

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA DEI
MATERIALI

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria dei materiali

INFLUENZA DEI PARAMETRI DI PROCESSO
SULL'USURA ADESIVA NELLO STAMPAGGIO A
CALDO DI LAMIERA IN LEGA DI ALLUMINIO
7075

Relatore: Prof. Stefania Bruschi

Laureando: Michele Marini

ANNO ACCADEMICO 2017 – 2018

Indice

1 INTRODUZIONE	6
1.1 PROBLEMA INDUSTRIALE	6
1.2 PROBLEMA SCIENTIFICO	7
1.2.1 <i>TRIBOLOGIA</i>	7
1.2.2 <i>ATTRITO</i>	8
1.2.3 <i>USURA</i>	12
1.2.4 <i>LUBRIFICAZIONE</i>	14
1.3 STATO DELL'ARTE	17
2 MATERIALI	19
2.1 AL7075	19
2.2 UTENSILE	21
2.3 LUBRIFICANTE	22
3 APPROCCIO	23
4 EQUIPAGGIAMENTO E PIANO SPERIMENTALE	25
4.1 DUROMETRO	25
4.2 TRAZIONE	27
4.3 PROFILOMETRO E MICROSCOPIO ELETTRONICO	29
4.4 MACCHINA DI LUBRIFICAZIONE	31
4.5 MACCHINA STRIP DRAWING	41
4.5.1 <i>TARATURA MACCHINA STRIP DRAWING</i>	48
4.6 STRUMENTI PER LUCIDATURA E ANALISI METALLOGRAFICA	50
4.6.1 <i>LUCIDATURA DEL PUNZONE</i>	50
4.6.2 <i>ANALISI METALLOGRAFICA</i>	52
5 RISULTATI	55
5.1 TRATTAMENTI TERMICI E MICROGRAFIE	55
5.2 LUBRIFICAZIONE	58
5.3 RISULTATI PROVE DI TRAZIONE	59
5.3.1 <i>PROVE A TEMPERATURA AMBIENTE CON LAMIERA SOLUBILIZZATA</i>	60
5.3.2 <i>ANDAMENTO DEL CARICO DI ROTTURA SU CAMPIONI T6 E SOLUBILIZZATI</i>	61
5.4 RISULTATI PROVE DI DUREZZA	64
5.4.1 <i>DUREZZA DE PUNZONE</i>	64
5.4.2 <i>CONFRONTO TRA SOLUBILIZZAZIONE DI 10 E 35 MINUTI</i>	66
5.4.3 <i>ANDAMENTO DELLA DUREZZA SU CAMPIONI T6 E SOLUBILIZZATI</i>	67

5.5 CONFRONTO TRA DUREZZE E CARICO DI ROTTURA	68
5.6 RISULTATI STRIP DRAWING	71
<i>5.6.1 RISULTATI SINGOLA PROVA STRIP</i>	71
<i>5.6.2 CONFRONTO TRA COEFFICIENTI DI ATTRITO AL VARIARE DEI PARAMETRI DI PROCESSO</i>	74
5.7 ANALISI DELLE SUPERFICI	79
6 CONCLUSIONI	91
<hr/>	
7 BIBLIOGRAFIA	93

Sommario

I più recenti sviluppi di veicoli a motore, ed in particolare la ricerca nel settore *automotive*, vertono verso l'utilizzo di leghe metalliche con rapporti resistenza-massa via via più elevati al fine di migliorare le prestazioni, ridurre i consumi e di conseguenza l'emissione di inquinanti. Le leghe di alluminio delle serie 7xxx sono particolarmente indicate grazie alle loro proprietà meccaniche e chimiche, tuttavia sono caratterizzate, oltre che da una buona resistenza, da una scarsa formabilità a temperatura ambiente che rende difficoltoso il processo di formatura. In particolare rendendosi necessario lavorare a temperature elevate, è importante controllare la tribologia del processo con attenzione ulteriore ai fenomeni di attrito, usura ed adesione del materiale agli stampi.

Il mio lavoro di tesi si è concentrato sulla lega di alluminio 7075, con il fine di verificare come i parametri di processo vadano ad influire sulla buona riuscita del processo di formatura a caldo di lamiera. Sono state investigate temperature tra i 200°C ed i 450°C, pressioni tra 5MPa e 10MPa e velocità di deformazione tra 10 mm/s e 50mm/s; con l'utilizzo di grafite come lubrificante e il ricorso a trattamenti termici in modo da ottenere la lega allo stato T6 o solubilizzata. Sono stati quindi valutati i coefficienti di attrito medi del processo di stampaggio al variare di uno o più dei parametri sopra descritti oltre ad una generale caratterizzazione dei materiali del manufatto e dello stampo.

Abstract

The latest developments regarding motor vehicles, and in particular the research in the automotive sector, lead to the use of alloys with higher strength-to-mass ratio in order to improve performance, lower the consumption and by doing so lowering the polluting emissions. Aluminum alloys in the 7xxx series are specially indicated for this purpose due to their chemical and mechanical properties. However they have a good resistance but poor formability at room temperature, leading to difficulties in the forming process. Since the process needs to be carried out at high temperature it is important to control the tribology with further attention to the friction, wear and galling phenomena.

My work was focused on the AA7075 alloy, with the aim to discover how the process parameters affect the hot forming process of metal sheets. The temperature varied between 200°C and 450°C, the pressure between 5 MPa and 10 MPa and the drawing speed between 10 mm/s and 50mm/s; using graphite as a lubricant and making the use of heat treatments in order to get the alloy in the T6 state or annealed. Mean friction coefficients during the hot stamping process have been measured, varying one or more than one of the process parameters, besides a general characterization of the sheet's and die's materials.

1 Introduzione

1.1 Problema industriale

La presenza crescente dell'alluminio nei processi industriali ha richiesto maggiori studi e test per poter ottimizzare il processo tecnologico. In particolare per quanto riguarda il campo *automotive* si è resa interessante la possibilità di sostituire le attuali leghe ferrose per la scocca di autoveicoli con leghe di alluminio delle serie 6xxx o 7xxx, date le loro proprietà meccaniche favorevoli, soprattutto se rapportate alla massa del pezzo finito. La ricerca verte infatti verso il continuo alleggerimento, così da migliorare le prestazioni, ridurre i consumi e le emissioni in atmosfera di gas inquinanti, in accordo con la tendenza globale dell'industria ad una maggiore attenzione verso il problema ambientale.

Vi sono però alcuni inconvenienti nella produzione di manufatti con questo tipo di leghe metalliche; presentano infatti una bassa formabilità a temperatura ambiente ed un'elevata tendenza al ritorno elastico [1] in fase di stampaggio che rende necessaria una lavorazione ad alta temperatura con tutte le criticità che ne derivano.

Si necessita infatti di una lubrificazione che nel processo produttivo riduce il coefficiente di attrito, migliorando l'interazione pezzo-utensile, diminuendo il calore generato dall'interazione di questi ultimi che causerebbe un indesiderato cambiamento microstrutturale con conseguente variazione del comportamento meccanico. Permette inoltre lo scorrimento tra lamiera e stampo, migliora la finitura superficiale delle lavorazioni per asportazioni di truciolo e riduce l'usura di stampi ed utensili. Ad alte temperature vi è poi la tendenza di queste leghe ad aderire agli stampi (solitamente in acciaio per lavorazioni a caldo) dando così pezzi difettosi e inutilizzabili, oltre a far nascere la necessità di pulire e lucidare degli stampi nel caso l'alluminio vi aderisse, rallentando il processo e riducendo la produttività. Questo fenomeno è strettamente legato alla temperatura, alla pressione ed alla velocità di stampaggio; è quindi essenziale conoscere come tali parametri vadano ad influire sulla buona riuscita del processo produttivo. Non è trascurabile infine la microstruttura del materiale costituente la lamiera di base; le leghe di alluminio da lavorazione plastica infatti possono variare sensibilmente le loro caratteristiche a seconda della loro microstruttura e del loro grado di invecchiamento. A tale proposito è importante conoscere lo stato iniziale del materiale e come ciò vada ad influire sui parametri di processo e sulla qualità del manufatto, ed eventualmente poter effettuare trattamenti termici in modo da ottenere la microstruttura di base desiderata ed ottimale per la lavorazione.

Risulta quindi chiaro come una molteplicità di fattori possano influire sulla riuscita ottimale dello stampaggio a caldo di lamiere di alluminio, il che rende essenziale una conoscenza approfondita dei processi ed una caratterizzazione completa dei materiali di base e dei manufatti ottenuti, in modo da poter variare con precisione i parametri interessati a fine di ottenere il processo produttivo adatto alle esigenze industriali.

1.2 Problema scientifico

1.2.1 Tribologia

La tribologia è la scienza che studia l'interazione tra due corpi in moto relativo; da essa sono stati sviluppati concetti come l'attrito, l'usura e la lubrificazione. La coniazione del termine tribologia avvenne nel Jost Report del 1966 [2].

la Figura 1.1 rappresenta un sistema tribologico, comprensivo di quattro elementi: le due superfici di contatto, un elemento interposto tra le due superfici (lubrificante) e infine l'ambiente in cui avviene l'interazione. Poiché i due corpi possiedono velocità di direzione analoga ma verso opposto danno origine ad un moto relativo tra i due. Il contatto tra le due superfici è dovuto alla forza che spinge uno dei due corpi contro l'altro, e può essere data sia dal peso proprio del corpo o da forze esterne.

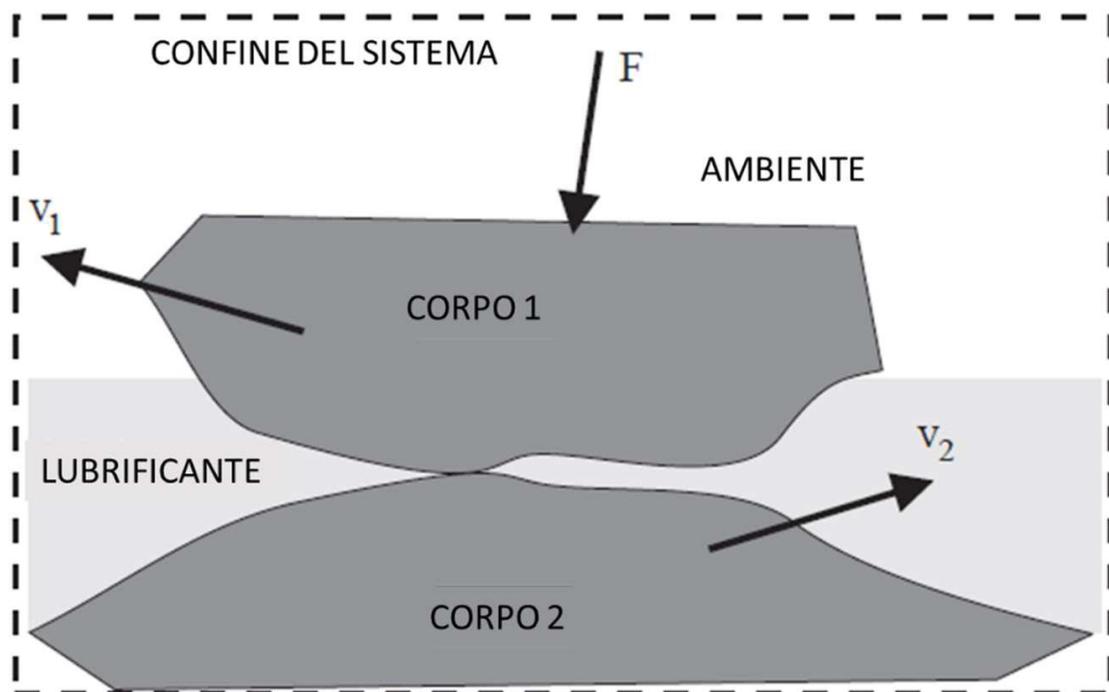


Figura 1.1 Schema di un sistema tribologico comprensivo di due corpi in movimento relativo e lubrificante [3]

1.2.2 Attrito

L'attrito può essere definito come: “la resistenza al moto relativo tra due corpi in contatto tra loro sotto l'azione di una forza esterna” [4]. Se due corpi a contatto si muovono con moto relativo, qualora vi sia una forza perpendicolare al piano di scorrimento, ne nasce una seconda, parallela alla direzione del moto ma con verso opposto, che si oppone a tale moto. L'attrito è un fenomeno che dissipa quindi energia sotto forma di calore. La teoria più accreditata per spiegare il fenomeno dell'attrito è la teoria dell'adesione. Due superfici a contatto infatti, per quanto sembrano piane a livello macroscopico, non poggiano mai l'una sull'altra sull'intera superficie, ma solo su dati punti, che ne costituiscono una piccola parte come illustrato in Figura 1.2. Tale frazione dell'area viene denominata area reale di contatto

