



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTA' DI INGEGNERIA**

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

**IL PROCESSO INNOVATIVO DI ESTRUSIONE PER  
ATTRITO (FSE) PER UN RICICLO ECOSOSTENIBILE  
DELLE LEGHE LEGGERE**

*THE INNOVATIVE PROCESS OF FRICTION STIR EXTRUSION  
(FSE) FOR A SUSTAINABLE RECYCLING  
OF LIGHTWEIGHT ALLOYS*

Relatore:  
prof. ***Mohamad El Mehtedi***

Tesi di Laurea di:  
***Nicola Vissani***

A.A. 2018/2019



# INDICE

<b>INTRODUZIONE</b> .....	5
<b>LEGHE LEGGERE</b> .....	7
<b>1.1 ALLUMINIO</b> .....	7
<b>1.1.1 CENNI STORICI</b> .....	7
<b>1.1.2 CARATTERISTICHE ED UTILIZZO DELL'ALLUMINIO</b> .....	8
<b>1.2 MAGNESIO</b> .....	13
<b>1.2.1 CENNI STORICI</b> .....	13
<b>1.2.2 CARATTERISTICHE ED UTILIZZO DEL MAGNESIO</b> .....	14
<b>RICICLO DELLE LEGHE LEGGERE</b> .....	19
<b>2.1 IL RICICLO DELL'ALLUMINIO</b> .....	19
<b>2.1.1 ALLUMINIO SECONDARIO: METODO TRADIZIONALE</b> .....	20
<b>2.2 IL RICICLO DEL MAGNESIO</b> .....	29
<b>2.2.1 METODI PER PRODURRE MAGNESIO SECONDARIO</b> .....	30
<b>2.3 METODO INNOVATIVO PER IL RICICLO DI LEGHE LEGGERE (FSE)</b> .....	32
<b>STUDIO PRELIMINARE E PREPARAZIONE AL PROGETTO</b> .....	37
<b>3.1 CONFIGURAZIONE DEI COMPONENTI</b> .....	39
<b>3.1.1 CONFIGURAZIONE NUMERO 1: PROVE ANTECEDENTI</b> .....	40
<b>3.1.2 CONFIGURAZIONE NUMERO 2: ESTRUSIONE LEGA DI ALLUMINIO 1000</b> .....	42
<b>3.1.3 CONFIGURAZIONE NUMERO 3: ESTRUSIONE LEGA DI ALLUMINIO 5457</b> .....	44
<b>3.1.4 CONFIGURAZIONE NUMERO 4</b> .....	47
<b>3.1.5 PROGETTAZIONE DEI NUOVI COMPONENTI</b> .....	48
<b>3.2 SIMULAZIONE AD ELEMENTI FINITI</b> .....	51
<b>3.2.1 SIMULAZIONI SULLE CONFIGURAZIONI PROGETTATE SUCCESSIVAMENTE</b> .....	55
<b>PROVE EFFETTUATE</b> .....	58
<b>4.1 OPERAZIONI PRELIMINARI</b> .....	59
<b>4.1.1 LAVAGGLIO TRUCIOLI</b> .....	59
<b>4.1.2 PRECOMPATTAZIONE DEI TRUCIOLI</b> .....	59
<b>4.1.3 MONTAGGIO DELLA PASTICCA NEL CONTAINER</b> .....	62
<b>4.1.4 ATTREZZAGGIO E CENTRAGGIO DELLA MACCHINA CNC</b> .....	62
<b>4.1.5 CREAZIONE PROGRAMMA ED INIZIO PROVA</b> .....	64

<b>4.2 SVOLGIMENTO DELLA PROVA</b> .....	65
<b>RISULTATI E VALUTAZIONI</b> .....	66
<b>5.1 CONSIDERAZIONI GENERALI</b> .....	67
<b>5.2 STUDIO DELLA LEGA AA1099</b> .....	72
<b>5.2.1 CAMPIONE “1”</b> .....	73
<b>5.2.2 CAMPIONE “2”</b> .....	75
<b>5.3 STUDIO DELLE LEGA AA5457</b> .....	84
<b>5.3.1 REPORT QUANTITATIVO SUL RENDIMENTO DELLA FSE</b> .....	84
<b>5.3.2 CONFRONTO METALLOGRAFICO</b> .....	88
<b>PROBLIMATICHE E SOLUZIONI ALTERNATIVE</b> .....	90
<b>6.1 VERSIONE AL TORNIO</b> .....	92
<b>6.2 CONTENITORE ROTANTE</b> .....	93
<b>ANALISI LCA: “LIFE CYCLE ASSESSMENT”</b> .....	95
<b>7.1 ASPETTI GENERALI DELLA LCA</b> .....	95
<b>7.2 FASI DELLA VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA</b> .....	97
<b>7.3 LIMITI DELLA LCA</b> .....	98
<b>7.4 VANTAGGI ANALISI LCA</b> .....	99
<b>7.5 OGGETTO DI STUDIO</b> .....	99
<b>7.5.1 UNITA’ FUNZIONALE E CONFINI DEL SISTEMA</b> .....	100
<b>7.5.2 INSTALLAZIONE E CREAZIONE DI UN DATABASE</b> .....	101
<b>7.5.3 CREAZIONE PROCESSI: FUSIONE</b> .....	102
<b>7.5.4 CREAZIONE PROCESSI: ESTRUSIONE</b> .....	105
<b>7.5.5 CREAZIONE PROCESSO: ESTRUSIONE PER ATTRITO</b> .....	106
<b>7.6 COMPARAZIONE</b> .....	107
<b>7.6.1 RISULTATI</b> .....	109
<b>CONCLUSIONI</b> .....	115
<b>ALLEGATI</b> .....	117
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	121



## INTRODUZIONE

Ogni volta che parliamo di rifiuti ci riferiamo a vari aspetti di questo problema mondiale; ma l'aspetto più importante, che molto spesso viene tralasciato, è la produzione sempre maggiore e sempre più complessa dei beni di consumo, che causa un continuo aumento dei cosiddetti "oggetti o sostanze di cui il detentore abbia deciso o abbia l'obbligo di disfarsi". In poche parole, dei rifiuti.

Purtroppo, anche se il problema del riciclo è più che mai attuale, non è sicuramente recente; infatti già dal 1997 con il Decreto Ronchi si è stabilito che i rifiuti devono essere sempre più considerati come una risorsa e non come uno scarto, e per questo smaltire rifiuti indifferenziati nelle discariche dovrebbe essere vietato; inoltre l'Unione Europea con la direttiva 99/31/CE ha stabilito che nelle discariche si possono conferire solo materiali non riciclabili e materiali a basso contenuto di carbonio organico, proprio per favorire una politica del recupero e del riciclo.

Fortunatamente non ci sono solo aspetti negativi, difatti l'Italia, con il 76,9% dei rifiuti recuperati, è lo Stato che ricicla di più tra i primi 5 Paesi industrializzati dell'Unione Europea: più della Francia, più della Germania e molto più della media Ue, che è appena del 37%.

Un settore del riciclaggio dei rifiuti è quello del riutilizzo dei materiali metallici, che consiste in un insieme di operazioni che vengono svolte sui rifiuti contenenti leghe metalliche per ottenere un nuovo materiale da reimmettere nei processi produttivi.

Negli ultimi anni questo specifico settore; ed in particolare la parte riguardante il riciclo delle leghe leggere ha fatto notevoli passi in avanti, non solo per quanto riguarda la quantità ma anche per altri aspetti legati alle modalità di riciclo, stanno infatti nascendo nuove tecniche legate a questo aspetto ed una delle più innovative ed interessanti è la FSE.

La Friction Stir Extrusion (FSE) è un processo di estrusione allo stato solido, e viene chiamata anche "a freddo" perché non prevede l'apporto esterno di calore che permette una non fusione del materiale.

Questa è una caratteristica di fondamentale importanza perché permette di ridurre drasticamente la quantità di dispositivi e di passaggi necessari per il riciclo, con enormi risparmi a livello energetico, evitando di produrre scorie.

Lo scopo eco sostenibile della FSE quindi è quello di legare meccanicamente, consolidare, e convertire polveri e trucioli di leghe leggere in generale in prodotti altamente ingegnerizzati con un unico passaggio e senza spreco di materiale.

In questo elaborato verrà dapprima presentata una breve panoramica sulla FSE, facendo riferimento sia a studi teorici che a produzioni di cavo effettuate nei più grandi istituti di ricerca mondiali; successivamente si mostrerà l'approccio teorico, simulativo e pratico/sperimentale che si è tenuto verso questa tecnica innovativa. Infine si analizzeranno le analogie e le differenze a livello di impatto ambientale, svolgendo delle analisi di life cycle assessment (LCA), delle due principali tipologie di riciclo, ossia il metodo convenzionale (o tradizionale), che prevede una fase di fusione del materiale, ed il metodo innovativo della Friction Stir Extrusion.

## **CAPITOLO 1**

# LEGHE LEGGERE

Una lega è una combinazione in soluzione o in miscela di due o più elementi di cui almeno uno è un metallo, ed il cui materiale risultante ha proprietà metalliche differenti da quelle dei relativi componenti, queste sono ideate solitamente per avere proprietà più desiderabili di quelle dei loro componenti.

Le leghe che sono definite leggere hanno come caratteristica principale quella di avere un basso peso specifico, quindi una minore densità, che le rende particolarmente interessanti in molti ambiti, tra cui soprattutto quello industriale.

## 1.1 ALLUMINIO

### 1.1.1 CENNI STORICI

L'alluminio è di gran lunga il più giovane tra i metalli di uso industriale, essendo prodotto su larga scala da poco più di un secolo.

Il nome alluminio deriva da Alum, più tardi allume, un solfato di alluminio conosciuto ed utilizzato sin dall'antichità per la preparazione di tinture e medicinali.

La 'scoperta' dell'Alluminio risale al 1807 quando il chimico inglese Sir Humphrey Davy ipotizzò che l'"alum" fosse il sale di un metallo ancora sconosciuto a cui diede il nome di "alumium", successivamente modificato in "aluminium".

Il tentativo di Davy di ottenere l'alluminio attraverso un processo di elettrolisi di una soluzione di ossido di alluminio e potassa non diede, però, esiti positivi.

Solo nel 1825 il fisico danese Hans Cristian Oersted riuscì a produrre alcune gocce di alluminio, tramite l'applicazione di una fonte di calore ad un amalgama di potassio e alluminio.

Le ricerche furono proseguite in Germania da un suo discepolo, Freidirich Wohler, che dimostrò molte delle proprietà del metallo, tra cui la sua leggerezza. Fu proprio questa scoperta ad animare il mondo scientifico e ad attrarre maggiori fondi per la ricerca.

Nel 1854, il francese Henri Sainte-Claire Deville sviluppò un complesso processo termo-chimico che permetteva una limitata produzione industriale. Tuttavia il

processo, diffuso in tutta Europa, era estremamente costoso e rendeva il metallo addirittura più caro dell'oro.

Nonostante i miglioramenti conseguiti nel tempo, il metodo usato fino ad allora non consentiva la produzione a carattere industriale.

Occorre arrivare al 1886 quando l'americano Charles Martin Hall e il giovane scienziato francese Paul Heroult, scoprirono contemporaneamente, seppur in modo indipendente, il primo processo di fusione elettrolitica per la produzione di alluminio metallico dall'allumina.

Il loro metodo consentì la produzione di elevati quantitativi di alluminio a basso costo dati anche gli enormi progressi avvenuti nella produzione di energia elettrica dovuti alle moderne dinamo.

Il metodo coniato da Hall e da Heroult, è ancora oggi il sistema utilizzato per la produzione di alluminio ed è stato migliorato dalle successive scoperte, quale quella dell'austriaco Karl Bayer, che nel 1888 brevettò la tecnica per l'estrazione dell'ossido di alluminio dalla bauxite.

La storia dell'alluminio, tuttavia, è in continuo sviluppo ed ancora oggi continua la ricerca per nuove applicazioni di questo metallo.

### **1.1.2 CARATTERISTICHE ED UTILIZZO DELL'ALLUMINIO**

L'Alluminio, identificato nella tavola periodica con il simbolo AL, è uno degli elementi più comuni in natura insieme all'ossigeno ed al silicio e costituisce l'8% della crosta terrestre, presentandosi non allo stato puro ma combinato con altri elementi sotto forma di numerosi minerali come la bauxite, i feldspati, i plagioclasti, la mica, i minerali argillosi e la corindone.

Questo metallo può essere ottenuto partendo da tali minerali ed in particolar modo dalla bauxite, estratta in riserve disseminate in tutto il mondo, tramite particolari processi chimici prendendo così il nome di "alluminio primario", oppure attraverso la rifusione dell'Alluminio stesso; recuperabile da rottami vecchi o da scarti delle macchine utensili. In questo caso parliamo di alluminio secondario.

L'Alluminio poi cristallizzando nel sistema cubico a facce centrate ha una struttura molto duttile e malleabile, è inoltre un metallo leggero di densità  $2,7 \text{ kg/dm}^3$ , si

presenta di colore bianco-argenteo con riflessi azzurrini; fonde a 660,45 °C ed è un ottimo conduttore di calore e di elettricità. All'aria ha la capacità di passivarsi cioè di ricoprirsi di un sottile ma molto compatto strato di ossidi che è capace di proteggerlo dagli agenti atmosferici.

Dalla sua scoperta ad oggi, l'Alluminio può essere considerato il protagonista dello sviluppo delle "leghe leggere" che rispetto ad altri materiali da costruzione hanno un complesso di caratteristiche fisiche particolari e per certi aspetti uniche, che le rendono particolarmente attraenti per progettisti, produttori ed utilizzatori finali. Le principali sono:

- **LEGGEREZZA:** a parità di volume, l'alluminio pesa solamente un terzo dell'acciaio, si possono ottenere quindi dei risparmi significativi di peso in quasi ogni tipo di applicazione meccanica.

Uno dei più sorprendenti esempi di questa combinazione di proprietà lo si vede quotidianamente negli aeroplani. L'Alluminio infatti è il principale materiale aeronautico, esso costituisce circa l'80% del peso strutturale degli attuali aerei a reazione;

- **ALTA CONDUCEBILITA' TERMICA, ELETTRICA E SONORA:** L'Alluminio permette la trasmissione di energia anche su lunghe distanze, non a caso sono fatte di questo metallo la maggior parte dei conduttori ad alto voltaggio, ed è in Alluminio anche la base filettata delle lampadine.

Questo metallo vanta inoltre un'elevata conducibilità termica, per questo è utilizzato nella costruzione di radiatori e contenitori termici, apparecchiature termocondizionanti e contenitori di cottura per alimenti. Infine, esso si distingue per la rilevante risonanza sonora, motivo per cui viene utilizzato anche nella costruzione di strumenti musicali;

- **LAVORABILITA':** l'alluminio è facile da lavorare. Nessun altro metallo è disponibile in tante forme, né può essere prodotto, montato e finito in tanti modi, inoltre può essere modellato con tutte le comuni tecniche di lavorazione dei metalli e più facilmente della maggior parte degli altri metalli. E' facile da colare,

o presso colare, in forme precise e complesse. Può essere forgiato, laminato fino ad ottenere un foglio sottilissimo, estruso in profili complessi o piegato;

- **RESISTENZA ALLA CORROSIONE:** è una caratteristica sfruttata in architettura e in edilizia già da molti anni, poiché l'Alluminio sviluppa velocemente una pellicola impenetrabile di ossido sulle superfici esposte, esso è estremamente resistente alla corrosione atmosferica, anche in esposizioni marine. Per tale ragione non richiede nessuna verniciatura di protezione ed è viene usato diffusamente per il rivestimento di edifici industriali e per le parti particolarmente esposte all'attacco degli agenti atmosferici in ambienti critici come quelli marini. Le applicazioni marittime dell'alluminio variano dalle cabine di coperta delle navi agli alberi e agli scafi di ogni tipo di yacht;

- **RICICLABILITA':** l'alluminio è facilmente riciclabile con un costo energetico molto più basso di quello necessario per la sua prima fusione: quasi un terzo dell'alluminio consumato oggi è prodotto riciclando rottami, costituiti sia da scarti e sfridi di processi produttivi che da prodotti usati. Il rapido successo dell'alluminio è fondamentalmente basato su una combinazione unica di proprietà intrinseche del metallo e sull'intenso sviluppo di leghe di alluminio che ne hanno aumentato durezza e resistenza meccanica. Non è pertanto una sorpresa constatare che l'alluminio è stato riciclato in quantità crescenti sin da quando il metallo è divenuto, verso la fine del secolo scorso, commercialmente disponibile. Attualmente un quarto dei fabbisogni di alluminio dell'Europa è soddisfatto dall'utilizzazione di metallo di seconda fusione (riciclato). L'alluminio può essere riciclato indefinitamente.

Queste caratteristiche hanno portato ad un l'incredibile aumento di utilizzo dell'Alluminio negli Stati Uniti, Europa e Giappone come mostrato dalla tabella 1.1, la quale mette anche in luce quanto l'incremento nell'ambito dei trasporti sia preponderante rispetto a quelli relativi all'imballaggio e impieghi strutturali. Nella Figura 1.2 vengono riportati invece i dati del consumo dell'alluminio nell'industria italiana ed anche in questo prospetto sono facilmente distinguibili settori di maggiore impiego.

Le pressioni legislative e ambientali hanno sicuramente favorito lo sviluppo e l'impiego di materiali più leggeri per la costruzione dei veicoli al fine di diminuire le emissioni e la produzione di CO<sub>2</sub>. In soli 50 anni la quantità media di lega leggera impiegata nella produzione dell'auto è sestuplicata come rappresentato in Figura 1.3.

Attualmente le tecnologie utilizzate per la produzione dei componenti in alluminio presenti nei telai dei veicoli sono principalmente la pressofusione, l'estrusione e lo stampaggio (vedi Figura 1.4).

Tra queste l'estrusione gioca un ruolo centrale visti i vantaggi sia in termini di risparmio economico che di superiore versatilità; utilizzando questo processo il progettista può realizzare profili con sezione forata, a spessore variabile e con geometrie molto complesse. Inoltre le matrici per estrusione hanno tempi e costi di produzione molto più bassi rispetto agli stampi utilizzati nella pressofusione, nello stampaggio e nella laminazione, questo è unito alla possibilità di ottenere velocemente componenti con forme complesse, elevate caratteristiche resistenziali e basse rugosità (paragonabili a quelle raggiungibili con la rettifica).

<i>Periodo</i>	<i>Packaging</i>	<i>Impieghi strutturali</i>	<i>Trasporti</i>
1980	2,3	3,0	2,9
1985	2,5	2,8	3,4
1990	2,7	3,4	4,2
1995	3,3	3,5	5,0
2000	3,7	3,9	6,3
2005	4,0	4,2	7,9
2010	4,3	4,7	8,5

*Tabella 1.1 – Utilizzo dell'Alluminio in Europa, Stati Uniti e Giappone (espresso in tonnellate)*

Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere

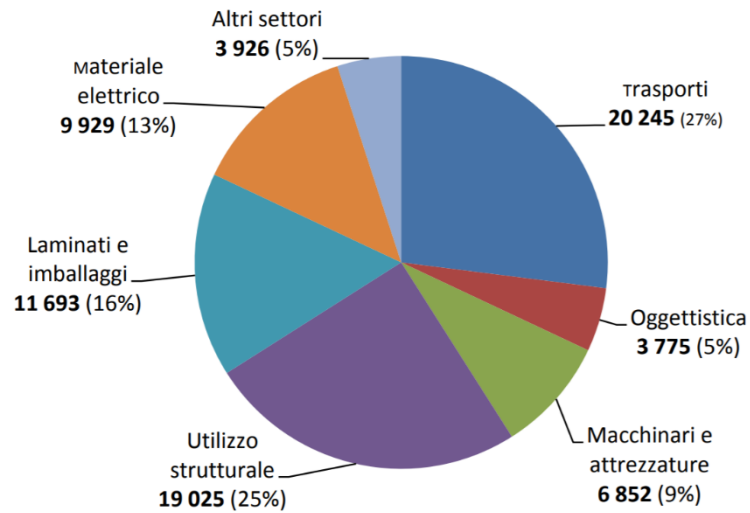


Figura 1.2 – Utilizzo dell'Alluminio nell'industria italiana

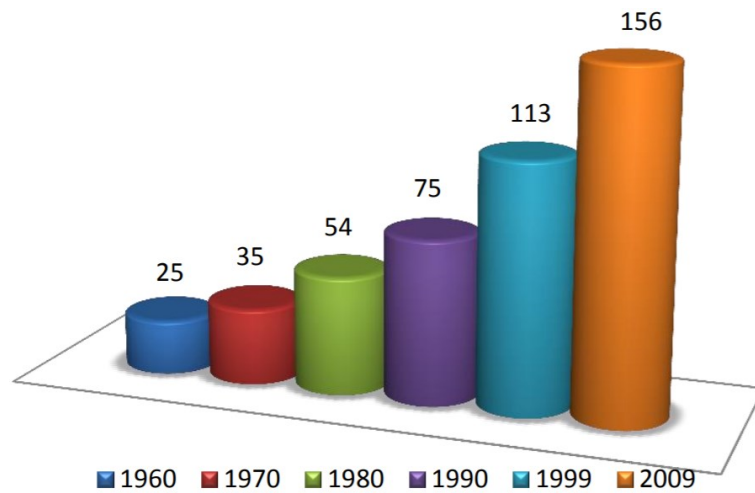


Figura 1.3 - Contenuto medio di Alluminio in un'auto (Kg per veicolo)

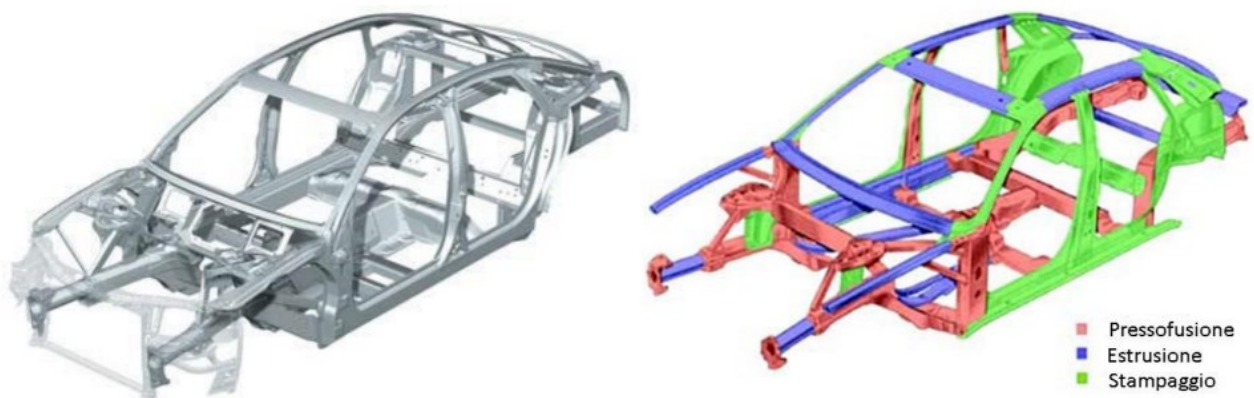


Figura 1.4 - Struttura del telaio dell'Audi A8



## 1.2 MAGNESIO

### 1.2.1 CENNI STORICI

Magnesia era il termine che gli alchimisti attribuivano a varie sostanze estratte nei dintorni di una città della Tessaglia, chiamata per l'appunto Magnesia.

Il Magnesio non è dunque un metallo nuovo, e il suo ossido venne riconosciuto nel XVIII secolo e chiamato “terra amara”, anche se già nel 1600 si conosceva il sale inglese (o sale amaro), cioè solfato di Magnesio in forma eptaidrata, ottenuto per la prima volta in Inghilterra dalla ebollizione di acque minerali. Riconosciuto come elemento nel 1700, solo successivamente viene isolato con processi differenti, fino ad arrivare alla produzione per elettrolisi di cloruro di magnesio fuso.

Nel 1852 viene realizzata una cella elettrolitica nella quale furono usati dei catodi di cavi di carbone, in modo da raccogliere il magnesio fuso, impedendone la combustione, una volta a contatto con l'aria. L'elevata reattività del Magnesio, che rende i suoi sali particolarmente stabili e difficili da scindere, ne ha a lungo decretato la difficoltà di impiego, tanto che solo recentemente viene considerato idoneo alla produzione anche di oggetti di largo consumo. Sebbene già impiegato durante la Prima Guerra Mondiale ma è solo con la Seconda che la produzione di Magnesio e sue leghe diventa massiccia. I motivi sono essenzialmente riconducibili al fatto che le strutture degli aerei passano da legno a leghe metalliche (che verranno definite aeronautiche), e alla forte richiesta di bombe incendiarie e confezionamento di propellenti per razzi.

Con la fine del periodo bellico, la complessità del suo impiego fecero scendere rapidamente la produzione ma oggi, grazie anche all'affinarsi delle tecnologie di lavorazione, la produzione sta subendo continui incrementi, con una crescita esponenziale dell'impiego di leghe di magnesio.

Ricapitolando i più diffusi metodi di produzione dei lingotti di magnesio si possono raggruppare in due processi distinti:

- **PROCESSO ELETTROLITICO:** si può ottenere il cloruro di Mg dalla dolomite ( $MgCO_3 \cdot CaCO_3$ ), con un opportuno processo chimico, o da altri minerali. Ottenuto il  $MgCl_2$  è necessario disidratarlo, perché cristallizza con sei molecole di  $H_2O$ , riscaldandolo; è particolarmente difficile eliminare le due ultime molecole

di H<sub>2</sub>O perché il MgCl<sub>2</sub> tende a questo punto a dissociarsi in Mg o e HCl. Si ostacola la decomposizione effettuando il riscaldamento in presenza di HCl gassoso o di cloruro di ammonio che a tale temperatura è parzialmente dissociato. Ottenuto il cloruro di magnesio anidro lo si fonde in vasche di ferro con anodi di grafite (punto di fusione 718°C) in presenza di cloruri e fluoruri alcalini o alcalino terrosi che hanno funzione di ricoprire, proteggendolo, il bagno. Il magnesio che si separa ai catodi di ferro galleggia sul sale fuso e viene periodicamente allontanato dalla cella. Verrà poi rifuso in forni elettrici, protetto con sali fusi.

Il magnesio così ottenuto ha la seguente composizione media % Mg 99.85; Al 0.07; Mn 0.08; Si 0.01; Cu 0.003; Ni 0.001; Fe 0.03; Ca 0.01 ; Pb 0.001; Zn 0.01.

• **PROCESSO TERMICO:** si basa sulla reazione reversibile:  $MgO + C \rightleftharpoons Mg + CO$   
Sopra i 2000°C la reazione è tutta spostata a destra. Tenendo conto che il Mg bolle a 1100°C, è sufficiente mantenere la temperatura al di sopra di tale valore (1200 ÷ 1600°C) e raffreddare poi bruscamente i gas che si svolgono dalla reazione per impedire il ritorno a sinistra dell'equilibrio. Come mezzo riducente è possibile usare anche carburo di calcio o silicio metallico. La riduzione del MgO deve avvenire sottovuoto. Il metallo così ottenuto ha una maggiore purezza di quello ottenuto per via elettrolitica e come conseguenza presenta una maggiore resistenza alla corrosione. La composizione media % è la seguente: Mg 99.97 ; Al 0.004 ; Mn 0.02 ; Si 0.006 ; Cu < 0.001 ; Ni < 0.0005 ; Fe 0.001 ; Ca 0.006 ; Pb 0.001 ; Zn 0.001

## **1.2.2 CARATTERISTICHE ED UTILIZZO DEL MAGNESIO**

Il Magnesio non è un metallo raro dato che costituisce il 2,3% in peso della litosfera, entra nella composizione della Dolomite ed è presente nelle acque marine, che hanno un contenuto medio di circa 1,1%: è l'ottavo elemento in ordine di abbondanza nella crosta terrestre. Di fatto il Magnesio si trova facilmente in commercio con purezze che superano il 99,8%, ma, nelle applicazioni industriali, è raramente impiegato allo stato puro a causa delle scarse caratteristiche meccaniche. Inoltre quando è nella sua forma pura è altamente infiammabile, soprattutto se in polvere, e brucia con una fiamma bianca dalla luce accecante.

A contatto con l'aria o l'acqua reagisce rapidamente e in maniera esotermica, deve essere quindi maneggiato con cura e lo spegnimento non deve essere fatto con acqua dato che il magnesio, una volta acceso, se entra in contatto con vapore acqueo reagisce formando Idrogeno che, a causa del calore sviluppato dalla reazione stessa, può infiammarsi ed esplodere.

Le leghe di Magnesio hanno un peso specifico di  $1,80 \text{ kg/dm}^3$  che, in caso di leghe speciali, quali le Magnesio- Litio, può scendere fino a  $1,3 \text{ kg/dm}^3$ ; queste vengono quindi spesso definite leghe ultra leggere; infatti il Magnesio ha il più alto rapporto resistenza-peso e le sue leghe rispetto a quelle di Alluminio, presentano, ad elevate temperature, un miglior comportamento.

Raffrontate con l'acciaio, le leghe di Magnesio sono circa il 70% più leggere e con l'Alluminio circa il 30%. Il Magnesio ha anche un'ottima capacità di smorzamento delle vibrazioni, schermatura elettromagnetica ed in radiofrequenza e, nota non trascurabile, può essere completamente riciclato, tanto da essere considerato un materiale dalla durata infinita.

I manufatti in lega di Magnesio sono perlopiù prodotti per fusione e, specie negli ultimi anni, le lavorazioni meccaniche stanno diventando sempre più importanti, in particolare quando è richiesto un grado di finitura superficiale molto elevato, spingendosi anche a livelli di superfinitura.

In generale le lavorazioni per asportazione di truciolo richiedono basse forze di taglio, con contenuti carichi meccanici e termici sull'utensile, che ha quindi lunga durata.

In linea generale, la lavorazione di leghe di Magnesio richiede esperienza specifica e viene ritenuta una lavorazione "difficile": chi lavora questi materiali è spesso ermetico e poco disposto a diffondere informazioni.

Attualmente il Magnesio è il metallo più leggero disponibile ad uso ingegneristico, caratterizzato da un impiego tecnologico è in continua crescita, secondo un andamento esponenziale. L'aumento dell'inquinamento ambientale e la diminuzione delle risorse disponibili, con cui siamo tenuti a fare i conti, obbligano allo sviluppo di nuovi prodotti e processi produttivi, che riguardino i consumi energetici. Il Magnesio e le sue leghe possono dimostrarsi una interessante opportunità grazie alle loro caratteristiche:

- **LAVORABILITA' ALLE MACCHINE UTENSILI:** le leghe di Magnesio presentano una minore resistenza agli utensili da taglio rispetto alla gran parte dei materiali metallici. Ciò fa sì che si possa tornirle e fresarle ad alta velocità risparmiando su tempi e costi di lavorazione e sull'usura degli utensili. Inoltre su tali leghe è possibile ottenere un'elevata finitura superficiale che in generale non rende necessario il ricorso ad ulteriori lavorazioni.
- **FORMABILITA':** le leghe di magnesio possono essere prodotte e formate dalla maggior parte dei processi di lavorazione dei metalli a caldo, mentre a temperatura ambiente presentano capacità deformativa piuttosto limitata. L'utilizzo di processi di deformazione plastica a freddo è ristretto ad alcuni processi (ad esempio piegatura ad ampio raggio).
- **SALDABILITA':** le leghe di magnesio risultano facilmente saldabili con metodi tradizionali. Per congiungere parti in magnesio è possibile ricorrere anche a rivettature, incollaggi, oppure collegamenti bullonati, facendo attenzione a mantenere i fattori di concentrazione degli sforzi entro i limiti di sicurezza. I metodi più utilizzati sono le saldature TIG e MIG.
- **COLABILITA':** le leghe di magnesio sono ottimi metalli da fonderia, avendo un basso punto di fusione (650°C) ed anche un'ottima fluidità allo stato liquido che consente di produrre getti di forma complessa a pareti sottili inoltre hanno un basso calore specifico, che permette di accelerare il raffreddamento dei getti e di limitare i carichi termici sulle forme metalliche.
- **STABILITA' DIMENSIONALE:** grazie ad una velocità di ritiro costante, le leghe di magnesio sono dimensionalmente stabili fino a circa 100°C e si possono dunque considerare prive di variazioni dimensionali al di sotto di tale temperatura. Alcune leghe, in particolare quelle contenenti alluminio e zinco o manganese, mostrano invece una lieve crescita dimensionale dopo periodi di esposizione

Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere

relativamente lunghi a temperature superiori ai 100 °C; mentre altre contenenti torio, zirconio o terre rare come elementi alliganti, hanno una leggera contrazione se esposti a temperature elevate.

- **RESISTENZA A FATICA:** il magnesio ha buona resistenza a fatica e ottime prestazioni soprattutto in quelle applicazioni in cui si ha un elevato numero di cicli a tensioni relativamente basse; risulta però molto sensibile alla concentrazione degli sforzi, perciò intagli, raccordi e cricche possono creare problemi rilevanti nei componenti realizzati con tale materiale.

- **SCHERMATURA ELETTROMAGNETICA (EMI shielding):** gli alloggiamenti in magnesio forniscono una migliore schermatura elettromagnetica rispetto ad analoghi prodotti in plastica con metallizzazione (applicazioni: alloggiamenti e rivestimenti di telefoni cellulari ed apparati di trasmissione radio (Figura 1.5)).



