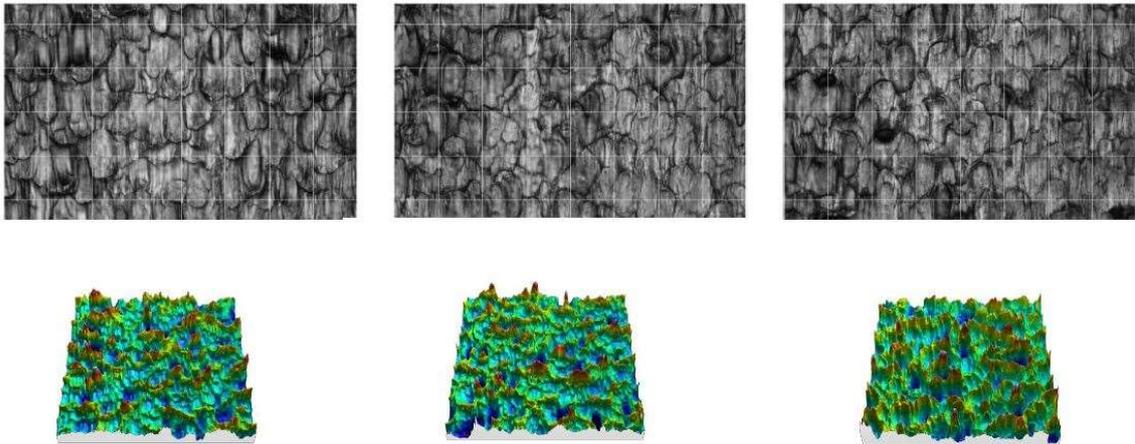
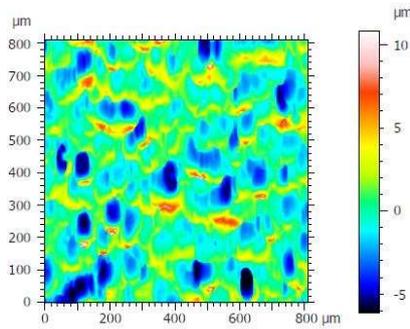


Figure 8 - Riduzione 5,7%: forma crateri

Surface – Sheet (5,7%Reduction)

tenova

SURFACE FROM ONE EDGE – MIDDLE

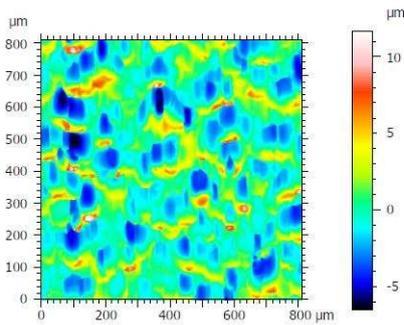


		Context	Mean	Std dev	Min	Max
ISO 4287						
Amplitude parameters - Roughness profile						
Rz	µm	Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	13.1	1.45	9.36	16.5
Ra	µm	Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	1.60	0.169	1.07	2.16
Rsk		Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	0.493	0.238	-0.139	1.08
Peak parameters - Roughness profile						
RPc	1/cm	Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed,...	73.8	5.23	59.0	91.3
Amplitude parameters - Waviness profile						
Wa	µm	Gaussian filter, 2.5 mm	0.181	0.0933	0.0395	0.565
Wt	µm	Gaussian filter, 2.5 mm	0.641	0.272	0.175	1.59

Surface – Sheet (5,7%Reduction)

tenova

SURFACE FROM ONE EDGE – SIDE 2

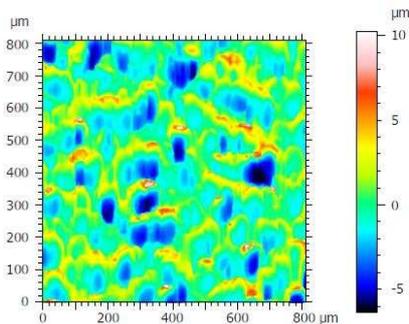


		Context	Mean	Std dev	Min	Max
ISO 4287						
Amplitude parameters - Roughness profile						
Rz	µm	Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	13.5	1.66	8.91	17.5
Ra	µm	Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	1.66	0.186	1.20	2.48
Rsk		Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	0.592	0.253	-0.172	1.44
Peak parameters - Roughness profile						
RPc	1/cm	Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed,...	74.2	6.02	53.2	90.3
Amplitude parameters - Waviness profile						
Wa	µm	Gaussian filter, 2.5 mm	0.169	0.0815	0.034	0.488
Wt	µm	Gaussian filter, 2.5 mm	0.617	0.248	0.134	1.64