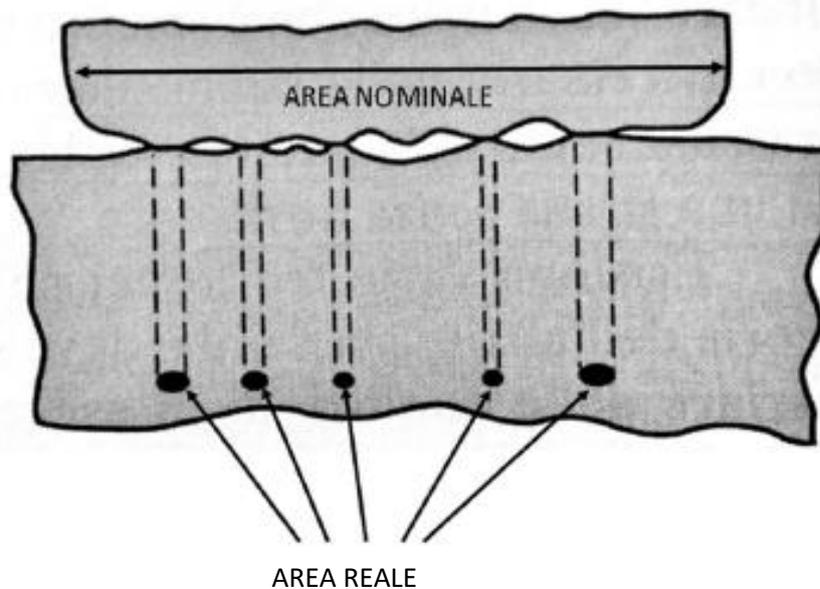


Figura 1.2 Area di contatto nominale e reale tra due corpi in moto relativo

Il carico dovuto alla forza peso, o comunque alla forza perpendicolare al movimento relativo non è quindi sostenuto dall'intera superficie, ma solo dalle asperità delle due facce che sono in contatto. Per di basse pressioni di contatto si avrà deformazione elastica di tali asperità, e sarà sufficiente quindi applicare una piccola forza per generare il moto relativo tra i due corpi. Per pressioni più elevate invece si hanno deformazioni maggiori, si passa da regime elastico a plastico ed iniziano ad insorgere

giunzioni microscopiche tra le parti dei due corpi in contatto (microgiunzioni o microsaldature), andando così verso uno stato di adesione. All'aumentare del carico, le asperità si deformano plasticamente riducendo la distanza tra le effettive superfici dei due corpi e si vengono a creare nuovi punti di contatto, riducendo la pressione. Alcune asperità vengono deformate rimanendo in campo elastico, altre in campo plastico. Il fenomeno dell'adesione non è spiegabile univocamente, ma coinvolge molteplici aspetti: interazioni atomiche all'interno di una superficie e tra superfici, solubilità reciproca dei due materiali ed eventuali fenomeni diffusivi. Le forze di legame dipendono dalle proprietà meccaniche e fisiche dei due materiali a contatto, e di conseguenza dalla temperatura di processo, dalle pressioni, dallo spessore degli ossidi superficiali e da eventuali contaminanti presenti all'interfaccia

Il coefficiente di attrito μ all'interfaccia è definito come:

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{\tau AR}{\sigma AR} = \tau \sigma \quad (1.1)$$

Dove N è il carico Normale, F è la Forza da applicare per avere moto relativo, τ è la resistenza al taglio della giunzione e σ è la tensione normale.

Si noti come una maggiore forza di legame tra le giunzioni si traduca in una maggiore forza da applicare per rompere tali giunzioni ed indurre moto relativo tra i due corpi e viceversa; giunzioni deboli necessiteranno di forze minori per essere vinte. Inoltre, si può osservare che aumentando la durezza delle superfici, si riduce la tensione di taglio da applicare, e si diminuisce così il coefficiente di attrito μ . Difatti poiché le asperità sono circondate dal materiale stesso, lo sforzo di snervamento al quale si passa da regime elastico a regime plastico equivale alla durezza del materiale [5].

Questa formulazione del coefficiente d'attrito non riesce però ad esprimere correttamente l'andamento del coefficiente di attrito all'aumentare del carico normale N . Si è visto infatti che oltre un certo valore di N il coefficiente di attrito rimane costante come mostrato in Figura 1.3

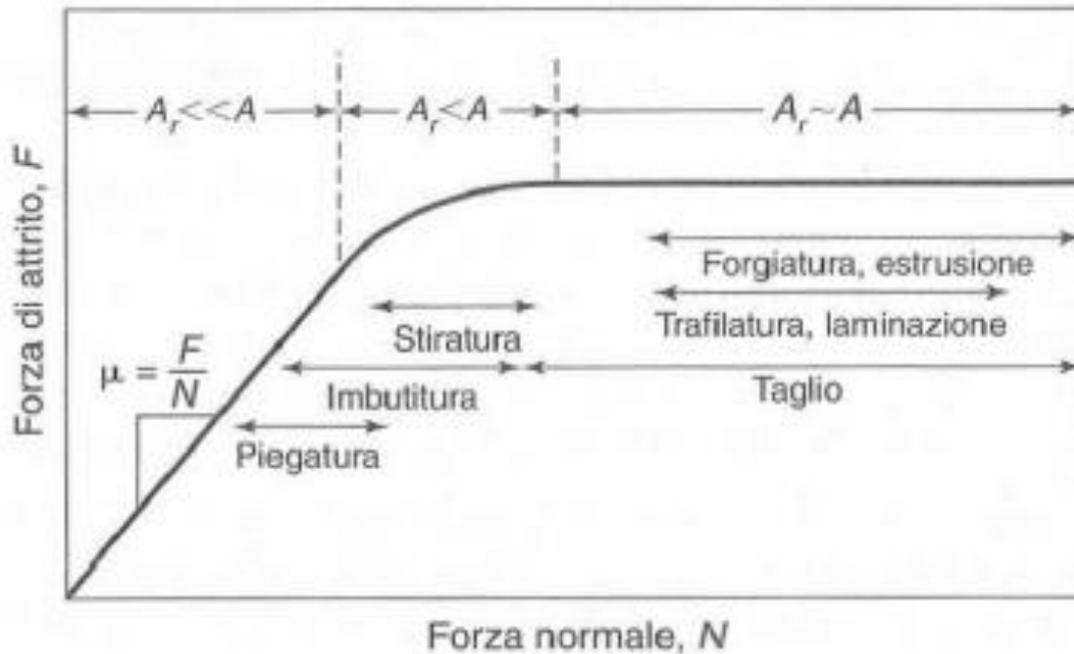


Figura 1.3 Variazione della forza di attrito al variare della forza normale

Un approccio che tenga conto di questo effetto, dovuto a Tresca, è quello di definire un fattore di attrito o fattore di taglio m nel seguente modo:

$$m = \frac{\tau_i}{k} \quad (1.2)$$

Dove τ_i è la resistenza al taglio dell'interfaccia e k è la tensione di snervamento a taglio del materiale meno duro.

Una seconda teoria sull'attrito è la teoria abrasiva; essa prevede che la forza F , ovvero la forza tangenziale da applicare per ottenere il moto relativo sia uguale a quella necessaria alle asperità del corpo più duro, o alle particelle dure presenti all'interfaccia, per deformare plasticamente e produrre solchi o graffi sulla superficie del corpo meno duro. Questo fenomeno, detto solcatura o *plowing*, si può distinguere in due categorie: la solcatura per deformazione plastica del corpo più duttile, e la creazione di graffi per asportazione di micro-trucioli e frammenti di materiale.

Si può quindi stabilire il valore del coefficiente di attrito come la sommatoria dei tre i valori dei riguardanti dei singoli aspetti rappresentati in Figura 1.4

$$\mu_{totale} = \mu_{adesione} + \mu_{solcatura} + \mu_{deformazione\ asperità} \quad (1.3)$$

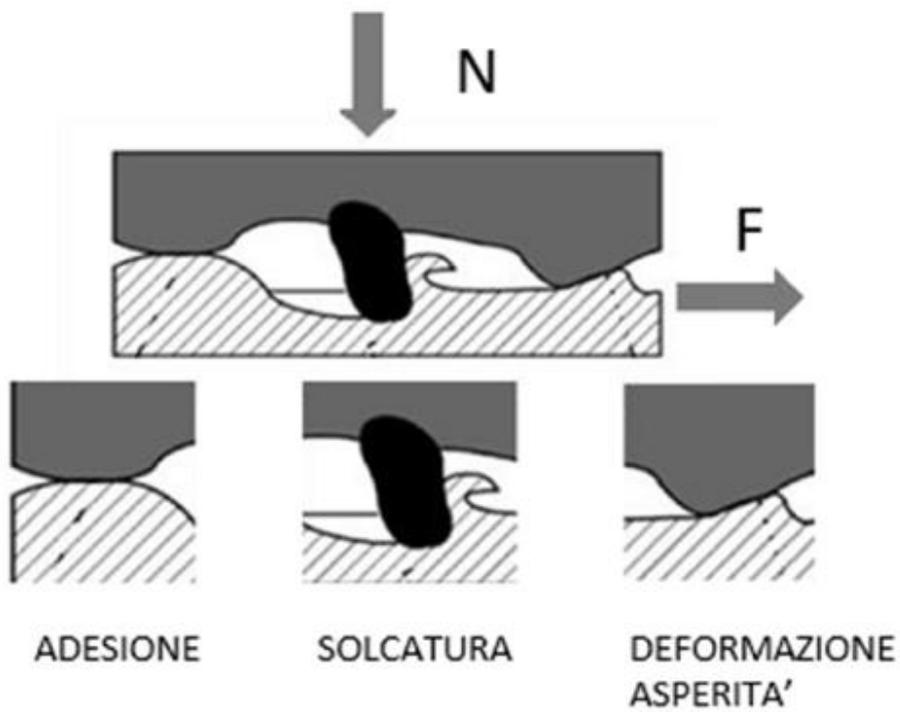


Figura 1.4 *Rappresentazione dei tre contributi al coefficiente di attrito*

1.2.3 Usura

L'usura è definita come: “danno alla superficie di un solido, che normalmente comporta una progressiva perdita o spostamento di materiale, a causa del moto relativo tra la superficie ed uno o più corpi” [6]. L'usura si può dividere fondamentalmente in due diversi fenomeni: l'usura adesiva e l'usura abrasiva. La prima è diretta conseguenza del fenomeno di adesione nell'attrito: quando due asperità a contatto si deformano plasticamente a causa del carico normale infatti, creano delle microsaldature ed il materiale deformato incrudisce. In seguito all'applicazione di una forza parallela alla superficie di contatto, ed alla conseguente rottura delle microsaldature, parte del materiale più debole può rimanere attaccato al materiale più duro; grazie ai fenomeni di diffusione e solubilità reciproca dei due materiali. Successivamente qualora il moto relativo tra le due superfici si protragga queste particelle si possono staccare diventando così frammenti di usura. In caso di severe condizioni di carico o di giunzioni resistenti, l'usura adesiva può essere definita rigatura, sfregamento, lacerazione o grippaggio. Le Figure 1.5 e 1.6 seguenti mostrano rispettivamente uno schema del fenomeno e gli effetti sul materiale.