*Figura 1.5 - Scocca di un cellulare realizzata in lega di Magnesio*



*Figura 1.6 - Esempio di un prodotto in commercio realizzato in parte in lega di Magnesio*

- **BUONA DISSIPAZIONE DI CALORE:** la conducibilità termica del magnesio è molto più alta di quella della plastica. Le custodie di apparecchiature elettroniche

possono dissipare il calore prodotto dai circuiti in maniera più efficiente di quelle costruite in plastica, conservando le caratteristiche di leggerezza (applicazioni: alloggiamenti per computer, macchine fotografiche (figura 1.6)).

Ci sono però anche degli aspetti negativi riguardanti il Magnesio ed il principale è la scarsa resistenza alla corrosione atmosferica; infatti i componenti esposti all'umidità ed agli agenti atmosferici necessitano di rivestimenti superficiali quali anodizzazione, cromatazione o verniciatura con evidenti aggravii sui costi di produzione.

Un miglioramento in termini di resistenza all'ossidazione e alla corrosione lo offrono le leghe più recenti che contengono una quantità minima di impurità di Nichel (Ni), Rame (Cu) e Ferro (Fe) e che ottengono prestazioni a livelli comparabili a molte comuni leghe di Alluminio.

Le caratteristiche fisiche del Magnesio inoltre permettono di classificarlo come ottimo metallo da fonderia. Le leghe di magnesio possono essere lavorate per colata, estrusione, forgiatura ecc. Può essere unito tramite rivetti oppure con i più comuni metodi di saldatura.

## **CAPITOLO 2**

## **RICICLO DELLE LEGHE LEGGERE**

Tutti i metalli possono essere riciclati con ottimi risultati. Anche in termini di recupero energetico, perché non dimentichiamo che produrre un metallo puro a partire dal minerale è un ciclo di produzione altamente energivoro.

Rifondere i metalli è anche un modo per limitare le emissioni di CO<sub>2</sub>, oltre che evitare di aprire altre miniere nel mondo ed a risparmiare moltissimo sullo smaltimento.

Il corretto smaltimento dei rottami deve avvenire mediante una attenta separazione dei pezzi metallici, ad esempio, grazie all'utilizzo di potenti magneti, vengono separati i metalli ferrosi come l'acciaio, mentre per metalli come l'Alluminio, la separazione è possibile grazie all'uso di correnti elettroniche. Tutto questo al fine di valorizzare ciascun materiale e trasformarlo nuovamente in una materia prima adatta a qualunque impiego.

### **2.1 IL RICICLO DELL'ALLUMINIO**

Negli ultimi anni la produzione di alluminio ha subito notevoli passi in avanti, soprattutto sfruttando una sua caratteristica molto importante dal punto di vista economico-ambientale: l'infinita riciclabilità, infatti la produzione di alluminio secondario è un processo molto proficuo dal punto di vista economico ed ambientale in quanto la quasi totalità dell'energia assorbita nelle fasi di produzione primaria del metallo, per l'esattezza il 95%, viene conservata nel materiale e rimessa in gioco al momento della rifusione degli scarti, quindi la produzione di un kg di alluminio da riciclo necessita di un quantitativo di energia che equivale solo al 5% (occorrono solo 0,7kWh di energia elettrica, contro i 14kWh che sono necessari per ricavarlo dalla bauxite) di quello consumato per la produzione di un kg di alluminio primario, è inoltre stato stimato che la produzione di una tonnellata di alluminio secondario permette di risparmiare 1370 kg di bauxite, 9800 kg di CO<sub>2</sub>, 64 kg di SO<sub>2</sub> e 15.000 litri di acqua.

L'alluminio secondario rappresenta oggi circa un terzo dell'alluminio prodotto a livello mondiale, e questo è un dato in continua crescita, soprattutto nelle regioni ad alto tasso di industrializzazione, dove la crescente richiesta di materiale, gli elevati costi energetici ed il maggiore interesse per la salvaguardia ambientale hanno reso meno appetibili i processi di trasformazione elettrolitica. In Italia poi siamo davvero bravi e possiamo vantare il primo posto in Europa con il 70% tra quota di riciclo e quota avviata al recupero energetico (ai termovalorizzatori) rispetto al fabbisogno industriale, il nostro Paese ha evitato emissioni per 370.000 tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente e risparmiato energia pari a 160.000 tonnellate di petrolio equivalente (dati CiAl 2013). Con 870.000 tonnellate di rottami riciclati. Basti poi pensare che, nel nostro Paese, anche un'azienda importante come la Nespresso ha creato un progetto chiamato "Ecolaboration", in collaborazione con il Consorzio CIAL, finalizzato alla raccolta e all'avvio al riciclo delle capsule da caffè in alluminio.

Le materie prime utilizzate per la produzione di leghe di alluminio da riciclo sono:

- "rottami nuovi", cioè scarti di lavorazione delle diverse fasi di produzione e di trasformazione di alluminio, normalmente puliti e di lega omogenea;
- "rottami vecchi", ovvero beni giunti alla fine del loro ciclo di vita, provenienti dalla raccolta differenziata (imballaggi come lattine, bombolette, vaschette, scatolame o altri piccoli oggetti di uso domestico), o da operazioni di selezione e disassemblaggio. Proprio gli imballaggi costituiscono una porzione fondamentale dei rottami in quanto rappresentano, tra tutti i prodotti in alluminio, quelli che hanno una vita utile minore, basti pensare che il 75% dei beni in alluminio prodotti nella storia di questo importante materiale è ancora in uso.

### **2.1.1 ALLUMINIO SECONDARIO: METODO TRADIZIONALE**

Dopo la raccolta differenziata, gli imballaggi e gli altri oggetti di alluminio arrivano all'impianto di separazione e primo trattamento. Qui, grazie ad un particolare



separatore che funziona a correnti parassite, vengono separati da eventuali materiali metallici (ferro) o da altri materiali diversi (vetro, plastica, etc.).

Sono poi pressati in balle e portati alle fonderie, dove, dopo un controllo sulla qualità del materiale, vengono pre-trattati a circa 500° per liberarli da altre sostanze estranee.

In seguito avviene la fusione in forno alla temperatura di 800°, fino ad ottenere Alluminio liquido che viene trasformato in lingotti. generalmente basati sulla famiglia di leghe Alluminio-Silicio a cui si aggiungono altri metalli quali il Rame e il Magnesio.

Questi lingotti, prodotti nel rispetto delle normative internazionali e nazionali, sono normalmente destinati alla produzione di componentistica in Alluminio derivato da questa fusione. Il metallo recuperato, di qualità identica a quello originale, viene impiegato in edilizia, meccanica ed anche nel settore degli imballaggi.

Andando più nello specifico possiamo individuare cinque fasi della produzione di alluminio da materie prime secondarie:

1. PRETRATTAMENTI: i rifiuti sono giunti in azienda vengono sottoposti ai seguenti pretrattamenti al fine di prepararli alla fusione:

- Triturazione, operazione fatta da una cesoia rotativa, al fine di ottenere una pezzatura idonea alle lavorazioni successive o alla fusione;
- Deferrizzazione, che consente di eliminare le sostanze ferrose;
- Pulizia da materiale inerte per ridurre la quantità di scoria in forno;
- Pulizia da alluminio alto legato ad altri metalli per evitare eccessive contaminazioni nel prodotto finale.

Le macchine per compiere queste operazioni possono essere disposte all'interno delle linee di produzione, e sono collegate tra loro e con i macchinari delle fasi successive mediante nastri trasportatori. Dopo l'ultimo step di questa fase, si ottiene un materiale che risulta essere abbastanza "puro" per poter procedere alle operazioni successive di rimozione di vernici e materiali organici, che andrebbero ad influenzare la resa del processo.

2. DECOATING SYSTEM (“slaccatura”): Stiamo parlando di un processo pirolitico, attraverso il quale avviene la decomposizione termochimica di materiali organici dai materiali metallici, attraverso lo scambio termico convettivo tra un gas caldo inerte e gli scarti di alluminio. I rottami, caricati nel tamburo rotante del pirolizzatore (vedi Figura 2.1), avanzano grazie alla rotazione del forno ed alla sua leggera inclinazione, attraversando il flusso di gas che si trova ad una temperatura di circa 450/500 °C.

Alle temperature raggiunte dal gas e dagli oli, si produce un gas pirolitico dovuto alla vaporizzazione di vernici e rivestimenti in materiale plastico o componenti organiche.

Il rottame poi avendo perso le componenti contaminanti lascerà il forno ad una temperatura di circa 350 °C senza essere stato ossidato e potrà essere inviato al forno fusorio.



*Figura 2.1 - Tamburo rotante di un sistema di decoating, ovvero un forno di pirolizzazione*

Affinché il processo di “slaccatura” avvenga nella maniera più completa possibile, la camera di combustione deve essere progettata in modo tale da tenere sotto stretto controllo i quattro parametri fondamentali di processo: temperatura, tenore di ossigeno, tempo di permanenza e contatto gas/metallo.



*Figura 2.2 - UBC prima e dopo aver subito il trattamento di slaccatura*

Non entrando nello specifico dei valori ottimali per questi parametri, che comunque variano in base al tipo di lega che si vuole riciclare, dobbiamo porre maggiore attenzione al contatto tra gas e metallo che riveste una notevole importanza sul processo generale.

Per ottenere il miglior risultato possibile, è fondamentale una adeguata regolazione della velocità di rotazione del forno, ed anche un opportuno design della geometria interna dello stesso.

Il forno per la produzione di gas pirolitico ha genericamente la forma esterna paragonabile a quella di un tamburo rotante, ma all'interno è prevista la presenza di risalti o palette di trascinamento, proprio per quanto accennato pocanzi.

Il processo pirolitico, come tutti i processi in cui si ha una combustione, ha il problema delle emissioni nocive; infatti la combustione incompleta di elementi plastici, vernici e oli genera la formazione di composti quali monossido di carbonio (CO), e particolato, per fare un esempio.



*Figura 2.3 - Campione di UBC sottoposto a decoating*

I VOC, o COV, sono invece dei composti organici di idrogeno e carbonio che anche si formano durante la pirolisi: tra questi i più noti sono il benzene ( $C_6H_6$ ) e il toluene ( $C_7H_8$ ). All'abbattimento di CO e COV è preposto il postcombustore, mentre a quello del particolato sono addetti i filtri a valle del sistema.

3. FUSIONE E COLATA: una volta che il rottame è stato slaccato, è pronto per la fusione e la successiva colata. Esistono diverse tipologie di forno utilizzabili a seconda del carico che si intende trattare, e della qualità del rottame in ingresso:

• **Forno a riverbero:** molto utilizzati per far fronte a grosse richieste di materiale fuso, possono avere infatti capacità di carico che vanno dai 900 kg alle 90 tonnellate. Questa tipologia di forni può classificarsi in:

- *Forni a fiamma diretta*, nei quali la fusione del metallo avviene per contatto diretto tra fiamma e rottame. Ciò determina un'alta produzione di scorie che abbassa il rendimento del recupero, inoltre viene prodotta molta turbolenza, aspetto non positivo in quanto porta il fluido ad assorbire gas;

- *Forni a riverbero a suola secca*, dove il metallo solido viene caricato nella prima camera e fuso dai bruciatori. Il pavimento inclinato permette al metallo liquido di scorrere nella seconda camera (di mantenimento) dove si raccoglie alluminio fuso. In questo tipo di forno, rappresentato in Figura 2.4 il rapporto aria-combustibile va controllato per non produrre troppo vapore acqueo e quindi per impedire all'alluminio di assorbire idrogeno.

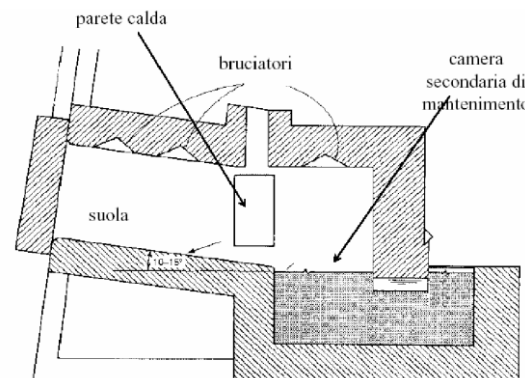


Figura 2.4 - Schema di un forno a suola secca

Una tecnologia di questo tipo si presta solamente alla fusione di rottami puliti per i quali si è in grado di ottenere una resa garantita del 99%. Per carichi misti e non ottimamente trattati la resa può scendere notevolmente, producendo anche il rilascio di gas incombusti in elevata quantità, che richiederebbero costi aggiuntivi di abbattimento ecologico dei fumi;

- *Forni a riverbero con camino*: il metallo viene inserito nella parte superiore tramite il camino. Questo tipo di forno ha una migliore efficienza ed un minore consumo energetico, in quanto il metallo è attraversato dai fumi che lo preriscaldano, e solo successivamente i bruciatori lo fondono, quindi la temperatura sale notevolmente già dalle prime fasi;

- *Forno a doppia camera*: viene molto utilizzato nel caso in cui si debba trattare rottame non perfettamente pulito e con impurità anche oltre il 10%. Il nome “doppia camera” deriva dalla presenza di due camere (vedi Figura 2.5), una fredda e una calda, che sono separate da un diaframma. Il metallo caricato nella camera fredda non verrà mai a contatto con le fiamme dei bruciatori ma riceverà il calore necessario per irraggiamento dalle pareti del forno, e per convezione tramite i fumi e il materiale fuso sottostante. Il metallo può essere anche caricato direttamente nella camera calda a patto che sia rottame pulito.

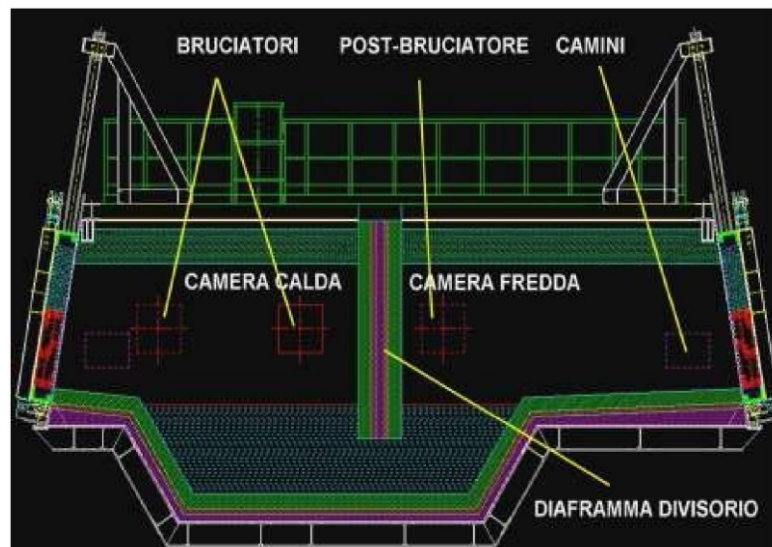


Figura 2.5 - Schematizzazione di un forno a doppia camera



- **Forno rotativo:** utilizzato per processare una modesta quantità di rottame contaminato. La capacità varia da 0,5 a 0,7 tonnellate e le tipiche temperature di fusione che si possono raggiungere sono intorno ai 700-750 °C, mentre i gas di scarico raggiungono temperature di 1000°C.

I vantaggi di questo forno sono appunto la possibilità di trattare rottame contaminato e anche di pezzatura molto fine, che presenta dei problemi in fase di fusione in quanto i piccoli rottami tendono a galleggiare sopra il metallo fuso, e non sono in grado di fondersi con esso in maniera omogenea. I principali svantaggi sono la grande richiesta di energia necessaria per fondere anche i sali che vengono introdotti per proteggere l'alluminio dall'ossidazione, ed i costi da affrontare per processare le scorie saline.

La struttura è costituita da un cilindro rotante rivestito di materiale refrattario e fatto ruotare attorno a due cuscinetti speciali grazie ad un grande e potente motore elettrico.

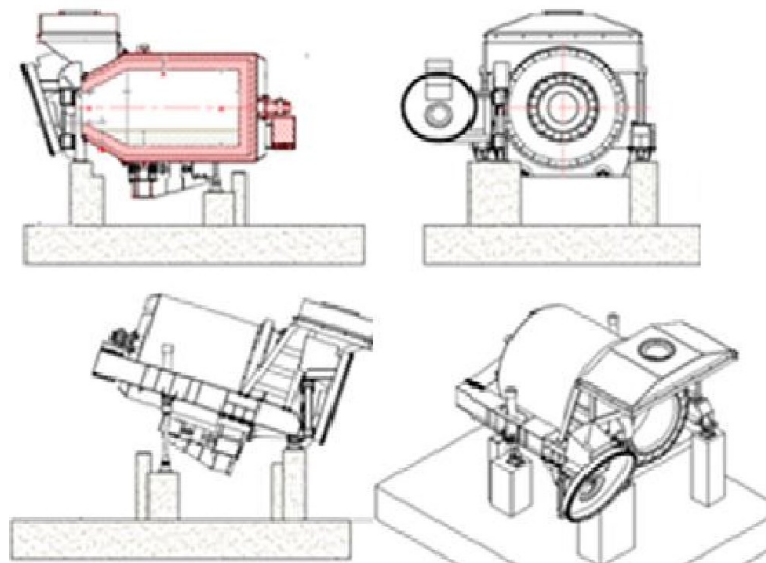


Figura 2.6 - Schema impiantistico di un forno rotativo

- **Forno a induzione:** sfrutta il principio dell'induzione elettromagnetica. Il circuito primario è una spira percorsa da corrente che genera il campo magnetico, mentre il metallo da fondere costituisce il circuito secondario. Il metallo si riscalda per effetto joule, fino a raggiungere la temperatura di fusione. Questi forni hanno una buona efficienza elettrica ma occorre sottolineare che per chiudere correttamente il circuito magnetico "ideale", il forno deve contenere una quantità relativamente bassa di metallo fuso. Di conseguenza non è possibile lavorare molti rottami

contemporaneamente, ma nonostante questa ridotta capacità di carico, l'induzione elettromagnetica rappresenta la tecnologia più efficiente per la fusione dell'alluminio ed il suo riciclo tramite tecniche fusorie.

4. RAFFINAZIONE: I tipici alliganti dell'alluminio sono: silicio, rame, zinco, magnesio e manganese. In base alla concentrazione degli elementi di lega

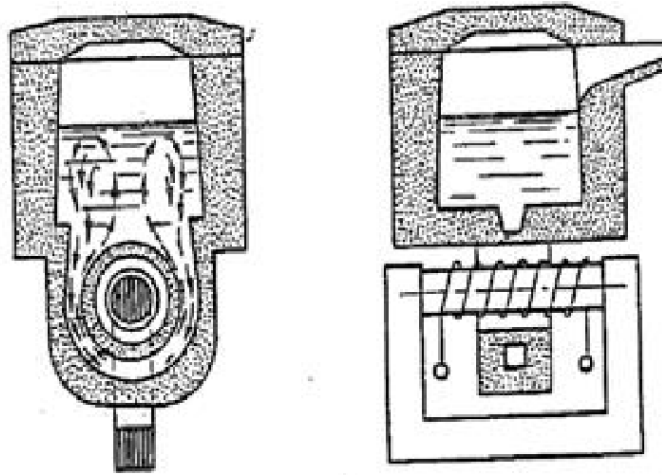


Figura 2.7 - Schema di un forno ad induzione

presenti si possono definire:

- wrought alloys, ovvero leghe con un contenuto massimo degli alliganti del 10% in peso;
- cast alloys, cioè leghe con un più alto limite di tolleranza (specialmente per il silicio, fino al 20% in peso).

Poiché durante la fase di pretrattamento dei rottami di leghe differenti non è possibile prevedere i tipi di lega che si otterranno. Durante le fasi finali del riciclo questi elementi alliganti diventano delle contaminazioni da tenere sotto controllo per garantire la purezza minima della lega teoricamente in produzione. All'interno del forno, oltre agli scarti, viene inserito un fondente, in genere cloruro di sodio, che fonde a una temperatura poco più bassa rispetto all'Alluminio e forma una crosta detta "salt cake", il cui compito è quello di proteggere il fuso dall'ossidazione. La fusione è un processo metallurgico e pertanto è governato dalle leggi della termodinamica, e nel caso dell'Alluminio sono molte le "barriere" termodinamiche da superare per la rimozione degli elementi indesiderati; soltanto il magnesio e lo zinco possono essere rimossi in maniera sensibile durante la

fusione, mentre la rimozione degli altri risulta praticamente impossibile durante questa fase. Alla luce di queste considerazioni, la tecnologia più comune utilizzata per rimuovere le impurità è il flussaggio. Si tratta di un processo in cui vari composti (di solito sali inorganici), sostanze chimiche e gas sono aggiunti al metallo fuso al fine di:

- ridurre l'ossidazione;
- consentire l'eliminazione di alcuni elementi indesiderati tramite la formazione di scoria o tramite il loro passaggio sulla superficie del bagno fuso;
- aumentare la fluidità o la bagnabilità del metallo che può facilitare la separazione di inclusioni;
- rimuovere Ca, Sr, Na, Mg e Li.

Un altro metodo di raffinazione è quello della distillazione sottovuoto, utilizzato soprattutto per eliminare l'eccesso di litio e di zinco dall'alluminio, e risulta essere un processo energeticamente poco dispendioso.

Il vapore raccolto e condensato risulta infatti talmente ricco degli elementi da eliminare che il fuso di alluminio quasi raggiunge in una sola fase la purezza desiderata.

La solidificazione unidirezionale riguarda invece dei controlli molto rigidi durante la fase di solidificazione, che vincolano gli elementi indesiderati a depositarsi e concentrarsi in particolari regioni che poi verranno eliminate, lasciando così la restante parte solidificata con una maggiore purezza. Un processo innovativo che sta prendendo piede negli ultimi anni è la cristallizzazione frazionata, utilizzata precedentemente solo per la produzione di alluminio primario ad elevata purezza (>99,97%). Sono infatti in corso delle sperimentazioni per utilizzarla durante il riciclo, al fine di ottenere alluminio non contaminato.

La tecnica consiste essenzialmente nel raffreddare velocemente la superficie del fuso al fine di formare cristalli puri di alluminio che si depositano nel fondo del forno, lasciando le impurità da eliminare nella porzione di metallo ancora liquido, che viene rimosso con facilità.

5. **PRODOTTO RICICLATO E SCORIE:** una volta ottenuto l'alluminio fuso con un grado di purezza soddisfacente, avviene la colata si ottengono dunque i nuovi



lingotti di materiale riciclato. Purtroppo i risultati non sono del tutto soddisfacenti, poiché è impossibile dare vita ad un circuito ad anello chiuso, immaginando di produrre un materiale simile a quello di partenza. Questa conseguenza deriva dal fatto che non è immaginabile poter eseguire un riciclo separato per ogni tipo di rottame di lega differente.

Nei tradizionali step del riciclo giungono in fonderia famiglie di leghe caratterizzate da percentuali di alliganti completamente diverse, perciò la problematica più importante è rappresentata proprio dalla “lotta” contro i contaminanti, che nonostante vengano in parte eliminati durante la raffinazione, impediscono di ottenere leghe di una certa purezza e portano molto spesso alla produzione delle “cast alloys”, precedentemente citate. Inoltre non è per niente scontata la “fedele” produzione della lega desiderata, anche se si partisse da rottami dello stesso materiale, ottenuto dalla stessa billetta di alluminio primario. Oltre alla perdita delle proprietà del materiale di partenza, c'è anche il problema della gestione delle scorie saline. Tali rifiuti sono un insieme di sali, ossidi di alluminio, alluminio metallico ed impurità che derivano dai rottami da riciclo durante la fase di fusione. A seconda del mix dei rottami, la quantità di scorie prodotte per tonnellata di alluminio variano tra i 200 e i 500 kg.

Poiché sono state classificate come rifiuti tossici e pericolosi (altamente infiammabili, irritanti e nocive) il loro smaltimento in discarica è proibito in molte delle nazioni europee e devono essere quindi riciclate.

Ricapitolando il metodo convenzionale di recupero consiste nella macinazione delle scorie seguita da una selezione mediante vagliatura o tramite sistemi di separazione a induzione magnetica, che permettono di recuperare la frazione di alluminio metallico (circa 10%) inglobata nella scoria, e da una lisciviazione in acqua per recuperare il sale tramite i successivi passaggi di filtraggio ed evaporazione. I rimanenti residui come ossido di alluminio e impurità sono resi inerti e pronti per essere utilizzati nell'industria cementizia o smaltiti nelle normali discariche.

## **2.2 IL RICICLO DEL MAGNESIO**

Una delle caratteristiche che rende il Magnesio così interessante per l'industria moderna, e per l'intera filiera, è la perfetta riciclabilità. Infatti, contrariamente a quanto avviene per altri materiali, il Magnesio può essere riciclato senza che le proprietà fisiche subiscano degrado. Anche la spesa energetica per il processo di riciclaggio e fusione è minore di quella richiesta per il riciclaggio degli altri metalli ed è circa il 5% della spesa necessaria per la produzione del grezzo.

Dunque, la possibilità di riciclaggio del Magnesio risulta essere molto vantaggiosa sia perché consente di ridurre i costi dovuti all'estrazione della materia prima sia per il risparmio energetico legato a riciclaggio e fusione rispetto ad altri materiali.

Non solo, la possibilità di riciclare implica minori costi per la gestione del rottame e dei prodotti a fine vita.

### **2.2.1 METODI PER PRODURRE MAGNESIO SECONDARIO**

Sono diversi i metodi per la rifusione e per il riutilizzo di Magnesio secondario. La tecnologia convenzionale per il riciclaggio comporta uno scioglimento dei rottami in una fornace per poi raffinare il fuso.

Il riciclo del Magnesio si può dividere essenzialmente in due grandi gruppi:

- **RICICLAGGIO "WITH FLUX"**: il riciclaggio "con flusso" è un processo discontinuo.

Per quanto riguarda la fusione dei rottami, come si può vedere dalla Figura 2.8, abbiamo un crogiolo riscaldato da un forno a gas o da un forno elettrico, formato il fuso poi viene trasportato in una macchina apposita per la colata in dei lingotti.

Per evitare l'ossidazione del magnesio ed avere una migliore raffinazione si utilizza dell'aggiunta di un "flusso". Si possono utilizzare tre diversi tipi di flusso: possiamo infatti avere un flusso povero di  $\text{CaF}_2$  (fluoruro di calcio) che assicura una migliore prevenzione all'ossidazione; invece un flusso ricco  $\text{CaF}_2$  (fluoruro di calcio) ci consente un controllo esatto del processo di raffinazione infine possiamo utilizzare un flusso combinato che può essere utile per la prevenzione

Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere

dell'ossidazione e richiede una minore spesa per quanto riguarda la logistica della raffinazione.

Al di sopra di  $650^{\circ}\text{C}$  il fuso viene mescolato con Azoto o Argon per omogeneizzarlo chimicamente e termicamente. Ad una temperatura specifica poi, che dipende dalla lega in esame, le impurità metalliche e l'Idrogeno vengono rimossi attraverso un trattamento in una girante.

Dopo un'analisi chimica ed un controllo dell'ossidazione possiamo passare alla colata e all'ottenimento di lingotti di Magnesio.

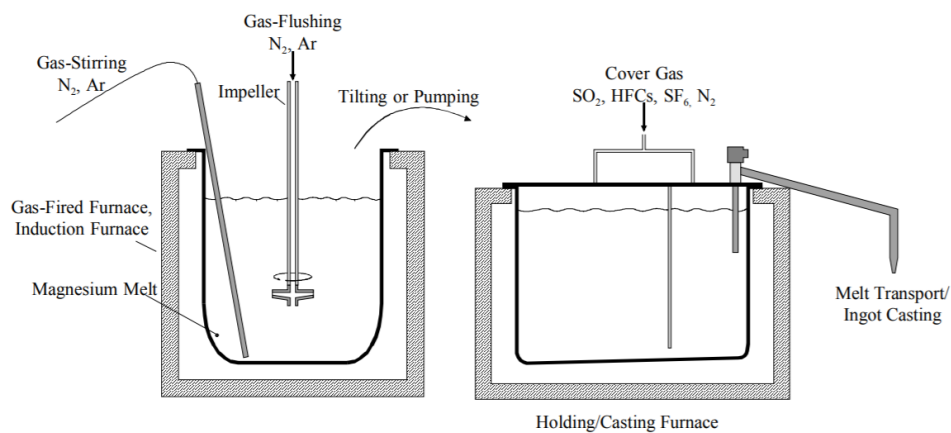


Figura 2.8 - Rappresentazione schematica del riciclaggio "con flusso"

- **RICICLAGGIO "WITHOUT FLUX"**: In opposizione al riciclaggio con flusso, ora parliamo di un processo continuo. Anche in questo caso è presente un crogiolo a consiste nella maggior parte dei casi in tre camere divise (fusione, raffinazione e insediamento).

Il rottame viene caricato in un forno ponendo particolare attenzione ad evitare l'ingresso di ossigeno. Per liberare il rottame dall'umidità esso deve essere preriscaldato a temperature superiori ai  $100^{\circ}\text{C}$ .

Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere

Le fasi successive del processo: fusione, introduzione di Azoto o Argon e sedimentazione sono simili al processo "con flusso". Per ottenere un buon prodotto bisogna comunque scegliere dei rottami di Classe A1 per evitare di introdurre delle impurità nel prodotto finito.

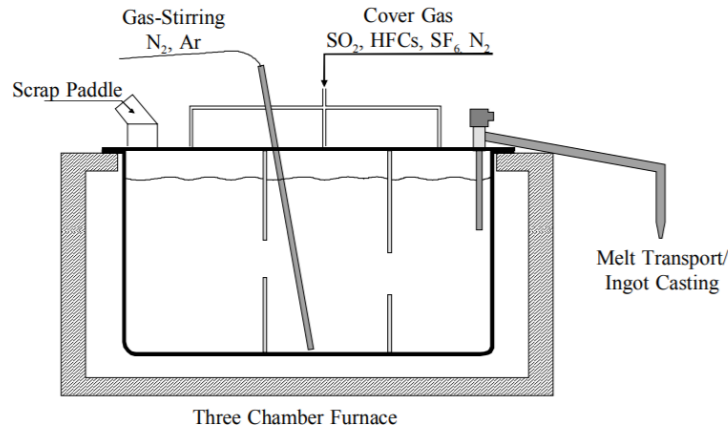


Figura 2.9 - Rappresentazione schematica del riciclaggio "senza flusso"

## 2.3 METODO INNOVATIVO PER IL RICICLO DI LEGHE LEGGERE (FSE)

Attualmente l'industria dei trasporti sta rivolgendo grande attenzione ad una nuova tipologia di saldatura, detta Friction Stir Welding (FSW) inventata e brevettata nel 1991, per leghe di alluminio difficilmente saldabili con i metodi conosciuti fino ad allora, dal The Welding Institute (TWI), organizzazione di ricerca e tecnologia con specializzazione nella saldatura con sede a Cambridge dal 1946.

Tale metodo è caratterizzato principalmente dal fatto che l'ottenimento della giunzione avviene allo stato solido e soprattutto dalla possibilità di saldare tipologie dissimili di leghe di alluminio.

Il cordone di saldatura è formato da un utensile cilindrico che ha un perno nella parte terminale, e che talvolta può presentare una filettatura.

Il perno ruotando genera attrito, quindi calore, che rende plastico il materiale. A questo punto avviene la ricristallizzazione, che unisce i due pezzi. La dimensione media dei grani ricristallizzati sarà molto piccola, migliorando le caratteristiche

meccaniche. Le temperature che si raggiungono sono circa pari al 75 - 80% della temperatura di fusione.

La tecnologia Friction Stir Welding (FSW) nell'ultimo decennio ha rappresentato una metodologia vincente per le applicazioni di diverso genere che devono essere fundamentalmente caratterizzate da elevate duttilità ed al contempo da alti valori di resistenza per mantenere elevate prestazioni, difatti è utilizzata in campo aerospaziale per saldare il serbatoio esterno dello Space Shuttle e in alcuni razzi vettori; nel settore aeronautico invece viene utilizzata per saldare leghe d'alluminio in sostituzione della rivettatura.

Questa innovativa tecnica di saldatura, se confrontata con i processi di saldatura più tradizionali, quali saldature per pressione o resistenza, riduce fortemente la presenza di distorsioni e tensioni residue nei giunti.

La tecnologia e la scienza sono in continuo sviluppo, tanto che negli ultimi anni si è pensato ad alcune varianti di tale metodo, quale tra i più importanti il Friction Stir Extrusion (FSE).

Si è pensato cioè, oltre alla saldatura, di poter effettuare anche una estrusione senza fusione che permetterebbe di ridurre drasticamente la quantità di dispositivi e di passaggi necessari per il riciclo, con enormi risparmi a livello energetico ed evitando di produrre scorie. Inoltre essendo il materiale ancora allo stato solido, anche se in plasticità, quando verrà estruso probabilmente non subirà alcuna degradazione o fase di trasformazione strutturale drastica che invece si verificherebbe con la fusione vera e propria. La novità del processo prevede di poter aumentare molto le deformazioni plastiche tramite il rimescolamento e la movimentazione degli strati del materiale.

Con la FSE si potrebbe avere la concreta possibilità di riuscire nella produzione di nuovi materiali, con una microstruttura unica, per ottenere leghe che non possono essere realizzate con le tradizionali tecniche di fusione. La FSE può essere facilmente trasformata in un processo continuo, per la produzione di grandi volumi di materiale, un problema ancora non risolto nella metallurgia delle polveri o nei processi di stampaggio a caldo.

Le caratteristiche salienti del processo di estrusione per attrito sono illustrate nella Figura 2.10 che infatti illustra la generica configurazione prevista per questo processo, costituita da una matrice e da una filiera rotante su cui è montata una testina forata che fornirà all'alluminio la dimensione e la direzione di estrusione.