Surface – Sheet (5,7%Reduction)

tenova

SURFACE FROM ONE EDGE – SIDE 3



		Context	Mean	Std dev	Min	Max
ISO 4287						
Amplitude parameters - Roughness profile						
Rz	µm	Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	12.3	1.50	8.39	15.5
Ra	µm	Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	1.54	0.149	1.19	2.04
Rsk		Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed	0.452	0.223	-0.258	1.14
Peak parameters - Roughness profile						
RPc	1/cm	Gaussian filter, 2.5 mm, End effects managed,...	74.2	5.53	58.5	91.0
Amplitude parameters - Waviness profile						
Wa	µm	Gaussian filter, 2.5 mm	0.218	0.105	0.0315	0.643
Wt	µm	Gaussian filter, 2.5 mm	0.767	0.316	0.138	1.83

Figure 9 - Riduzione 5,7%: analisi rugosità

Final Considerations

1ST TRIAL



Reduction 1,8%

- Low transfer of texture
- Low Ra
- Large areas of mill finish visible
- High negative Rsk

Reduction 3,4%

- Improved transfer
- Reduced mill finish remaining
- Much higher Ra
- Neutral Rsk

Reduction 5,7%

- Minimal Mill finish
- Further increased Ra
- Positive Rsk
- Some crater elongation beginning

Figure 10 - Considerazioni Pomini Tenova

Appendice F: prova su nastro intero scarto – Report Slim Fusina Rolling

Scopo (Business case)

Nell'ambiente automotive può essere richiesta la qualità superficiale EDT – Electric Discharge Texture – ottenuta in laminazione a freddo durante un passo “skin” eseguito con una coppia di cilindri dotati di una particolare superficie/rugosità. Si definisce “skinpass” un passo di laminazione a freddo che prevede una riduzione minima dello spessore – attorno a 4-5% – finalizzato a conferire al materiale un abbassamento del carico di snervamento e un conseguente miglioramento delle caratteristiche di stampabilità. Lo scopo del progetto è quello di adattare il laminatoio a freddo IBK perché possa lavorare in modalità “skinpass” senza compromettere la qualità del nastro (vibrazioni, planarità, allineamento spire, ...) e ottenendo al contempo i benefici previsti da questa lavorazione.

Una volta realizzata la condizione macchina per poter ottenere questa qualità superficiale sul materiale, questo viene spedito presso Alluminio di Qualità dove verrà applicata su tutta la superficie (sia superficie superiore che inferiore) una lubrificazione particolare che aiuta lo stampaggio finale, DryLube.

Descrizione della condizione iniziale

Attualmente il laminatoio a freddo può lavorare in controllo di posizione o in controllo di forza. In entrambe le modalità è necessario effettuare una riduzione di spessore al materiale che preveda un carico di laminazione abbastanza sostenuto per evitare di degenerare in un fenomeno di vibrazione meccanica che si riflette sul materiale rendendolo non conforme.

Obiettivo

Con questa prova si vuole verificare la qualità superficiale che si ottiene laminando un nastro intero con cilindri PDT (particolare tecnologia utilizzata da Pomini Tenova: Pomini Digital Texturing). Altro scopo di questa prova è quello di valutare l'applicazione della cera, presso il terzista AQ, con valutazione da parte del cliente finale.

Costi

Possibilità per Slim di entrare all'interno di un mercato automotive che richiede la qualità superficiale EDT, richiesta per un migliore stampaggio finale del materiale.

Descrizione dell'attività

L'attività viene realizzata secondo i seguenti passaggi:

1. Individuazione nastro utilizzabile per prova, con caratteristiche simili a quelle richieste per un eventuale ordine
2. Ricottura prima di laminazione per omogeneizzare la struttura e renderlo più lavorabile
3. Laminazione con cilindri PDT
4. Rotolino per opportune misurazioni di rugosità
5. Verifica rugosità superficiale ottenuta dal test (università)
6. Supervisione applicazione drylube sul materiale (presso Alluminio di Qualità)

Si descrivono di seguito i dettagli per ognuna delle fasi elencate.

1. *Individuazione nastro utilizzabile per prova, con caratteristiche simili a quelle richieste per un eventuale ordine*

Per effettuare la prova viene scelto di procedere utilizzando un nastro ritenuto scarto, con caratteristiche simili a quanto richiede il cliente finale. Il cliente aveva rilasciato delle specifiche tra cui poter scegliere:

- 6181 T4 coil 360x5 o 260x5 (o tutte due le misure con una combi) EDT+Dry Lube
- 5182 Coil 130x4 EDT+Dry Lube
- 5754 lamiera 1000x2000x4 EDT+Dry Lube

In quanto si voleva lavorare su un nastro e la lega 5182 risulta essere più difficile da laminare, ci siamo orientati verso un nastro in lega 6181 T4, che poi dovrà essere slittato per ottenere larghezze di 360 mm e 260 mm, con spessore 5 mm. Secondo la disponibilità di nastri scarti si è scelto di procedere con la prova di laminazione con un nastro in lega 6082, con stato fisico T4, larghezza 1110 mm e spessore 5,03 mm. Il nastro in questione è stato dichiarato scarto per un graffio in tutta la sua lunghezza causato da forno continuo.