Figura 1.5 a) Formazione dei punti di contatto b) Formazione di microgiunzioni c) Risultato dell'usura adesiva



Figura 1.6 *Organo meccanico successivamente a fenomeni di usura adesiva*

L'usura abrasiva è principalmente causata da superfici scabre e dure o da superfici contenenti particelle dure che scorrono all'interfaccia. I frammenti di usura sono principalmente trucioli e schegge che creano abrasioni e graffi sulla superficie più morbida, come mostrato in Figura 1.7

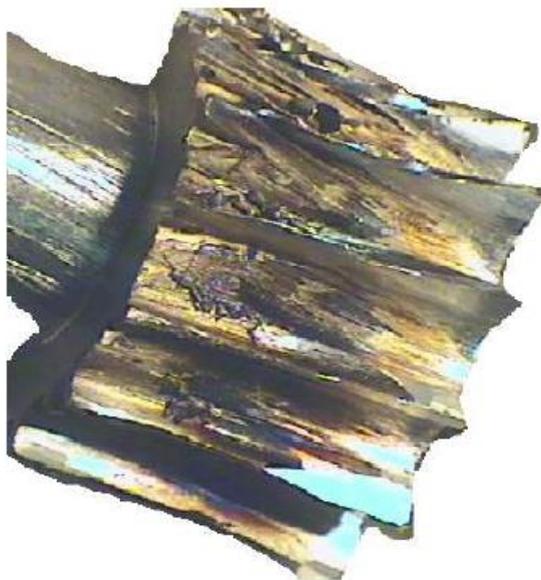


Figura 1.6 *Organo meccanico soggetto ad usura abrasiva*

L'instabilità termodinamica della maggior parte dei metalli fa sì che vi sia uno strato di ossidi che si formano sulla superficie a contatto con l'aria; ciò può influire sul fenomeno dell'usura adesiva poiché varia le condizioni superficiali. Se l'ossido è fortemente legato al metallo sottostante e non vi sono carichi sufficienti a rompere lo strato di ossido ad esempio, questo può ridurre l'usura, aiutando lo scorrimento delle asperità l'una sull'altra. Se invece l'ossido non è solidale con il metallo, o i carichi sono sufficienti a romperne lo strato, si possono creare frammenti di usura dovuti alla frattura dell'ossido, oltre ad esporre le asperità del metallo che possono andare incontro a microsaldature, alimentando il processo di adesione.

1.2.4 Lubrificazione

Per lubrificante si intende un qualsiasi materiale, che venga interposto tra due superfici in moto relativo e con il fine di ridurre attrito ed usura. I lubrificanti più diffusi sono i liquidi a base di olio minerale o sintetico, con l'aggiunta di additivi che ne migliorano le caratteristiche richieste dai vari utilizzi, quali capacità di carico, viscosità e resistenza all'ossidazione. Un'altra serie di lubrificanti largamente utilizzati sono i grassi, formati da oli con l'aggiunta di un addensante. Essi vengono utilizzati ogniqualvolta non si possa adoperare un olio. I lubrificanti solidi sono caratterizzati da una struttura lamellare che permette loro di scorrere ad alte temperature e pressioni. Essi vengono impiegati quando un olio non sarebbe in grado di sostenere le alte pressioni poiché uscirebbe dalle sedi, o quando le temperature siano tali da causare la carbonizzazione della base liquida. Particolare attenzione verrà rivolta ai lubrificanti solidi, poiché sono quelli utilizzati nella campagna sperimentale successivamente descritta.

Le tipologie più diffuse di lubrificante solido sono: disolfuro di molibdeno, grafite, acido borico ed il nitrato di boro. La capacità di lubrificazione è dovuta alla loro struttura lamellare o a cristalli stratificati schematizzata nella Figura 1.7 e nello specifico per la grafite in Figura 1.8

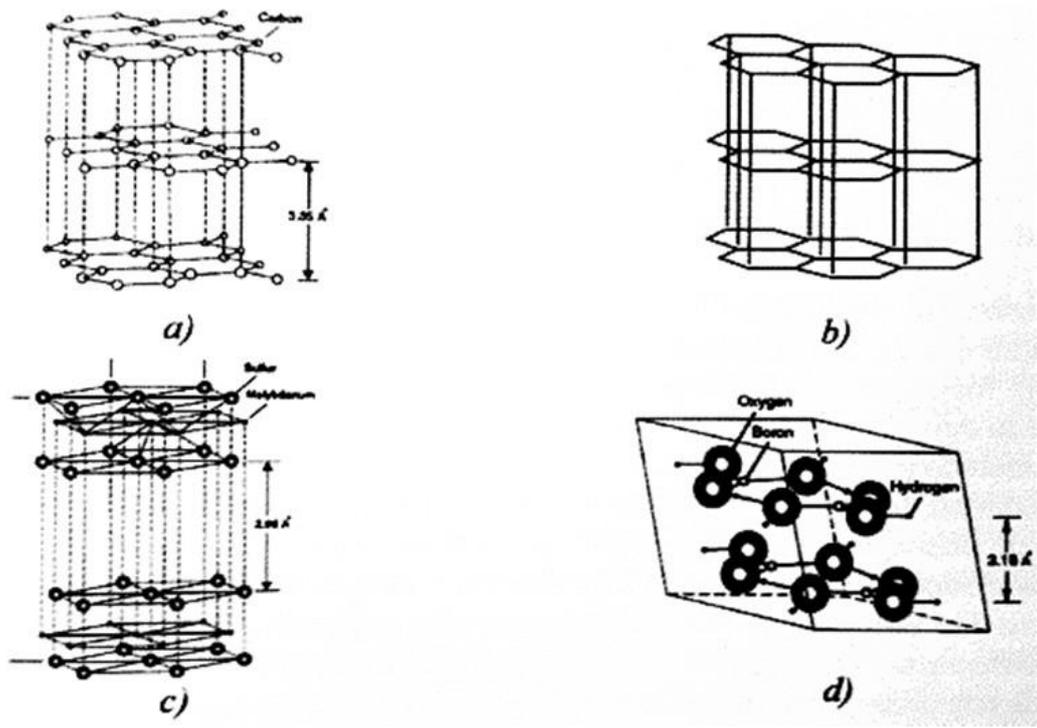


Figura 1.7 *Struttura lamellare tipica dei lubrificanti solidi*

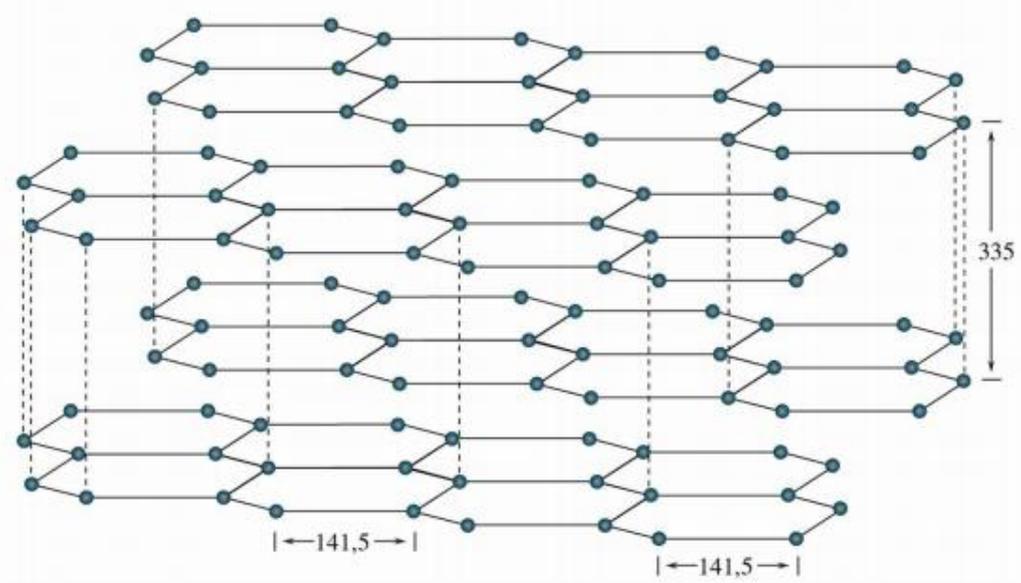


Figura 1.8 *Struttura lamellare della grafite, che ne permette l'utilizzo come lubrificante solido*

I lubrificanti solidi presentano alcune criticità: sono infatti generalmente cattivi conduttori termici, hanno una vita ad usura limitata e nel lungo periodo tendono a degradarsi ed il loro posizionamento non è facile come per altri lubrificanti. Come descritto in seguito però tali inconvenienti sono ampiamente compensati dalle caratteristiche uniche di questi lubrificanti.

I lubrificanti solidi possono interagire con le due superfici in tre modi:

- Scorrimento intrafilm (*intrafilm flow*): il lubrificante aderisce alle superfici e si comporta come un fluido ad altissima densità per assecondare il moto relativo;
- Scorrimento tra interfacce (*interface sliding*): il lubrificante aderisce solo ad una faccia e permette il facile scorrimento dell'altra su di esso;
- Scivolamento tra film (*interfil sliding*): il lubrificante aderisce ad entrambe le superfici ma si separa in due distinti film o pellicole che scorrono una sull'altra. In questo caso la forza di attrito è legata alla forza di legame del lubrificante. [7]

La Figura 1.9 schematizza le tre modalità di azione dei lubrificanti solidi.

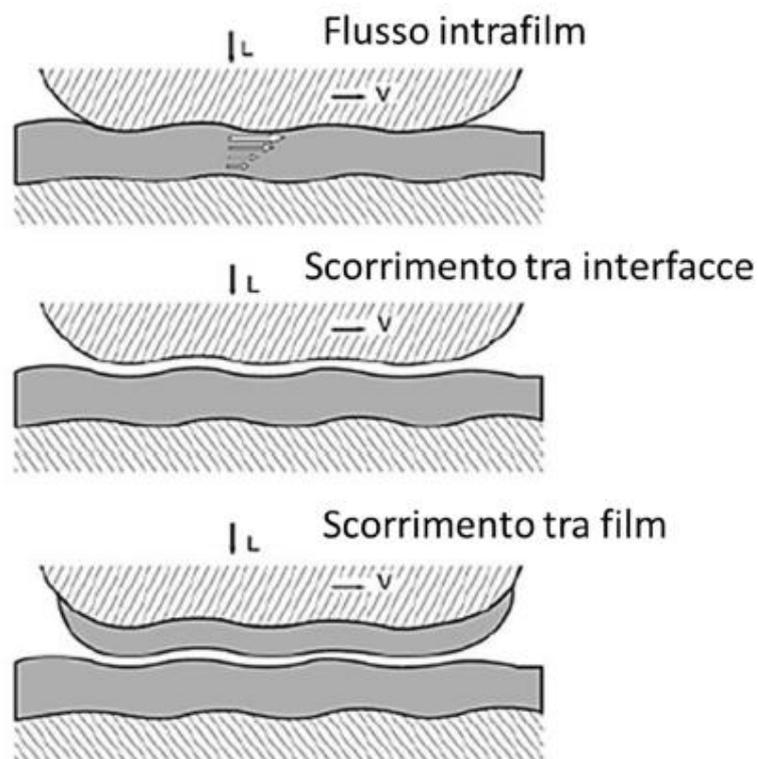


Figura 1.9 Meccanismi di funzionamento dei lubrificanti solidi

1.3 Stato dell'arte

Vari studi sono stati condotti, specialmente all'interno del dipartimento di ingegneria industriale dell'Università di Padova, riguardo lo stampaggio a caldo di lamiere di alluminio e come i parametri influenzino la buona riuscita del processo.

Ghiotti et al. [8] hanno dimostrato come la grafite sia il lubrificante migliore per questo tipo di processo, tra i vari da loro analizzati, in buon accordo con la pratica industriale.

Hanno infatti effettuato *Strip Drawing Tests* su lamiere di alluminio 6016 con varie pressioni di contatto a temperature di 300°C e 400°C, utilizzando lubrificanti a base di nitrato di boro, disolfuro di molibdeno e grafite. Il BN si è dimostrato non adatto in quanto poco resistente alle alte temperature e poiché forma uno strato piuttosto spesso che tende a rompersi durante il processo, dando così marcati fenomeni di adesione. Si è verificato inoltre come il coefficiente di attrito non resti costante durante tutto il test, ma abbia un'improvvisa impennata nel caso si abbia adesione della lamiera al punzone. Il lubrificante a base di grafite si è inoltre dimostrato quello che produce lo strato più sottile sulla superficie della lamiera, nonché il più adatto alle due temperature considerate, facendo in modo che il coefficiente di attrito cali all'aumentare della pressione di stampaggio esercitata.

Medea et al. [9] hanno invece messo a punto un apparato di deposizione del lubrificante che permette un controllo ottimale della deposizione. Tale apparato si basa sulla nebulizzazione di una soluzione contenente grafite sulla lamiera previamente riscaldata, così da far evaporare l'acqua ed ottenere una lubrificazione controllata ed omogenea, depositando la quantità ottimale di grafite di 1,5/2 g/m².