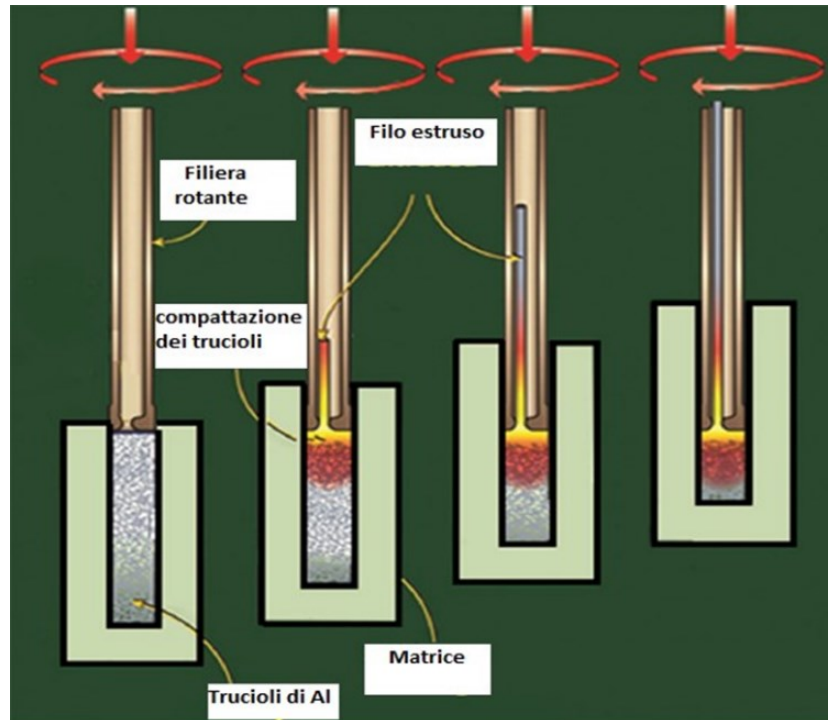


Figura 2.10 - Schema del processo di estrusione per attrito

La rotazione della testina provoca il riscaldamento per l'attrito da contatto con i trucioli all'interno della matrice, contatto continuo garantito dal moto di avanzamento della filiera verso il basso.

I trucioli subiscono dapprima una compattazione fino a raggiungere un grado di consistenza

paragonabile ad un materiale "sano", e poi vengono estrusi in un solo passaggio attraverso il foro presente sulla testina e sulla filiera.

Nel metodo tradizionale invece la formatura avviene per spinta del fuso attraverso una testa di estrusione (detta anche filiera) destinata ad impartire la forma desiderata, mentre la forma del manufatto viene stabilizzata per raffreddamento.

Il materiale fuso viene quindi forzato ad uscire attraverso una testa di estrusione.

Nella zona iniziale il polimero solido è trasportato lungo il cilindro e compresso.

A causa delle forze d'attrito e del riscaldamento esterno, il polimero fonde e allo stato fuso, viene trasportato verso il foro d'uscita.

La grande innovazione, quindi, rispetto alla produzione secondaria dell'alluminio con il metodo tradizionale è proprio l'assenza della fusione del materiale prima della successiva colata in una nuova billetta, con la produzione diretta di un estruso (solitamente un filo o comunque un oggetto cilindrico) grazie alla plasticizzazione continua di uno strato del materiale da riciclo immesso nel processo.

C'è inoltre la concreta possibilità di riuscire nella produzione di nuovi materiali, con una microstruttura unica, per ottenere leghe che non possono essere realizzate con le tradizionali tecniche di fusione. FSE può essere facilmente trasformata in un processo continuo, per la produzione di grandi volumi di materiale, un problema non risolto nella metallurgia delle polveri o nei processi di stampaggio a caldo.

La FSE può sembrare in apparenza un metodo banale ed immediato, quando invece, come si vedrà anche nei prossimi capitoli, è fondamentale scegliere i parametri più adatti per le due velocità, e trovare la giusta combinazione tra precompattazione dei trucioli e "forma" della filiera rotante sull'area di contatto col materiale.

Dal punto di vista energetico, come ampiamente anticipato, FSE è un processo con costi energetici, operativi e degli impianti molto più bassi di quelli attuali, e permette di riciclare una varietà di metalli industriali che includono anche materiali unici nel loro genere, offrendo un significativo vantaggio economico e di conseguenza un vantaggio sul mercato. Dando uno sguardo all'ambiente, entro il 2035 sarebbe prevista la riduzione totale delle emissioni, con un risparmio annuo di 2.300 tonnellate di CO<sub>2</sub>., 17.000 tonnellate di SO<sub>2</sub> e 14.400 tonnellate di NO<sub>x</sub>.

In base a queste previsioni, le prospettive di redditività economica di questa nuova tecnologia sono molto positive, tanto che si prevede entro il 2035 un risparmio economico di 100 milioni di dollari per la sola produzione di alluminio. Per quanto riguarda il mercato, la vendita dei prodotti della FSE potrebbe andare a coprire le richieste per il materiale da carpenteria "leggero", ossia funi

Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere

metalliche e fili delle linee aeree di trasmissione della corrente a media-bassa tensione.



## **CAPITOLO 3**

# **STUDIO PRELIMINARE E PREPARAZIONE AL PROGETTO**

Prima di procedere con l'illustrazione del lavoro svolto, è bene presentare la configurazione, visibile nella Figura 3.1 ed utilizzata durante lo svolgimento del progetto, così da facilitare la comprensione dei successivi capitoli avendo ben chiari i componenti utilizzati.

1. **CONTAINER:** è letteralmente il contenitore per i trucioli, entro il quale viene inserita la “pasticca” di trucioli compattati che verrà riscaldata, plasticizzata e quindi estrusa;

2. **PUNZONE:** è la filiera vera e propria, viene agganciato direttamente alla testa di lavorazione CNC e subisce l'abbassamento in funzione dei parametri impostati. Normalmente, nei casi documentati, è provvisto di scanalature e geometrie particolari sulla faccia a contatto con il materiale da estrudere, per favorire la creazione di attrito e la successiva risalita del materiale verso il foro di estrusione. Si è preferito invece adottare una soluzione diversa in questo progetto, filettando la parte interna del punzone per i primi cm, garantendo così la possibilità di sostituzione della parte terminale che verrà chiamata testina. È cavo al centro, per una lunghezza pari a 150 mm, quindi non permette di generare degli estrusi più lunghi di questa quantità;

3. **TESTINA ROTANTE:** è il cuore del progetto, garantisce un migliore flusso del materiale verso il centro della “pasticca” in fase plastica, e genera un invito al materiale per l'estrusione. Ovviamente anch'essa è cava per permettere al materiale di raggiungere il canale dell'estrusore;

4. **BASE:** è una piastra di appoggio per il container, sulla quale avviene gran parte del bloccaggio del sistema rotante.

Tutti i componenti hanno subito nell'arco del progetto delle modifiche, che sono state effettuate in seguito al verificarsi di inconvenienti durante lo svolgimento

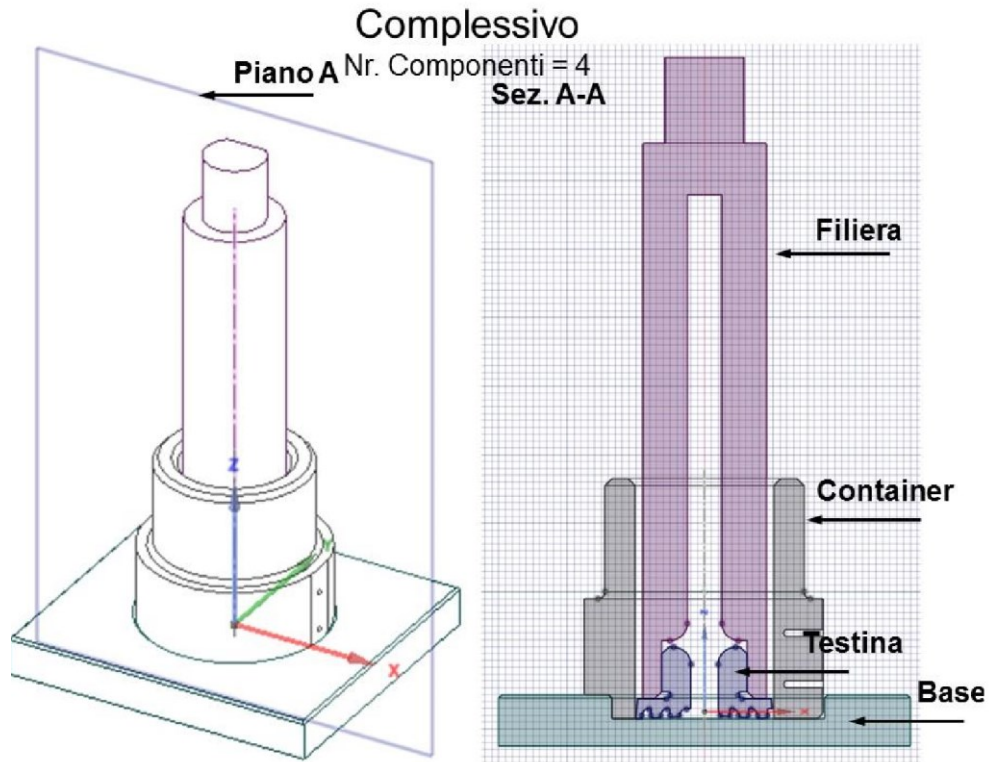


Figura 3.1 - Esempio di configurazione del dispositivo dell'Univpm

delle prove, ma perlopiù dovute ad una maggiore comprensione del fenomeno. Ad esempio si è tenuto conto di poter garantire una migliore stabilità del dispositivo durante la prova, oppure si è voluto cercare di migliorare il percorso del materiale all'interno dei canali della testina in funzione dell'analisi dei componenti dopo le prove.

### 3.1 CONFIGURAZIONE DEI COMPONENTI

Alla luce dei risultati ottenuti durante le simulazioni si è deciso di passare alle prove sperimentali con la prima versione della testina, che si è evoluta fino a dar luogo ad altre 3 versioni, che verranno illustrate in sequenza. In realtà le configurazioni presentate saranno 4, comprendendo anche quella con cui non si è lavorato a questo progetto, ma che viene riportata per completezza e per far vedere lo sviluppo dei componenti. Il materiale utilizzato per la realizzazione di tutti i pezzi è un acciaio da stampi, ovvero il K720, scelto per le sue caratteristiche meccaniche davvero eccellenti (come possiamo vedere nella tabella 3.2) e particolarmente indicato per ambienti in cui debbono avvenire delle deformazioni a freddo, che riguardano proprio il campo dell'estrusione per attrito in quanto le temperature raggiunte non sono minimamente paragonabili con quelle di fusione dell'alluminio, e quindi a maggior ragione dell'acciaio.

Composizione chimica													
C%	Si%	Mn%	P% max	S% max	Cr%	V%							
0,85-0,95	0,10-0,40	1,80-2,20	0,030	0,030	0,20-0,50	0,05-0,20							
± 0,03	± 0,03	± 0,08	+ 0,005	+ 0,005	± 0,05	± 0,02							
Scostamenti ammessi per analisi di prodotto													
Temperature in °C													
Deformazione a caldo	Distensione dopo lav. e prima della tempra	Preriscaldo	Tempra				Rinvenimento						
1050-850	650 raffr. forno 320 aria	400 sosta poi 650 sosta poi ▲	▲ 790-820 olio o polimero bagno sali o termale (200-250)				180-220 aria calma minimo 2 cicli						
Ricottura di lavorabilità	Ricottura isotermica	Tempra Jominy	Preriscaldo per saldatura			Distensione dopo saldatura							
700	780 raffr. forno fino a 650 raffr. forno a 650 aria (HB max 229)		250-300	Ac1	Ac3	Ms	Mf						
La durezza allo stato ricotto e trafilato può essere HB 249 max				720	750	190	-20 <sup>*)</sup>						
*) sottoraffreddamento													
Il simbolo ▲ indica la salita della temperatura fino a ..... °C ▲													
Proprietà meccaniche e fisiche													
Tabella di rinvenimento dopo tempra a 790 °C in olio													
HB	739	722	706	688	654	595	543	496	390	353			
HRC	65	64	63	62	60	57	54	51	42	38			
N/mm <sup>2</sup>						2240	2010	1820	1340	1180			
Rinvenimento a °C	50	100	150	200	250	300	350	400	500	600			
HRC tondi temprati a 810 °C in olio													
mm	esterno		½ raggio		centro								
Ø 40	65		64		64								
Ø 50	65		64		63								
Ø 60	64		63		62								
Ø 70	64		58		52								
Espansione termica 10 <sup>-6</sup> · K <sup>-1</sup>								11,5	12,0	12,2	12,5	12,8	
Modulo elastico longitudinale GPa								210					
Modulo elastico tangenziale GPa								80					
Prove a °C								20	100	200	300	400	500
Calore specifico J/(Kg·K)		Densità Kg/dm <sup>3</sup>		Conducibilità Termica W/(m·K)		Resistività Elettrica Ohm·mm <sup>2</sup> /m		Conducibilità elettrica Siemens·m/mm <sup>2</sup>					
460		7,85		30		0,35		2,85					

#### Acciaio da utensili per lavorazioni a freddo

- acciaio al manganese, cromo e vanadio
- indeformabile durante la tempra
- ottima resistenza all'usura
- non è raccomandato per quegli utensili che raggiungono alte temperature in fase di esercizio
- soggetto a cricatura se riscaldato troppo velocemente.
- impieghi: stampi di forma allungata, matrici, punzoni per imbutitura, calibri campione, stampi per materie plastiche, lame circolari, guide, cesoie per la carta, utensili per la lavorazione del legno

Tabella 3.2 - caratteristiche dell'acciaio K720

### 3.1.1 CONFIGURAZIONE NUMERO 1: PROVE ANTECEDENTI

In questa versione la filiera, o punzone, è dotata di testa sagomata, e non è presente la testina sostituibile, che è nata proprio dopo la rottura di questo primo dispositivo. Il punzone è ormai inutilizzabile dopo l'inconveniente occorso, e non serve recuperarlo tramite lavorazioni alle MU poiché questa configurazione è stata abbandonata quasi subito.

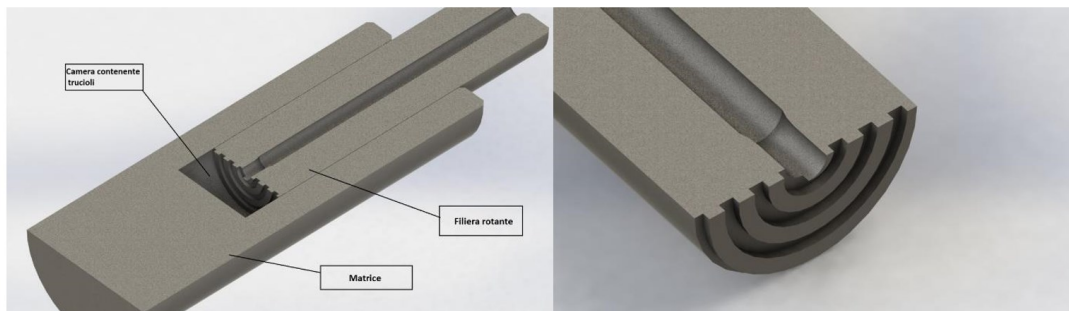


Figura 3.3 - Screenshot del CAD della configurazione numero 1

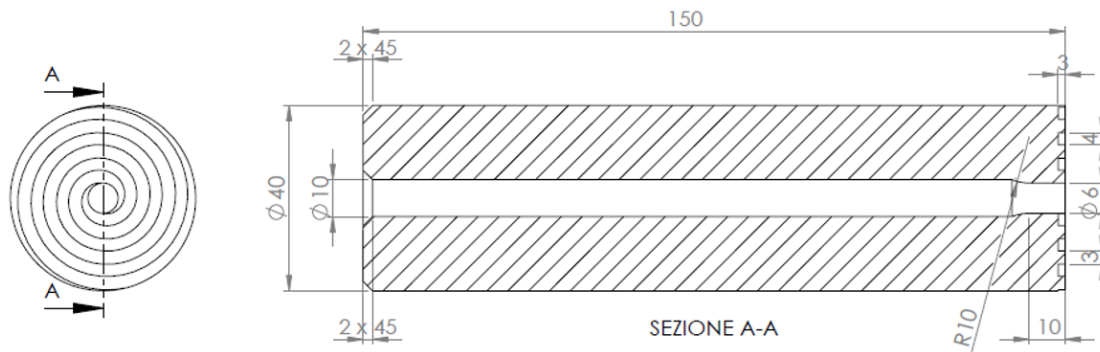


Figura 3.4 - Tavola quotata punzone/estrusore

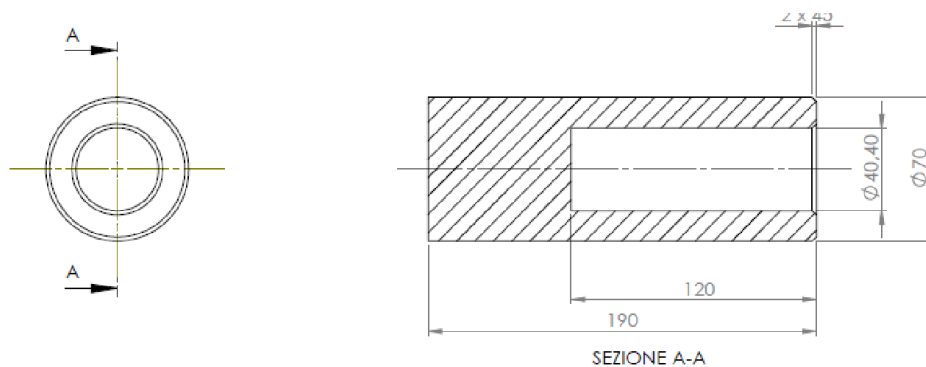


Figura 3.5 - Tavola quotata matrice/container

Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere

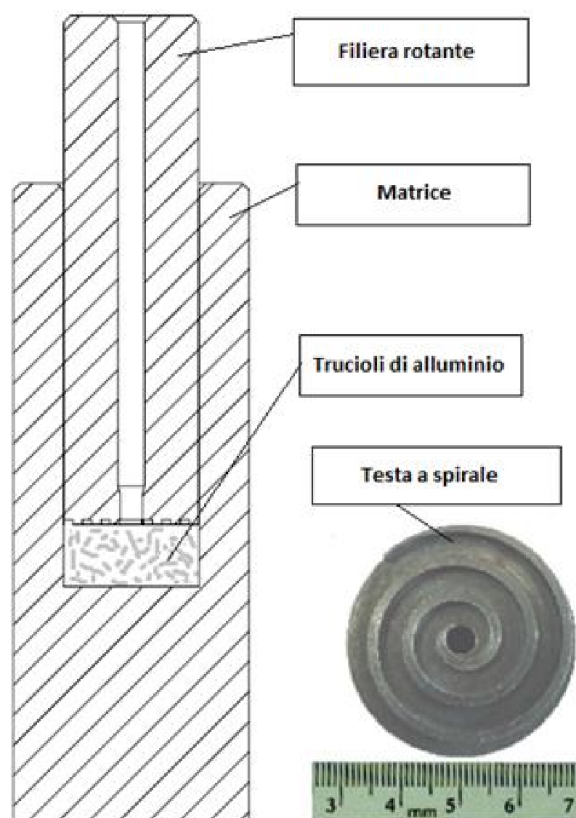


Figura 3.6 - Descrizione funzionale della configurazione numero 1



Figura 3.7 - Foto dei componenti della configurazione numero 1

### 3.1.2 CONFIGURAZIONE NUMERO 2: ESTRUSIONE LEGA DI ALLUMINIO 1000

Questa configurazione differisce dalla n.1 principalmente per l'introduzione della testina rotante in luogo del semplice punzone sagomato, e si vede dalle immagini di figura 3.8 che il montaggio del componente avviene tramite filettatura. Questa soluzione, oltre ad avere maggiore versatilità di utilizzo (le successive testine possono essere montate sul vecchio punzone), consente di estrarre più facilmente il prodotto dell'estrusione che per la maggior parte rimane incastrato nel tratto iniziale della testina qualora la prova dovesse interrompersi per in blocco della macchina.

Il resto dell'estruso invece è recuperabile facendo sì che cada dal punzone una volta che sia stata svitata la testina, soluzione comoda anche nel caso in cui il filo prodotto fosse intatto.

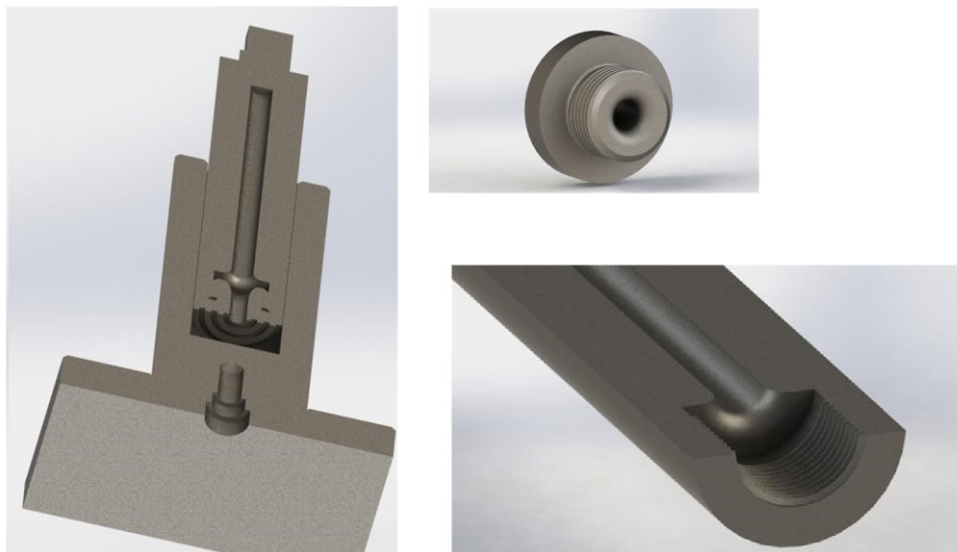
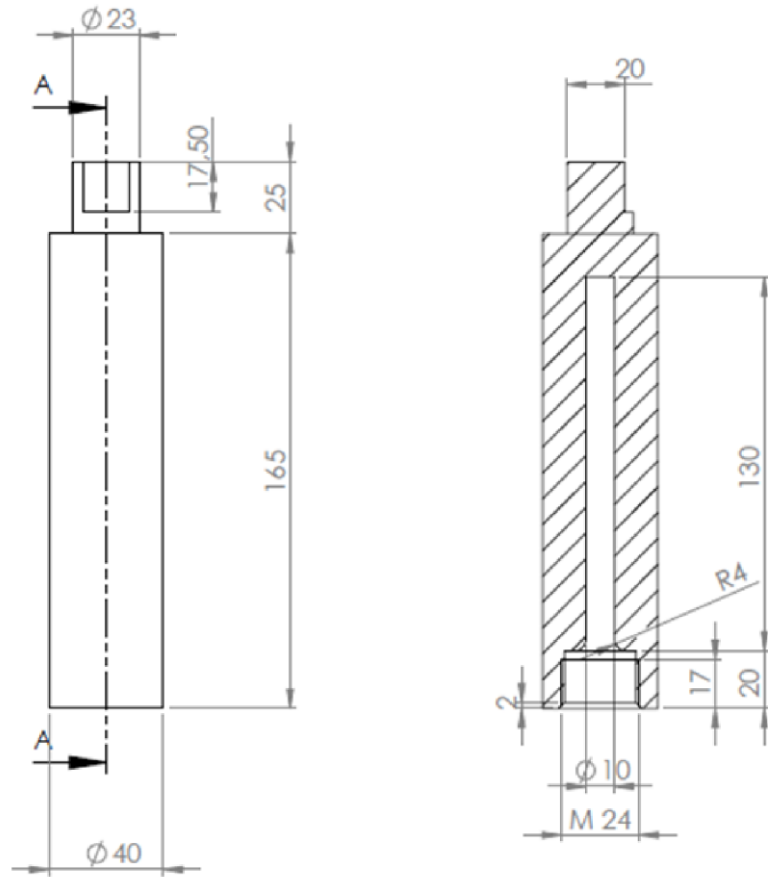


Figura 3.8 - Alcune immagini CAD della configurazione numero 2

Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere



SEZIONE A-A

Figura 3.9 - Sezione della testina rotante della configurazione numero 2

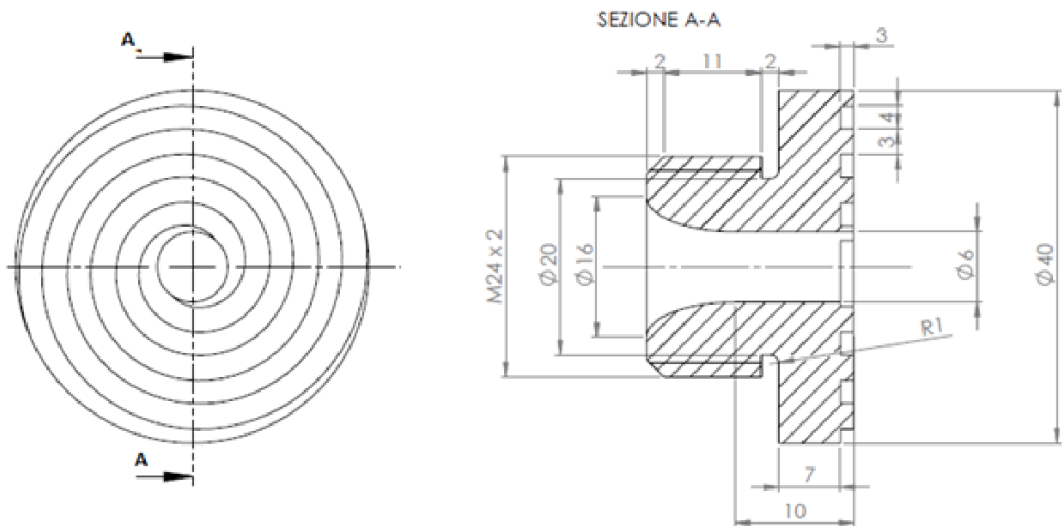


Figura 3.10 - Sezione del punzone della configurazione numero 2

### **3.1.3 CONFIGURAZIONE NUMERO 3: ESTRUSIONE LEGA DI ALLUMINIO 5457**

Il punzone è sostanzialmente simile a quello della configurazione precedente, viene snellito di qualche millimetro per calibrare meglio la stabilità del sistema durante la prova, ma mantiene le medesime dimensioni interne, per sfruttare sia la testina di lavorazione vecchia che quella riprogettata. Viene alleggerito il container, sul quale vengono realizzati due fori per inserire le termocoppie (monitorando il raggiungimento della temperatura più adatta per l'estrusione), e che viene abbassato per permettere un bloccaggio anche sulle sue pareti laterali. La piastra subisce una modifica funzionale con l'aggiunta di una piccola tasca preposta ad ospitare la spina; dall'altro lato la spina blocca il container facendo accoppiamento di forma (e forza) con un'altra tasca che si trova sul fondo dello stesso. Questa soluzione avrebbe dovuto impedire la rotazione sincrona del container con il punzone, provocata dall'elevato attrito che si genera dal contatto tra testina e trucioli compattati. Inoltre, con l'avanzare dell'esperimento, si dimostrerà che purtroppo parte dei trucioli tendono a "scappare" e a non lasciarsi lavorare in maniera ottimale sotto la testina, creando così un sottile ma deleterio strato di bava ai lati del container.

In realtà la formazione della bava può essere utile durante la prova perché permette di innalzare la temperatura mantenendo la plasticità dell'alluminio, però rappresenta un problema quando si deve cominciare un'altra prova con gli stessi componenti, in quanto "a freddo" gli sforzi (ed il rumore) prodotti dall'attrito tra punzone rotante e bava sono eccessivi, a tal punto da bloccare la macchina e rendere impossibile la prosecuzione. Tornando alla configurazione in esame, la testina è stata riprogettata cercando di favorire il flusso plastico del materiale dentro i canali e, fase ancor più cruciale, dai canali al foro di estrusione e poi nel successivo canale della filiera.

In particolare la superficie a contatto con la pasticca non è piatta ma presenta una conicità di 3° verso l'interno, come si può notare dalla figura 3.12. Questo accorgimento è stato adottato considerando che in letteratura ci sono dei casi per cui l'estrusione è riuscita semplicemente utilizzando una testina piatta con conicità accentuata di 10°. Questo grado di conicità sarà raggiunto nelle configurazioni progettate in seguito alle prove sperimentali.