2. *Ricottura prima di laminazione per omogeneizzare la struttura e renderlo più lavorabile*

Il nastro scelto per la prova prevedeva uno stato fisico T6, ma per favorire l'ulteriore laminazione ha ricevuto un trattamento termico di ricottura in data 02/05/2019 (da controllare). Così facendo il nastro si presenta con un teorico stato fisico T4.

3. *Laminazione con cilindri PDT*

Il giorno 11/06/2019 è stato laminato il nastro di prova. Per eseguire la laminazione si è usata la ricetta Skin Pass, disponibile nel PLC all' IBK. Inserendo questa opzione la macchina non lavora più in controllo di spessore, risulta essere in catena aperta, e quindi lo spessore finale si ottiene soltanto grazie alle correzioni dell'operatore. Lo spessore iniziale è di 5,03 mm e si è deciso di imprimere una riduzione del 5,7%, che in base alle prove precedenti è quella che ha dimostrato di essere il miglior compromesso tra finitura superficiale (non lasciava tracce di mill finish) e profilo rugosità (numero picchi per cm pienamente dentro il target 73,8-74,2 e rugosità leggermente elevata 1,54-1,66). Si va quindi a impostare in macchina uno spessore finale di 4,74 mm. Dopo aver proceduto con l'azzeramento della macchina, necessario dopo aver installato i cilindri necessari alla laminazione in questione, si è iniziato a laminare il nastro. Teoricamente la lavorazione dovrebbe essere fatta con la miscela di lubrificazione al minimo, ma poiché il nastro non si presentava nelle condizioni ottimali è stata usata la lubrificazione al 45%. La prima parte del nastro è risultata essere la più delicata sia perché lavorazione non abituale per gli operatori (tiri troppo elevati ad esempio), sia per le condizioni non ottimali del nastro (bucato, alato e strisciato). Si è registrata una rottura del nastro nella prima parte probabilmente per i tiri troppo elevati. Dopo questa prima fase di assestamento, l'operatore è riuscito a mantenere uno spessore di uscita abbastanza vicino a quello obiettivo, si è proceduto quindi alla raccolta di campioni per verificare le caratteristiche di rugosità.

4. *Rotolino per opportune misurazioni di rugosità*

Si è scelto di prelevare due campioni all'inizio della laminazione, facendo un rotolino in testa al nastro. Di questi campioni, uno destinato a Pomini Tenova e l'altro all'università degli studi di Padova, si andrà a valutare rugosità e numero di picchi in tre zone: lato operatore, lato motore e in centro. Operazione analoga è stata eseguita in coda al nastro, con le stesse modalità dei prelievi dei campioni. Nella parte finale del nastro però si è registrato uno spessore inferiore al 5,03 mm del resto del nastro: 4,91 mm con uno spessore dopo laminazione di 4.7 mm circa, e quindi una riduzione del circa 4%, quindi probabilmente saranno campioni meno affidabili.

Analisi rugosità secondo normativa BS EN 10049:2013

Il rugosimetro utilizzato è *Taylor-Hobson: Surtronic 3*, e sono stati impostati i seguenti valori:

- Lunghezza di misura → 12,5 mm
- λ_c → 2,5 mm
- Filtro microrugosità → 2,5 μm
- Filtro gaussiana → 0,8 mm