È importante sottolineare come questi ed altri studi non riguardassero specificamente la lega Al7075, sulla quale mi sono concentrato durante il mio lavoro di tesi, ma si possano comunque estenderne i risultati anche a questa specifica composizione. Non sono stati di interesse infatti per lo studio i dati numerici o i risultati specifici, ma più in generale i processi e le tendenze osservate al variare dei parametri in gioco. Queste pubblicazioni sono state la base da cui partire per poter sviluppare la campagna di prove sperimentali, escludendo o minimizzando l'incertezza dovuta ad alcuni fattori (i.e. quale lubrificante utilizzare, come depositarlo, in che quantità e come ottenerla con lo specifico macchinario) e potendosi così concentrare sui parametri di interesse dello studio e su come favorissero od ostacolassero il processo di stampaggio a caldo.

2 Materiali

2.1 Al7075

Nell'ultimo secolo la produzione di alluminio è aumentata enormemente, fino a giungere a circa 30 milioni di tonnellate nell'anno 2000, divenendo paragonabile in volume alla produzione di acciaio [10]. La causa è da ricercare nelle peculiari caratteristiche di questo materiale, la sua leggerezza (specialmente se rapportata alla resistenza), la generale buona resistenza ad ossidazione, lavorabilità, saldabilità e riciclabilità. La divisione più generale delle leghe di alluminio è tra quelle da fonderia e quelle da lavorazione plastica: le prime sono destinate alla produzione di getti per colata mentre le seconde vengono commercializzate sotto una varietà di forme (lingotti, billette, placche) e possono essere sottoposte a trattamenti termici e meccanici al fine di migliorare le proprietà meccaniche del prodotto finito.

In particolare le leghe da lavorazione plastica vengono catalogate con dei codici a seconda della composizione chimica e dei trattamenti termo-meccanici applicati. [11]

Le leghe della serie 7xxx sono leghe a base di alluminio, zinco e rame; sono leghe "da tempra" ovvero che rispondono a trattamenti termici di invecchiamento. Tale trattamento consiste nel portare la lega ad alta temperatura, così che tutti gli elementi alliganti formino una soluzione solida monofasica, e raffreddare velocemente a dare una soluzione solida monofasica sovrassatura. Con trattamenti termici consistenti di opportune combinazioni di tempo e temperatura è possibile quindi far precipitare dati componenti della lega in modo controllato, così da ottenere il massimo di durezza e resistenza; tale processo prende il nome di invecchiamento. Le criticità di questo trattamento sono la possibilità di invecchiare troppo (o troppo poco) il materiale ottenendo proprietà deludenti, e la difficoltà di integrare il trattamento termico nel processo produttivo. Queste leghe sono inoltre trattabili attraverso procedimenti meccanici.

La serie 7xxx è particolarmente indicata per applicazioni aerospaziali e per veicoli a motore, date le sue buone caratteristiche meccaniche, la buona saldabilità, lavorabilità e la possibilità di essere anodizzata; è invece poco utilizzata per altre applicazioni (ad esempio alimentari) data la scarsa resistenza all'ossidazione se paragonata ad altre leghe di alluminio.

La lega utilizzata nella campagna sperimentale è la lega Al7075 conosciuta anche col nome commerciale di Ergal. La composizione e le principali caratteristiche di questa lega sono riportate in Tabella 2.1

Tabella 2.1 Composizione e proprietà della lega Al7075 dichiarate dal fornitore [12]

Elemento	Quantità in wt%
Mg	2.1 – 2.9
Si	≤ 0.4
Cr	0.18 – 0.28
Mn	≤ 0.3
Ti	≤ 0.2
Zn	5.1 – 6.1
Cu	1.2 – 2
Fe	≤ 0 – 5
Proprietà meccanica	Valore (MPa)
Modulo di Young	71100
Sforzo di Snervamento	470
Carico di rottura	540

La lega è stata fornita sotto forma di lamiera dello spessore di $2.0(\pm 0.1)$ mm, nella quale sono stati intagliati tramite taglio laser provini diversi per i differenti tipi di test effettuati, in direzione congruente alla direzione di laminazione, a 45° ed a 90° . La rugosità superficiale S_a della lamiera nello stato di fornitura era di $0.60 (\pm 0.10)$ μm , misurata tramite un profiometro 3D Sensofar™ Plux Neos come evidenziato in Figura 2.1. La lamiera è stata consegnata allo stato T6, ovvero solubilizzata e conseguentemente invecchiata artificialmente.

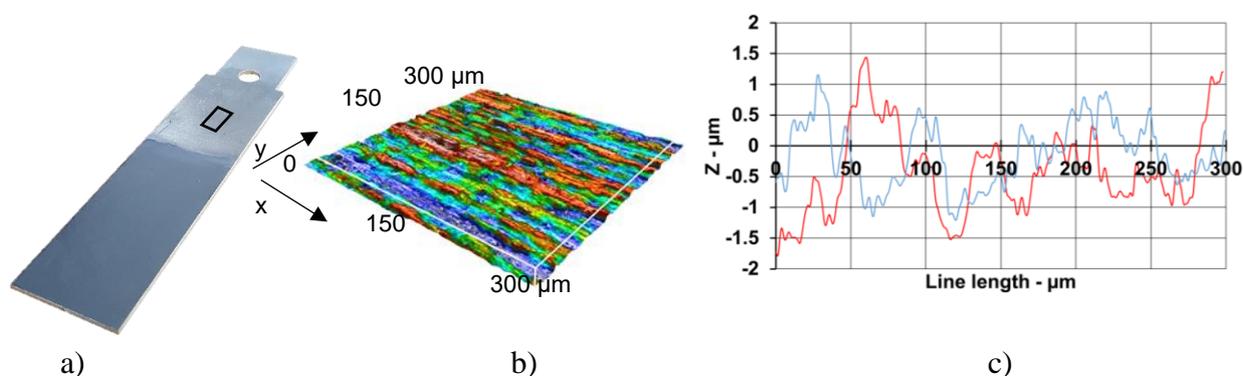


Figura 2.1 a) Campione con evidenziata la zona su cui è stata effettuata la profilometria b) Mappa 3D della superficie analizzata c) Profilometria; in rosso in direzione x, in blu in direzione y

2.2 Utensile

Uno dei principali test utilizzati è stato lo Strip Drawing Test, per il quale si necessita di un punzone di un materiale più duro dell'alluminio, a simulare l'azione dello stampo durante il processo di stampaggio. L'utensile in acciaio legato per lavorazioni a caldo EN X38CrMoV5 è stato temprato e rinvenuto per ottenere una durezza superficiale di 51(\pm 1) HRC e lucidato manualmente con carte abrasive al carburo di silicio fino ad una rugosità Ra inferiore a 0.1 μ m, coerentemente con la rugosità degli stampi utilizzati industrialmente per lo stampaggio di lamiere di alluminio. La Tabella 2.2 e la Figura 2.2 mostrano rispettivamente la composizione chimica ed un punzone con evidenziata la sua superficie

Tabella 2.2 Elementi alliganti del materiale del punzone e relativa composizione percentuale

Elemento	Quantità in wt%
C	0.39
Si	0.97
Mn	0.43
P	0.015
S	0.06
Cr	5.01
Mo	1.14
Ni	0.21
V	0.35

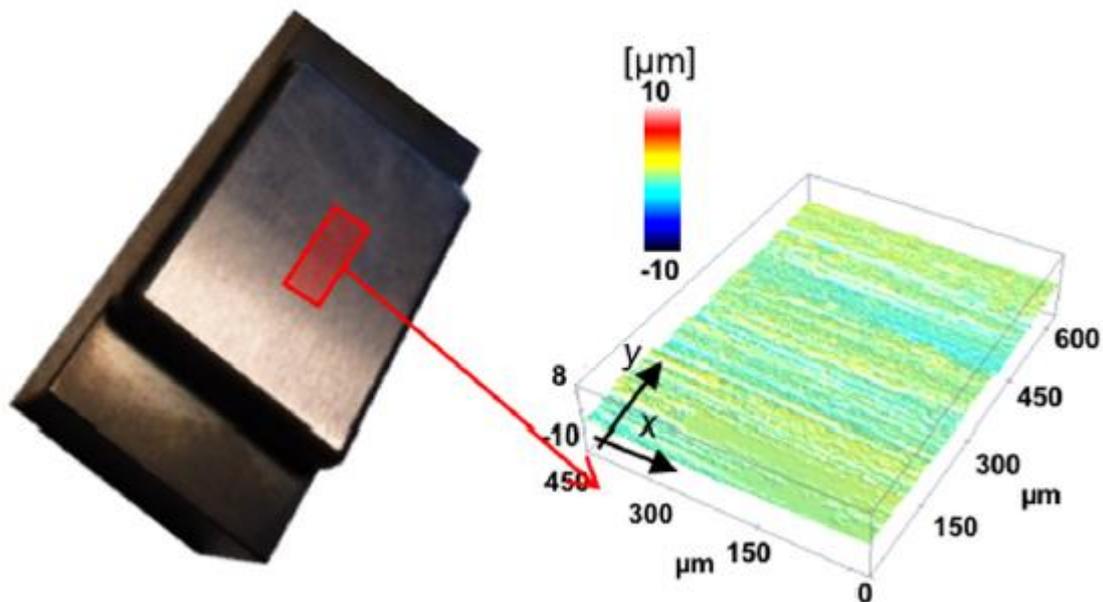


Figura 2.2 Superficie del punzone ed analisi al profilometro della relativa zona evidenziata

2.3 Lubrificante

Il lubrificante utilizzato, in accordo con la pratica industriale e con quanto riportato dai precedenti studi effettuati [8], è stato un lubrificante solido a base di grafite. È stato scelto il Bonderite® L-GP Aquadag, un gel tixotropico formato da polvere di grafite dispersa in acqua. Il 90% delle particelle di grafite ha una dimensione massima di 1 μm . Quando viene applicato sulla lamiera previamente riscaldata tramite l'apparato messo a punto, si ottiene l'evaporazione dell'acqua, e quindi un'ottimale copertura della lamiera stessa tramite lubrificante solido. Per ottimizzare l'applicazione il lubrificante è stato diluito in acqua demineralizzata in una percentuale del 15% e applicato per spruzzatura [9]. L'applicazione del lubrificante non modifica l'altezza dei picchi della rugosità della lamiera, poiché il liquido spruzzato tende a riempire le valli della rugosità superficiale.

3 Approccio

L'approccio sperimentale utilizzato non ha potuto prescindere dalla complessità del fenomeno osservato. Per quanto infatti lo stampaggio di lamiere sia un processo largamente utilizzato industrialmente, presenta dal punto di vista scientifico numerose questioni, soprattutto se effettuato a caldo e su leghe di alluminio. Si sovrappongono infatti effetti termodinamici, meccanici e chimici, il che non rende sempre facile individuare le cause dell'adesione agli stampi o di una generica cattiva riuscita del processo di stampaggio. Inoltre la presenza di grafite come lubrificante ha ulteriormente complicato la comprensione degli avvenimenti microscopici che avvengono durante lo stampaggio, sommando i suoi effetti a quelli della variazione di proprietà meccaniche dovute all'incremento di temperatura, ai fenomeni diffusivi termicamente attivati tra inclusioni e materiale del punzone e alla differenza tra pressione nominale applicata macroscopicamente e pressione effettiva sulle microscopiche asperità del materiale. Si è tentato quindi di effettuare test con range di variabilità dei parametri in gioco più ampi possibile, modificandone però una solo alla volta, così da risalire a come ciascuno effettivamente incidesse sull'esito della prova, le uniche costanti sono state il tipo di lega metallica (Al7075) e il lubrificante (Bonderite® L-GP Aquadag applicato come descritto per ottenere $1,5 \text{ g/m}^2$ di grafite). Si è scelto il coefficiente di attrito come indicatore della riuscita o meno del processo di stampaggio a caldo simulato dallo Strip Drawing Test, in quanto qualora si abbia usura adesiva si misura un rapido incremento del coefficiente stesso, mentre per prove senza adesione si stabilizza ad un valore costante. Gli stessi test con gli stessi parametri di processo sono stati ripetuti su campioni allo stato T6 e solubilizzati così come una generale caratterizzazione delle proprietà meccaniche, della durezza, delle superfici e della microstruttura. Si è scelto di solubilizzare il materiale, temprarlo in acqua così da "congelare" la microstruttura, e successivamente portarlo alla temperatura di test nel modo più veloce possibile preriscaldando le macchine di prova. In questo modo si è andati a simulare nel miglior modo possibile, compatibilmente con le risorse disponibili, il processo industriale di stampaggio in cui la lega viene solubilizzata in una fornace e successivamente trasferita ancora in temperatura all'interno degli stampi, dove avvengono contemporaneamente lo stampaggio ed il rapido raffreddamento del pezzo, poiché gli stampi hanno normalmente una temperatura largamente inferiore a quella del manufatto al momento dello stampaggio. Per questo stesso motivo le temperature di prova sono state comprese tra i $200 \text{ }^\circ\text{C}$ e i $450 \text{ }^\circ\text{C}$, dato che la temperatura di solubilizzazione di questa lega di alluminio è di $480 \text{ }^\circ\text{C}$ [13] e che difficilmente nei processi a caldo si opera a temperature inferiori ai $200 \text{ }^\circ\text{C}$. I test di trazione a caldo invece sono stati utili ad ottenere le curve di *flow-stress* del materiale nelle due condizioni, T6 e solubilizzato, sia con

il fine di osservare come variassero all'aumentare della temperatura nei due casi, sia per ottenere dati utili alla calibrazione dei parametri numerici per ulteriori studi basati su simulazioni agli elementi finiti del fenomeno.