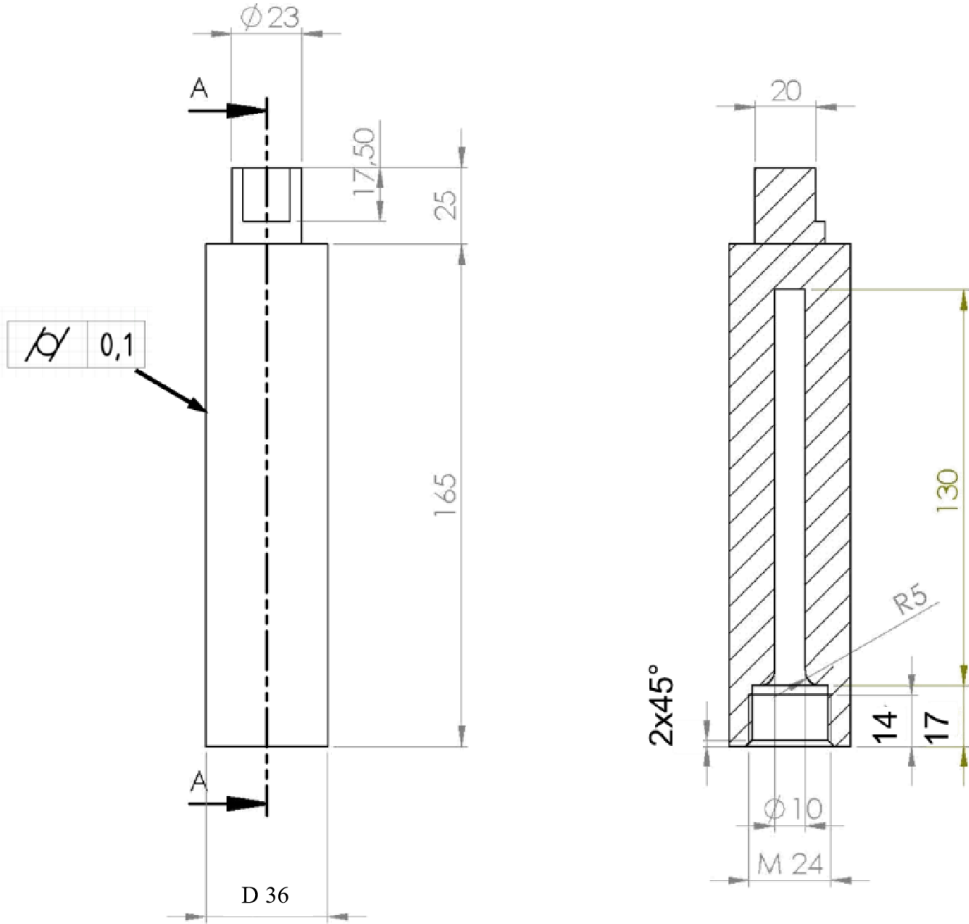


Figura 3.11 - Sezione del punzone della configurazione numero 3

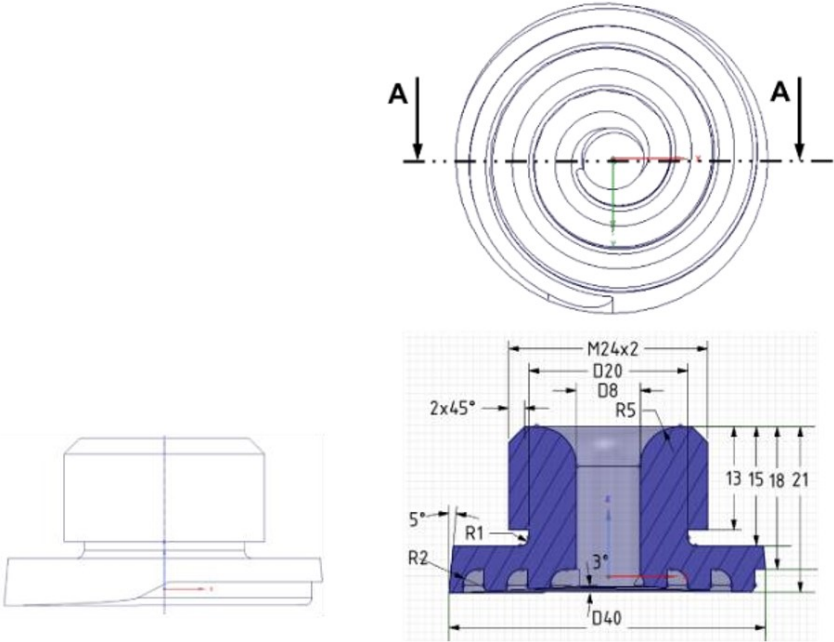


Figura 3.12 - Sezione della testina della configurazione numero 3

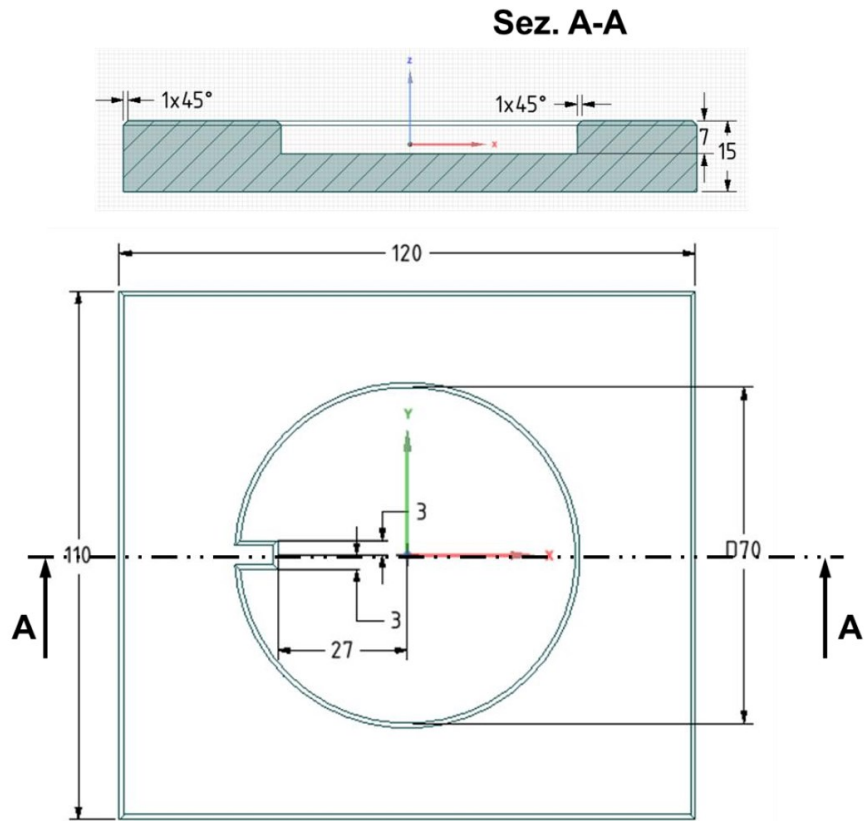


Figura 3.13 - Piastra/base della configurazione numero 3

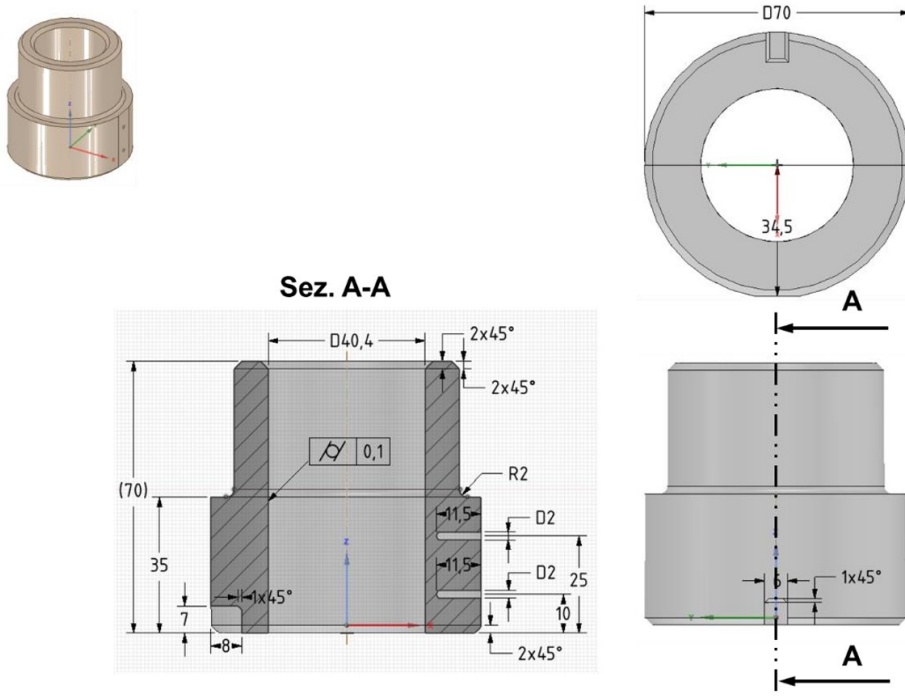


Figura 3.14 - Contenitore della configurazione numero 3

### 3.1.4 CONFIGURAZIONE NUMERO 4

Questa configurazione è quella attuale disponibile presso i laboratori UNIVPM, anche se parte dei componenti sono stati utilizzati in combinazione con quelli precedenti, dando luogo così a “configurazioni ad-hoc” che però purtroppo non hanno dato i risultati attesi. Le differenze fondamentali rispetto alla n.3 sono due, e riguardano la base ed il container. Notando infatti che è possibile mantenere una migliore stabilità del dispositivo applicando gli afferraggi sugli spallamenti esterni del contenitore, si rende pressoché inutile la presenza della chiavetta con relativi alloggi per entrambi i pezzi. Inoltre i fori per le termocoppie vengono ridotti ad uno solo, nella fattispecie quello più in basso, che si trova all’altezza ideale per monitorare la temperatura dello strato plastico della pasticca, la cui altezza si è andata sempre più “standardizzando” con il proseguire delle prove. Con la produzione dei componenti modificati, è stata richiesta all’officina anche la produzione di altre tre testine per ulteriori prove, che però sono identiche a quelle della configurazione n.2, ovvero senza la conicità che genera un migliore invito, perché i benefici non sono stati quelli sperati e sicuramente bisogna che per ottenere un migliore flusso del materiale si agisca su altri aspetti. Infatti la testina con conicità ha “intrappolato” molto materiale nei suoi canali, ma non è stata in grado di trasmetterlo al canale di estrusione; anzi è poi risultato problematico recuperare (per quanto fosse possibile) la sua piena funzionalità, tant’è che un esemplare è stato dismesso perché troppo rovinato.

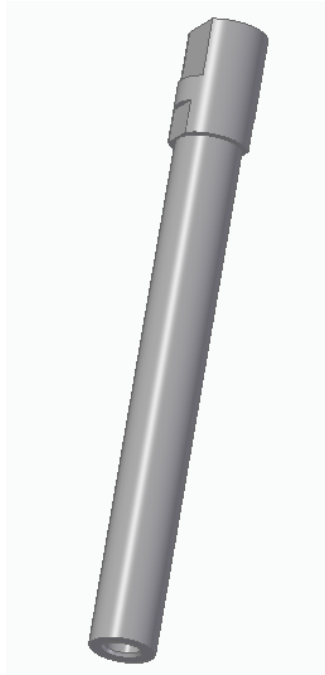


Figura 3.15 - Componenti della configurazione numero 4

### 3.1.5 PROGETTAZIONE DEI NUOVI COMPONENTI

Dopo aver analizzato le varie problematiche riscontrate durante lo svolgimento delle prove, si è tenuto necessario di riprogettare, con diverse soluzioni, i vari componenti, al fine di migliorare il processo in funzione dei caratteri principali che lo caratterizzano.

La filiera, rispetto alla precedente versione, ha subito una riduzione del diametro. Questa modifica è stata dettata dalla necessità di ridurre i carichi della macchina durante la lavorazione, così da ridurre notevolmente la superficie di lavoro. Il diametro della parte principale della filiera è da 19 mm per evitare il contatto con le pareti del container (successivamente descritto) che ha un foro da 20.2 mm. Sulla parte superiore, oltre alla configurazione per il fissaggio sul portautensili, la parte cilindrica presenta una sezione smussata al fine di ottenere due superfici



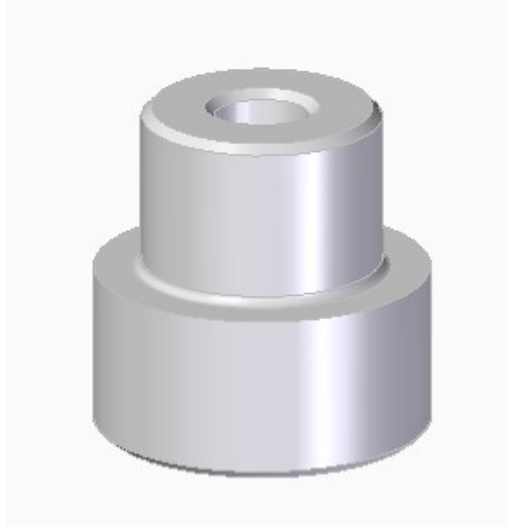
*Figura 3.16 - Filiera vista 3D*

parallele e distanti 20 mm che permettano l'afferraggio con una chiave inglese della medesima dimensione (particolare presente nella Figura 3.16). Il disegno tecnico quotato è riportato nell'allegato 1 alla fine dell'elaborato.

Anche il container è stato ridotto nelle dimensioni, in modo particolare nel diametro del foro interno. Come già accennato precedentemente, infatti, il foro centrale è stato ridotto ad un diametro di 20.2 mm dai 40 mm della versione

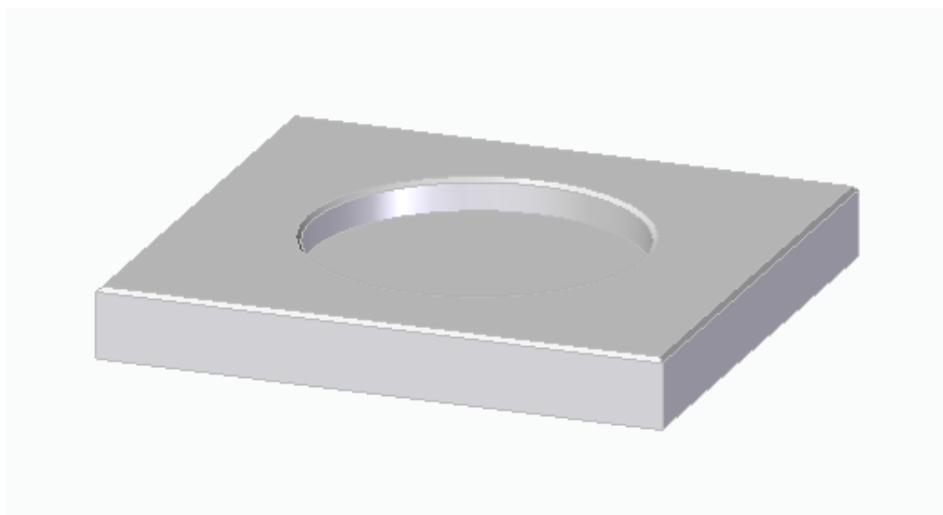
Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere

precedente (presente nella Figura 3.17). I 2 decimi di millimetro in più sul diametro sono stati aggiunti per evitare il contatto continuo durante la rotazione con la testina (descritta successivamente) che ha un diametro massimo di 20 mm. Anche in questo caso è presente un disegno tecnico quotato riportato nell'allegato 2.



*Figura 3.17 - Container vista 3D*

Sulla piastra base invece l'unica modifica effettuata (Figura 3.18) è stata la riduzione della scanalatura centrale per adattarla alle nuove dimensioni del container.



*Figura 3.18 - Piastra base vista 3D*

Le modifiche più consistenti sono state apportate alle testine e la più evidente,

come mostra la Figura 3.19, oltre alla riduzione del diametro da un massimo 40 mm a un massimo 20 mm, è la rimozione della scanalatura a spirale sulla superficie inferiore, in quanto ritenuta non più necessaria. Al suo posto è stata progettata una superficie liscia con una svasatura verso il centro della testina. La progettazione ha previsto 9 testine in cui gli elementi che le distinguono sono il diametro del foro centrale, che varia da 4, 6 e 8 mm, e l'angolo di inclinazione della svasatura rispetto al piano orizzontale che varia da 5°, 10° e 15°.



*Figura 3.19 - Testina vista 3d*

Un particolare interessante è che la superficie esterna cilindrica di diametro 20 mm è presente solo per uno spessore di 0.5 mm, mentre la restante superficie è conica con il diametro minore di misura 19 mm, al fine di ridurre al minimo il contatto con le pareti della filiera durante la rotazione. Nell'immagine renderizzata di Figura 3.19 non viene mostrata la filettatura sulla parte superiore, presente invece nel disegno CAD, per poter essere avvitata alla filiera che, allo stesso modo, presenta una filettatura interna nel foro alla base. Allo stesso modo, nella immagine, non vengono rappresentate due svasature parallele lungo la parte conica, presenti invece sul disegno CAD, che, come per la filiera, consentono l'afferraggio con una chiave inglese della stessa misura. In questo modo è possibile rimuovere e sostituire le testine senza dover utilizzare altri strumenti di bloccaggio. Le dimensioni effettive di una delle testine sono riportate nel disegno tecnico quotato riportato nell'allegato 4.

### 3.2 SIMULAZIONE AD ELEMENTI FINITI

La fase sperimentale del progetto FSE è stata preceduta da una serie di simulazioni del processo, tramite alcuni software specifici che hanno permesso di indagare il flusso del materiale durante l'estrusione e quindi di capire la migliore geometria possibile dei componenti da progettare.

Oltre a presentare la configurazione “virtuale” con cui sono state effettuate le simulazioni, vengono proposti dei grafici riguardanti i parametri da monitorare per la progettazione dei componenti, tra i quali ad esempio lo stress globale e la deformazione.

Le simulazioni sono state aggiornate continuamente in funzione dello sviluppo dei componenti e parallelamente allo svolgimento delle prove in laboratorio, inoltre sono state fatte anche delle simulazioni, che si riporteranno nel prossimo paragrafo su delle configurazioni progettate dopo aver effettuato le prove in laboratorio ed avere analizzato i risultati ottenuti, avendo ritenuto necessario mettere mano ai progetti degli utensili al fine di migliorare ed ottimizzare il processo in funzione dei parametri principali che lo caratterizzano.

I dati riportati in questo paragrafo invece sono relativi alla prima prova svolta, ed è stupefacente la coerenza tra il risultato della simulazione e quello della prova, visibile nella Figura sottostante.

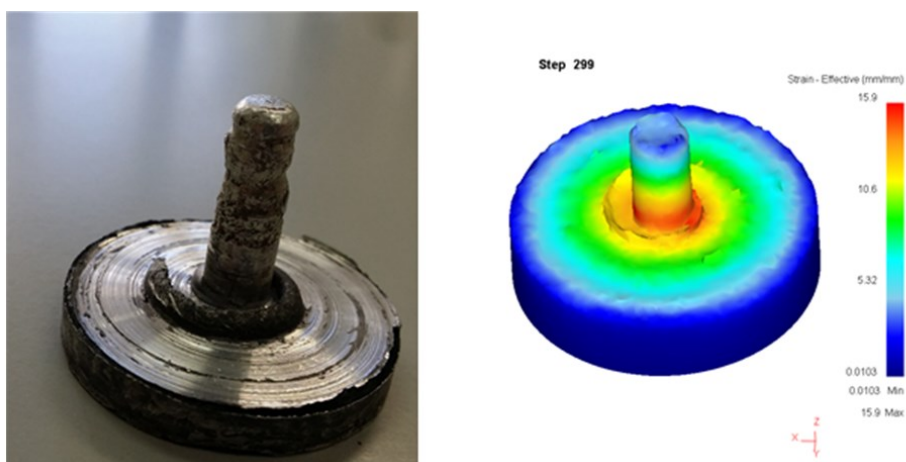


Figura 4.20 - Confronto tra deformazione nella simulazione e risultato della prova sperimentale

La straordinarietà di questo confronto risiede nella visualizzazione del movimento del materiale della pasticca verso il canale della filiera. Si riscontra infatti una “cresta” sulla foto reale che corrisponde alla simulazione.

Lo step selezionato nella simulazione è intermedio, e corrisponde alla stessa tempistica prevista per la prova in laboratorio. Nonostante il blocco rotazionale della macchina CNC che non ha permesso una completa estrusione della pasticca, sono ben visibili i fenomeni di riempimento dei canali con conseguente compattazione e creazione del cilindro estruso. Ovviamente nel caso ideale era impossibile ottenere una geometria pressoché perfetta come risulta invece dalle simulazioni, ma è bene specificare che ci sono delle differenze sostanziali tra i parametri impostati realmente e quelli ideali per il processo FEM. Questo discorso verrà ripreso successivamente nella trattazione dei risultati delle prove ma è bene anticipare gli ostacoli che si sono riscontrati.

Prima di tutto le velocità impostate sono rispettivamente per rotazione ed avanzamento di 250 rpm e 2 mm/sec. Queste velocità sono risultate impraticabili in quanto la macchina andava in blocco sia per lo sforzo sull'asse del punzone che per la rotazione dello stesso; si è quindi optato per una combinazione di 1000 rpm e di 0,2 mm/sec, prevenendo di aumentare gradualmente la velocità di avanzamento ad un aumentare significativo della temperatura. Essendo le uniche condizioni possibili per raggiungere le temperature necessarie senza andare incontro ad un blocco della macchina; la durata della prova si allunga di 10 volte rispetto alle previsioni.

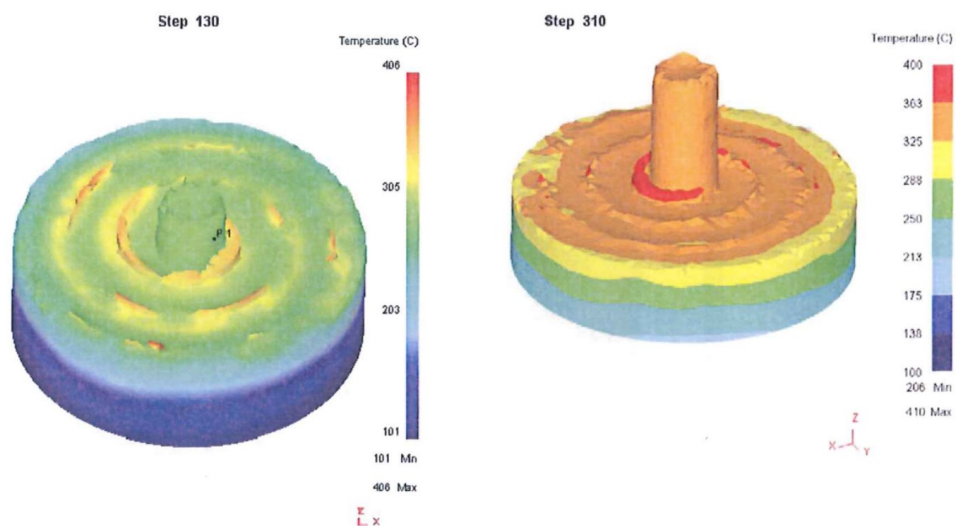


Figura 3.21 - Profili di temperatura per step delle fasi iniziale e finale della simulazione

Osservando l'andamento della temperatura dello step 130 della Figura 3.21 si nota che nelle fasi iniziali non sono ancora state raggiunte le migliori condizioni di estrusione, in quanto la pasticca è ancora relativamente fredda ed il materiale



non è plastico; il filo estruso potrebbe quindi, nelle prime parti, non avere le caratteristiche di compattezza e forma desiderate.

Nell'immagine a fianco invece lo step 310 illustra la situazione termica verso la fine della prova, e si nota molto bene la plasticità diffusa sullo strato superficiale della pasticca, con la "cresta" alla temperatura più alta che conclude il percorso all'interno dei canali della testina e risale dentro il punzone compattandosi. Durante l'estrusione l'alluminio tende a raffreddarsi ma non con effetto immediato, poiché l'intero dispositivo si è riscaldato e non dissipa immediatamente il calore. Con riferimento alla figura 3.22 si osserva invece l'andamento delle direzioni di deformazione, tramite l'ausilio di una serie di vettori disposti sulla superficie esterna della pasticca.

La direzione è ovviamente condizionata dalla rotazione imposta e dalla presenza dei canali di estrusione sulla testina, che sono facilmente riconoscibili dal diverso colore che assumono, ed è corrispondente ad uno spostamento minore rispetto alle zone più "calde", come quelle del materiale appena estruso.

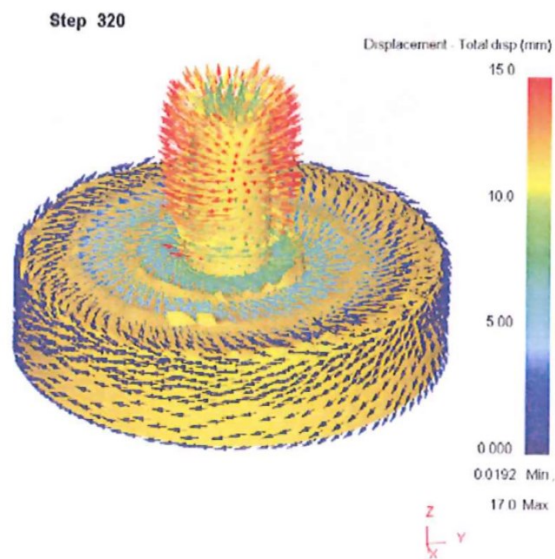


Figura 3.22 - Vettori di deformazione della pasticca

Un'ultima analisi può essere fatta sulle figure 3.23 e 3.24, sottolineando sempre l'aspetto della deformazione delle zone a contatto con i canali della testina. Il dato confortante delle simulazioni, è che la velocità di deformazione è minima nel canale interno al punzone, a significare che durante la fase di "solidificazione" il

Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere

flusso dell'alluminio è continuo e soprattutto si ha una buona compattazione di tutte le zone del cilindro estruso.

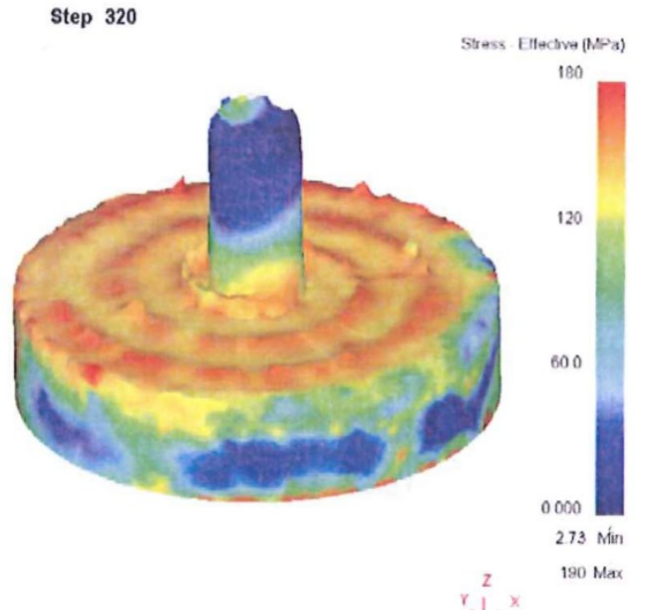


Figura 3.23 - Sforzo sulla pasticca durante l'estrusione

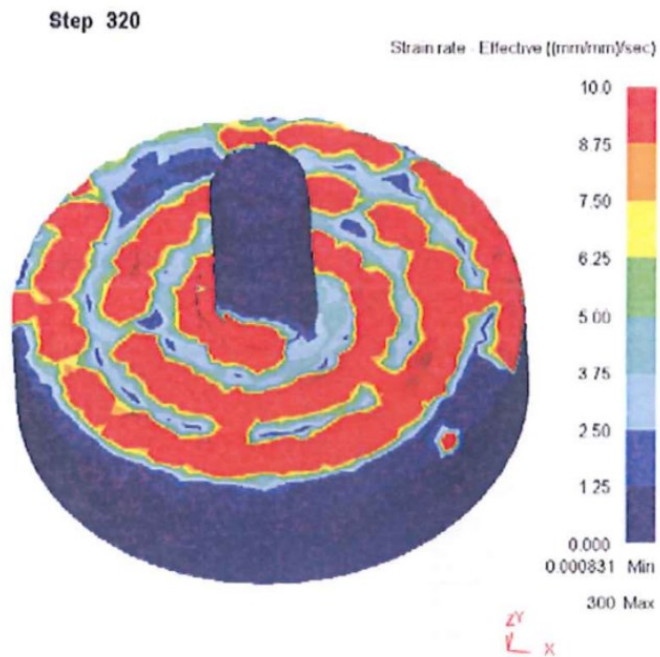


Figura 3.24 - Velocità di deformazione

### 3.2.1 SIMULAZIONI SULLE CONFIGURAZIONI PROGETTATE SUCCESSIVAMENTE

Come già accennato sono state ideate delle configurazioni, illustrate nei paragrafi precedenti, progettate successivamente alle prove sperimentali, questo perché si è ritenuto opportuno ridurre la  $\delta$  per evitare che la macchina vada in carico di punta e quindi in blocco.

Nelle configurazioni in considerazione sono state variate principalmente le dimensioni della testina e l'angolo alla sua base, all'interno di questo paragrafo saranno però prese in considerazione solo le configurazioni in cui l'angolo è di  $15^\circ$  e le dimensioni della testina sono di 4 ed 8mm, perché ritenute le più significative dal punto di vista delle modifiche effettuate.

Dalla Figura 3.25 si possono confrontare le due simulazioni, sebbene gli step considerati siano diversi ma ritenendo, che una volta iniziato il processo, le condizioni si mantengano stazionarie, riguardo le temperature raggiunte.

In questo caso come ci si poteva aspettare le temperature risultano inferiori rispetto alle configurazioni precedenti ed arrivano ad un massimo di circa  $200^\circ\text{C}$ , mentre sulle prove effettuate in laboratorio si arrivavano a toccare in alcune zone i  $400^\circ\text{C}$ .

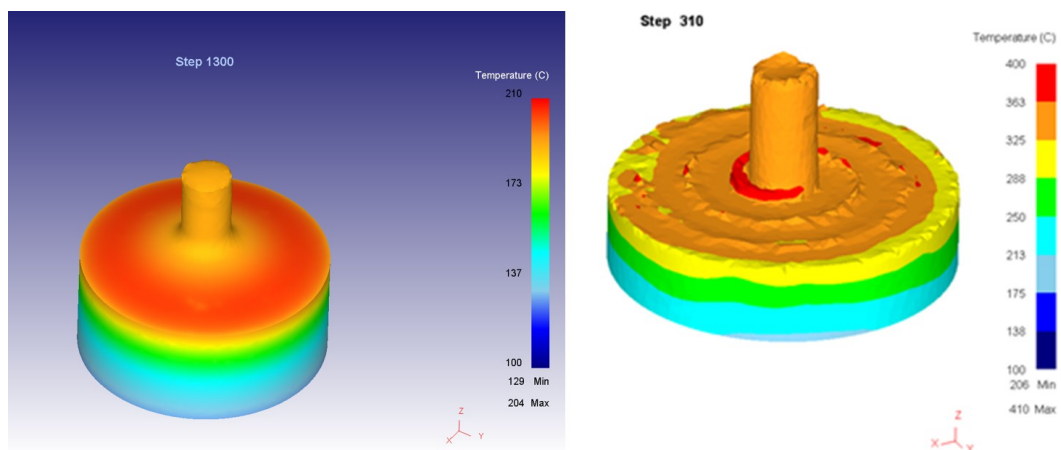


Figura 3.25 - Andamento della temperatura sulla configurazione con testina di 8mm in confronto col la simulazione precedente

Anche le velocità di deformazione risultano essere consistentemente più basse in tutte le zone della pasticca come riportato nella figura nella pagina successiva.

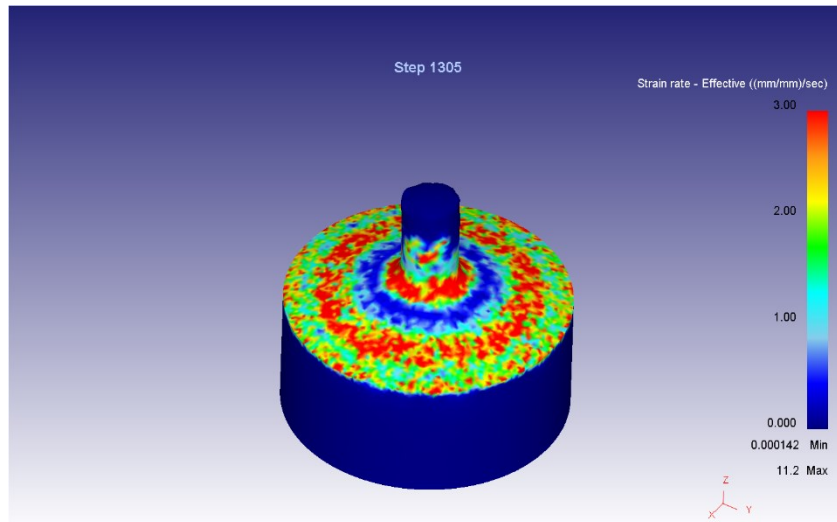


Figura 3.26 - Velocità di deformazione nella configurazione con testina di 8mm

La differenza più grande però si è ottenuta, volutamente sugli sforzi agenti sulla pasticca durante l'estrusione, difatti prendendo a riferimento ad esempio la configurazione con il diametro della testina di 4mm notiamo che riproponendo lo stesso fondo scala della simulazione precedente non riusciamo a cogliere i diversi particolari, si è dovuto infatti ridurre superiormente il fondo scala per riuscire a cogliere tutte le differenze (riportato in Figura 3.28).

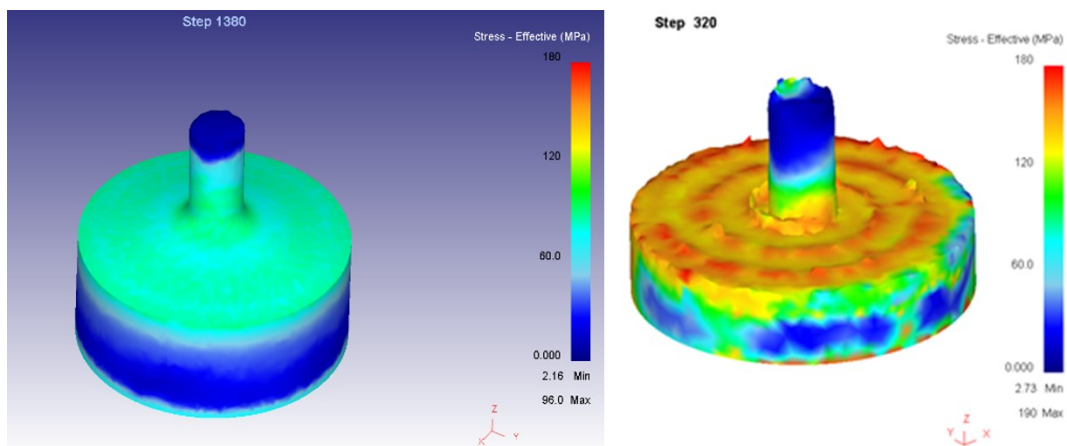
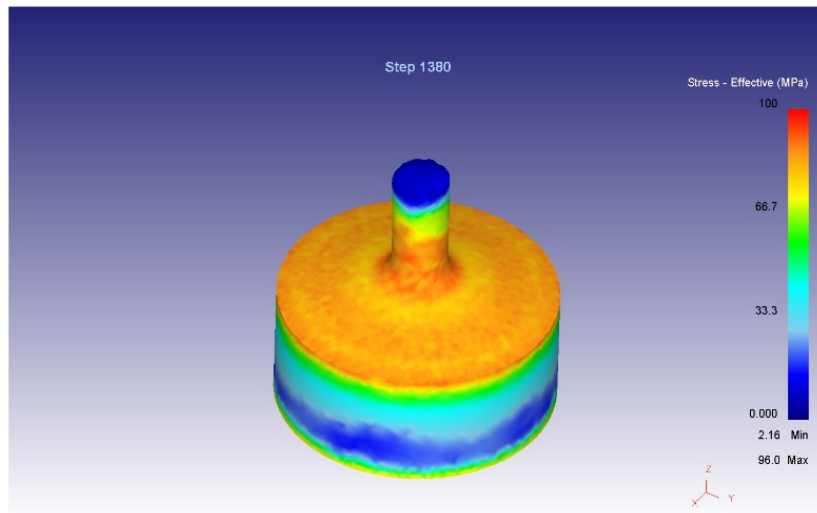


Figura 3.27 - Sforzo con il "vecchio" fondo scala sulla configurazione con la testina di 4mm confrontato con la simulazione precedente



*Figura 3.28 - Sforzo con il "nuovo" fondo scala sulla configurazione con la testina di 4mm*

Si può dunque presupporre che le modifiche effettuate abbiano ottenuto l'effetto voluto, riuscendo a diminuire la  $\delta$  sulla superficie, e probabilmente le nuove configurazioni sarebbero riuscite a non far andare la macchina in carico di punta, riuscendo a portare a termine l'estrusione completa.

## CAPITOLO 4

### PROVE EFFETTUATE

Le prove sono state condotte presso i laboratori di tecnologia meccanica del D.I.I.S.M. della facoltà di Ingegneria dell'Univpm, ad Ancona.

I materiali a disposizione sono dei trucioli di due diverse leghe di alluminio e di una di magnesio:

- lega 1000 di Alluminio con grado di purezza al 99,9999%, i trucioli sono stati appositamente prodotti (come si può osservare dalla figura 4.1) per simulare i residui di una lavorazione alle MU;
- lega 5457 di Alluminio, i trucioli provengono dagli scarti di un'azienda della provincia di Ancona.
- lega AZ31 di Magnesio, trucioli ottenuti mediante una lavorazione al tornio per simulare gli scarti di lavorazione.



*Figura 4.5 - Lavorazione al tornio delle barre di Alluminio*

Nei paragrafi successivi sarà dapprima illustrata la sequenza di operazioni preliminari per preparare il materiale da riciclare ed assemblare i componenti sulla macchina CNC utilizzata, ed in seguito si spiegherà in dettaglio l'andamento della prova.