Table 1 - Analisi rugosità parte iniziale del nastro

		1T	2T	3T	4T	5T	1L	2L	3L	4L	5L	Media	Dev Std	Max	Min	
Superiore	lato motore	Ra	1,5	1,54	1,3	1,24	1,32	1,5	1,46	1,36	1,3	1,32	1,38	0,12	1,54	1,24
		Rq	1,96	2,14	1,66	1,62	1,74	1,9	1,84	1,76	1,64	1,68	1,824	0,20	2,14	1,62
		Rz	10,6	11,2	9	9,6	9,7	9,7	9,6	9,5	8,1	9	10,02	0,78	11,2	8,1
		RPC	51	63	50								54,7	5,91	63	50
	centro	Ra	1,48	1,36	1,34	1,3	1,12	1,5	1,3	1,22	1,3	1,38	1,32	0,12	1,5	1,12
		Rq	1,88	1,76	1,8	1,66	1,48	1,92	1,68	1,54	1,66	1,8	1,716	0,14	1,92	1,48
		Rz	10,7	10	10	9,2	8,2	10,8	9,6	8,1	9	10,4	9,62	0,85	10,8	8,1
		RPC	50	56	60								55,3	4,11	60	50
	lato operatore	Ra	1,56	2,24	2,98	1,62	2,04	1,16	1,46	2,22	1,6	1,28	2,088	0,51	2,98	1,16
		Rq	2,02	3,2	4,16	2,14	2,7	1,48	1,92	3,04	2,02	1,58	2,844	0,78	4,16	1,48
		Rz	11,8	15,2	18	11,2	14	7,7	10,2	13,8	10,8	7,3	14,04	2,45	18	7,3
		RPC	52	55	56								54,3	1,70	56	52
Inferiore	lato motore	Ra	1,68	1,64	1,8	1,6	1,68	1,74	1,82	1,66	1,38	1,54	1,68	0,07	1,82	1,38
		Rq	2,12	2,04	2,28	2,02	2,1	2,18	2,62	2,14	1,76	1,96	2,112	0,09	2,62	1,76
		Rz	12,4	10,8	12	10,8	11	11,1	13,8	11,5	9,3	11,2	11,4	0,67	13,8	9,3
		RPC	49	70	72								63,7	10,40	72	49
	centro	Ra	1,44	1,42	1,32	1,6	1,58	1,48	1,4	1,26	1,8	1,34	1,472	0,10	1,8	1,26
		Rq	1,82	1,82	1,72	2,04	2,02	1,86	1,74	1,62	2,64	1,74	1,884	0,12	2,64	1,62
		Rz	9,7	10,2	10,8	11,5	10,9	9,7	9,2	8,4	12,1	9,4	10,62	0,62	12,1	8,4
		RPC	69	58	59								62	4,97	69	58
	lato operatore	Ra	1,84	2,52	1,96	1,9	2,02	1,72	1,82	1,76	1,74	1,74	2,048	0,24	2,52	1,72
		Rq	2,28	3,96	2,58	2,46	2,52	2,16	2,28	2,18	2,28	2,2	2,76	0,61	3,96	2,16
		Rz	12	16,4	15,3	14,3	13	12,2	12,7	11,8	12,8	11,4	14,2	1,57	16,4	11,4
		RPC	63	60	74								65,7	6,02	74	60

Table 2 - Analisi rugosità parte finale del nastro

		1T	2T	3T	4T	5T	1L	2L	3L	4L	5L	Media	Dev Std	Max	Min		
FINE	Superiore	lato motore	Ra	0,78	0,64	0,7	0,68	0,58	0,68	0,84	0,74	0,74	0,924	0,09	1,08	0,78	
			Rq	1,02	0,82	0,88	0,86	0,78	0,92	1,08	1	0,96	0,96	5,06	0,60	6	4,4
			Rz	5,5	6	4,4	4,6	4,7	5	5,9	5,7	5,5	5,5	32,7	7,93	41	22
			RPC	22	41	35								0,768	0,04	0,8	0,66
	Superiore	centro	Ra	0,7	0,8	0,78	0,8	0,76	0,68	0,68	0,66	0,7	0,74	1,008	0,07	1,12	0,88
			Rq	0,9	1,12	1,02	0,98	1,04	0,92	0,88	0,96	1,06	1,06	5,9	0,70	7,1	4,8
			Rz	5,2	7,1	6	5,2	6,6	5,4	4,8	4,8	5,2	6,2	40,7	9,39	52	29
			RPC	29	41	52								0,828	0,11	0,96	0,44
	Superiore	lato operatore	Ra	0,96	0,74	0,94	0,68	0,5	0,44	0,66	0,66	0,62	0,78	1,072	0,13	1,22	0,62
			Rq	1,22	0,98	1,22	0,9	0,62	0,68	0,88	0,82	1,02	1,02	6,38	0,72	7,6	3,2
			Rz	7,6	6,2	6,7	5,6	3,2	4,7	4,9	4,9	4,8	6,6	32,7	13,30	44	14
			RPC	14	44	40								0,876	0,04	1,34	0,8
FINE	Inferiore	lato motore	Ra	0,88	0,92	0,86	0,8	1,34	1,24	0,92	0,86	0,86	1,116	0,05	2,12	1,02	
			Rq	1,12	1,16	1,14	1,02	2,12	1,86	1,48	1,26	1,06	1,06	6,06	0,27	8,5	5
			Rz	5,6	6,1	6,2	6,4	8,5	7,8	6,8	5	5	5,2	35,3	13,52	51	18
			RPC	51	18	37								0,904	0,07	1,04	0,8
	Inferiore	centro	Ra	0,98	0,92	0,8	0,84	0,98	1	0,8	1,04	0,96	0,84	1,16	0,09	1,36	1,04
			Rq	1,26	1,18	1,04	1,08	1,32	1,06	1,36	1,26	1,14	1,14	6,68	0,71	7,8	5,8
			Rz	7,8	6,6	5,8	6,1	6,9	6,8	7,1	7,1	7,1	6,4	38,3	9,39	50	27
			RPC	27	38	50								0,856	0,03	0,9	0,58
	Inferiore	lato operatore	Ra	0,9	0,86	0,86	0,84	0,58	0,62	0,82	0,82	0,78	0,8	1,1	0,03	1,14	0,72
			Rq	1,14	1,1	1,1	1,1	0,72	0,82	1,08	1,02	1,04	1,04	6,42	0,10	6,6	3
			Rz	6,4	6,4	6,6	6,3	3	4,4	5,7	6,2	6,2	5,6	43	14,85	54	22
			RPC	54	22	53											