4 Equipaggiamento e piano sperimentale

4.1 Durometro

Per le misure di durezza superficiale ad alta temperatura, sia su campioni di lamiera sia sul materiale del punzone, è stato utilizzato un durometro Instron-Wolpert Rockwell 2000, equipaggiato con una fornace elettrica autonoma che permette di effettuare test fino a 750°C. La camera riscaldante, opportunamente isolata, è raffreddata esternamente tramite uno scambiatore di calore ad acqua e dispone di un foro che permette di effettuare il test in temperatura senza dover surriscaldare l'indentatore tarato per la prova di durezza superficiale. I test sono stati effettuati su campioni di 10.0 x 10.00 x 2.0 (± 0.1) mm sia nello stato T6 che dopo solubilizzazione per quanto riguarda la lamiera, verificando la planarità di questi ultimi e l'assenza di bave residue dal taglio, che avrebbero potuto inficiare i risultati, e su campioni di 10.0 x 10.0 x 5.0 (± 0.1) mm sul materiale del punzone; esponendo al test le superfici trattate termicamente con tempra e rinvenimento. La camera riscaldante è stata previamente portata in temperatura così da ridurre il tempo di riscaldamento del campione minimizzando gli effetti deleteri che tale riscaldamento avrebbe potuto avere specialmente sulla lamiera allo stato solubilizzato. Le temperature di test erano infatti largamente inferiori a quelle necessarie a far perdere l'effetto del trattamento termico sull'acciaio per lavorazioni a caldo del punzone. Una volta in temperatura i campioni sono stati caricati nella fornace, attendendo per eseguire il test 100 secondi dal momento in cui la temperatura fosse tornata quella stabilita per l'analisi, dando così tempo al campione per omogeneizzare la sua temperatura a quella della camera, senza però dare modo ad evoluzioni microstrutturali di avvenire.

Entrambi i materiali sono stati testati utilizzando un indentatore a sfera di acciaio di 1/8'' dopo aver tarato il macchinario con gli standard forniti; il punzone seguendo la procedura per test HRK e la lamiera secondo la procedura HR15W. Questo test consiste nell'applicare un carico iniziale F_0 per 5 secondi, in modo da recuperare la deformazione elastica dell'indentatore, seguito da un carico addizionale F_1 per 10 secondi, per un totale di 15 kgf come riassunto in Tabella 4.1.

Tabella 4.1 Specifiche dell'esecuzione della prova di durezza HR15W

15 HR15W	
Tipo di test di durezza	15 HR15W
Materiale dell'indentatore	Steel
Forma dell'indentatore	Sfera di diametro 1/8''
Carichi [kgf]	F0 = 3.0 (± 0.1) / F1= 12.0 (± 0.1)
Tempo di pre-carico [s]	5 (F0), 10 (F1)
Tempo di carico [s]	30 (F1)
Temperatura [$^{\circ}$C]	Temperatura ambiente; 200; 250; 300; 350 (± 2)
Stato del materiale di base	T6 ; Solubilizzato
Ripetibilità	10

Le temperature testate sono state: temperatura ambiente, 200(± 2) $^{\circ}$ C, 250(± 2) $^{\circ}$ C, 300(± 2) $^{\circ}$ C, 350(± 2) $^{\circ}$ C, 400(± 2) $^{\circ}$ C e 450(± 2) $^{\circ}$ C per quanto riguarda il punzone, mentre per la lamiera sono state escluse le due temperature più elevate data l'impossibilità di effettuare il test in tali condizioni sulla lamiera di alluminio. A temperature così elevate infatti le proprietà meccaniche dei campioni non erano sufficienti a sopportare il carico della prova, e la lamiera veniva deformata nell'intero spessore e non solo superficialmente come previsto dal test.

4.2 Trazione

Le prove di trazione ad alta temperatura sono state effettuate tramite un dinamometro a MTS-322 50kN. I provini a forma di osso di cane misuravano 65.0 (± 0.1) mm di lunghezza nel tratto utile, escludendo quindi la zona di aggancio per le ganasce; 12.5 (± 0.1) mm di larghezza e 2.0 (± 0.1) mm di spessore; sono stati tagliati a laser dalle lamiere fornite, in direzione concorde alla direzione di laminazione e sono mostrati prima e dopo la rottura in Figura 4.1. I test, sia su materiale allo stato T6 che solubilizzato sono stati eseguiti a temperatura ambiente, 200(± 5) °C, 250(± 5) °C, 300(± 5) °C, 350(± 5) °C, 400(± 5) °C e 450(± 5) °C.

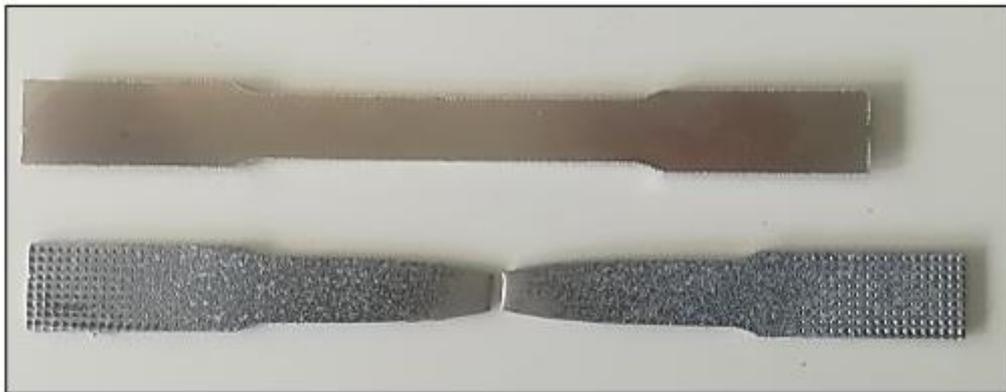


Figura 4.1 Due campioni ad osso di cane per la prova di trazione. In alto un campione vergine ed in basso uno rotto dopo aver effettuato la prova

Per motivi tecnici e per praticità di operazione il riscaldamento del campione è avvenuto con due diverse modalità durante la campagna sperimentale, ripetendo spesso prove alla stessa temperatura ottenuta tramite mezzi riscaldanti diversi, così da verificare che non vi fossero differenze nei risultati operando in un modo o nell'altro. Taluni test sono stati effettuati riscaldando il campione tramite camera climatica; questo apparato consiste in una fornace elettrica appositamente disegnata per il dinamometro MTS-322 50kN, così da consentire di effettuare test fino a 315.5 °C (600 °F). Si riscalda previamente la fornace alla temperatura del test, comprensiva di ganasce per l'aggancio del campione; una volta in temperatura si introduce il campione ad osso di cane, si fissa tramite viti alle ganasce e si chiude la camera. Raggiunta nuovamente la temperatura di test, abbassatasi a causa dell'apertura della fornace, si attendono 100 secondi per dare modo al campione di omogeneizzare la sua temperatura a quella della camera, senza però avere tempo a sufficienza per cambiare sostanzialmente la sua microstruttura, e si effettua il test a trazione. Il secondo metodo sfrutta il riscaldamento per effetto Joule dato dal passaggio di corrente all'interno del provino grazie ad un generatore ad alta

frequenza della potenza di 30 kW. Questo procedimento è stato utilizzato per temperature superiori ai 315 °C o nei casi in cui l'elevata resistenza del materiale non rendesse possibile il test in camera climatica senza avere slittamento del provino nelle ganasce a viti. Per monitorare la temperatura in questo caso si è fatto ricorso ad un pirometro a laser puntato nel mezzo del campione, mostrato assieme ad un campione termocoppiato in Figura 4.2

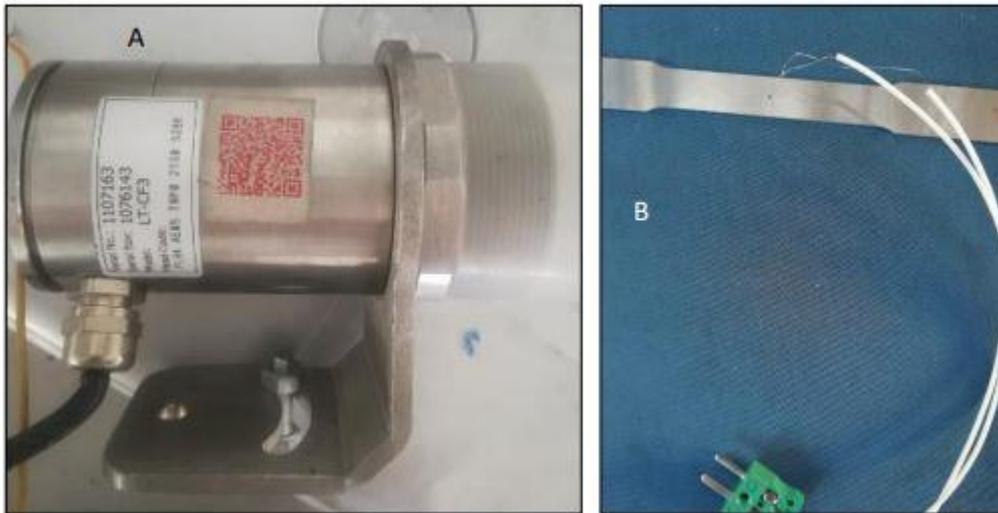


Figura 4.2 a) Pirometro utilizzato per le misure di temperatura b) Campione a cui è stata saldata una termocoppia per la taratura del pirometro

Per effettuare la taratura del pirometro per questo assetto sperimentale e con questa data lega di alluminio si è utilizzata al contempo una termocoppia saldata sul lato opposto del campione. Mentre si riscaldava per effetto Joule il campione è stata costruita una funzione lineare utilizzando dieci coppie di valori rilevati rispettivamente dal pirometro e dalla termocoppia, in modo da conoscere la temperatura esatta del campione qualsiasi fosse il valore rilevato dal pirometro. Il campione è stato riscaldato in questo caso con una velocità di $30 (\pm 1) \text{ }^\circ\text{C/s}$ fino alla temperatura di test, con un'attesa di 10 secondi prima del test stesso così da omogeneizzarne la temperatura.

È stata quindi applicata una tensione a rottura con uno *strain rate* di 0.1 s^{-1} come riassunto in Tabella 4.2

Tabella 4.2 Specifiche dell'esecuzione della prova di rottura a trazione

Apparecchiatura di test	Dinamometro da 50kN
Velocità di riscaldamento [°C/s]	30
Tempo di attesa [s]	10
Tipo di provino	Osso di cane
Stato del materiale di base	T6; Solubilizzato
Test temperature [°C]	200; 250; 300, 350; 400; 450 (±5)
Strain rate [s⁻¹]	0.1
Ripetibilità	3

4.3 Profilometro e microscopio elettronico

Le analisi superficiali su campioni e punzone sono state effettuate tramite un profilometro ottico 3D Sensofar™ Plu Neox, funzionante sia tramite microscopia confocale che per interferometria. È stata analizzata sia la lamiera allo stato di fornitura che dopo lubrificazione, i campioni dopo Strip Drawing Test con e senza adesione ed il punzone prima e dopo l'adesione. Lo strumento fornisce un'immagine in 3D della superficie con risoluzione nanometrica nella direzione perpendicolare alla superficie (ovvero per quanto riguarda la misura delle rugosità) e micrometrica nelle altre due direzioni. Permette inoltre di misurare la rugosità media Sa, estrarre profili reali e superfici sotto forma di file di punti ed altre misure. Trattandosi di uno studio dedicato principalmente alla tribologia, tale strumento è risultato particolarmente utile non solo per le misure quantitative effettuate sui campioni ma anche per osservare le variazioni di morfologia dopo un dato procedimento. Ad esempio è stato possibile osservare se la lubrificazione alterasse o meno la morfologia superficiale, come il materiale aderito sul punzone andasse a disporsi o ancora come venissero appiattiti i profili dopo Strip Drawing Test. La Figura 4.3 mostra lo svolgimento di una tipica analisi al profilometro.