## **4.1 OPERAZIONI PRELIMINARI**

### **4.1.1 LAVAGGLIO TRUCIOLI**

Questa fase si è resa necessaria solo per la lega 5457, in quanto i trucioli si presentavano molto “sporchi”, ovvero misti a scarti di plastica, carta e legno, derivanti dalle lavorazioni successive del semilavorato per ottenere un prodotto finito. Per ottenere un truciolo “puro”, si è provveduto al lavaggio del materiale con dell’acqua, sfruttando il galleggiamento degli elementi più leggeri. Non è stato sufficiente però a separare completamente i trucioli metallici dalle impurità derivanti anche dai lubrificanti di lavorazione, e si è reso quindi necessario un secondo passaggio di pulizia. Il metodo più rapido e funzionale è stato quello di mettere i trucioli in una pentola portando l’acqua in ebollizione, in maniera tale da sfruttare i moti convettivi per separare la sporcizia dall’alluminio (che rimaneva attaccato al fondo), portandola in superficie dove veniva catturata con una rete a maglie strettissime. Ovviamente questo procedimento non ha nulla a che vedere con quelli che potrebbero essere i metodi di pulizia industriale del truciolo prima di estruderlo con la FSE, poiché in quel caso andrebbe studiato un processo apposito e che garantisca una purezza del materiale in ingresso davvero alta. Questo aspetto meriterebbe un serio approfondimento (ovviamente a seguito di un’affermazione imponente del riciclo tramite FSE), in quanto il materiale sporco non può “ripulirsi” durante la fusione, bruciando i materiali indesiderati, ma questi andrebbero ad essere inclusi nel prodotto finito, se le temperature di plasticità dell’alluminio (450-500° C) non riuscissero a bruciarli completamente, vista la mancanza (voluta) di scorie.

### **4.1.2 PRECOMPATTAZIONE DEI TRUCIOLI**

I trucioli lavati devono essere quindi compattati per realizzare le cosiddette “pasticche”, ovvero dei cilindri di altezza variabile (a seconda della lunghezza che si vuole ottenere per l’estruso) ma con diametro fisso, pari alla dimensione del container entro il quale verranno bloccate per procedere all’estrusione. Per compattare i trucioli è stata utilizzata una pressa normalmente destinata per effettuare prove di trazione-compressione, una MTS (“Material Test System”



visibile nella figura 4.4), in grado di raggiungere una forza massima di 250 kN. I trucioli di lega 1000 sono stati compattati a 100 kN, per la lega 5457 il carico è stato di 200 kN poiché il grado di consistenza della pasticca non era soddisfacente, considerando che durante la lavorazione alle MU il materiale poteva aver subito un incrudimento notevole; anche per le pasticche della lega AZ31 di Magnesio si è usato un carico di 200 Kn ottenendo sia pasticche con truciolo grossolano (poco denso) che pasticche formate da del truciolo fine (molto denso).

La compattazione avviene ad opera di un punzone che comprime i trucioli all'interno di un container dalle dimensioni pressoché riconducibili a quelle del contenitore per l'estrusione, anzi nella versione più recente si è cercato di adottarne uno con un diametro leggermente più piccolo per favorire il montaggio. Alla luce di queste considerazioni, sarebbe auspicabile, almeno in fase sperimentale, poter fare una ricottura dei trucioli prima della compattazione, in maniera tale da agevolare la formazione di "provini" che non si sfaldano e favorire la lavorabilità durante l'estrusione. Questi passaggi intermedi di preparazione sono in parte dispendiosi, ma servono per cercare di capire quali siano i parametri di lavorazione ottimali per il processo di FSE cercando di produrre un buon estruso, è sottinteso che in ambito di riciclo globale andrebbero studiati dei



*Figura 4.2- Trucioli di Alluminio "liberi" e trucioli compattati*



Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere  
metodi di preparazione più efficaci, operabili in linea come se fossero una parte  
della produzione, e soprattutto che rispettassero i canoni della eco-sostenibilità.



*Figura 4.3 - Trucioli di Magnesio*



*Figura 4.4 - Material Test System con componenti per la precompattazione*

### 4.1.3 MONTAGGIO DELLA PASTICCA NEL CONTAINER

Preparata la pasticca, dobbiamo passare all'estrusione. Il primo passaggio è quello di inserire la pasticca all'interno del container (Figura 4.5), come anticipato nel precedente paragrafo.

Anche in questo caso c'è stata una evoluzione del modus operandi: inizialmente, la pasticca veniva spinta all'interno del container forzandola con lo stesso sistema utilizzato per la precompattazione (MTS), mentre adesso, dato che la pasticca viene preparata con un diametro leggermente inferiore a quello del container, basta inserirla ed esercitare una leggera pressione per vederla aderire sul fondo, evitando di "ristressarla" ulteriormente tramite l'utilizzo del MTS.



*Figura 4.5 - Pasticca montata dentro il contenitore*

### 4.1.4 ATTREZZAGGIO E CENTRAGGIO DELLA MACCHINA CNC

Una volta inserita la pasticca, il container viene bloccato sul piano di lavoro della macchina, mentre il punzone viene fissato sulla testa di lavoro della macchina (mandrino rotante). Prima di avvitare la testina all'interno del punzone, i filetti vengono spruzzati con dell'olio lubrificante, per poter svitare con più facilità tutto il sistema una volta terminata la prova. A questo punto si procede al centraggio

Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere

della macchina, che viene eseguito manualmente lasciando il punzone libero di ruotare e controllando gli spostamenti dell'asse di rotazione tramite controllo numerico. Il centraggio deve necessariamente essere effettuato in questo modo poiché la macchina CNC normalmente viene utilizzata per altri scopi (fresa), non ha quindi un sistema di riferimento che può essere calcolato in maniera automatica, pertanto si controlla che la testina entri nel container in maniera tale



*Figura 4.6 - Bloccaggio dei componenti sulla macchina CNC*

da non toccare le sue pareti. Una volta trovato il centraggio, si fa scendere, sempre tramite CN, il punzone fino a toccare la pasticca, e la quota risultante



*Figura 4.7 - Preparazione della macchina a controllo numerico*

sarà il punto di inizio della generazione di attrito della testina sui trucioli.





Figura 4.8 - "Actual position" del punzone rispetto allo zero macchina

#### 4.1.5 CREAZIONE PROGRAMMA ED INIZIO PROVA

Il programma necessario per questa prova prevede il raggiungimento del punto di centraggio desiderato, un abbassamento veloce del punzone fino alla quota di inizio lavorazione, e da lì una discesa nella quale si produca attrito, e quindi calore che faccia iniziare l'estrusione. Le velocità di rotazione e avanzamento sono gestibili anche online durante la prova, e possono essere variate entro un certo range, dato il valore iniziale imposto da programma. Terminato l'avanzamento del punzone della quantità preimpostata, il punzone risale e solo a questo punto la macchina blocca la rotazione.

## 4.2 SVOLGIMENTO DELLA PROVA

Una volta dato il via al programma il punzone scende secondo la velocità impostata fino a toccare la pasticca, ed a questo punto comincia la prima fase di riscaldamento del materiale. C'è subito da dire che, vista la novità del processo e l'impossibilità di utilizzare una macchina appositamente dedicata, ogni tentativo effettuato può essere considerato come una categoria di prove a sé stante, sia in termini di prodotto finito che di rumore/comportamento dei pezzi e dell'estruso. Tralasciando i commenti ed i risultati ottenuti, che verranno analizzati nel capitolo successivo, si descrive l'andamento degli esperimenti. Controllando la temperatura tramite un lettore di termocoppia digitale, è stato possibile variare in tempo reale la velocità di rotazione o quella di avanzamento, a seconda dello sforzo (leggibile su indicatore analogico) verticale della macchina, per cercare di raggiungere in breve tempo le condizioni ottimali di estrusione, ovvero una temperatura minima di 400° C. Si può constatare che ogni volta che si è raggiunta questa temperatura, il rumore era pressoché assente e lo sforzo costante, facendo auspicare una buona riuscita della prova. In realtà, come si vedrà nella discussione dei risultati ottenuti, le condizioni erano veramente ottimali, ma con un assetto non del tutto favorevole per ottenere un prodotto estruso dalle qualità soddisfacenti.



Figura 4.9 - Computer di controllo della macchina CNC, modulo digitale e controllo online

## CAPITOLO 5

### RISULTATI E VALUTAZIONI

Le prove, riportate nella Tabella 5.1 sono state effettuate come detto nei precedenti paragrafi con dei trucioli di tre leghe: due delle quali di alluminio ed una di magnesio. Entrando più nello specifico abbiamo preso in esame una lega di magnesio AZ31, una lega 1000 (con purezza al 99,9999%) ed una 5457 di alluminio.

Si può disporre pertanto di una serie di dati significativi che riguardano tutte le leghe sopracitate anche se lo studio effettuato varia a seconda dei casi.

NUMERO PROVA	LEGA	PRECOMPATTAZIONE (Kn)	PARAMETRI (rpm-mm/min)	TEMPERATURA MASSIMA (C°)
1	1000	100	250 – 1,5	400°C
1 bis	1000	100	1100 – 0,15	400°C
2	5457	200	1100/1000 – 0,08/0,11/0,15/0,60	430°C
3	5457	200	1000 – 2/600 – 2	450°C
3 bis	5457	200	1000 – 2	450°C
4	5457	200	1000 – 0,24/900 – 0,24/800 – 0,47	450°C
5	5457	200	1100 – 0,11/1100 – 0,24	450°C
6	5457	200	1100 – 0,24	450°C
7	AZ31	200	900 – 2	340°C
8	AZ31	200	400 – 1,2	320°C
9	AZ31	200	1000 – 0,2	280°C

*Tabella 5.1 Parametri utilizzati per la preparazione e la conseguente estrusione delle leghe in esame*

## 5.1 CONSIDERAZIONI GENERALI

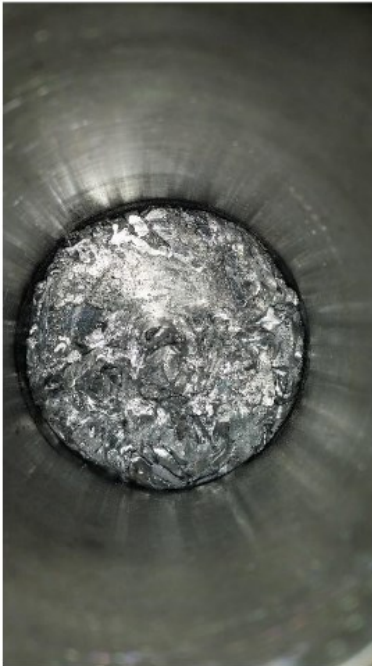
Nella tabella soprastante sono riportati i dati essenziali relativi alle prove svolte; nelle righe in cui si legge più di una combinazione velocità di rotazione/velocità di avanzamento, si intende che durante lo svolgimento i parametri siano stati variati in maniera graduale per favorire il riscaldamento e poi l'estrusione. A livello globale si nota che, vista la scarsa potenza della macchina, si è dovuto optare per una velocità di rotazione molto più alta rispetto a quelle presenti in letteratura, ed una velocità di avanzamento molto bassa, almeno durante le prime fasi della prova, ovvero quelle di riscaldamento della pasticca e in generale di tutto l'apparato. La difficoltà più grande è stata proprio quella di portare tutti i componenti in temperatura, perché l'inerzia termica del dispositivo è rilevante e la produzione di attrito avviene unicamente all'interno del contenitore tra pasticca e testina rotante. Avere tutto il dispositivo nel range di temperatura ideale (almeno superiore ai 200° C, con il materiale in plasticità a 400° C) aiuta e di molto l'estrusione, perché permette di eliminare i fenomeni legati alla presenza di bava (che può essere più facilmente asportata durante la lavorazione) e soprattutto di "saldare" i componenti tra loro grazie alla dilatazione termica, situazione che garantisce una migliore stabilità della configurazione. In generale i risultati ottenuti non si possono considerare dei grandi successi, perché per alcuni motivi (che verranno spiegati nel prossimo capitolo) non è stato possibile ottenere un estruso con la consistenza desiderata e di una lunghezza accettabile, producendo dei pezzi frammentati di forma cilindrica, affusolati e pieni di imperfezioni. Nonostante questi problemi, è stato possibile raccogliere dei dati importanti che fanno ben sperare in un prosieguo più fortunato degli esperimenti, almeno per quelli che si riusciranno a condurre con lo stesso tipo di macchina CNC. È infatti auspicabile la predisposizione di una macchina apposita per questa applicazione, come ad esempio potrebbe essere un trapano CNC (autocentrante, una caratteristica che migliorerebbe di molto la fase preparatoria delle prove), con un livello di potenza superiore ed un blocco macchina regolabile, sia sull'asse verticale che per la rotazione. In questo modo sarebbe possibile riuscire a portare a termine la prova senza blocchi improvvisi della macchina, legati a picchi improvvisi di sforzo, che dovrebbe essere in grado di contenere. Inoltre è sorto anche il dubbio che la macchina a disposizione

Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere

dell'Univpm, rimanendo comunque del parere che non sia adatta per la FSE, possa avere un blocco termico, perché molte prove sono state interrotte “sul più bello”, ovvero al raggiungimento dei 450° C, con un valore del carico/macchina minimo e senza rumore, condizioni ideali per l'estrusione a freddo, che infatti è sempre iniziata per poi fermarsi bruscamente “strappando” letteralmente il materiale.

Prima di analizzare in maniera approfondita i casi di studio più interessanti per le due leghe, si propone una breve raccolta fotografica con relativi commenti delle prove effettuate.

- **Prova 1**



Nelle immagini sovrastanti, legate alla prova della lega 1000, si osserva il “flusso” della pasticca del container fino al prodotto finito, il residuo di pasticca e l'estrusione che è cominciata per poi fermarsi conseguentemente al blocco della macchina.





Figure 5.2 - Estruso lega 1000 di Alluminio

• Prova 2



Figura 6.3 - Risultati della seconda prova di estrusione

La seconda prova è stata la prima effettuata con la lega 5457, e come mostrano le immagini, oltre ad un riempimento dei canali della testina (verificabili sullo “stampo” lasciato sulla pasticca residua) non si è riuscito a produrre un estruso di qualità decente. Si notano infatti alcuni frammenti di filo, dalla forma approssimativamente cilindrica, ma con scarsa consistenza e forme allungate. Questo significa che il materiale, durante l’estrusione, nel momento in cui provava ad entrare nel canale, subiva un distacco brusco senza creare una sorta di “continuum”. La causa di questo fenomeno, alla fine, sarà da imputare alla eccessiva velocità di rotazione, ed alla configurazione non del

Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere

tutto azzeccata nella relazione tra i vari componenti, che verrà discussa nel capitolo successivo.

### • Prova 3



*Figura 5.4 - estruso della lega 5457 della terza prova*

### • Prova 4

In questo caso, il fallimento è stato totale perché il materiale ha completamente riempito i canali della testina ma non è stato prodotto alcun estruso, complice la non perfetta pulizia del contenitore dalla bava delle prove precedenti ed il solito problema riscontrato in tutte le prove legato alla eccessiva velocità di rotazione. Purtroppo andando a 1000/1100 rpm, unico modo per generare attrito senza bloccare la macchina, è normale che il materiale risenta maggiormente della forza centrifuga e, soprattutto per il fatto che si trova in plasticità, non riesce a compattarsi come dovrebbe.

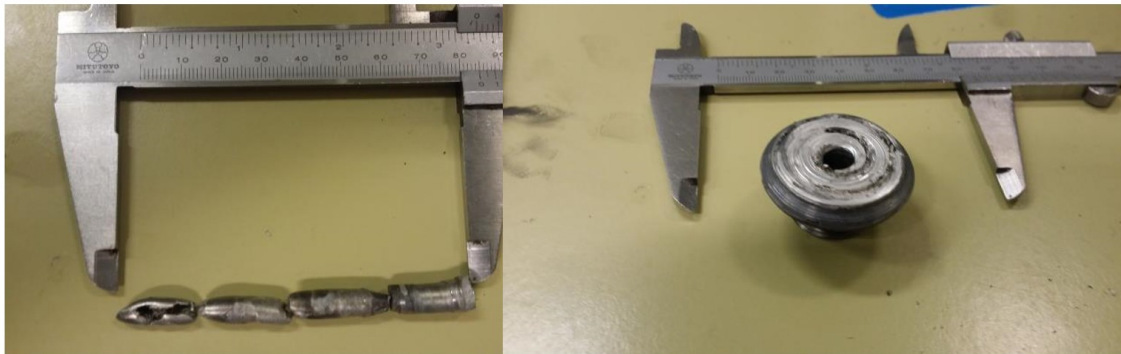


*Figura 5.5 - Tentativo di estrusione della lega 5457 della prova 4*

Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere



*Figura 5.6 - Riempimento canali e consumo della pasticca*



*Figura 5.7 - Estruso della lega 5457, e testina rovinata (dismessa)*



*Figura 5.8 - Estruso della lega 5457 e pasticca consumata*



• **prova 8**

Come possiamo vedere dalla figura sottostante, durante questa prova, abbiamo ottenuto un buon estruso di magnesio.



*Figura 5.9 - Estruso della lega di magnesio AZ31*

## 5.2 STUDIO DELLA LEGA AA1099

È stata presa in considerazione la prima prova svolta, con un estruso molto emblematico per le caratteristiche di forma assunte dopo la lavorazione, infatti il risultato di questa prova, visibile dalle foto del paragrafo precedente, è confrontabile con le immagini ottenute durante la simulazione; si può dunque notare come il flusso del materiale che riempie i canali preparandosi a risalire verso l'estrusore è pressoché identico. Questo campione verrà chiamato "CAMPIONE 2", ed è rappresentato dal residuo di pasticca ed un inizio di estrusione (con dimensioni significative).



II

*Figura 5.10 - Campione 2, residuo di pasticca della prova 1 bis*

"CAMPIONE 1" è invece costituito dall'estruso che era riuscito ad entrare nel canale interno al punzone, rappresentando il vero e proprio prodotto della prova.



*Figura 5.11 - Campione 1, estruso della lega 1000 entrato nel canale della filiera*

Per ogni campione verranno presentate le corrispondenti metallografie, descrivendo i tipi di attacchi utilizzati per visualizzare la microstruttura e commentando quest'ultima.

### **5.2.1 CAMPIONE “1”**

Il campione ha una forma che ricorda vagamente un cilindro, in quanto il materiale durante l'estrusione non è riuscito a riempire perfettamente il canale di estrusione, compattando il “filo” in maniera ottimale così da avere un cilindro con il diametro desiderato. L'irregolarità della forma circolare è conferita dal continuo distaccarsi del materiale in fase plastica, come spiegato precedentemente, per effetto della forza centrifuga. Il campione è stato tagliato in due parti lungo la sezione, per ottenere altri due piccoli “cilindri”. Uno è stato utilizzato per studiare la microstruttura sulla sezione, mentre l'altro per osservare quella sulla “schiena” del pezzo, ovvero longitudinalmente. Le due metà sono state inglobate nella stessa capsula, dando vita ad un provino unico da trattare, ma con due superfici da studiare distinte. L'inglobatura è stata eseguita a caldo, con una resina specifica a 150° C e una pressione di 25 kN per un tempo di 7 minuti. La lucidatura è avvenuta per mezzo di lappatrice con quattro tipi di carte differenti, in ordine crescente di granulometria, siamo partiti infatti con una granulometria di 600 per arrivare a 4000 passando prima per la 1200 poi per la 2000.

In seguito si è provveduto a lucidare a specchio le superfici su cui fare l'attacco acido con un panno apposito per l'Alluminio. Per il campione “1” è stato utilizzato un attacco chimico molto utilizzato con questo tipo di leghe, l'attacco “Keller”:

Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere

miscela di HF (al 40%, 1 parte su 100), HCl (dens.1.19, 1.5 parti su 100), HNO<sub>3</sub> (dens. 1.41, 2.5 parti su 100) ed H<sub>2</sub>O (95 parti su 100) da applicare per 5-25 sec. a temperatura ambiente; segue lavaggio con acqua distillata o etanolo.



*Figura 5.12 - Provino inglobato delle due parti del campione "1"*



*Figura 5.13 - Panoramica attacco chimico sezione del campione "1"*



*Figura 5.14 - Panoramica longitudinale attacco chimico campione "1"*

## 5.2.2 CAMPIONE "2"

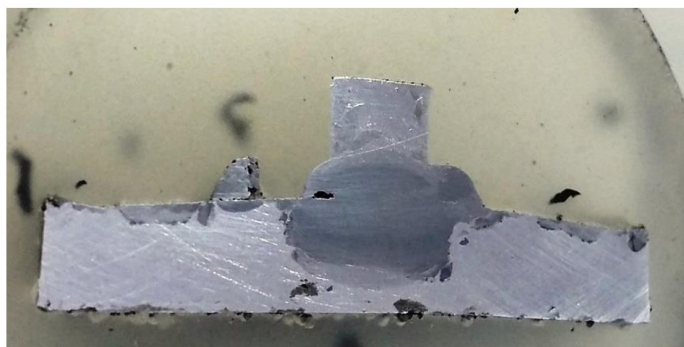
Questo campione rappresenta forse il risultato più prezioso tra tutte le prove eseguite finora, ed infatti è quello che viene indagato più a fondo. Per quello che riguarda la preparazione del campione, vista la sua grandezza, si è optato per una inglobatura a freddo con una resina indurente, senza l'utilizzo di pressa e forno come invece è accaduto per il campione 1. Le operazioni di lucidatura ed attacco chimico sono le stesse viste nel paragrafo precedente. Anche in questo caso però si è optato per suddividere il campione in altre parti, che hanno permesso di compiere uno studio migliore.



*Figura 5.15 - Campione "2" in fase di preparazione dopo aver subito il primo taglio*



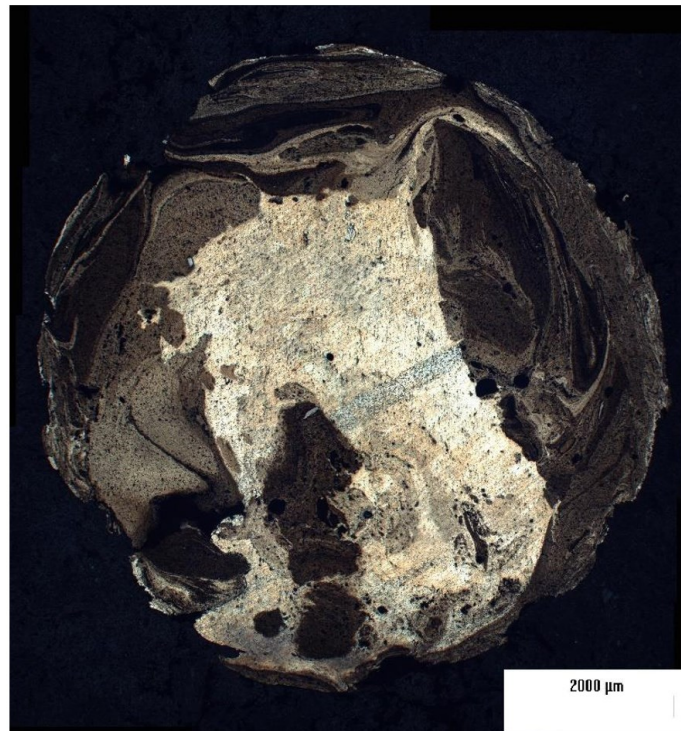
*Figura 5.16 - Campione tagliato lungo la direzione indicata*



*Figura 5.17 - Superficie da studiare*



Con il primo taglio effettuato è stato possibile anche ricavare il pezzo di cilindro estruso, ottenendo così un campione simile al campione 1. Oltre all'attacco chimico Keller, successivamente è stato eseguito anche l'attacco elettrochimico con reagente Barker (5 ml di  $\text{HBF}_4$  in 200 ml di  $\text{H}_2\text{O}$ ), per permettere di osservare meglio la superficie con la luce polarizzata. Di esso è stata effettuata la metallografia della sezione che viene di seguito riportata, sia con attacco chimico che elettrochimico. La sezione viene ricavata dal taglio nella zona superiore della figura precedente (5.17).



*Figura 5.18 - Panoramica dopo l'attacco keller sulla sezione ricavata dal campione "2"*

Nelle Immagini che seguono, riguardanti l'attacco elettrochimico, si è utilizzato un filtro per la luce polarizzata in modo tale da visualizzare meglio il tipo di struttura nella zona centrale della sezione; l'effetto del colore rossastro sui bordi esterni si è reso necessario per riuscire al visualizzare al meglio tutta la sezione, che altrimenti sarebbe rimasta in parte oscurata. La parte esterne sembra essere inoltre quasi apparentemente di un altro materiale, con una compattazione quasi assente ed una irregolarità di forma davvero impressionante.



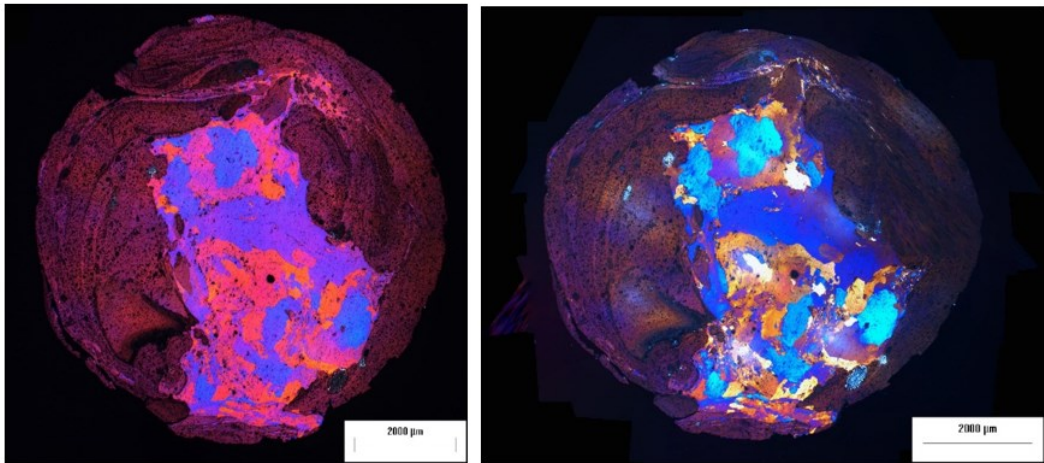


Figura 5.19 - Panoramiche con luci polarizzate

Per quanto riguarda invece la superficie ottenuta con il secondo taglio, vista l'impossibilità di realizzare un'immagine che la comprendesse tutta, garantendo una buona definizione per osservare la microstruttura, si è optato per catturare una serie di foto provenienti da diverse zone del campione, secondo la legenda illustrata nell'immagine sottostante.

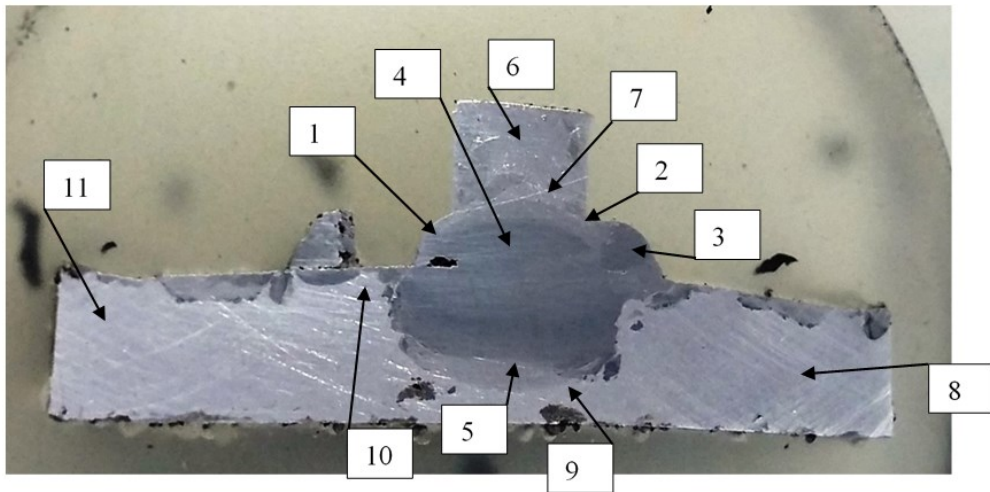
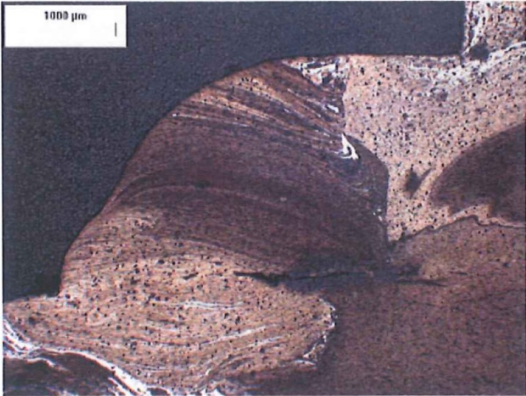
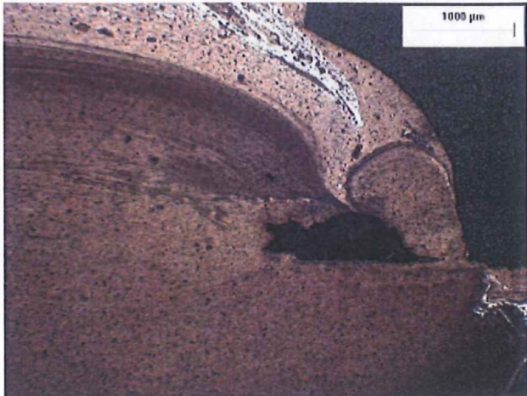


Figura 5.20 – Legenda per lo studio delle metallografie del campione "2"

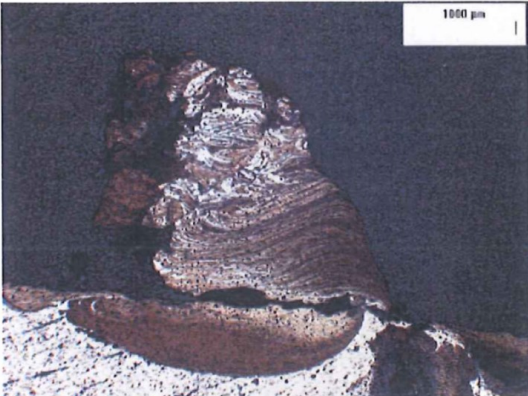
Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere



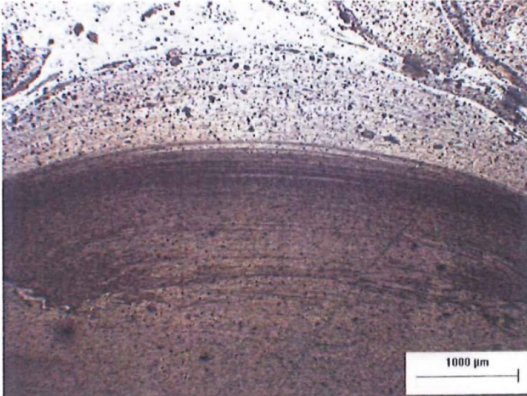
1



2



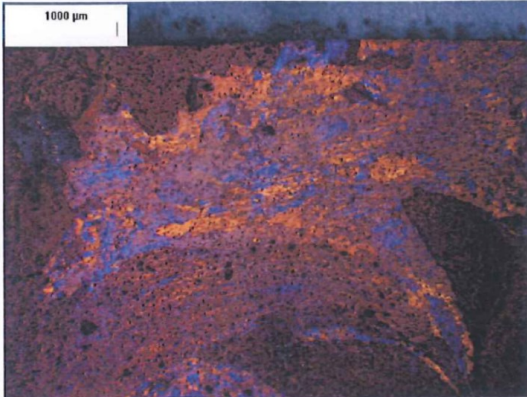
3



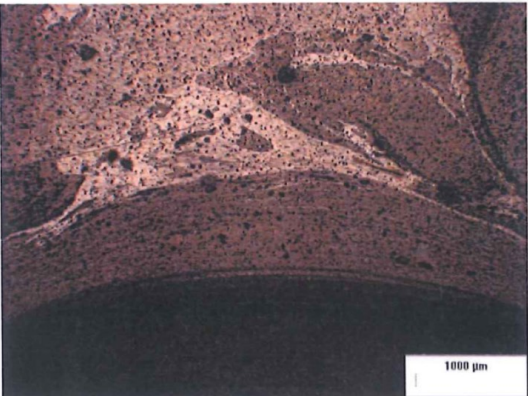
4



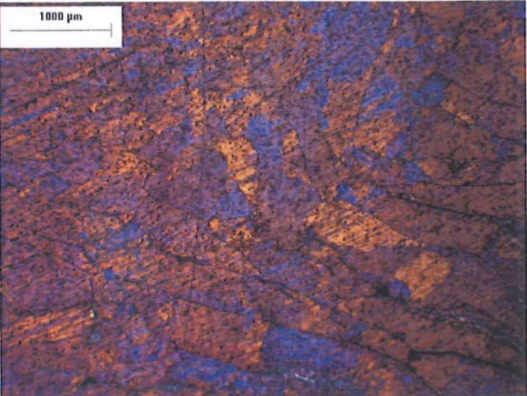
5



6 – luce polarizzata

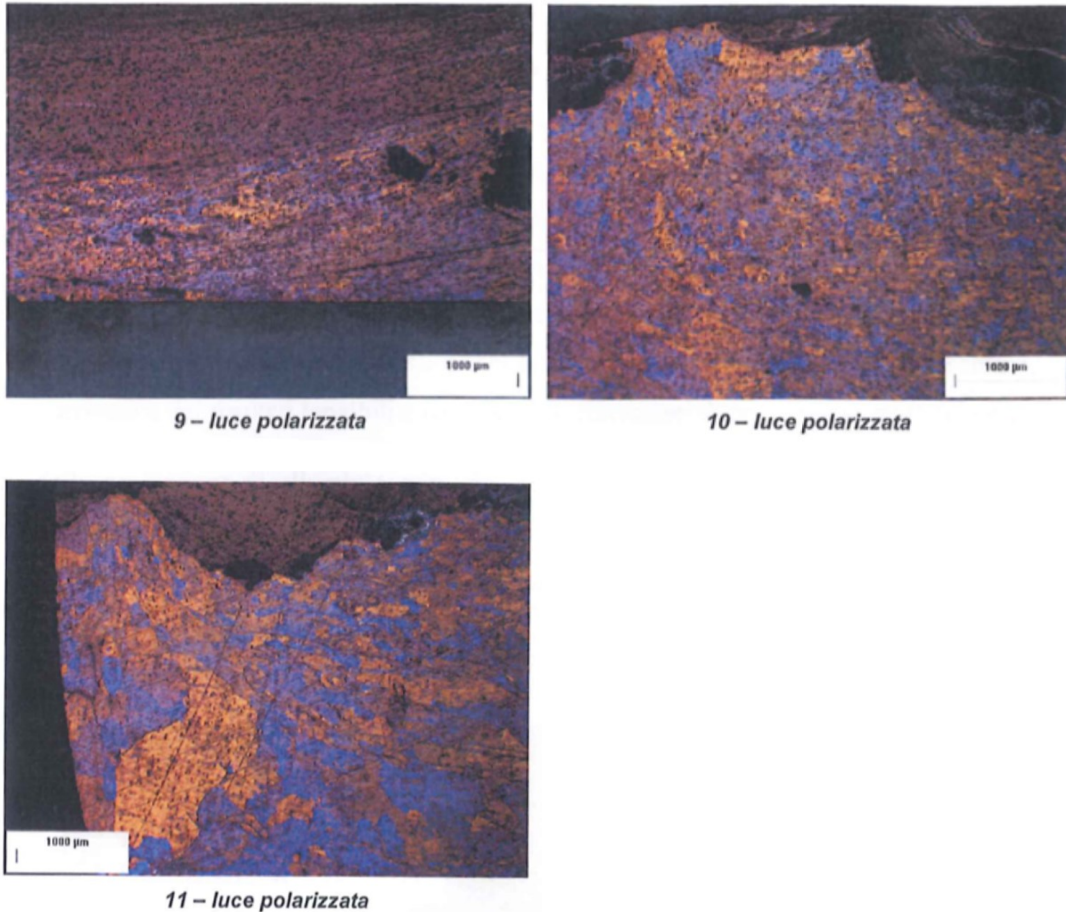


7



8 – luce polarizzata





Dall'analisi di queste metallografie si evince principalmente la totale mancanza di una struttura omogenea ed uniforme per il prodotto estruso. La presenza di microstrutture differenti in aree contigue sarebbe stata comunque giustificabile come il prodotto di una ricristallizzazione e ripristino dalla plasticità durante il raffreddamento a vari stadi, presupponendo magari una sorta di stratificazione dall'interno verso l'esterno. Quello che si ottiene dalle prove effettuate invece è un insieme di microstrutture indefinito, con presenza di grani dalle dimensioni variabili, e soprattutto con dei difetti a volte non classificabili, accentuati dalla presenza di veri e propri buchi (visibili già ad occhio nudo sulla superficie e quindi perfettamente inquadrati dalla microscopia ottica).