Misurazione quantità di cera sul materiale

Vengono utilizzati due campioni: uno in cui è stato utilizzato il rullo in uscita e l'altro senza. È stata misurata la quantità di drylube presente sulle superfici dei campioni per via analitica.

Le dimensioni dei campioni sono 140 X 110 mm, spessore 4,76 mm, e sono stati misurati sia con che senza cera, la rimozione è avvenuta attraverso pulizia accurata con acetone:

<i>[g]</i>	<i>Senza rullo</i>	<i>Con rullo</i>
<i>Con cera</i>	199,7438	198,9825
<i>Senza cera</i>	199,7265	198,9664

Una volta eseguite le pesate si calcola la quantità effettiva di cera su ciascuna superficie:

$$Quant. \text{ cera}_{CON RULLO} = \frac{Peso_{CON CERA} - Peso_{SENZA CERA}}{Area} = \frac{198,9664 - 198,9825}{0,140 * 0,110} = 1,0476 \text{ g/m}^2$$

$$Quant. \text{ cera sup}_{CON RULLO} = \frac{Quant. \text{ cera}_{CON RULLO}}{2} = 0,5238 \text{ g/m}^2$$

$$Quant. \text{ cera}_{NO RULLO} = \frac{Peso_{CON CERA} - Peso_{SENZA CERA}}{Area} = \frac{199,7438 - 199,7265}{0,140 * 0,110} = 1,1266 \text{ g/m}^2$$

$$Quant. \text{ cera sup}_{NO RULLO} = \frac{Quant. \text{ cera}_{NO RULLO}}{2} = 0,5634 \text{ g/m}^2$$

Appendice G: prova di laminazione PDT su nastri in lega 6181 T4 (4,26 mm e 3,8 mm) – Report IBK

Vengono riportati i report generati in automatico alla fine di un passo di laminazione dal finitore IBK dei nastri utilizzati per l'ultima prova di laminazione.