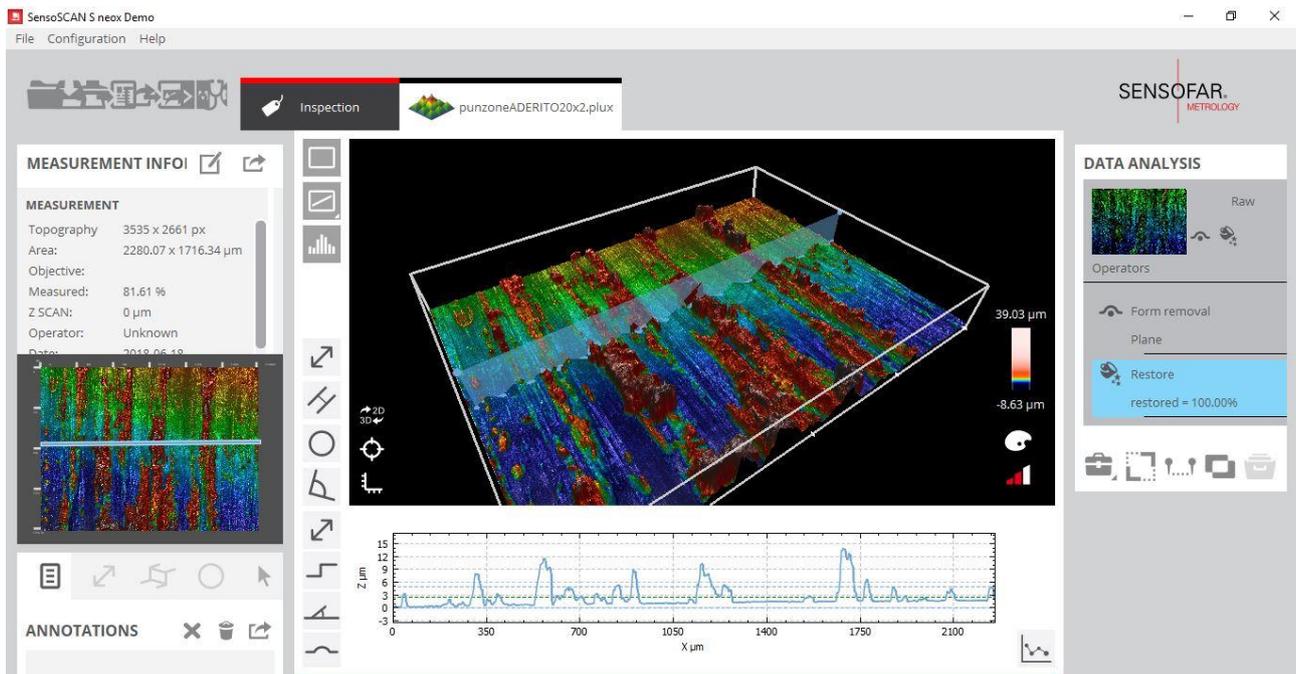


Figura 4.3 Schermata di lavoro durante l'analisi di una profilometria effettuata tramite Sensofar™ Plu Neox

Ulteriori analisi e micrografie sono state effettuate tramite microscopia ottica ed elettronica; in particolare utilizzando elettroni retrodiffusi (SEM-BSE) e spettroscopia a dispersione di energia di raggi-x (EDX). Le due tecniche di microscopia hanno diversi obiettivi, con la prima si è investigata la morfologia e la struttura delle varie adesioni e della lamiera strisciata con ingrandimenti superiori al semplice microscopio ottico o al profilometro; mentre con la seconda è stato possibile conoscere la composizione percentuale dei precipitati e della matrice elemento per elemento, risalendo così alla composizione chimica, con il fine di valutarne l'eventuale affinità con il materiale del punzone. Lo strumento utilizzato per questo studio è mostrato in figura 4.4

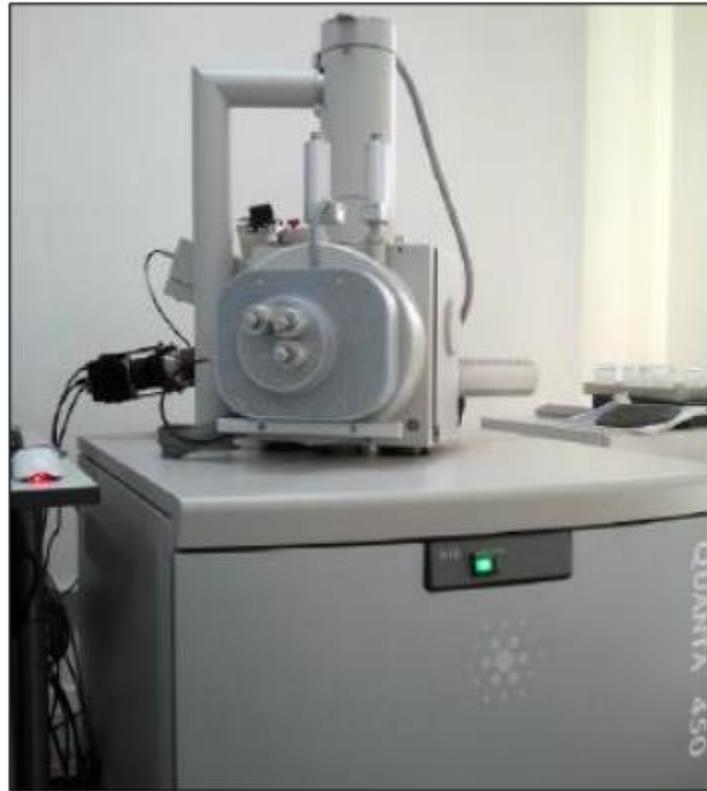


Figura 4.4 Fotografia del microscopio elettronico presente nei laboratori Te.Si di Rovigo

4.4 Macchina di lubrificazione

La macchina utilizzata per la lubrificazione dei provini è stata messa a punto e costruita nei laboratori del dipartimento di ingegneria industriale dell'università di Padova, [14] [15].

Essa è divisa in due livelli, superiormente si trova la camera di spruzzatura in cui avviene la lubrificazione vera e propria, sotto vi è un pianale che alloggia un motore elettrico, un carrello con relative guide, una vite senza fine e i controlli elettronici. Un telaio tubolare esterno sorregge la struttura come visibile in Figura 4.5

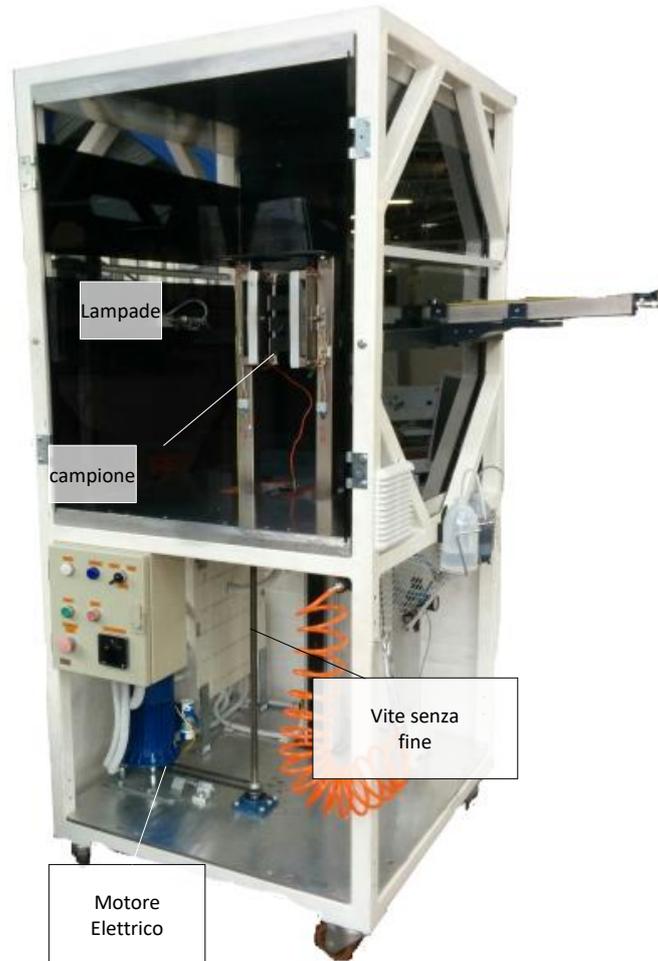


Figura 4.5 Fotografia della macchina di lubrificazione utilizzata per la preparazione dei campioni

I campioni vengono alloggiati all'interno della camera di lubrificazione, le cui pareti sono costruite in plexiglass, all'interno di una ganascia serrata tramite viti. Si procede poi al riscaldamento del campione tramite quattro lampade alogene ad infrarossi ad onda corta dal diametro di 10 mm e lunghezza di 225 mm di potenza 1500 W ciascuna, capaci di giungere in temperatura in pochi secondi senza dover essere in contatto con la lamiera. Queste lampade sono fissate ad un carrello e possono salire all'interno della camera o scendere al di sotto di essa grazie ad un motore elettrico che mediante una vite senza fine muove il carrello stesso. Una volta raggiunta la temperatura prefissata, monitorata tramite una termocoppia posta in contatto con la lamiera, si spengono le lampade e grazie al motore elettrico esse ridiscendono uscendo dalla camera di lubrificazione, trovandosi così al riparo dalla successiva spruzzata di lubrificante. Successivamente avviene la lubrificazione vera e propria: due ugelli, uno per lato, spruzzano la miscela al 15% di acqua demineralizzata e Bonderite® L-GP

Aquadag sulla lamiera riscaldata, così che l'acqua evapori e la grafite abbia modo di aderire alla superficie, aprendosi grazie ad un'elettrovalvola. Gli ugelli, collegati da un lato all'impianto di aria compressa del laboratorio tramite un regolatore di portata con manometro, ed ai serbatoi di lubrificante dall'altro, sfruttano l'effetto Venturi per aspirare il lubrificante da serbatoi posti più in basso rispetto agli ugelli stessi, mostrati nel dettaglio in Figura 4.6

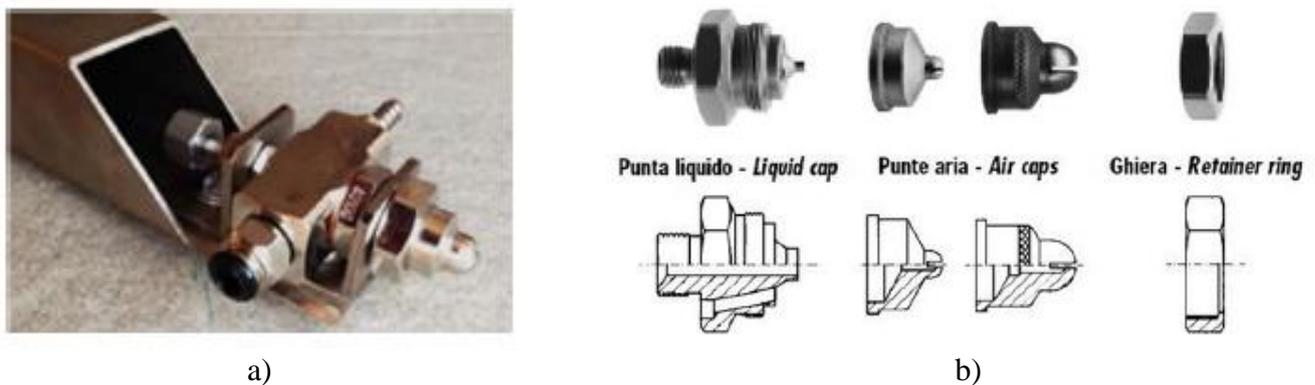


Figura 4.6 a) Fotografia di uno degli ugelli montato correttamente b) Esploso dei vari componenti dell'ugello

Al diminuire della sezione di una condotta, senza variazioni di portata, aumenta infatti la velocità del fluido e qualora sia a densità costante si ha un abbassamento di pressione. Gli ugelli sono smontabili per la pulizia e sono collegati ai serbatoi di lubrificante attraverso una valvola di non ritorno. Il controllo della macchina avviene da computer tramite una scheda elettronica ARDUINO® collegata via USB, e relativo software. Quest'ultimo permette tramite semplici comandi di effettuare la lubrificazione delle lamiere variando i parametri di spruzzatura (tempo di apertura degli ugelli, numero di spruzzate, attesa tra una spruzzata e la successiva) e di temperatura target, oltre ovviamente a mostrare la temperatura rilevata dalla termocoppia e permettere la salita/discisa delle lampade, la loro accensione, lo spegnimento e l'effettiva spruzzata. Vi è infine un sistema di luci a led interno alla camera e una ventola per l'areazione in seguito alla lubrificazione.