Tutto ciò è ovviamente legato alla mancata compattazione del materiale plastico durante l'estrusione, causata da molteplici fattori come ad esempio le elevate velocità di rotazione ed il non perfetto andamento dei canali della testina alle condizioni di lavorazione. Tuttavia è possibile identificare in maniera abbastanza facile l'andamento del materiale, che lascia una traccia indelebile del suo spostamento dall'esterno verso l'interno della pasticca, condizionato

dalla rotazione della testina sulla superficie superiore. Visivamente già nella Figura 5.19 è possibile notare una differenza sostanziale di materiale che rimane “intrappolato” all’interno della pasticca residua al centro ed ai lati. Al centro, come anche confermato dalle metallografie l’alluminio ha una migliore compattazione e presenta una sezione con grani leggermente più fini.

Per verificare le caratteristiche meccaniche del materiale riciclato tramite FSE sono state eseguite delle prove di microdurezza sempre sulla superficie superiore della Figura 5.17, lungo le seguenti direttrici:

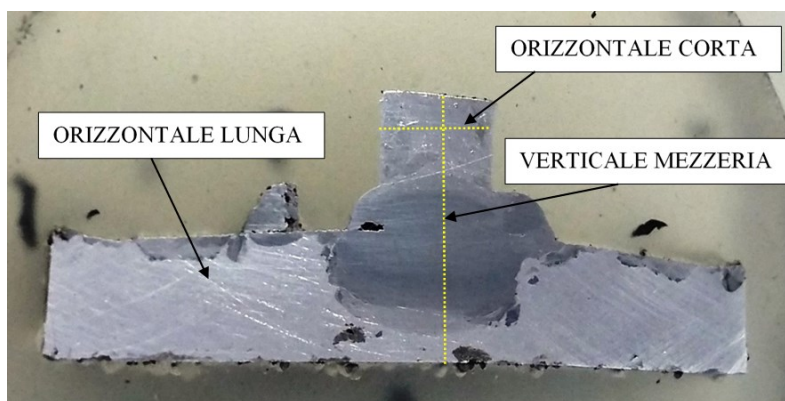


Figura 5.21 - Direzioni di campionamento per le prove di durezza

I dati sono stati acquisiti utilizzando il durometro a disposizione del laboratorio di metallurgia dell’UNIVPM, settato con i seguenti parametri:

- Carico applicato: 0.1 kgf (100 gf);
- Tempo di applicazione del carico: 15 secondi;
- $\Delta s$  tra le acquisizioni: 0.5 mm per “orizzontale corta” e “verticale mezzeria”, differenziato per “orizzontale lunga” nel seguente modo: 0.5 mm nella parte centrale, 1 mm per la restante lunghezza (vedi colori linee).

Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere

CALCOLO MICRODUREZZA				TABELLA DI CONVERSIONE			
Carico applicato		100	gf	Media HV	50,5		
Diagonale	HV	MPa	GPa	Vickers (120 chilogrammi)	Brauer (sfere da 10 millimetri, un carico da 1000 chilogrammi)	Rockwell C (cono da 120 gradi 150 chilogrammi)	Rockwell B (1/16" sfere 100 chilogrammi)
367	22	216	0,22		800	72	-
353	24	233	0,23	1220	780	71	-
332	27	264	0,26	1170	760	70	-
350	24	237	0,24	1114	745	68	-
360	23	224	0,22	1060	725	67	-
345	25	244	0,24	1021	712	66	-
341	26	250	0,25	940	682	65	-
343	25	247	0,25	935	668	64	-
344	25	246	0,25	867	652	63	-
350	24	237	0,24	803	626	62	-
366	22	217	0,22	775	614	61	-
365	22	218	0,22	746	601	60	-
354	24	232	0,23	727	590	59	-
377	21	205	0,20	694	576	57	-
360	23	224	0,22	649	552	56	-
366	22	217	0,22	639	545	55	-
362	23	222	0,22	606	529	54	-
259	44	434	0,43	587	514	53	120
201	73	720	0,72	565	502	52	119
182	90	878	0,88	551	495	51	119
198	76	742	0,74	534	477	49	118
192	80	789	0,79	502	461	48	117
184	88	859	0,86	489	451	47	117
188	84	823	0,82	474	444	46	116
191	81	797	0,80	460	427	45	115
194	79	773	0,77	435	415	44	115
197	76	750	0,75	423	401	43	114
193	80	781	0,78	401	388	42	114
184	88	859	0,86	390	375	41	113
170	103	1007	1,01	385	370	40	113
182	90	878	0,88	380	362	39	111
180	92	898	0,90	361	351	38	111
172	100	983	0,98	352	346	37	110
167	106	1043	1,04	344	341	37	110
177	95	929	0,93	335	331	36	109
180	92	898	0,90	320	323	35	109
177	95	929	0,93	312	311	34	108
179	93	908	0,91	305	301	33	107
176	96	939	0,94	291	293	32	106
189	83	814	0,81	285	285	31	105
180	92	898	0,90	278	276	30	105
169	104	1019	1,02	272	269	29	104
176	96	939	0,94	261	261	28	103
358	23	227	0,23	258	258	27	102
338	26	255	0,25	250	249	25	101
356	23	230	0,23	246	245	24	100
376	21	206	0,21	240	240	23	99
372	21	210	0,21	235	232	23	99
385	20	196	0,20	226	229	22	98
375	21	207	0,21	221	224	21	97
405	18	177	0,18	217	217	20	96
377	21	205	0,20	213	211	19	95
378	21	204	0,20	209	206	18	94
389	20	192	0,19	201	203	17	94
374	21	208	0,21	199	200	16	93
390	20	191	0,19	197	196	15	92
372	21	210	0,21	190	191	14	92
378	21	204	0,20	186	187	13	91
379	21	203	0,20	184	185	12	91
405	18	177	0,18	183	183	11	90

Tabella 5.22 - orizzontale lunga



Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere

CALCOLO MICRODUREZZA				TABELLA DI CONVERSIONE			
Carico applicato		100	gf	Media HV	41,4		
Diagonale	HV	MPa	GPa	Vickers (120 chilogrammi)	Brinell (sfera da 10 millimetri, un carico da 3000 chilogrammi)	Rockwell C (cono da 120 gradi 150 chilogrammi)	Rockwell B (1/16 " sfera 100 chilogrammi)
230	56	550	0,55	-	800	72	-
252	47	458	0,46	1220	780	71	-
246	49	481	0,48	1170	760	70	-
212	66	647	0,65	1114	745	68	-
362	23	222	0,22	1060	725	67	-
280	38	371	0,37	1021	712	66	-
277	39	379	0,38	940	682	65	-
261	44	427	0,43	905	668	64	-
289	36	348	0,35	867	652	63	-
289	36	348	0,35	803	626	62	-
308	31	307	0,31	775	614	61	-
292	35	341	0,34	746	601	60	-
274	40	387	0,39	727	590	59	-
284	37	361	0,36	694	576	57	-
260	44	430	0,43	649	552	56	-
258	45	437	0,44	639	545	55	-

Tabella 5.23 - Orizzontale corta

CALCOLO MICRODUREZZA				TABELLA DI CONVERSIONE			
Carico applicato		100	gf	Media HV	48,0		
Diagonale	HV	MPa	GPa	Vickers (120 chilogrammi)	Brinell (sfera da 10 millimetri, un carico da 3000 chilogrammi)	Rockwell C (cono da 120 gradi 150 chilogrammi)	Rockwell B (1/16 " sfera 100 chilogrammi)
394	19	187	0,19	-	800	72	-
373	21	209	0,21	1220	780	71	-
280	38	371	0,37	1170	760	70	-
286	36	356	0,36	1114	745	68	-
260	44	430	0,43	1060	725	67	-
223	60	585	0,59	1021	712	66	-
214	65	635	0,64	940	682	65	-
184	88	859	0,86	905	668	64	-
205	71	692	0,69	867	652	63	-
209	68	666	0,67	803	626	62	-
228	57	560	0,56	775	614	61	-
232	55	540	0,54	746	601	60	-
210	67	660	0,66	727	590	59	-
216	64	624	0,62	694	576	57	-
231	56	545	0,55	649	552	56	-
198	76	742	0,74	639	545	55	-
223	60	585	0,59	606	529	54	-
253	46	454	0,45	587	514	53	120
291	35	344	0,34	565	502	52	119
342	25	249	0,25	551	495	51	119
239	52	509	0,51	534	477	49	118
299	33	325	0,33	502	461	48	117
333	27	262	0,26	489	451	47	117
352	24	235	0,23	474	444	46	116
345	25	244	0,24	460	427	45	115
346	25	243	0,24	435	415	44	115
219	62	607	0,61	423	401	43	114

Tabella 5.24 - Verticale mezzeria

Tenendo conto solo delle misurazioni effettuate nella zona gialla della direttrice “orizzontale lunga”, i valori di durezza oscillano tra 73 3 106 HV, con una media pari a 89 HV. Questo valore appartiene, in condizioni normali, a ben altro tipo di leghe di alluminio, come le 7000 e le 8000, cioè leghe altoresistenziali, ciò significa che l’estrusione, nonostante abbia prodotto un filo molto corto rispetto a quanto programmato, è riuscita nell’intento di “rimescolare” la struttura della lega di partenza per dare vita ad una sorta di materiale composito con proprietà meccaniche superiori e immediatamente utilizzabile.

Alloy	Temper	Proof Stress 0.20% (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Shear Strength (MPa)	Elongation A50 (%)	Hardness Brinell HB	Hardness Vickers HV	Fatigue Endur. Limit (MPa)
AA1050A	H2	85	100	60		30	30	
	H4	105	115	70	9	35	36	70
	H6	120	130	80		39		
	H8	140	150	85	5	43	44	100
	H9	170	180		3	48	51	
	0	35	80	50	38	21	20	50
AA7075	0	105	225	150	17	60	65	230
	T6	505	570	350	10	150	160	300
	T7	435	505	305	12	140	150	300

Tabella 5.25 - Dati riportati da AZOM (Azo Materials)

## 5.3 STUDIO DELLE LEGA AA5457

### 5.3.1 REPORT QUANTITATIVO SUL RENDIMENTO DELLA FSE

Provino (pasticca) di lega 5457 (alluminio), ottenuto compattando del truciolo a 200 kN



Figura 5.26 - Provino compattato a 200 kN

#### Caratteristiche del provino cilindrico:

- Peso  $W = 39.72 \text{ g}$
- Diametro medio  $D = 40 \text{ mm}$ ; altezza media  $h = 14.5 \text{ mm}$  ;  
pertanto il volume sarà  $V = \pi(D/2)^2 * h = 18.22 * 10^3 \text{ mm}^3 = 18.22 \text{ cm}^3$
- Ipotesi di lavorazione

#### Ipotesi di lavorazione:

Considerando un prodotto di estrusione con caratteristiche fisico-meccaniche paragonabili a quelle delle più comuni leghe di alluminio (densità=2.73 g/cm<sup>3</sup>), si è calcolata un'altezza effettiva della pasticca, ovviamente minore rispetto a quella reale misurata.

$$V = \frac{W}{\rho} = \frac{39.72}{2.73} = 14.55 \text{ cm}^3$$

Dalla formula inversa del volume si ricava  $h_{eff} = 11.6 \text{ mm}$ . La differenza tra altezza reale ed effettiva rappresenta la quantità di cui il provino viene "schiacciato" durante la prima fase di lavorazione senza produrre estruso, il che si traduce in ulteriore compattazione del truciolo con aumento di temperatura ed



una prima formazione di bava sulle pareti del contenitore. L'idea di base è quella di raggiungere la temperatura di estrusione (circa 400°C) proprio colmando il gap tra altezza misurata ed effettiva della pasticca, per poter estrudere per intero il volume a disposizione.

In realtà si è visto che, per una questione legata alla massima potenza raggiungibile dalla macchina CNC a nostra disposizione, per raggiungere la temperatura desiderata occorre un abbassamento del punzone di quasi 7mm ( $\Delta h_{400}$ ).

#### **Parametri scelti:**

La prova è proseguita per tutta la sua durata con una velocità di rotazione del punzone di 1100 rpm, ed un avanzamento pari a 0.24 mm/min. La massima temperatura raggiunta è stata di 450° C con uno sforzo della macchina rilevato costante tra il 30 ed il 50 per cento a seconda delle fasi di estrusione.

#### **Andamento dell'estrusione:**

È stata utilizzata l'ultima testina studiata (nella versione senza conicità), con la quale si era riusciti ad estrudere una buona quantità di truciolo compattato della lega 1000. La prova è andata avanti senza dover mai intervenire per blocchi di forza della macchina, che ha lavorato dapprima con forte rumore, mentre al raggiungimento dei 400°C il processo è stato silenziosissimo. Purtroppo il blocco (non imputabile ad un picco di forza) è avvenuto dopo un aumento di altri 50 gradi della temperatura.

#### **Risultati:**

La prova ha avuto successo perché si è ottenuto un estruso diviso in 4 sezioni, della lunghezza totale di circa 85 mm. Tuttavia, come si vede dalle foto, la testina si è rovinata irrimediabilmente, e con essa anche le pareti del contenitore che di fatto è diventato inutilizzabile per ulteriori prove.

con calibro della pasticca dopo l'estrusione: Misura  $hm \cong 8 \text{ mm}$



Figura 5.30 - Prodotto di FSE per questo report



Figura 5.31 - Pasticca consumata dopo la prova

In riferimento alle quote della macchina sono invece state registrati i seguenti dati:

- $h_{\text{contatto}} = 169.900$ ;
- $h_{400} = 176.250$  (posizioni relative allo 0 macchina)
- $\Delta h_{400} = 176.250 - 169.900 = 6.35 \text{ mm}$

Come già anticipato in precedenza ci sono voluti quasi 7 mm per arrivare alla temperatura desiderata. Da questo punto in poi, prima del blocco, il punzone si è abbassato fino alla quota 177.022, il che significa che il totale teorico di pasticca consumata risulta:

$$h_{\text{cost}_t} = 7.122 \text{ mm};$$

l'altezza residua teorica dovrebbe allora essere:  $h_{\text{res}_t} = 14.5 - 7.122 = 7.378 \text{ mm}$ , mentre quella misurata è di circa 8 mm, due valori che comunque si possono considerare compatibili per via dell'irregolarità superficiale della pasticca e della bava prodotta ai lati.

Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere

Si proceda ad ulteriori due considerazioni, sul volume dell'estruso e sul peso complessivo del provino, dapprima sano e poi utilizzato.

Dati geometrici testina di estrusione:  $d_{int} = 8 \text{ mm}$ ,  $d_{ext} = D = 40 \text{ mm}$

$$L_{ext\_mis} \cong 85 \text{ mm}; \pi(D^2/4) * h_{consect} = \pi(d_{int}^2/4) * L_{extmis}; h_{consect} = 3.4 \text{ mm}$$

Questo significa che:  $\Delta h_{cons} = h_{cons\_t} - h_{consect} = 3.722 \text{ mm}$ , cioè parte della pasticca non ha contribuito all'estrusione ma si è staccata principalmente sotto forma di bava.

Per quanto riguarda il peso, sono stati raccolti i seguenti dati:

- peso iniziale provino:  $W = 39.72 \text{ g}$
- peso provino dopo estrusione:  $W_f = 31.03 \text{ g}$
- peso estruso:  $W_{ext} = 5.72 \text{ g}$
- quantità di materiale perso:  $\Delta W = 39.72 - 31.03 - 5.72 = 2.97 \text{ g}$

Teoricamente, sempre considerando una densità ideale del prodotto finale, il volume dell'estruso dovrebbe essere pari a:

$$V_{ext\_t} = \frac{W_{ext}}{\rho} = 5.72 / 2.73 = 2.095 \text{ cm}^3$$

che tramite la formula inversa del volume, corrisponderebbe ad una altezza teorica dell'estruso pari a  $h_{ext\_t} = 41.7 \text{ mm}$ .

In relazione ai precedenti tentativi fallimentari di estrusione della stessa lega, anche se con una testina migliorata rispetto a quella utilizzata in questa prova appena descritta, si stabilisce che un fattore fondamentale per la buona riuscita del processo è l'avere i canali della testina i più puliti possibile, in quanto il

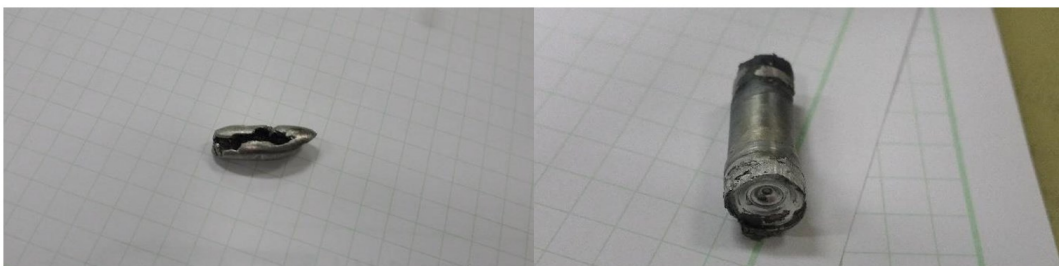


Figura 5.32 - Particolari dell'estruso

riempimento di essi è fondamentale per creare un migliore invito al materiale e ridurre al minimo la formazione di bava ai lati. Ciò che si può invece cogliere dai dati numerici riportati, è che l'estruso presenta una lunghezza doppia rispetto a quella che dovrebbe avere a parità di peso, ovvero la consistenza del materiale prodotto, sempre considerando una densità teorica prossima a quella ideale, è circa la metà; questo problema è riconducibile al fatto che l'estruso non raggiunge il diametro designato se non per brevi tratti; alcuni spezzoni sono infatti di forma irregolare e sicuramente hanno un diametro inferiore e non costante rispetto a quello programmato.

### 5.3.2 CONFRONTO METALLOGRAFICO

Sebbene questo studio fosse maggiormente indirizzato verso un'analisi dal punto di vista quantitativo del rapporto tra materiale estruso e quello immesso nella FSE, vista l'opportunità di poter effettuare delle metallografie, si è deciso di fotografare anche la microstruttura di un campione di questa lega, nella fattispecie proveniente dalla prova numero 5. Il pezzo scelto è stato inglobato a caldo e lucidato, come il campione 1, ed è stato sottoposto direttamente ad attacco elettrochimico, più indicato per le leghe 5000 dell'alluminio.

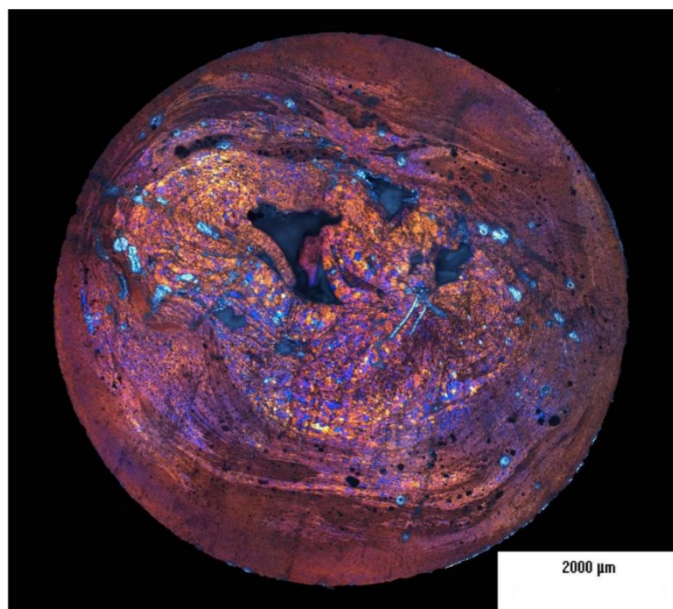


Figura 5.33 - Panoramica sezione lega 5457 (luce polarizzata)

Nella Figura 5.33 si nota che la lega 5457, in condizioni simili a quelle della prova di estrusione con la lega 1000, ricristallizza in maniera differente, con dei

grani più piccoli ed un flusso di materiale che tende ad investire un'area più vasta della sezione, rendendo meno netto il confine di demarcazione tra zone più o meno compatte.

Nonostante risulti più difficile lavorare con un truciolo più incrudito dalle lavorazioni alle MU, come quello della lega 5457, il prodotto di riciclo da FSE sembra essere leggermente migliore rispetto alla lega 1000.

Lo svantaggio è che non si riesce ad ottenere un campione significativo per uno studio metallografico più approfondito che, visto il risultato di quello fatto sulla lega 1000, avrebbe potuto rilevare delle piacevoli sorprese.

## **CAPITOLO 6**

## **PROBLIMATICHE E SOLUZIONI ALTERNATIVE**

Molti sono i problemi riscontrati e documentati durante lo svolgimento delle prove, alcuni legati al processo ed altri connessi con la qualità del materiale riciclato prodotto. C'è comunque da dire che la configurazione scelta dal team UNIVPM non vuole proporsi come metodo definitivo di riciclo a livello industriale, ma anzi ha come unico scopo quello di dimostrare la fattibilità delle operazioni cercando di ottimizzare al massimo il risultato degli esperimenti, dando enfasi alla eco sostenibilità del prodotto ed alla sua rinnovata qualità. Durante la fase preparatoria non ci sono molti problemi, perché il montaggio manuale viene controllato accuratamente e comunque, se si riscontrano delle anomalie, la prova viene abortita o modificata. Quando invece la testina comincia a consumare la pasticca, producendo attrito, non si è mai stati in grado di capire la giusta quantità di metallo da “sacrificare” per raggiungere la temperatura di estrusione. Ciò vuol dire che non si è mai riusciti ad ottenere una conduzione omogenea della prima fase di riscaldamento, con un consumo medio delle pasticche sempre diverso, e pertanto con un'altezza finale dei residui mai confrontabile. Inoltre non è stato mai possibile portare a termine il programma preventivato poiché la macchina si è sempre bloccata, o per un picco di sforzo assiale, o per un blocco rotazionale, oppure, sospetto non confermato da un'analisi più approfondita, per un blocco termico a 450° C, temperatura alla quale almeno 3 prove si sono bloccate nonostante l'indicatore di carico fosse costante sul 40%. A causa di questi blocchi, è sempre risultato difficile estrarre il prodotto finito dalla filiera, anche per il tipo di configurazione scelta. Svitare una testina che si trova ad almeno 400° C non è un'operazione banale, soprattutto se fatta a mano, considerando che la maggior parte delle volte i componenti erano molto serrati tra loro per l'espansione termica generata e la presenza di alluminio all'interno del contenitore in piena fase plastica. Purtroppo le fasi di estrazione e pulizia della testina si sono rivelate molto più difficili rispetto a quanto ipotizzato in fase di studio e simulazione, in cui teoricamente l'estruso sarebbe dovuto salire all'interno del canale del punzone consumando totalmente la pasticca.

Un'ulteriore conseguenza di questo “flusso anomalo” dell'alluminio da riciclo riguarda la rottura delle testine di rotazione. Questo aspetto rappresenta uno dei limiti più grandi della configurazione proposta, sebbene la testina intercambiabile

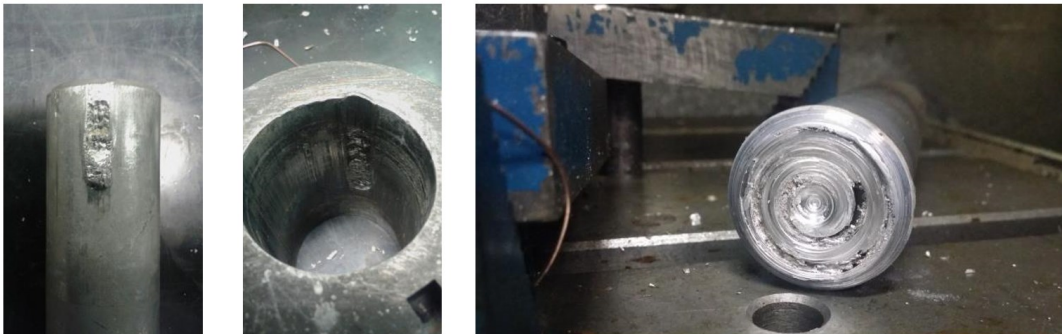


sia stata presentata come una delle migliori soluzioni possibili per lo studio del processo, variando la geometria della faccia a contatto con la pasticca. La intercambiabilità è stata molto apprezzata, anche se non per delle sostituzioni a scopo didattico ma per necessità di lavorare con pezzi efficienti e non danneggiati. Sebbene si sia verificato un solo caso di rottura della testina, l'aspetto più brutale dei momenti successivi alla prova, e quindi all'estrazione del materiale estruso, era la pulizia dei canali della testina, che si presentano completamente otturati dal materiale che segue il flusso plastico dalla pasticca verso il canale di filiera. Il problema si presenta perché, bloccandosi la prova, il flusso si ferma e il materiale in fase plastica rimane letteralmente intrappolato dentro i canali, solidificando durante il raffreddamento. Provando ad estrarlo meccanicamente con un piccolo trapano, si danneggiano irrimediabilmente i canali; usando un piccolo cacciavite a mano, si rischia di rovinare i canali e di non rimuovere tutto l'alluminio; soffiando con la fiamma ossidrica sulla testina, si riesce a sciogliere l'alluminio mentre l'acciaio da stampi della testina non subisce deformazioni, ma è comunque difficoltoso rimuovere "manualmente" il metallo fuso che cola.

Il prodotto ottenuto non è assolutamente confrontabile con quello che dovrebbe essere il suo impiego industriale, e con i risultati provenienti dalle prove della letteratura consultata, ma è stato già largamente anticipato che si tratta del primo progetto che l'Univpm affronta su questo argomento, e che il dispositivo è stato progettato e realizzato per valutare il processo da un punto di vista teorico-sperimentale, e non direttamente applicativo-industriale. Come mostrano le figure nella pagina seguente, l'estruso ha una forma "simi-cilindrica" ma non si può dire che abbia la consistenza desiderata e dunque le caratteristiche meccaniche sperate.



*Figura 6.2 - Rottura della testina che risulta completamente distrutta nella parte esterna*



*Figura 6.3 - A sx rottura del punzono e del contenitore durante la fase preliminare di compattazione; a dx riempimento dei canali della testina con alluminio solidificato*

## 6.1 VERSIONE AL TORNIO

La versione da tornio può risolvere innanzitutto il problema della pulizia della testina, perché in questo caso la sostituzione è prevista solo dopo un elevato numero di ore di lavoro. La filiera viene sostituita per intero, mantenendo inalterati gli altri componenti se non si sono danneggiati. Questa versione è già più applicabile a livello aziendale, perché permette una lavorazione continua del materiale da riciclo (precedentemente preparato/compattato) e soprattutto non necessita di ulteriori operazioni per recuperare il filo estruso, che esce direttamente dalla macchina e viene raccolto per lavorazioni successive o utilizzo diretto. Inoltre, vista la potenza del tornio, non si hanno blocchi legati al carico eccessivo (ovviamente considerando il perfetto assemblaggio e funzionamento dei componenti) ed è possibile andare a velocità di rotazioni più basse, aumentando invece la velocità di avanzamento. È possibile in questa maniera

Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere

ottenere un prodotto migliore dal punto di vista della compattezza e della continuità del filo, che non risente della forza centrifuga (problema non risolto nella configurazione Univpm) ed esce senza interruzioni dalla filiera, raffreddandosi fino alla completa solidificazione (si proviene dalla plasticità).

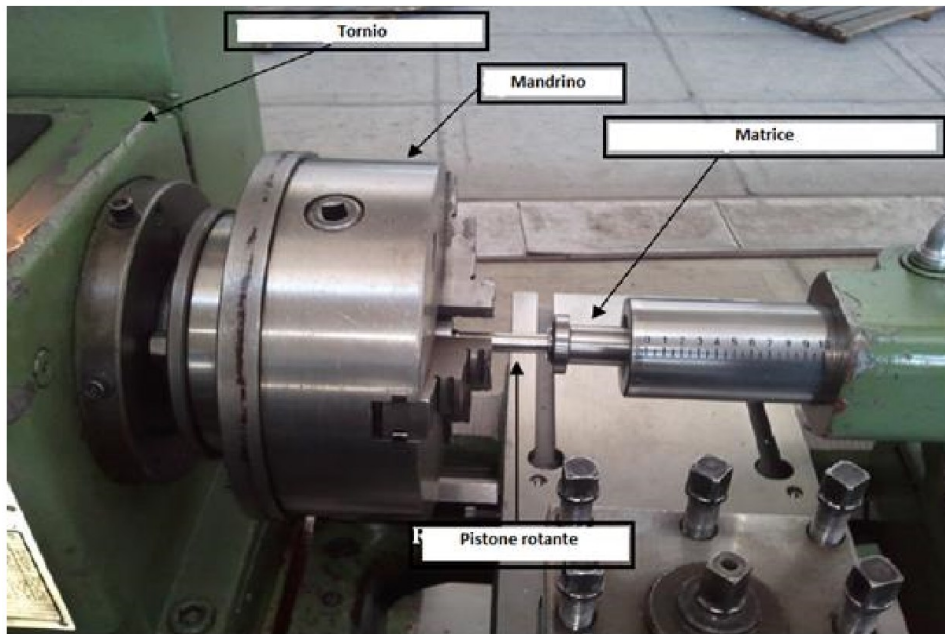


Figura 6.4 - Versione FSE al tornio

## 6.2 CONTENITORE ROTANTE

Questa soluzione può essere l'unica vera alternativa che coniughi le necessità di studio del processo e successivamente di utilizzo in ambito industriale. Consiste nell'invertire la relazione di moto tra contenitore e punzone/filiera, bloccando quest'ultimo in maniera solidale con il piano di lavoro della macchina CNC, e mettendo il container in rotazione.

I benefici che si possono ottenere da questa modifica sono molti, pur con una minima rivisitazione dei componenti già esistenti e disponibili presso i laboratori UNIVPM. Sicuramente non sarà una prova fattibile con la macchina utilizzata finora, perché conferire la rotazione al contenitore, che ha una massa e dunque un'inerzia maggiore rispetto al punzone, richiede una potenza superiore (senza blocchi di forza "inutili") ed una capacità di bloccaggio differente da quella

Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere

utilizzata finora. Il principio di riscaldamento della pasticca è identico a quello precedentemente utilizzato, ma la miglioria fondamentale risiede nella capacità di passaggio del materiale plastico all'interno del canale della filiera, perché quest'ultima non ruota, e quindi permette all'alluminio di compattarsi nella risalita dentro al punzone.