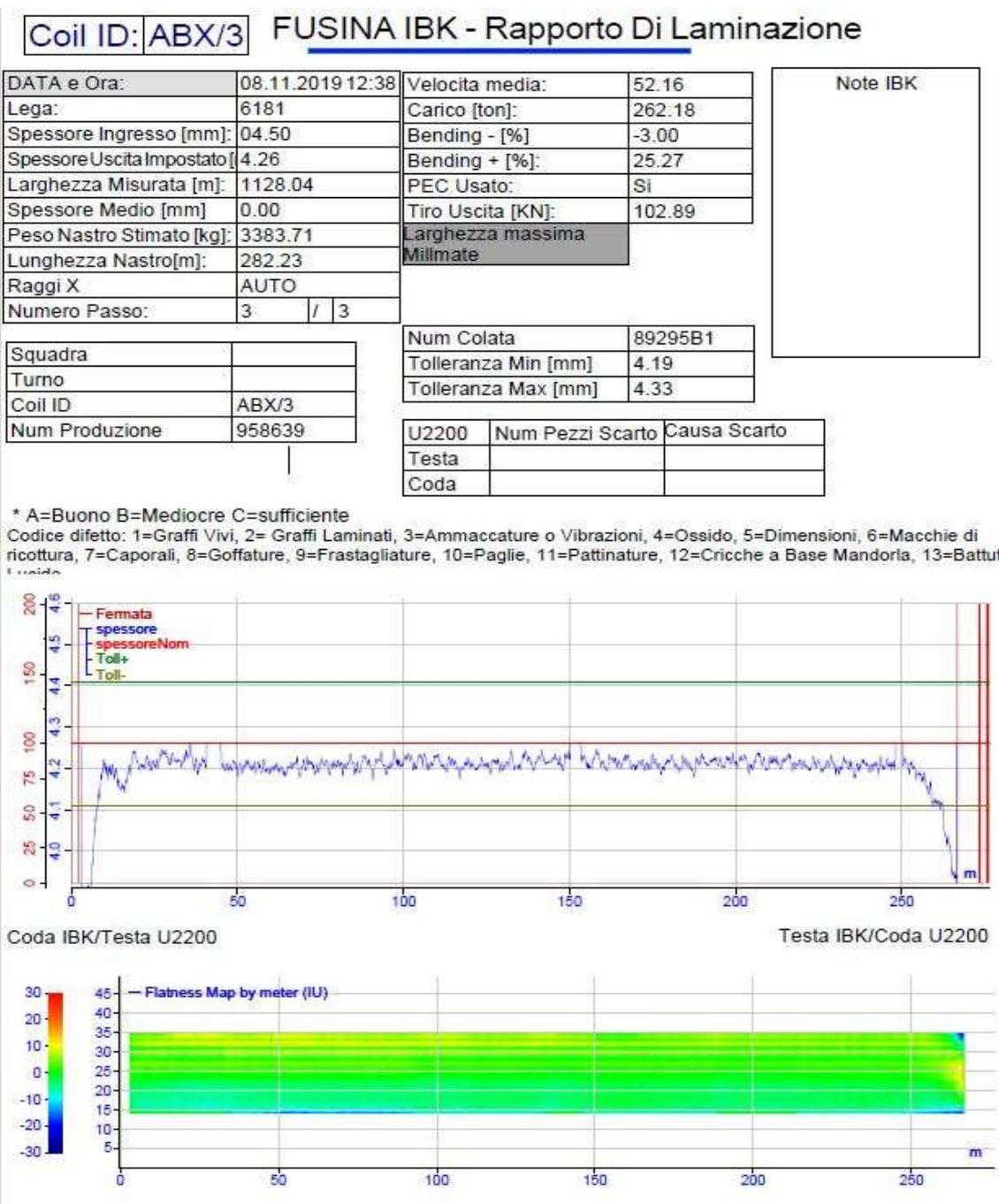


Figure 11 - Nastro finito a 4,26 mm

Coil ID: 956/4 FUSINA IBK - Rapporto Di Laminazione

DATA e Ora:	08.11.2019 12:53	Velocita media:	49.54
Lega:	6181	Carico [ton]:	336.75
Spessore Ingresso [mm]:	04.00	Bending - [%]:	-3.00
Spessore Uscita Impostato:	3.80	Bending + [%]:	48.03
Larghezza Misurata [m]:	1072.45	PEC Usato:	Si
Spessore Medio [mm]	0.00	Tiro Uscita [KN]:	103.00
Peso Nastro Stimato [kg]:	2488.13	Larghezza massima Millmate	
Lunghezza Nastro[m]:	243.21		
Raggi X	AUTO		
Numero Passo:	3 / 3		

Note IBK

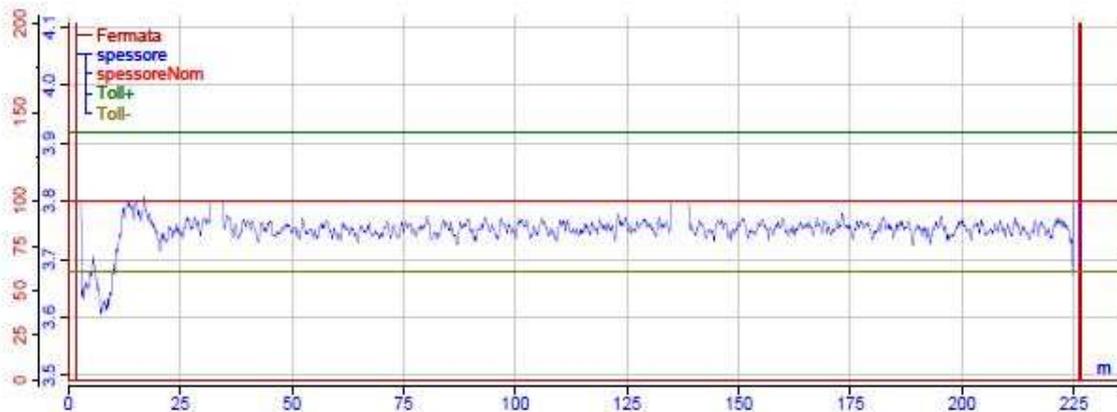
Squadra	
Turno	
Coil ID	956/4
Num Produzione	958484

Num Colata	89219C3
Tolleranza Min [mm]	3.73
Tolleranza Max [mm]	3.87

U2200	Num Pezzi Scarto	Causa Scarto
Testa		
Coda		

* A=Buono B=Mediocre C=sufficiente

Codice difetto: 1=Graffi Vivi, 2= Graffi Laminati, 3=Ammaccature o Vibrazioni, 4=Ossido, 5=Dimensioni, 6=Macchie di riccottura, 7=Caporali, 8=Goffature, 9=Frastagliature, 10=Paglie, 11=Patinate, 12=Cricche a Base Mandorla, 13=Battute