I parametri ottimali per la lubrificazione erano stati precedentemente messi a punto, così come il quantitativo ottimale di $1.5/2 \text{ g/m}^2$ di grafite applicata. Durante le prove preliminari della macchina però i parametri di lubrificazione previsti non davano una copertura ottimale della lamiera, rendendo impossibile la replica dei risultati degli studi precedenti, probabilmente a causa di un parziale intasamento degli ugelli e dell'invecchiamento di tubi e guarnizioni. Si è optato quindi, dopo

un'attenta pulizia degli ugelli in un bagno di acetone, per mantenere invariato il risultato, ovvero l'applicazione di $1.5/2 \text{ g/m}^2$ di grafite, più che la procedura utilizzata; poiché la lubrificazione ottimale è ciò che sarebbe andato poi ad influire maggiormente sulla successiva campagna sperimentale di *Strip Drawing Test*. Si sono quindi ricercati nuovi parametri operativi che portassero allo stesso risultato, stabilendo come ottimali quelli riportati in Figura 4.7

```
// VALORI PER L'ESECUZIONE
int valoreletto = 0; // POTENZA LAMPADA [0 MAX - 10 MIN]
int c_obb = 150.00; // TEMPERATURA OBIETTIVO
int c_all = 200.00; // TEMPERATURA ALLARME
int n_mant = 5; // cicli di mantenimento temperatura
int spruzzate = 2; // n° di spruzzate di lubrificante
double t_att = 0.15; // tempo di attesa tra spruzzate [s]
double t_spruz = 2.00; // tempo di spruzzata [s]
```

Figura 4.7 Parametri ottimali di lubrificazione come appaiono da terminale

La rampa termica a cui è sottoposto il campione con questo tipo di procedura è schematizzata in Figura 4.8

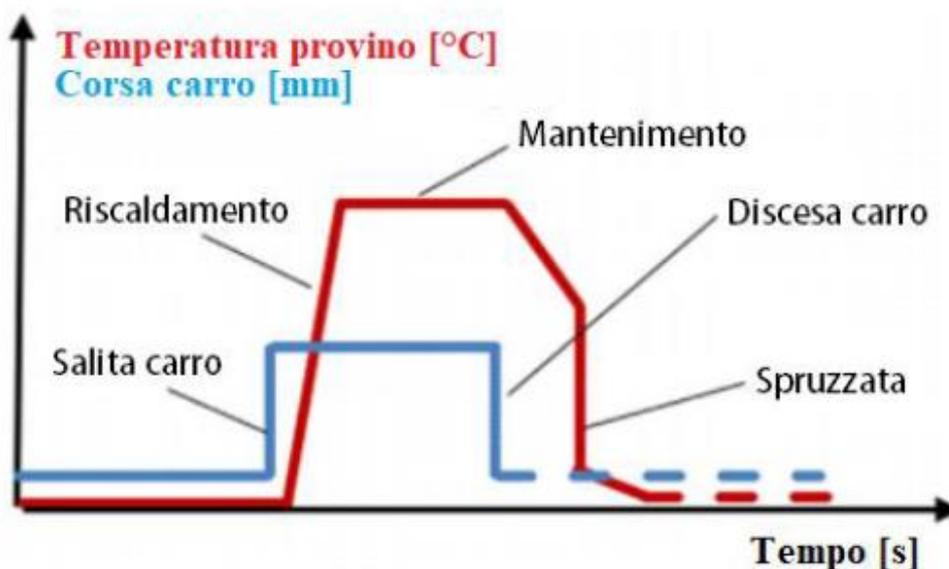


Figura 4.8 Rampa termica e corsa durante il processo di lubrificazione

Per effettuare le operazioni di lubrificazione è necessario accendere l'interruttore generale Figura 4.9 ed assicurarsi che tutti gli interruttori di emergenza non siano premuti.



Figura 4.9 Interruttore generale (in nero) ed altri comandi del pannello della macchina di lubrificazione

Accendere le luci a led interne alla camera può essere utile poiché il plexiglass delle pareti è oscurato tramite una pellicola polimerica con il fine di proteggere l'utilizzatore dalla luce intensa che deriva dall'uso delle lampade riscaldanti. Per inserire il campione è necessario che non vi siano bave residue dalle operazioni di taglio laser; dopo a sbavatura si procede quindi a posizionarlo nell'apposita morsa e se necessario si serrano le viti di afferraggio. Dato che tutti i campioni utilizzati avevano lo stesso spessore nominale, essendo ricavati dalla stessa lamiera, si è preferito mantenere le ganasce sempre alla stessa distanza l'una dall'altra, così che i campioni si potessero reggere semplicemente ad incastro, accelerando notevolmente le operazioni di montaggio e lubrificazione. Si deve quindi fare in modo che la termocoppia incamiciata che rileverà la temperatura e farà sì che le lampade si

spengano una volta giunte in temperatura sia in contatto con il campione. Si appoggerà quindi la punta della termocoppia sulla superficie della lamiera, tenendo presente quale sarà la traiettoria delle lampade una volta in posizione di riscaldamento e facendo in modo che non interferisca con la termocoppia stessa. Le Figure 4.10 e 4.11 mostrano le fasi di riscaldamento e spruzzatura.

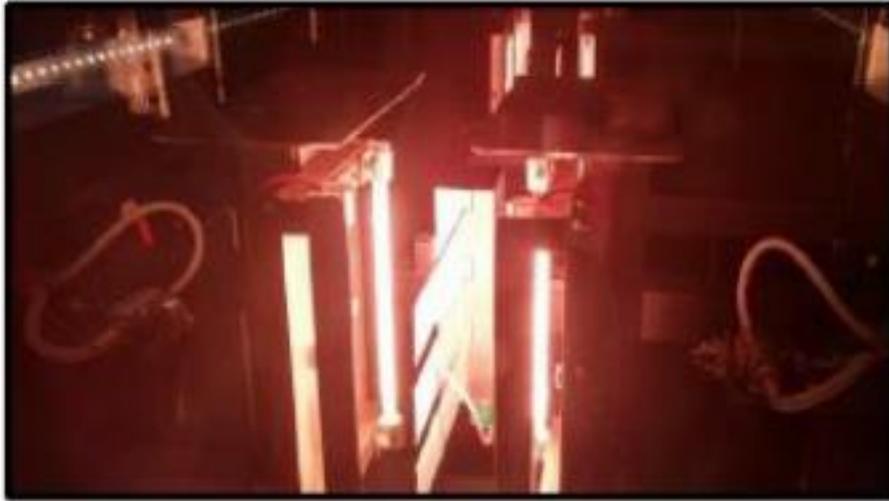


Figura 4.10 Fase di riscaldamento dei campioni tramite le lampade ad infrarossi



Figura 4.11 Fase di spruzzatura dei campioni

Prima di procedere è buona pratica assicurarsi che nei serbatoi la soluzione di Bonderite® L-GP Aquadag al 15% sia correttamente miscelata e non vi siano depositi o separazioni di fase, in caso ciò avvenisse è necessario mescolare energicamente la soluzione ed eventualmente produrne di nuova. Collegando quindi la macchina al computer tramite cavo USB è possibile avviare il software ARDUINO, selezionando il programma desiderato (movimento2). La schermata che si presenta è mostrata in Figurra 4.12

```

// LIBRERIE
#include <SPI.h>
#include <Adafruit_MAX31855.h>
#include <Time.h>
#include <TimeLib.h>
#include <DS1302RTC.h>
#include <Streaming.h>

// VALORI PER L'ESECUZIONE
int valoreletto = 0; // POTENZA LAMPADA [0 MAX - 10 MIN]
int c_obb = 150.00; // TEMPERATURA OBIETTIVO
int c_all = 200.00; // TEMPERATURA ALLARME
int n_mant = 5; // cicli di mantenimento temperatura
int spruzzate = 2; // n° di spruzzate di lubrificante
double t_att = 0.15; // tempo di attesa tra spruzzate [s]
double t_spruz = 2.00; // tempo di spruzzata [s]

// PIN BUZZER
int buzzer = 4;

//PIN OROLOGIO: CE, IO ,CLK
DS1302RTC RTC(8, 9, 10);

// PIN ALIMENTAZIONE OROLOGIO
int DS1302_GND_PIN = 11;
int DS1302_VCC_PIN = 12;

// PIN TERMOCOPPIA INCAMICIATA
int TC_1 = 22;

```

Figura 4.12 Schermata di comando del programma “movimento2” utilizzato per interfacciarsi da terminale con la macchina di lubrificazione

Si impostano quindi i parametri desiderati, avendo cura di non commettere errori dal punto di vista di scrittura del programma, nel nostro caso quelli indicati in Figura 4.7. Aprendo il menu “strumenti” si devono poi selezionare la scheda, il processore e la porta corretti, di modo che il software riesca ad interfacciarsi correttamente con l’hardware. Si procede quindi a caricare il programma e la schermata di comandi che appare è la seguente, riportata in Figura 4.13

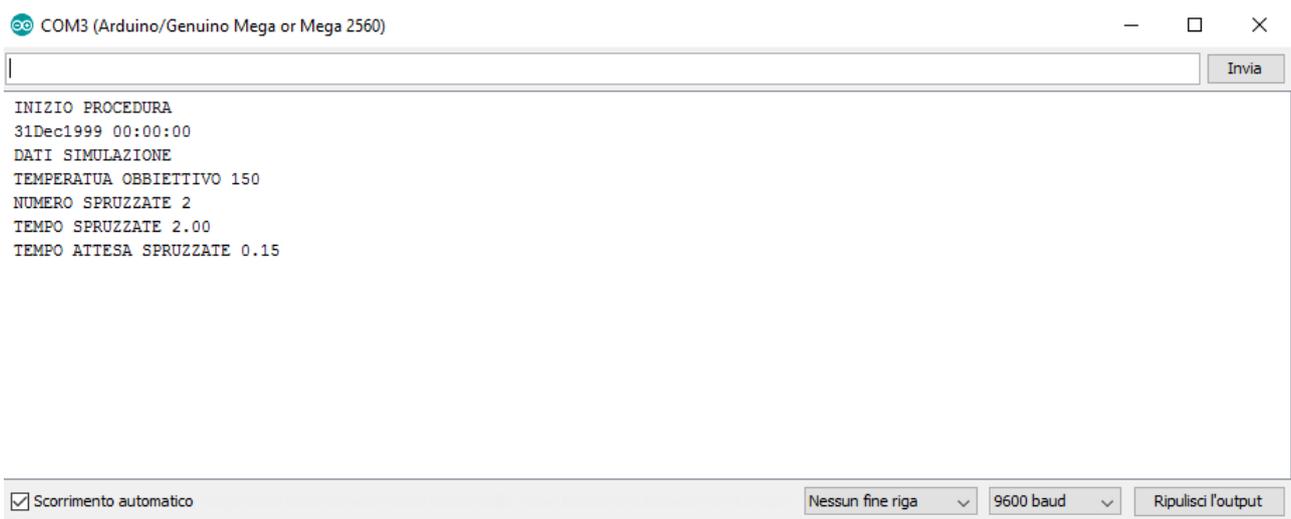


Figura 4.13 Schermata dei comandi presente una volta lanciato il programma “movimento2”

I comandi necessari alla lubrificazione sono riportati in Tabelle 4.3.