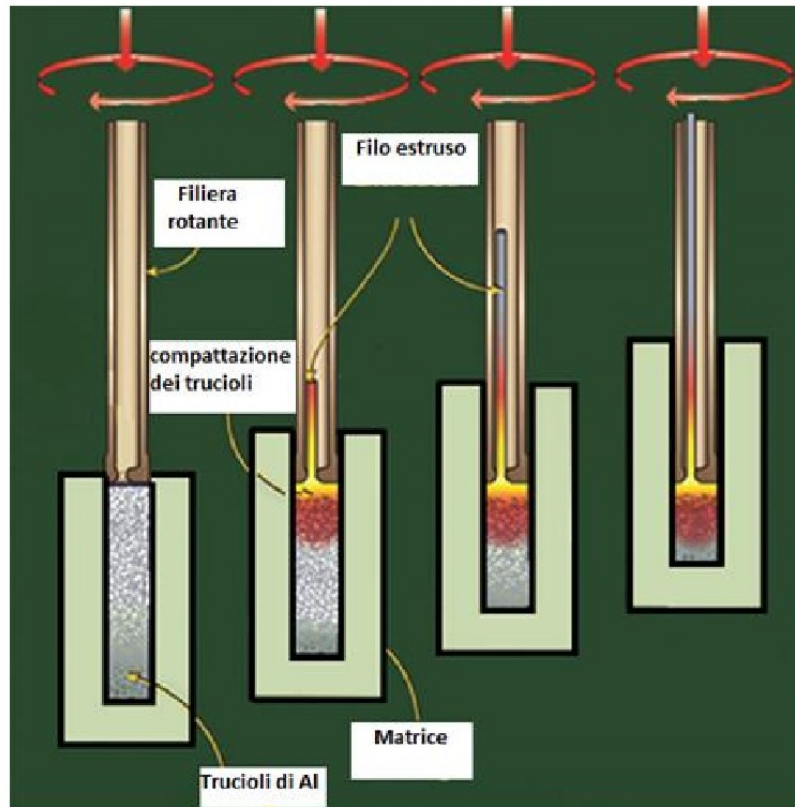


Figura 6.5 - Configurazione con contenitore bloccato e punzone rotante

## CAPITOLO 7

### ANALISI LCA: “LIFE CYCLE ASSESSMENT”

#### 7.1 ASPETTI GENERALI DELLA LCA

L'analisi del ciclo di vita (LCA) fa parte di quella nuova strumentazione metodologica, messa a punto negli ultimi anni, per consentire, con interventi di natura preventiva, uno sviluppo sostenibile.

Il ciclo di vita di un prodotto o di una qualsiasi attività umana viene quindi esaminato “from the cradle to the grave” ossia “dalla culla alla tomba” attraverso la compilazione di un inventario di ingressi (materiali, energia, risorse naturali) e di uscite (emissioni in aria, acqua, suolo) del sistema, la valutazione di impatti potenziali, diretti e indiretti, associati a tali inventari, l'analisi dei risultati delle due fasi precedenti e infine la definizione delle possibili linee di intervento.

Viene definita come:

“è un procedimento oggettivo di valutazione di carichi energetici e ambientali relativi a un processo o un'attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale “.

La LCA è una tecnica sviluppata originariamente per valutare gli impatti ambientali dei prodotti e dei processi produttivi.

Negli ultimi dieci anni il metodo è stato però applicato non solo ai prodotti, ma anche ai servizi, compresi quelli legati alla gestione dei rifiuti.

La LCA, conosciuta in Italia come analisi del ciclo di vita dei processi produttivi, può essere considerata l'evoluzione della tecnica di analisi energetica, i cui primi esempi di applicazione risalgono alla fine degli '60, quando alcune grandi industrie hanno cominciato a rivolgere un interesse particolare ai temi del risparmio delle risorse (energia e materiali) e del contenimento delle emissioni nell'ambiente.

La caratteristica fondamentale di questa nuova metodologia è costituita dal modo innovativo di affrontare l'analisi dei sistemi industriali: dall'approccio tipico dell'ingegneria tradizionale, che privilegia lo studio separato dei singoli elementi dei processi produttivi, si passa ad una visione globale del sistema produttivo, in cui tutti i processi di trasformazione, a partire dall'estrazione delle materie prime fino allo smaltimento dei prodotti a fine vita, sono presi in considerazione in quanto partecipano alla realizzazione della funzione per la quale essi sono stati progettati.

Gli studi del Life Cycle Assessment, negli ultimi anni, sono sempre più diffusi grazie alla cresciuta esigenza delle aziende di tenere sotto controllo, dal punto di vista ambientale, i processi legati ai propri prodotti. Le aziende mirano al raggiungimento degli obiettivi derivanti dalle politiche europee di sostenibilità ambientale, che prevedono strategie volte al miglioramento dei risultati nel campo della protezione e gestione ambientale nonché l'uso di fonti di energia rinnovabile.

In seguito alle problematiche di carattere ambientale che contribuiscono al progressivo deterioramento degli ecosistemi, oggi si sta rafforzando in Europa la domanda di una migliore qualità ambientale e di una maggiore efficienza dei servizi e degli impianti tecnologici permettendo di valorizzare, anche da un punto di vista economico e imprenditoriale, i prodotti, le imprese e i territori gestiti con criteri rigorosi di sostenibilità ambientale.

## 7.2 FASI DELLA VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA

La struttura e le richieste di LCA sono fissate nelle normative DIN/ISO 14040 –14043.

In accordo con queste regolamentazioni, il metodo si divide in 4 parti:

1. Obiettivo e campo di applicazione (Goal and Scope):

è la fase preliminare in cui vengono definiti i fini dello studio, l'unità funzionale, i confini del sistema studiato, il fabbisogno di dati, le assunzioni e i limiti;

2. Analisi d'inventario (Lyfe Cycle Inventory - LCI):

è la prima parte del lavoro, dedicata allo studio del ciclo di vita del processo o attività. Lo scopo principale è quello di ricostruire la via attraverso cui il fluire dell'energia e dei materiali permette il funzionamento del sistema produttivo in esame tramite tutti i processi di trasformazione e trasporto;

3. Valutazione dell'impatto del ciclo di vita (Life Cycle Impact Assessment - LCIA):

è lo studio dell'impatto ambientale provocato dal processo o attività e ha lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni generate a seguito dei consumi di risorse e dei rilasci nell'ambiente calcolati nell'inventario;

4. Interpretazione dei risultati (Lyfe Cycle Interpretation):

è la parte conclusiva di una LCA e ha lo scopo di proporre i cambiamenti necessari a ridurre l'impatto ambientale dei processi o attività considerati.

Le quattro fasi non vanno considerate come blocchi separati, ma parte di un processo iterativo che, con l'acquisizione di informazioni supplementari nel corso dello studio, rende necessaria la revisione delle ipotesi formulate.

Procedendo, ad esempio, con la raccolta dei dati, il sistema è meglio conosciuto e possono emergere nuovi requisiti o limitazioni, che richiedono una revisione dell'obiettivo o del campo di applicazione dello studio.

Analogamente la fase di interpretazione dei risultati può generare un riesame del campo di applicazione della LCA, come pure della natura e della qualità dei dati raccolti per conseguire l'obiettivo finale.



## 7.3 LIMITI DELLA LCA

Nonostante le sue numerose applicazioni e la sua capacità nell'identificazione di impatto ambientale in riferimento al processo produttivo di un bene un servizio o un prodotto, la metodologia LCA presenta dei limiti che riguardano soprattutto la disponibilità di dati completi e precisi, la complessità dello studio e le considerevoli risorse richieste in termini di costo e tempo.

I limiti principali, che vengono qui di seguito descritti, sono associati in particolare ai seguenti aspetti:

1. perdita dell'informazione sito-specifica: La LCA non fa distinzione tra le emissioni avvenute in luoghi differenti.

Tutte le emissioni relative ad un inquinante infatti vengono sommate e hanno come conseguenza la completa perdita dell'informazione spaziale. Il problema sta nel fatto gli impatti ambientali di molti inquinanti possono dipendere pesantemente da dove vengono emessi.

2. valutazione degli impatti a diverse scale: Gli effetti dovuti alle sostanze nell'ambiente possono verificarsi nelle immediate vicinanze del punto di emissione, oppure possono avere una ricaduta su tutto il pianeta, fondamentalmente a seconda delle caratteristiche fisiche e chimiche dell'emissione che genera l'effetto stesso. Questi effetti ambientali possono quindi essere suddivisi in base alla scala di azione: globale, regionale o locale.

3. considerazioni di carattere solo energetico/ambientale: La LCA si focalizza sugli aspetti energetici e ambientali del sistema analizzato, mentre non include altri aspetti come quelli economici e sociali. Di conseguenza, per avere una visione completa del sistema e prendere quindi una decisione in merito, i risultati forniti dalla LCA sono solo uno degli elementi che devono essere valutati

4. Disponibilità e qualità dei dati: Un'altra limitazione può risiedere nella disponibilità dei dati. In molti Paesi si stanno sviluppando delle banche dati anche se in pratica i dati sono spesso obsoleti, non confrontabili, o di qualità non nota.

Inoltre, sono molte volte riferiti a interi blocchi di attività e non suddivisi per i singoli sotto processi che li compongono. Quindi, nel mondo reale, coloro che fanno studi di LCA hanno a che fare con il problema dell'imprecisione e dell'incertezza dei dati, in particolare nell'analisi di inventario

Le informazioni, quindi, sviluppate attraverso una valutazione LCA dovrebbero essere utilizzate come un componente di processo decisionale più completo, ad esempio il Life Cycle Management.

## **7.4 VANTAGGI ANALISI LCA**

Una valutazione LCA può aiutare a selezionare un prodotto o un processo che determina il minimo impatto ambientale.

Queste informazioni possono essere combinate con altri fattori, come i dati di costo, aumentando, in fase di scelta, la consapevolezza delle prestazioni ecologiche degli oggetti considerati.

Attraverso tale valutazione, sei in grado, più nello specifico di:

- Sviluppare una valutazione sistematica delle conseguenze ambientali associate ad un determinato prodotto;
- Analizzare l'impatto ambientale delle scelte associate ad uno o più specifici prodotti/ processi per aiutare i soggetti pubblici (Stato ecc.) nell'accettazione di azioni pianificate;
- Confrontare l'impatto sanitario e ambientale tra due o più prodotti (processi della concorrenza);
- Contribuire a individuare cambiamenti significativi negli impatti ambientali tra le fasi di ciclo di vita;

## **7.5 OGGETTO DI STUDIO**

L'obiettivo di questo lavoro, come già accennato precedentemente, sarà quello di comparare, attraverso un'analisi LCA, i due processi per il riciclo di alluminio, ossia quello di estrusione tradizionale e quello per attrito, al fine di

mostrare quale dei due sia migliore rispetto l'altro a livello di impatto ambientale.

Si studieranno quindi i due processi di produzione dell'alluminio, sui vari inputs e outputs e sui relativi risultati che ne derivano.

### 7.5.1 UNITA' FUNZIONALE E CONFINI DEL SISTEMA

Prima di iniziare a descrivere come si utilizza tale software e i vari dati immessi, si specificare cosa si è studiato.

Come unità funzionale è stato preso un piccolo cilindro di alluminio di diametro 8 mm e altezza 10 mm. Il prodotto che uscirà, quindi, da entrambi i processi di produzione di alluminio sarà dunque il medesimo; e proprio attraverso ciò riusciremo a notare le differenze che ci saranno a livello di inputs ed emissioni. Considerando quindi un cilindro di tali misure e considerando come densità dell'alluminio 2699 kg/ metro cubo, la nostra unità funzionale avrà una massa di 1,3559 grammi, ossia entrambi i processi dovranno arrivare a produrre un filo di alluminio di quella massa.

Per quanto riguarda, invece, i confini del sistema del caso studiato, si è preso come riferimento per entrambi i processi tutto ciò che accade a partire da una billetta formata da trucioli precompattati di alluminio fino alla realizzazione del filo di alluminio, dell'unità funzionale.

Ovviamente i sistemi analizzati avranno al loro interno una serie di processi che sono diversi tra loro.

Metodo FSE (Estrusione per attrito, Figura 7.1):

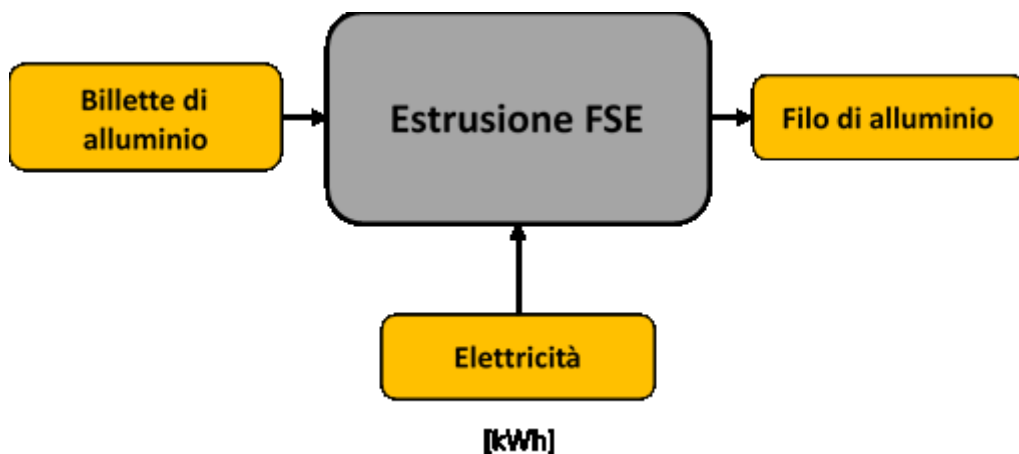


Figura 7.1 - Schematizzazione metodo di estrusione per attrito

Metodi di estrusione tradizionale:

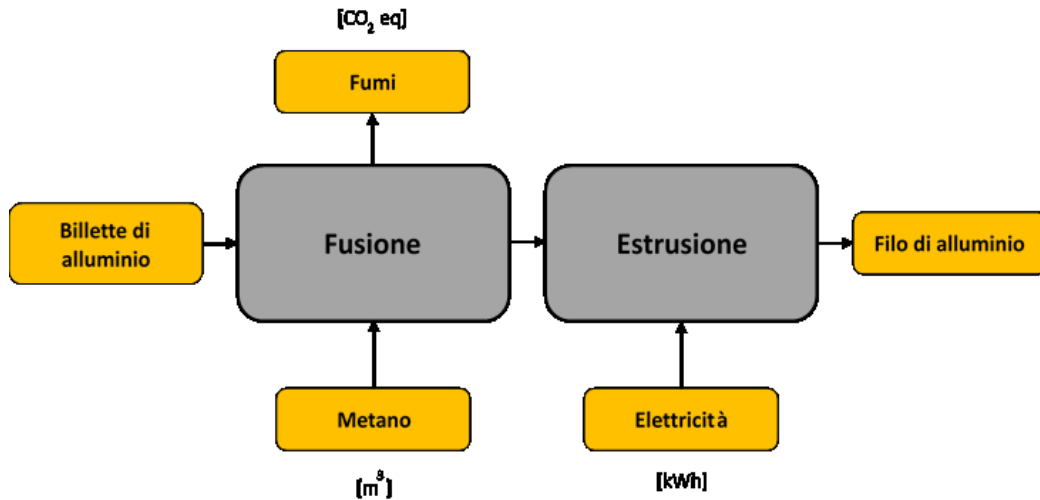


Figura 7.2 - Schematizzazione metodo tradizionale

Si analizzeranno quindi 3 processi, quello di estrusione per attrito, quello di estrusione tradizionale e quello di fusione che precede quest'ultimo.

## 7.5.2 INSTALLAZIONE E CREAZIONE DI UN DATABASE

Installato il software dal suo sito, si deve inserire un nuovo database, "ComparazioneProcessi", cliccando sulla finestra di navigazione sulla sinistra (visibile nella Figura 7.3) con il tasto destro e selezionando "New Databases", formato da una serie di sotto elementi, quali "Project", "Product systems", "Processes", "Flows", "Indicators and parameters" e "Background data".

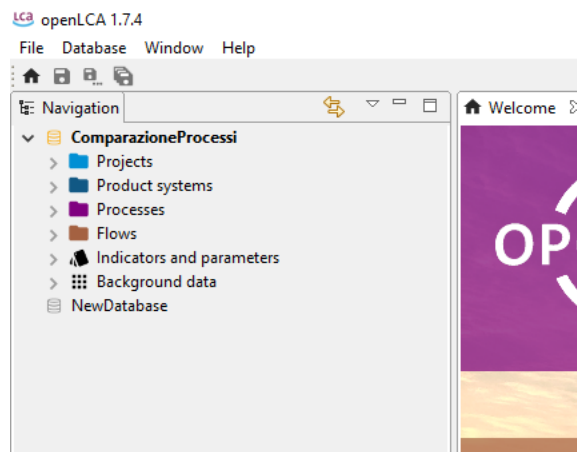


Figura 7.3 - Creazione di un nuovo database

Si devono importare, poi, alcuni file, ossia dei set di dati da un database diverso, da quello che si ha, potendoli scaricare gratuitamente da openLCA Nexus.

I file, si importano facilmente cliccando sul tasto destro del mouse sul nome del database e selezionando "Importa", sono i:

- "Natural gas mix" ossia set di dati che coprono l'intera catena di approvvigionamento del gas naturale, compresi perforazione del pozzo, produzione di petrolio, lavorazione e trasporto.
- Gli "openLCA LCIA methods 1.5.7", il cui compito è proprio quello di convertire i dati puramente di bilancio forniti dall'Inventario in una serie di misure d'impatto che permettano di valutare gli effetti ambientali del sistema in esame. Le valutazioni verranno fornite sotto forma di profilo ambientale per una decina di tematiche ambientali.

### **7.5.3 CREAZIONE PROCESSI: FUSIONE**

Il primo processo esaminato è quello relativo alla fusione dell'alluminio, il primo step del metodo convenzionale per il riciclo dell'alluminio, come è ampiamente descritto nei capitoli precedenti.

Una volta creato un nuovo "flow" "Aluminium" e il relativo processo "Fusione Alluminio" sul software, si ricercano i vari dati da inserire nella tabella degli input e degli output per poter poi valutare il loro impatto ambientale.

#### **Dati di input:**

I materiali e le risorse utilizzate in tale processo come inputs possono essere riassunti in questo elenco:

- Aluminium scrap: ossia trucioli di alluminio compattati provenienti dagli scarti delle macchine per la produzione di alluminio. Per quanto riguarda la quantità di tale materiale che si è utilizzato bisogna prima premettere un argomento. Il metodo convenzionale, come spiegato nel capitolo precedente, si basa sulla fusione e tale processo presenta notevoli perdite di efficienza quando devono essere trattati questo tipo di rottami. Durante il processo di fusione

dell'alluminio o delle sue leghe, una media del 10% del metallo è bruciato e una simile percentuale del 10% è persa poiché l'alluminio viene inglobato all'interno delle scorie che a loro volta vengono eliminate dalla superficie del bagno fuso. Si possono raggiungere, addirittura, percentuali del 35% se questa fase viene effettuata mediante tradizionali forni a combustibile invece che con il più idoneo forno a induzione. La causa principale che porta all'ottenimento di questi risultati è da attribuire alla particolare conformazione che questi scarti di lavorazione presentano: a causa della loro bassa densità, all'elevato rapporto area su volume questi si dispongono e rimangono per molto tempo sulla superficie del metallo fuso e, entrando in contatto con l'atmosfera, si ossidano intensamente andando a generare notevoli perdite. Nella fase di colata, inoltre, si verificano altre inefficienze quantificabili con un 8% (difetti, cavità di ritiro, coni di ritiro ecc.) e nella realizzazione di prodotti estrusi si origina un ulteriore circa 20% di scarti (considero i prodotti estrusi per permettere un confronto con il metodo della diretta conversione allo stato solido). Per migliorare la resa del processo è conveniente incrementare la densità dei trucioli fino a  $1 \text{ kg/dm}^3$ ; anche, però, sotto queste condizioni in media si raggiungono perdite del 15% durante la fase di fusione.

Avendo considerato gli scarti di alluminio compattati e considerando nella fusione anche la fase di colata, ho considerato uno scarto di circa il 23 %.

Il materiale, quindi, da utilizzare per ottenere in uscita una billetta di alluminio di massa 1,3559 grammi, avendo spiegato precedentemente il perché e avendo considerato che nell'estrusione non c'è dispersione di massa, sarà di 1,6677 grammi.

- Natural gas: utilizzato dal forno per la fusione del metallo. Per quanto riguarda le quantità utilizzate per fondere il metallo preso in esame ci si può basare su un articolo in cui vengono riportate le quantità di input ed output di un intero processo di estrusione relativo alla produzione di 600 kg di alluminio.

Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere

Inputs	Unit	Total	Outputs	Unit	Total
Raw materials			Air emissions		
Aluminum scraps	kg	595	Particulates, < 2.5 um	kg	0.09
Natural gas	M <sup>3</sup>	286	Particulates, > 10 um	kg	0.08
Electricity	MJ	4580	BTEX <sup>1</sup>	kg	0.07
Water	M <sup>3</sup>	1.14	Hydrogen chloride	kg	0.007
Outputs			Water emissions		
Air emissions			BOD <sub>5</sub> <sup>3</sup>	kg	0.63
Carbon dioxide, fossi <sup>1</sup>	kg	1754	COD <sup>4</sup>	kg	0.84
Sulfur dioxide	kg	8.99	Suspended solids	kg	53.33
Nitrogen oxides	kg	2.69	Chloride	kg	43.86
NMVO <sup>2</sup>	kg	0.58	Magnesium	kg	1.35
VOC, volatile organic compounds	kg	0.20	Lithium	kg	1.22
Particulates, >2.5 um, and < 10um	kg	0.09	Bromide	kg	0.2

<sup>1</sup> Benzene, toluene, ethyl-benzene, and xylene, unspecified ratio, <sup>2</sup> Non-methane volatile organic compounds, unspecified origin, <sup>3</sup> Biological Oxygen Demand, <sup>4</sup> Chemical Oxygen Demand.

Tabella 7.4 - Impatti della produzione secondaria dell'alluminio

Questa tabella, appunto, è stata presa da un articolo che analizzava attraverso un'analisi LCA, gli impatti della produzione secondaria dell'alluminio prendendo in considerazione le industrie dell'alluminio ad Arak, il centro dell'area industriale dell'Islam. La tabella include materiali, energia e rilasci ambientali associati alle operazioni secondarie di estrusione di alluminio. Sarà, infatti, utilizzata più avanti per descrivere anche i vari outputs di tale processo e di quello di estrusione.

Rapportando i 286 Metri cubi di "natural gas" (3440 MJ) che servono per produrre 600 kg di alluminio all'unità funzionale presa in esame, ossia una billetta di 1,3559 grammi, ho ricavato il gas necessario al caso in esame.

- Water: utilizzata durante la fusione per il trattamento delle scorie. Le scorie saline di alluminio sono un insieme di sali, ossidi di alluminio, alluminio metallico e impurità che derivano dai rottami di alluminio durante la fase di fusione. Poiché sono state classificate come rifiuti tossici e pericolosi (altamente infiammabili, irritanti e nocive) il loro smaltimento in discarica è proibito in molte delle nazioni europee e pertanto devono essere riciclate. Devono la loro formazione principalmente all'utilizzo di sali per proteggere il metallo fuso dalla formazione di ossidi nella parte superiore del bagno fuso in seguito alla reazione con l'atmosfera.

Il metodo convenzionale di recupero consiste nella macinazione delle scorie seguita da una selezione mediante vagliatura o sistemi di separazione a induzione magnetica, che permette di recuperare la frazione di alluminio



metallico (circa 10%) inglobata nella scoria e da una lisciviazione in acqua per permettere il recupero del sale tramite i successivi filtraggio e evaporizzazione.

Come per il “natural gas”, anche in questo caso si possono utilizzare i dati della tabella soprastante per immettere nella mia tabella le quantità di acqua richieste.

### **Dati in output:**

I materiali e le emissioni prodotte dal processo di fusione, ricavati per lo più dall'articolo citato precedentemente, sono:

- Aluminium: ossia l'alluminio ottenuto dopo la fusione e la colata di 1,6677 grammi di alluminio, pronto per essere estruso. Preso il processo di estrusione come un processo senza perdite di materiale e dovendo ottenere una billetta di alluminio di massa 1,3559 grammi in uscita, avremo la stessa quantità in uscita dalla fusione.
- Emissioni in aria: CO<sub>2</sub> (anidride carbonica), SO<sub>2</sub> ( biossido di zolfo), N<sub>2</sub>O (ossido di diazoto)
- Emissioni in acqua: Litio, Cloruro, Bromuro e solidi sospesi.

In questo caso, come nei precedenti, si rapportano le quantità mostrare nella tabella precedente ai dati del caso preso in esame

## **7.5.4 CREAZIONE PROCESSI: ESTRUSIONE**

Una volta concluso di analizzare il processo di fusione, si inizia ad esaminare il processo di estrusione.

Innanzitutto, si deve ricreare, cliccando con il tasto destro prima su “Flows” poi su “Processes”, un nuovo flusso che avrà come output “Filo Alluminio d8h10”, ossia un filo di diametro 8 mm e altezza 10mm, l' unità funzionale e un nuovo processo “Estrusione”.

In questo caso la compilazione della tabella Input/Output è molto più semplice dato che si tratta solamente di inserire come input l'alluminio prodotto dalla fusione di massa identica a quello che sarà poi il filo di alluminio in uscita.

Per quanto riguarda l'estrusione, infatti, come prima accennato, si è considerato che durante il procedimento non ci siano perdite di materiale, come invece accadeva durante la fusione.

Oltre all'alluminio è servita solamente energia elettrica utilizzata dall'estrusore.

Come per gran parte dei dati, si utilizza anche per questo come riferimento per le quantità la tabella citata precedentemente che mi mostra i vari materiali e risorse che sono servite per produrre 600 kg di alluminio in un processo di estrusione, come in questo caso.

Una volta analizzati i due processi distintamente, si può notare, essendo i due processi collegati avendo l'estrusione come input l'output della fusione, attraverso i grafici il legame che c'è tra i due procedimenti. Nel software openLCA, infatti, cliccando su "Product system" si aprirà una finestra nella quale in basso troveremo scritto "Model graph".

### **7.5.5 CREAZIONE PROCESSO: ESTRUSIONE PER ATTRITO**

L'ultimo processo da dover esaminare è quello di estrusione per attrito (FSE).

Un metodo innovativo sviluppatosi a partire dalla Friction Stir Welding, innovativa tecnica di saldatura, ampiamente descritto nei capitoli precedenti, che non prevede l'utilizzo della fusione. Chiamata anche estrusione a freddo.

Avendo poca conoscenza scientifica della FSE in letteratura e un'ampia conoscenza del processo di saldatura ad attrito (FSW), si sono utilizzate alcune informazioni e dati presi da articoli scientifici sulla FSW per quantificare gli input e gli output del processo di estrusione per attrito.

Come per il processo di estrusione tradizionale, anche qui, la tabella degli input e degli output è molto scarna rispetto a quella riguardante la fusione.

In input si ha una billetta di alluminio ricavata da trucioli, da scarti di produzione di massa 1,3559 grammi, non avendo dispersione di massa durante il procedimento e l'energia elettrica.

Non avendo informazioni precise su quanta energia fosse utile per estrudere, si è cercato informazioni in un articolo sulla FSW, riportando poi i risultati al caso in esame.

In quel caso si partiva da una lamiera di alluminio di lunghezza 185 mm, larghezza 80 mm e 2 mm di spessore e con una velocità di rotazione pari a 1200, 1500, 2000 e 2500 giri / min e velocità di avanzamento di 30, 60 e 100 mm / min.

Rapportando i dati al caso in esame, ossia un processo di estrusione per attrito avvenuto con una velocità di rotazione di 1000 giri/ min e 0,8 mm/ sec, si è ritenuto opportuno scegliere come risultato un approssimativo 0,5 MJ.

Arrivati a questa conclusione poi è stata rapportata tale energia, relativa ad un avanzamento di 185 mm, al nostro avanzamento corrispondente a 0,4 mm (nel caso preso in esame si partiva da una billetta di diametro 40 mm fino ad arrivare ad una billetta di 1 cm di altezza e 0,8 mm di diametro).

## **7.6 COMPARAZIONE**

Una volta aver concluso l'analisi dei 3 processi e creato i relativi "Product System", cliccando "Project" si può creare un progetto che porterà alla creazione di un report in cui saranno comparati i processi esaminati per quanto riguarda le categorie d'impatto che si selezioneranno.

Come si può notare dall'immagine della pagina seguente, una volta aperta la finestra "Comparazione" la prima cosa da fare è quella di scegliere il pacchetto di metodi più adeguato al caso studiato.

Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere

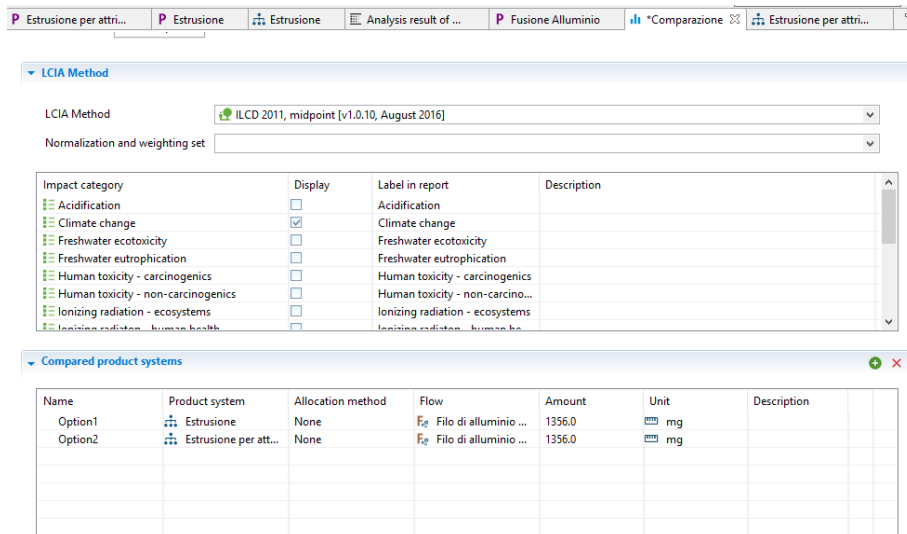


Tabella 7.5 - Scelta del pacchetto metodi

Si utilizza dapprima “ILCD 2011, midpoint” e poi “eco-indicator 99 (E)”, dove ILCD sta per International Reference Life Cycle Data System ed è il risultato di un progetto condotto dal Joint Research Center (JRC) della Commissione europea che ha analizzato diverse metodologie di valutazione dell'impatto del ciclo di vita per raggiungere un consenso sul metodo raccomandato per ciascun tema ambientale.

Eco-indicator 99 è un metodo olandese sviluppato dalla Pré (Product Ecology Consultants) per conto del Ministero dell’Ambiente Olandese; costituisce uno strumento efficace per i progettisti, in quanto consente di aggregare i risultati di un LCA in grandezze o parametri facilmente comprensibili ed utilizzabili, chiamati Eco-indicatori.

Essendo un metodo LCIA un insieme di categorie di impatto, una volta scelto quello da utilizzare si passa ad identificare le tipologie d'impatto su cui agisce il sistema in esame e quelle su cui ci si vuole soffermare.

Ciò che interessa il nostro lavoro al livello di impatto ambientale sono le categorie: “Climate change”, “Ecosystem quality”, “Human health” e “Resources”.

Una volta scelte le categorie e inseriti nel riquadro “Compared product system” i processi che si vogliono comparare, cliccando su “Report”, il software mostrerà i risultati del lavoro descritti nel paragrafo successivo.

## 7.6.1 RISULTATI

I risultati verranno mostrati dal software sottoforma di report il quale viene suddiviso in una serie di sezioni:

- “Selected LCIA Categories”: vengono qui mostrate le varie categorie d’impatto selezionate e la loro unità di misura;
- “LCIA Results”: tabella che mostra i risultati del LCIA delle varianti di progetto;

Ogni categoria LCIA selezionata viene visualizzata nelle righe e le varianti di progetto nelle colonne con le rispettive unità di misura;

- “Single Indicator Results”: grafico che mostra i singoli risultati di ogni variante di progetto per l’indicatore selezionato. In questa sezione è possibile modificare la selezione e di conseguenza il grafico verrà aggiornato dinamicamente;
- “Relative Results: grafico che mostra tutti i risultati delle varie categorie d’impatto scelte .

Per ogni categoria il risultato massimo è impostato su 100% e i risultati delle altre varianti vengono visualizzati in relazione a questo risultato.

Qui di seguito verranno mostrati i risultati dell’analisi per ciascun pacchetto di metodi scelto:

### ILCD 2011, MIDPOINT:

#### Selected LCIA Categories

Impact category	Unit	Description
Climate change	kg CO2 eq.	

Tabella 7.6 – Categorie selezionate in “ILCD2011, midpoint”

Avendo scelto, per quanto riguarda “ILCD 2011, midpoint”, esclusivamente “Climate Change” come categoria d’impatto, la tabella ci mostra solo questo elemento con la relativa unità di misura, kg di CO2 equivalente.