Coda IBK/Testa U2200

Testa IBK/Coda U2200

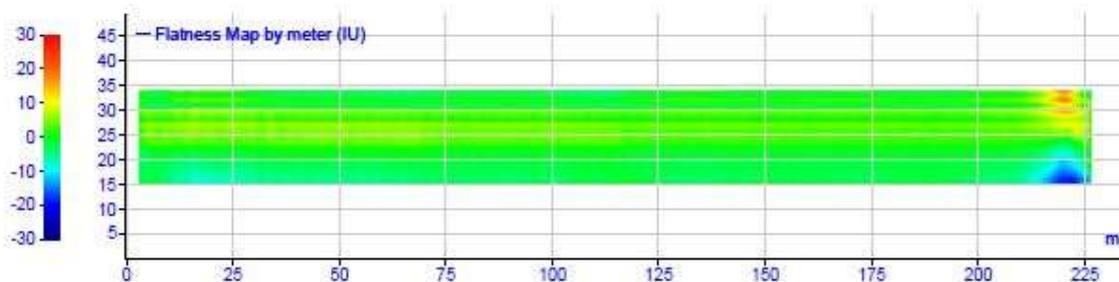


Figure 12 - Nastro finito a 3,8 mm

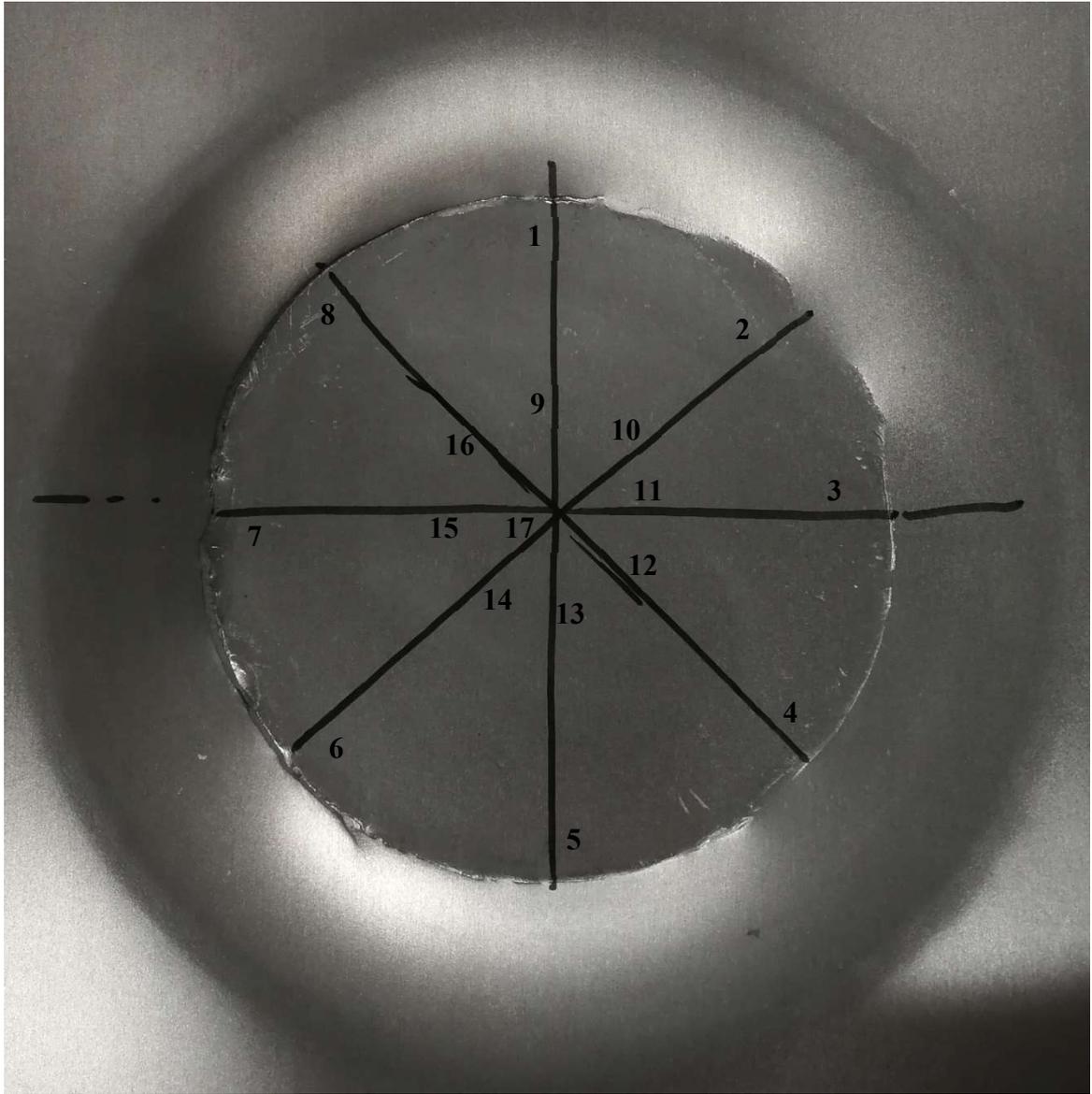


Figure 13 - Punti di misurazione profondità

Table 3 - Misure profondità

	Mill Finish	PDT, no cera	PDT e cera
1	16,26	15,87	21,22
2	15,55	14,46	20,43
3	14,78	14,21	21,91
4	15,09	14,88	21,17
5	14,60	16,36	20,86
6	16,49	17,82	18,54
7	17,61	18,12	21,32
8	16,45	16,99	20,63
9	15,95	16,37	20,10
10	16,04	15,96	19,82
11	14,65	16,13	19,47
12	15,29	16,49	21,00
13	14,78	16,79	17,79
14	14,98	17,06	17,45
15	17,43	16,93	18,28
16	16,18	16,96	18,74
17	16,68	15,27	18,47
MAX	17,61	18,12	21,91
min	14,60	14,21	17,45
Media	16,105	16,165	19,68

Appendice H: composizione delle leghe utilizzate nelle prove

EN AW-5754

Lega di alluminio e magnesio.

Tabella 1 – Composizione chimica 5754, EN 573-3:2013

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Oth
0,40	0,40	0,10	0,50	2,6-3,6	0,30	-	0,20	0,15	-	-	0,15

EN AW-6181

Lega di alluminio magnesio e silicio.

Tabella 2 - Composizione chimica 6181, EN 573-3:2013

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Oth
0,8-1,2	0,45	0,10	0,15	0,6-1,0	0,10	-	0,20	0,10	-	-	0,15

EN AW-6082

Lega di alluminio magnesio e silicio.

Tabella 3 - Composizione chimica 6082, EN 573-3:2013

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Oth
0,7-1,3	0,50	0,10	0,4-1,0	0,6-1,2	0,25	-	0,20	0,10	-	-	0,15

Riferimenti

1. Andini, Salvatore. *SlidePlayer*. s.d. <https://slideplayer.it/slide/10428218/>.
2. Runge, Dr. Jude M. n.d. <https://www.anodizing.org/page/1stALCar/The-First-Aluminum-Automobiles.htm>.
3. *MOTOR CAR*. s.d. <https://motor-car.net/bugatti/item/17657-bugatti-type-10>.
4. *Pinterest*. s.d. <https://www.pinterest.it/pin/541065342707738694/>.