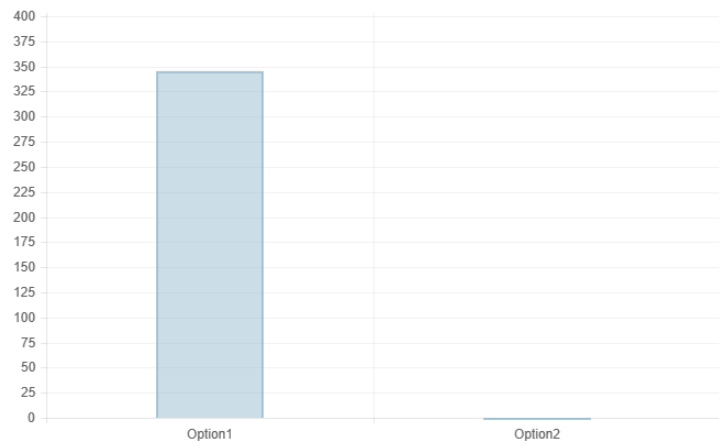
## LCIA Results

Impact category	Option1	Option2	Unit
Climate change	3.45404e+2	5.21285e-4	kg CO2 eq.

Tabella 7.7 - Quantità di anidride carbonica

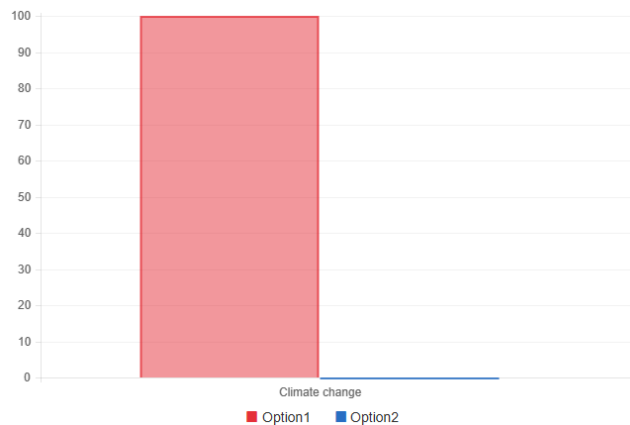
In quest'ultima tabella vengono invece mostrate le relative quantità di CO2 equivalente di ogni processo preso in esame ossia l'estrusione tradizionale (Option1) e l'estrusione per attrito (Option2).

## Single Indicator Results



Infine, vengono mostrati i risultati ottenuti rapportati ad un massimo di 100.

## Relative Results



## ECO-INDICATOR 99 (E):

### Selected LCIA Categories

Impact category	Unit	Description
Ecosystems-total	PDF*m2*yr	
Human Health-total	DALY	
Resources-total	MJ surplus energy	

Tabella 7.8 - Categorie selezionate

In quest'altro report si è selezionato come categorie d'impatto utili per il lavoro svolto:

- “Ecosystems”: i realizzatori del metodo di valutazione hanno scelto di considerare la variazione del numero di specie vegetali presenti in un territorio come l'indicatore biologico della salute dell'ecosistema e quindi l'unità di misura associata rappresenta la diminuzione (disappeared) relativa o il danneggiamento (affected) relativo del numero di specie. In tale categoria l'unità di misura è PDF m2yr (PDF: Potentially Disappeared Fraction). La diminuzione del numero di specie è rappresentata dal PDF e può essere interpretato come la frazione di specie che hanno una alta probabilità di non sopravvivere nell'area considerata, a causa di sfavorevoli condizioni di vita.
- “Human health”: Per quantificare il danno arrecato alla salute umana è necessario considerare una scala che sia capace di misurare la salute della popolazione; essa dovrà comprendere il numero di individui interessati dal problema, il tempo sottratto a ciascun individuo da infermità o morte prematura e la gravità della malattia. Misurato con l'unità di misura DALY.
- “Resources”: indicato in MJ Surplus. Il MJ Surplus è definito come la differenza fra l'energia necessaria attualmente all'estrazione di una risorsa e quella indispensabile in un istante futuro. Si calcola il surplus di energia, valutato in [MJ], che sarà necessario per estrarre 1 kg di materiale nel momento in cui il consumo di quel materiale sarà cinque volte quello estratto dall'umanità prima del 1990.



## LCIA Results

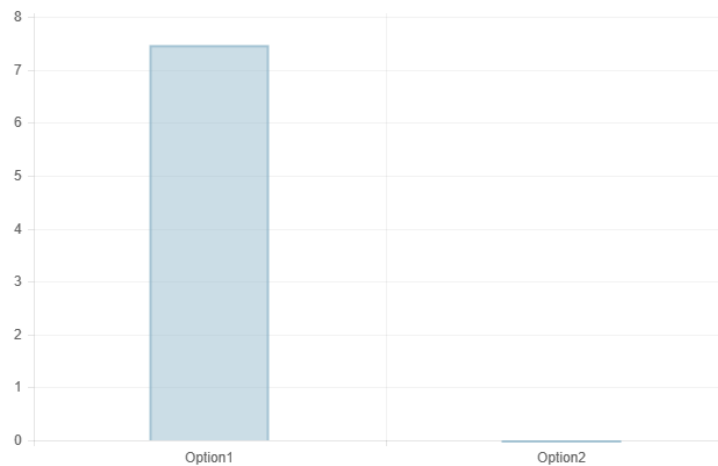
Impact category	Option1	Option2	Unit
Ecosystems-total	7.46509e+0	1.09893e-5	PDF*m2*yr
Human Health-total	2.50362e-4	3.68019e-10	DALY
Resources-total	1.75209e+0	2.08984e-6	MJ surplus energy

Tabella 7.9 - Tabella dei risultati per le diverse categorie scelte

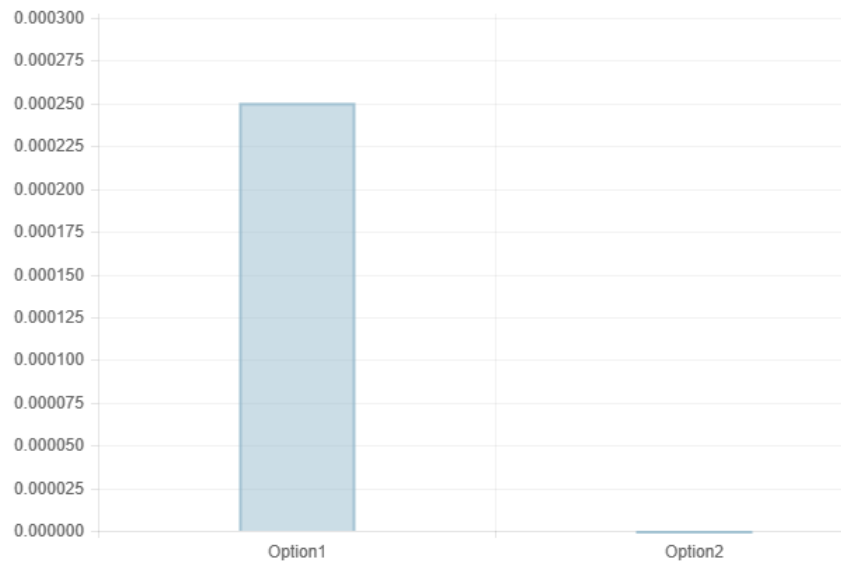
Come descritto prima, vengono qui riportate le relative quantità, per ogni processo, in termini di impatto di ogni categoria scelta.

## Single Indicator Results

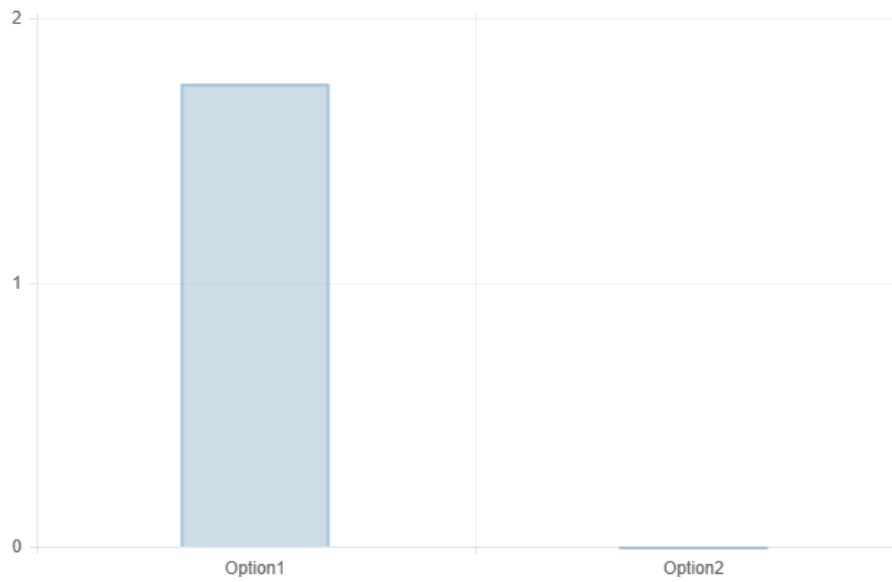
- Ecosystems:



- Human health:



- Resources:

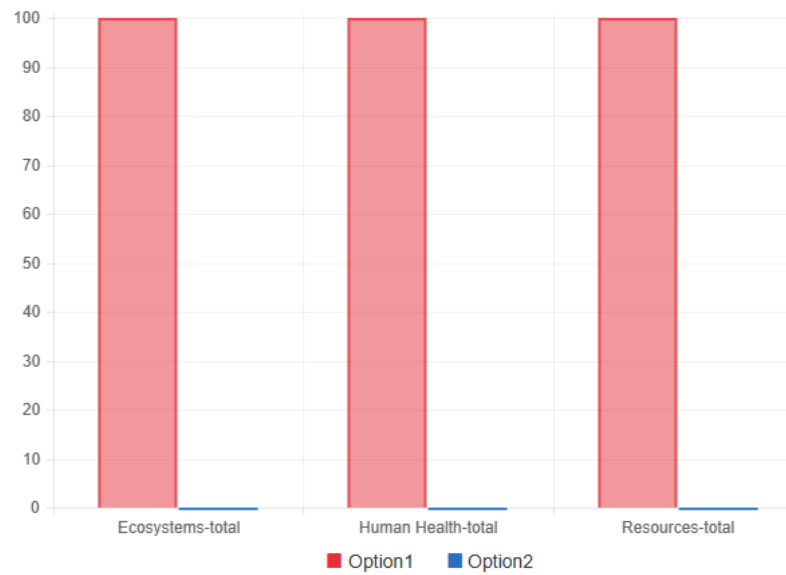


Il processo innovativo di estrusione per attrito (FSE) per un riciclo ecosostenibile delle leghe leggere

I grafici mostrati nelle pagine precedenti sono semplicemente la rappresentazione delle quantità di ogni categoria d'impatto mostrate nella sezione "LCA Results".

Una volta fatto ciò, il report infine ci mostra i vari risultati in uno stesso grafico, rapportati ad un massimo di 100.

#### Relative Results:



## CAPITOLO 8

### CONCLUSIONI

L'attività di ricerca si è concentrata sullo studio e sull'analisi del processo di estrusione inversa per attrito (FSE) e sulle sue "prestazioni" energetico-ambientali attraverso il software openLCA.

1. Partendo dalle simulazioni ad elementi finiti si è studiata la fattibilità del processo, stilando un elenco degli step necessari alla preparazione delle prove di laboratorio, come realizzazione degli utensili e preparazione dei materiali. Le prove sono state svolte tramite l'utilizzo di una macchina centro di lavoro a controllo numerico che ha permesso di impostare, come parametri di lavorazione, le variabili ricavate dalle simulazioni. Il risultato è soddisfacente e rispecchia quanto già previsto dalle simulazioni agli elementi finiti.

Il processo studiato dimostra di avere grandi potenzialità. In ambito industriale, per esempio, il riciclo dell'alluminio risulta essere in tema di notevole rilevanza in quanto il processo utilizzato dalla maggior parte delle aziende che si occupano di recupero degli scarti di alluminio avviene con il processo tradizionale, che prevede diverse fasi di lavorazione.

2. Il nuovo processo, al contrario, non prevede queste fasi particolarmente energivore e di notevole impatto ambientale, perché condensa tutto in un'unica fase. Partendo da trucioli pretrattati e precompattati, infatti, tramite la sola FSE si giunge all'ottenimento di un prodotto filiforme, cosa che comporta un notevole risparmio a livello energetico e la totale assenza di forni (quindi risparmio totale sull'uso di gas combustibili). Risulta essere, inoltre, un processo particolarmente "Green" poiché non vengono emessi fumi di alcun genere durante l'estrusione, cosa del tutto opposta al processo tradizionale che prevede l'utilizzo di forni (alimentati a gas, quindi combustione di metano ed emissioni in ambiente di fumi particolarmente impattanti).

Si può infatti notare dall'analisi svolta, attraverso openLCA, che l'energia spesa durante i due processi è nettamente differente, abbiamo 0,010 MJ

contro i 0,0010 MJ del nuovo metodo innovativo. Per quanto riguarda le emissioni in aria di fumi, inoltre, analizzando il grafico riguardante il “Climate Change”, possiamo subito notare il divario che esiste tra i due metodi al livello di emissione di CO<sub>2</sub> equivalente. La maggior parte delle emissioni, se non quasi tutte, infatti, provengono dal processo di fusione.

I risultati hanno evidenziato che non solo il processo di estrusione per attrito è migliore in termini di “Climate Change” ma anche in relazione a tutte le altre categorie d’impatto scelte per lo studio.

L’impatto sull’ecosistema, infatti, è principalmente legato al suolo e alle emissioni in acqua, alla tossicità dell’acqua che si verifica per lo più a causa dell’utilizzo della fusione, come anche per quanto riguarda le risorse, legate all’uso di gas, petrolio e carbone necessari per la produzione di elettricità, utilizzata da quest’ultima in maggior quantità.

3. La stessa situazione, in termini di preferenza di un metodo rispetto l’altro, si riscontra per quanto riguarda la quantità di materiale necessario a produrre la billetta di alluminio presa in considerazione.

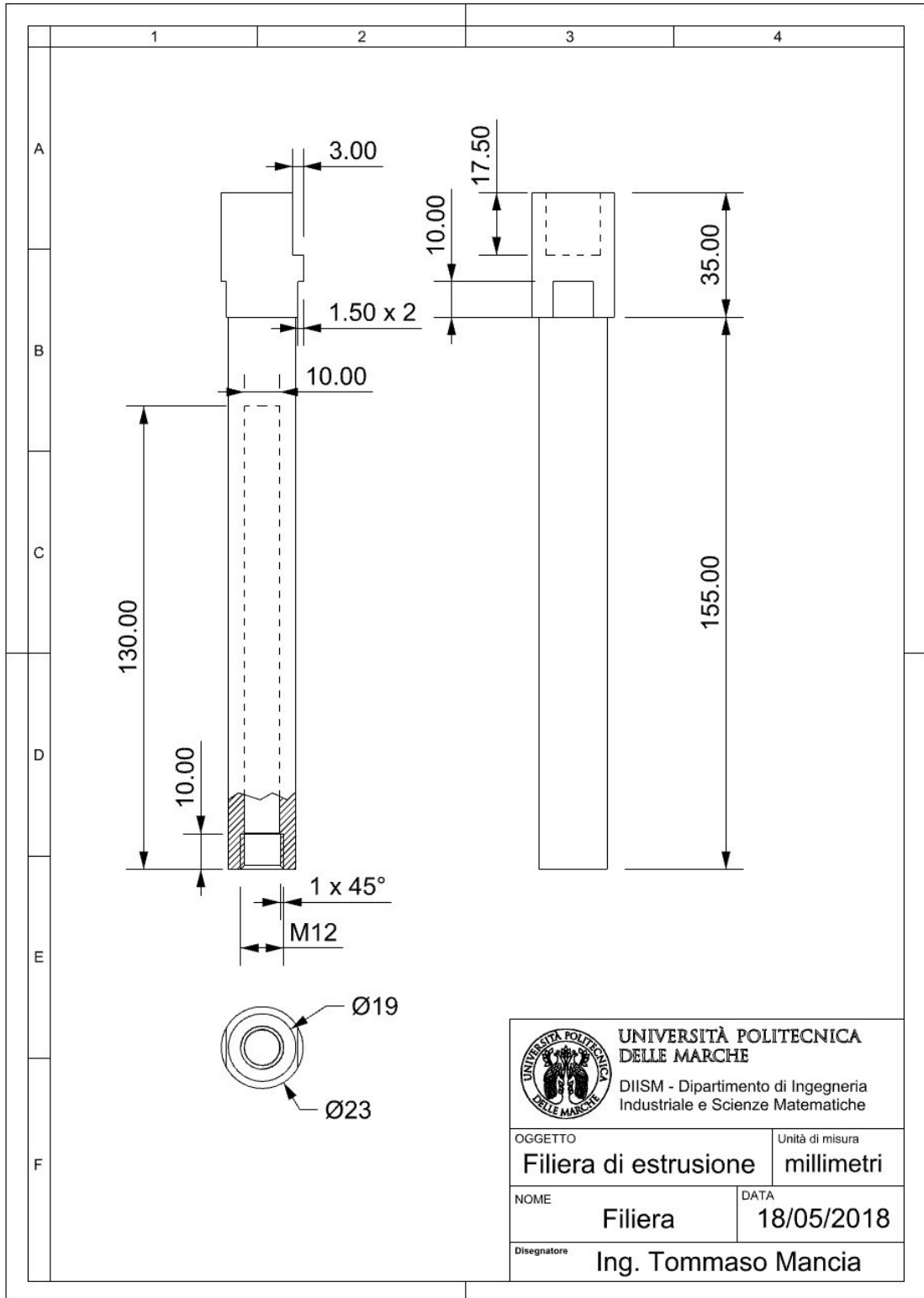
Si può notare, infatti, che nella Friction Stir Extrusion non si ha dispersione di massa quindi tutto il materiale che immettiamo lo avremo poi come output, al contrario della fusione in cui c’è uno scarto di materiale di circa il 23 % che può arrivare fino al 45 % in caso di trucioli non precompattati.

Questo processo può quindi determinare un grande cambiamento nella produzione di alluminio secondario e tutt’ora risulta in piena fase di studio e sviluppo, si spera dunque che il processo innovativo di estrusione per attrito diventi sempre più conosciuto, utilizzato e aggiornato dato che ancora non se ne conoscono tutte le potenzialità.

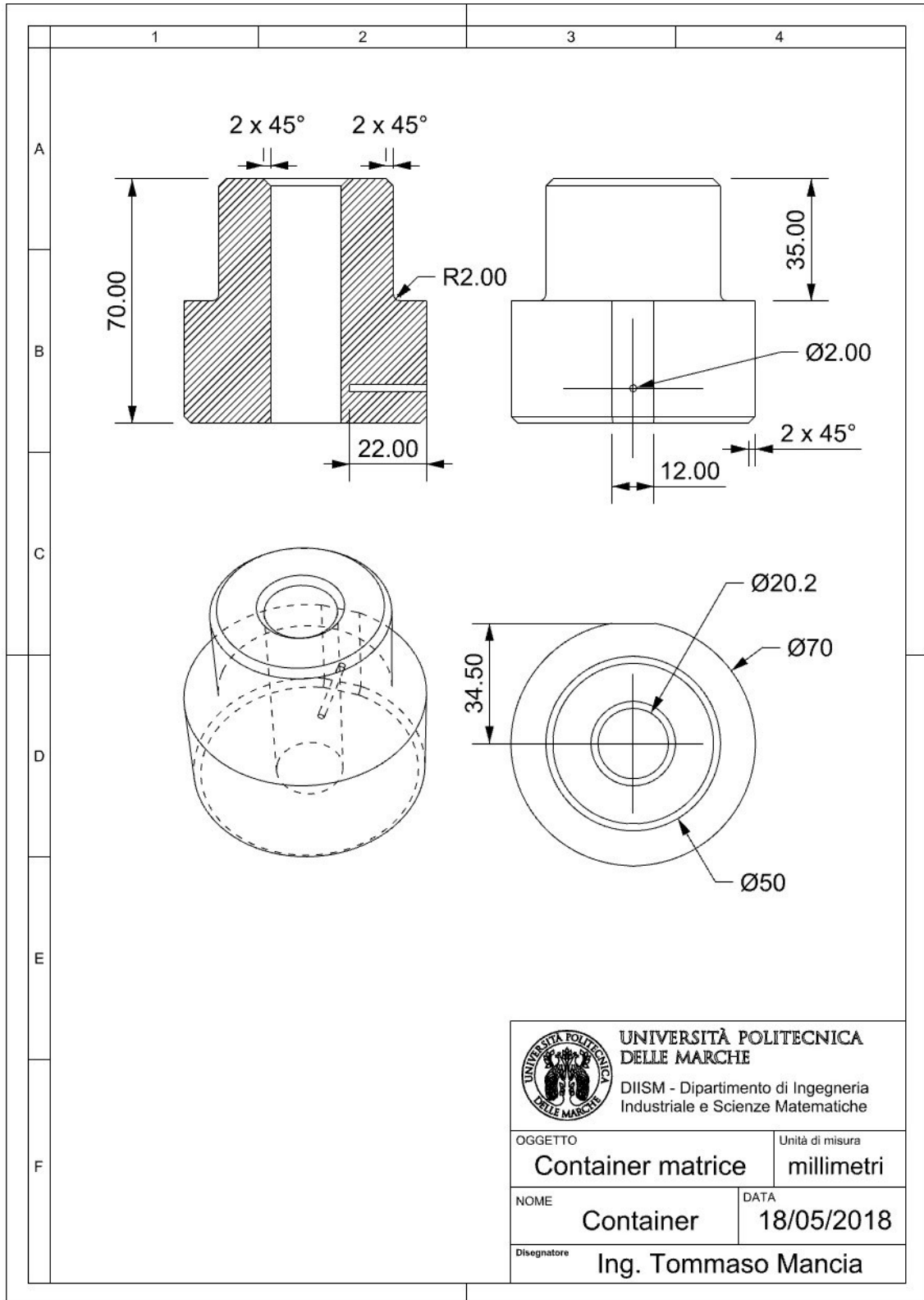
Bisogna, quindi, insistere sull’analisi e sulla sperimentazione per averne una più ampia e approfondita conoscenza.

# ALLEGATI

## ALLEGATO 1: disegno tecnico Filiera

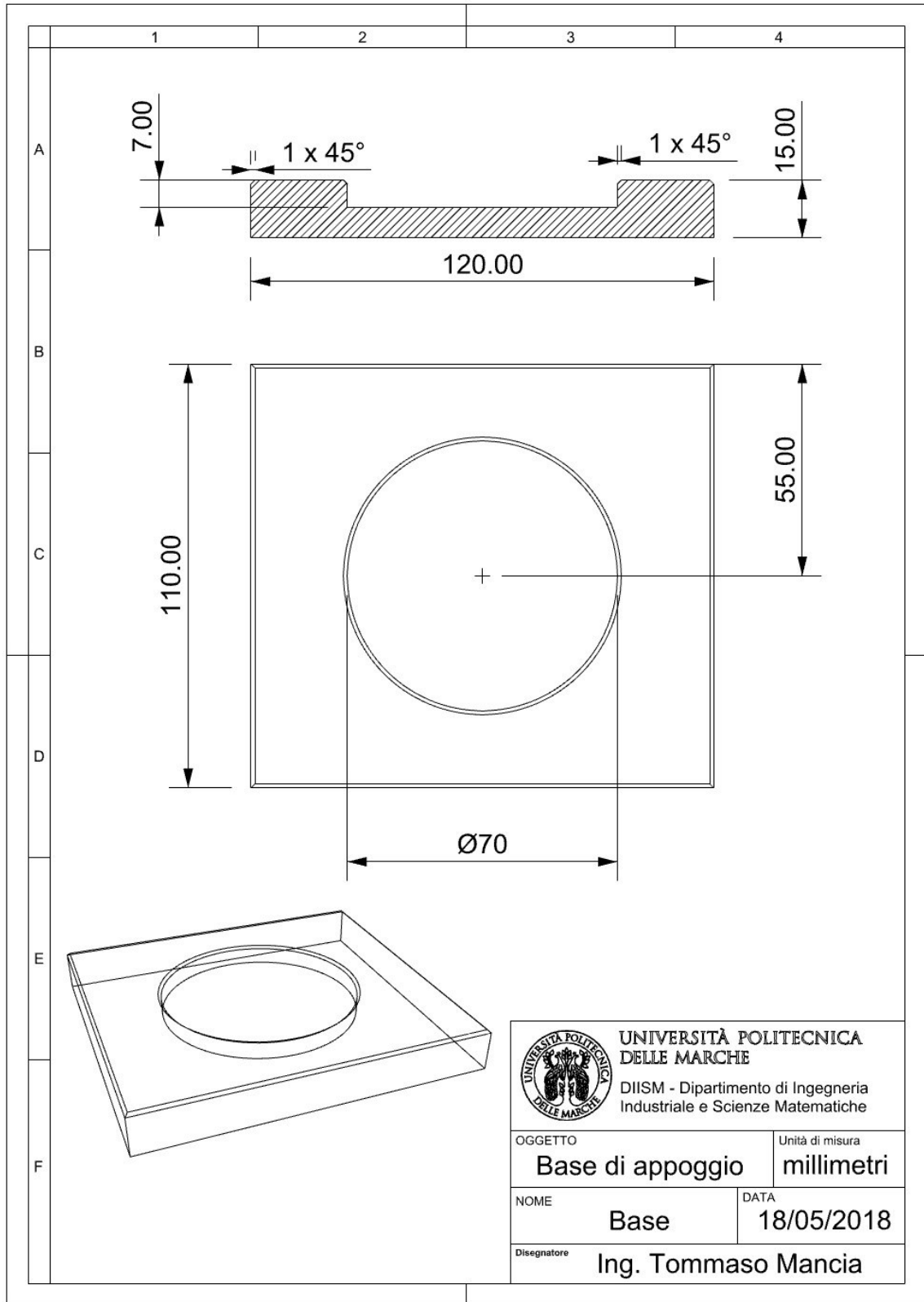


**ALLEGATO 2: disegno tecnico Container**

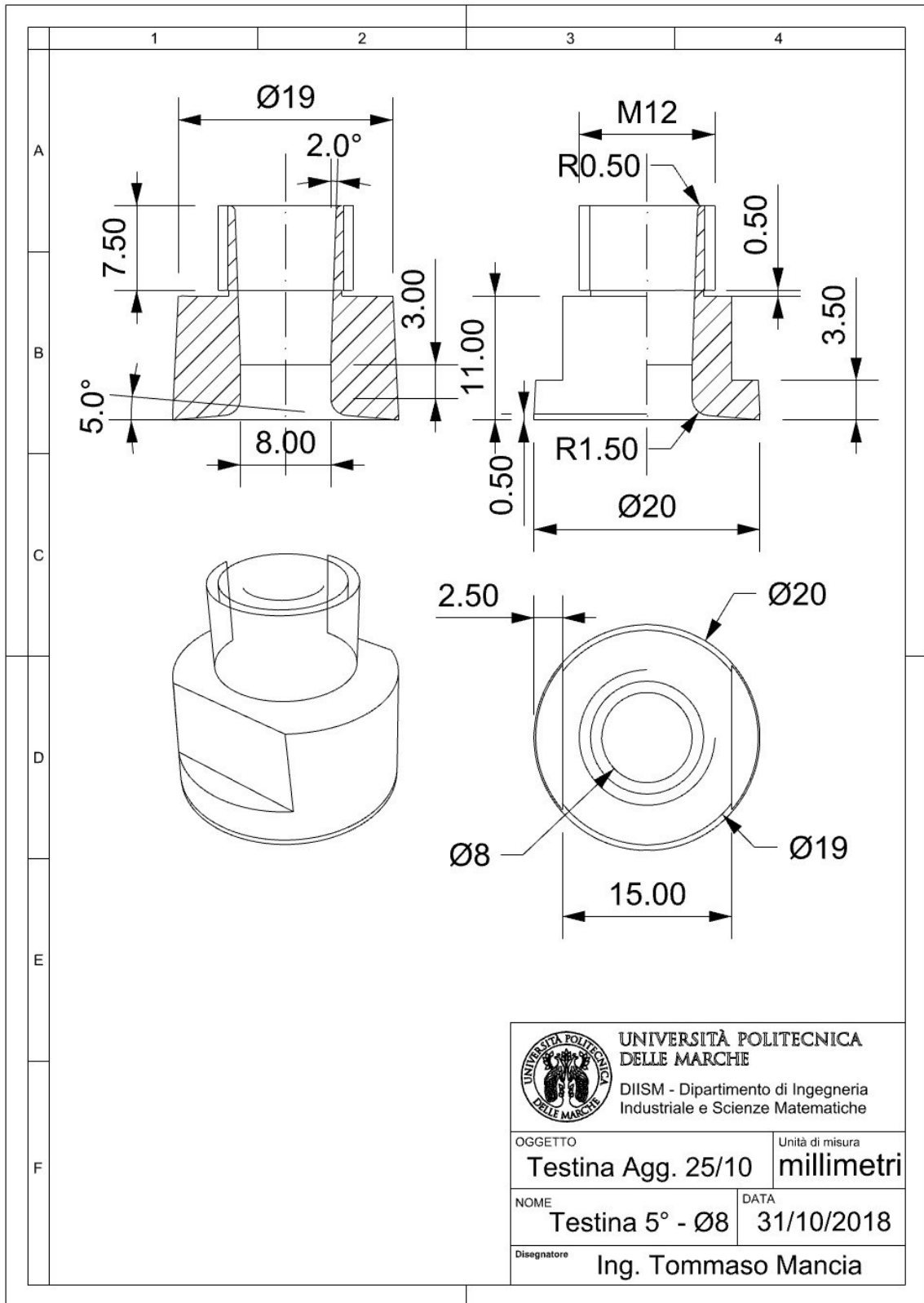




**ALLEGATO 3: disegno tecnico Piastra Base**



**ALLEGATO 4: disegno tecnico Testina 5° - Ø8**



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Thomas, W., et al. (2010). *Discovery Invention and Innovation of Friction Technologies for the Aluminium Industries. New Frontiers in Light Metals: Proceedings of the 11th International Aluminium Conference INALCO 2010*, IOS Press.
- [2] Thomas, W. And R. Fenn "JOINING AND MATERIAL PROCESSING BY FRICTION BASED TECHNOLOGY-AN INTRODUCTION"
- [3] Manchiraju, K. (2012). *Direct Solid-State Conversion of Recyclable Metals and Alloys*, Southwire Company.
- [4] Trang, W. And A. P. Reynolds (2010). "Production of wire via friction extrusion of aluminium alloy machining chips." *Journal of Materials Processing Technology* 210(15): 2231-2237.
- [5] Sharfzadeh, M., et al. (2015). "Evaluation of wear and corrosion resistance of pure Mg wire produced by friction stir extrusion." *Transaction of Nonferrous Metals Society of China* 25(6).
- [6] *Influence of Process Parameters on the Product Integrity in Friction Stir Extrusion of Magnesium Alloys* Dario Baffi, Gianluca Buffa and Livan Fratini.
- [7] *Magnesium Technology 2002* Edited by H.I. Kaplan TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2002. "RECYCLING OF DIFFERENT TYPES OF MAGNESIUM SCRAP".
- [8] W. Domke, *Vademecum Materiaoznawstwa*, PWN, Warszawa, 1989.
- [9] M. Samuel, *A new technique for recycling aluminium scrap*. *Journal of Materials Processing Technology*, 3138-3142.
- [10] <https://www.cial.it/>
- [11] F. Ciarapica, A. D'Orazio, A. Forcellese, M. Bevilacqua, M. Simoncini << Sustainability analysis of friction stir welding of AA5754 sheets >>
- [12] <http://www.openlca.org/>
- [13] *Il metodo LCA applicato all'alluminio*, Matteo Piazza, Università degli studi di Padova, 2013.
- [14] R. Zare, J. Nouri, M.A. Amdoli, F. Atabi << Life cycle assessment of the secondary extruded aluminum production process in industry city of Arak >>
- [15] [http://icarifiuti.net/wiki/Metodi\\_per\\_la\\_valutazione\\_del\\_danno](http://icarifiuti.net/wiki/Metodi_per_la_valutazione_del_danno)

[16] <https://nexus.openlca.org/>

[17] <https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2015/11/LCIA-METHODS-v.1.5.4.pdf>

[18] <https://www.focus.it/ambiente/ecologia/alluminio-riciclo-raccolta-differenziata>

[19] [http://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2015-2017/processi-e-macchinari-industriali/rds\\_par2015-068.pdf](http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2015-2017/processi-e-macchinari-industriali/rds_par2015-068.pdf)

[20] <<Università degli Studi di Padova Facoltà di Ingegneria Dipartimento di tecnica e gestione dei sistemi industriali Tesi di Laurea di primo livello Il metodo LCA applicato all'alluminio Relatore Ch. Mo Prof. Mirto Mozzon Corelatore Ch. Mo Prof. Rino A >>, Univ. degli Stud. Di Padova Fac. Di Ing. Dip. Di Tec. E Gest. Dei Sist. Ind. Tesi di Laurea di primo livello Metod. LCA Appl. All'Allum. Relat. Ch. Mo Prof. Mirto Mozzon Corelatore Ch. Mo Prof. Rino A.

[21] *Model Answers to the Exercises from openLCA Training.*

[22] W.Tang e A.P. Reynolds, << Production of wire via friction extrusion of aluminium alloy machining chips >>, *J. Mater.Process.Technol.*, vol.210, n.15