5. *Flickr*. s.d. <https://www.flickr.com/photos/26445677@N03/20783473238/>.
6. *Pinterest*. s.d. <https://www.pinterest.fr/pin/13229392635436484>.
7. Richard, Sylvain. 21 Gennaio 2017. <https://www.4legend.com/2017/porsche-928-s-d49-de-1983-un-prototype-innovant-avec-une-carrosserie-en-aluminium/>.
8. «Aluminium Automotive Manual.» *EUROPEAN ALUMINIUM*. 2013. <https://www.european-aluminium.eu/resource-hub/aluminium-automotive-manual/>.
9. Tosi, Adriano. «motor1.» *Audi, dalla V8 alla A8, quasi trent'anni di lusso e hi-tech*. 6 Agosto 2017. <https://it.motor1.com/news/220294/audi-la-storia-delle-ammiraglie-dalla-v8-alla-a8/>.
10. «Aluminium content in european passenger cars.» Duckerfrontier, 2019.
11. Hirsch, Juergen R. «Automotive Trends in Aluminium - The European Perspective.» Gennaio 2004.
12. R. S. Long, E. Boettcher, D. Crawford. «Current and Futures Uses of Aluminium in the Automotive Industry.» *JOM*, 2017.
13. S. Kalpakjian, S. R. Schmidt. «Imbutitura» In *Tecnologia meccanica*, di S. R. Schmidt S. Kalpakjian, 381-391. Milano - Torino: Pearson Italia, 2014.
14. *Mevar s. r. l.* s.d. <http://www.mevar.it/tipi-di-stampi.php>.
15. S. Kalpakjian, S. R. Schmidt. «Laminazione» In *Tecnologia meccanica*, di S. R. Schmidt S. Kalpakjian, 286-306. Milano - Torino: Pearson Italia, 2014.

16. Jameson, Elman C. «Description and development of EDM.» In *Electrical Discharge Machining*, di Elman C. Jameson, 1-60. Society of Manufacturing Engineers, 2001.
17. R. McWhirter, M. Cavallari, C. Trevisan. *POMINI DIGITAL TEXTURING - PDT*. s.d.
18. M. Cavallari, P. Gaboardi, R. McWhiter. «Roll texturing for cold rolling mills.» Ottobre 2016.
19. Kim, Hyunok. «Evaluating dry film lubricants for automotive applications Part I.» *Stamping Journal*, 2017.