Tabella 4.3 *Comandi per la macchina di lubrificazione*

COMANDO	AZIONE	USABILE	DESCRIZIONE	SOPPRESSIONE COMANDO
S	ARRESTO	DOPO IL COMPLETAMENTO DELL'AZIONE PRECEDENTE	Arresta la macchina, RESETTA i contatori	NESSUNA
U	SALITA CARRO	DOPO COMANDO S O COME PRIMO COMANDO	Il carro sale dalla posizione corrente alla massima possibile	PULSANTE EMERGENZA
D	DISCESA CARRO	DOPO COMANDO S O COME PRIMO COMANDO	Il carro scende dalla posizione corrente alla minima possibile	PULSANTE EMERGENZA
O	LIVELLO LUBRIFICANTE	SE SI USA IL SERBATOIO SENSORIZZATO	Rimanda un valore legato alla quantità di lubrificante nel serbatoio sensorizzato	Tasto S
G	APERTURA UGELLI	SE LE LAMPADE SONO IN POSIZIONE DI SICUREZZA	Alla temperatura obbiettivo esegue il ciclo di spazzatura come da parametri inseriti	Tasto S
L	ACCENSIONE LUCI RISCALDAMENTO	SE LE LAMPADE SONO IN POSIZIONE COMPLETAMENTE ALZATA	Le luci si accendono portando il componente fino alla temperatura di surriscaldamento e mantengono quella temperatura	Tasto S
T	LETTURA TEMPERATURA	SEMPRE	Restituisce a monitor le temperature rilevate dalle termocoppie	Tasto S
A	APERTURA UGELLI CONTINUA	SE LE LAMPADE SONO IN POSIZIONE DI SICUREZZA	Gli ugelli vengono alimentati fino ad interruzione del comando con S	Tasto S
W	ASPIRAZIONE	SEMPRE	Accende manualmente l'aspirazione	Tasto S
M	ABILITAZIONE COMANDI MANUALI	DOPO IL COMPLETAMENTO DELL'AZIONE PRECEDENTE	Permette l'abilitazione del telecomando, dopo l'abilitazione il telecomando gestisce la macchina	Tasto S

Una volta ultimata la spruzzatura può essere utile impartire il comando W di aspirazione ed aprire leggermente gli sportelli della camera di lubrificazione in attesa che il campione si asciughi e si raffreddi. Per quando la grafite aderisca comunque al campione è buona prassi pulire la superficie con etere prima del processo e non toccare direttamente la superficie lubrificata alla fine di esso. A tale scopo è stata costruito un apposito contenitore con in fondo uno strato di polistirolo da imballaggio con venti fessure numerate e dimensionate in modo da sorreggere verticalmente i provini che vi si inseriscono, così che non si tocchino tra loro e non si rovinino in attesa di effettuare lo *Strip Drawing Test*. Per quanto riguarda la manutenzione straordinaria della macchina questa consiste principalmente nel mantenimento della vite senza fine e del carrello in buone condizioni di funzionamento e lubrificazione, la manutenzione ordinaria invece nella pulizia della camera di lubrificazione con acqua e acetone dopo ogni campione, oppure alla fine della sessione di utilizzo della macchina, così come quella degli ugelli. Questi possono essere smontati completamente così da poterli lavare in acetone o con carta assorbente; oltre a dare la possibilità di sostituire i nastri di teflon necessari alla tenuta dei componenti avvitati.

4.5 Macchina Strip Drawing

Lo *Strip Drawing Test* piano è stato eseguito sia su campioni allo stato T6 che solubilizzati, a varie pressioni, temperature e velocità. La macchina permette di applicare la pressione richiesta perpendicolarmente al campione tramite il punzone, fa scorrere poi il campione misurando durante il test la forza perpendicolare e quella tangenziale tramite due celle di carico, dando così modo di calcolare il coefficiente di attrito durante tutta la prova. Le temperature sono state 200 (± 2) °C, 250 (± 2) °C, 300 (± 2) °C, 350 (± 2) °C, 400 (± 2) °C e 450 (± 2), le pressioni nominali di 5 MPa e 10 MPa e le velocità di 10 mm/s e 50 mm/s.

La macchina composta da un motore elettrico che muove un carrello lungo una guida; sul carrello è fissata una piastra riscaldata tramite cartucce, uno strato di isolante, ed una piastra raffreddata ad acqua per evitare distorsioni termiche del carrello. Alla fine della guida una struttura in acciaio sorregge una vite che tramite una molla precompressa permette di applicare la pressione desiderata sul campione agganciato al carrello, tramite il punzone in acciaio per lavorazioni a caldo. Si misurano quindi la forza normale F_n e tangenziale F_t (considerando trascurabile l'attrito del carrello con la guida sulla quale è alloggiato), risalendo così al coefficiente di attrito $\mu = F_t/F_n$, graficabile in funzione della corsa del test. Si riportano di seguito nelle figure 4.14 e 4.15 una foto e uno schema della macchina per *Strip Drawing Test*

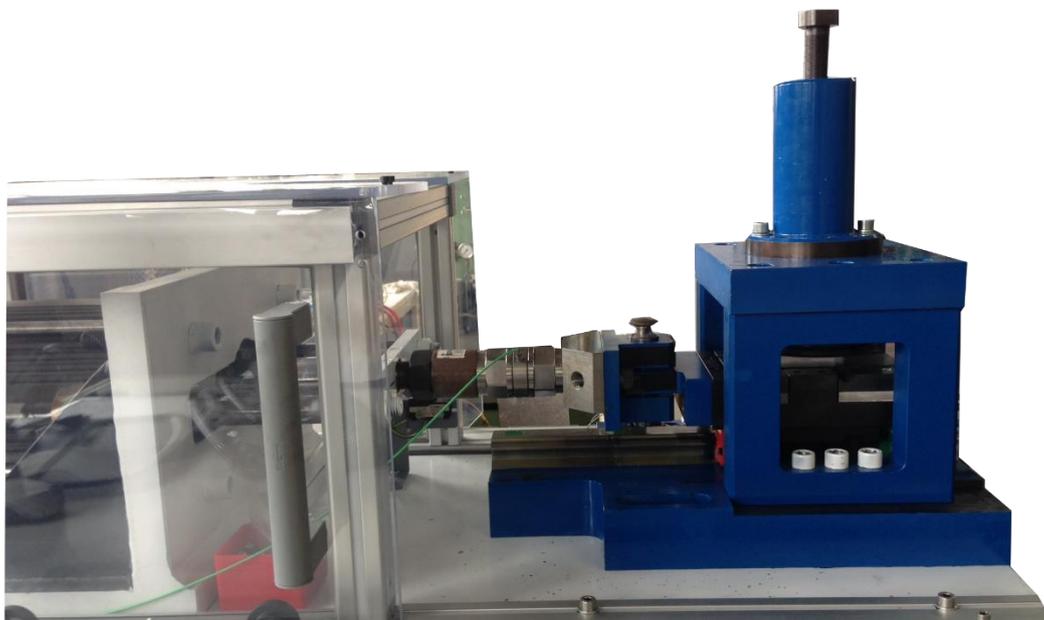


Figura 4.14 Fotografia del carrello e del castello della macchina per *Strip Drawing Test*

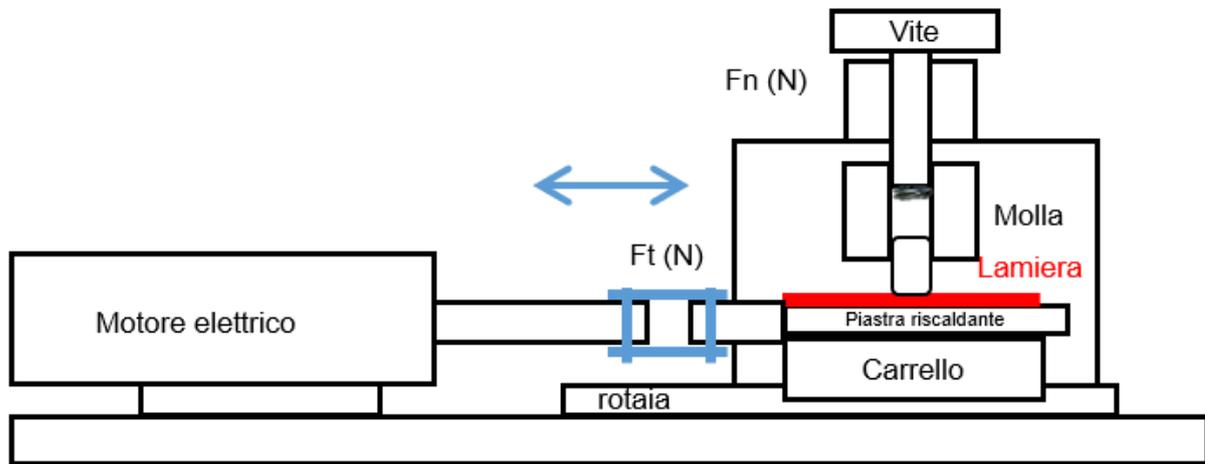


Figura 4.15 Schema dei componenti della macchina per Strip Drawing tet

I vari elementi della macchina sono quindi:

Motore: il motore elettrico Exlar® della serie GSX permette il movimento del carrello in entrambe le direzioni con una velocità massima dichiarata dal costruttore di 952 mm/s [16]

Celle di carico: Sono state installate due celle di carico di produzione della Kistler®: una monitora la forza normale impressa dall'operatore mediante un accoppiamento a vite e l'altra la forza tangenziale che viene invece dettata dal motore stesso.

Piastra riscaldante: tale piastra ha il compito di riscaldare il provino, fissatovi sopra. In essa infatti sono presenti tre fori nei quali sono inserite le tre cartucce riscaldanti e, per monitorare la temperatura, un piccolo foro per alloggiare una termocoppia. La piastra riscaldante è schematizzata in Figura 4.16

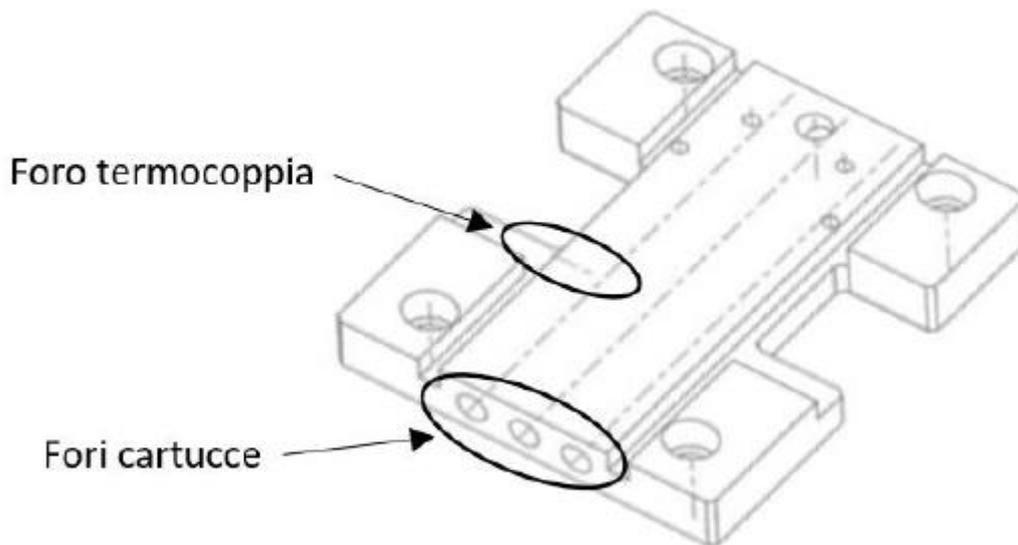


Figura 4.16 Schema della piastra riscaldante con fori per termocoppia e cartucce

Cartucce riscaldanti: sono sate per scaldare la piastra di appoggio del campione. Sono cartucce della Rotfil® Ipermax da 800W ciascuna con una temperatura superficiale massima di 1000 °C. hanno un diametro di 10mm ed una lunghezza di 130mm.

Strato isolante: sotto la piastra scaldante viene posto uno strato di isolante Trathermic® MI700 dello spessore di 10 mm. È un materiale isolante a base di mica con un'elevata resistenza meccanica alla compressione e alle alte temperature.

Piastra di raffreddamento: sotto lo strato di isolante viene posizionata una piastra con canali di raffreddamento ad acqua. Lavorare ad alte temperature porrebbe il rischio di fondere le componenti in plastica del carrello o di andare incontro a deformazioni termiche; sono quindi inseriti all'interno della piastra raffreddante dei canali di raffreddamento collegati alla rete idrica.

Punzone: il punzone viene compresso sulla superficie del campione a dare la pressione di test desiderata tramite una vite ed una molla precompressa. Prodotto in EN X38CrMoV5 il punzone ha la geometria mostrata in figura (x) con una superficie di contatto col campione di 336 mm² ed un raggio di raccordo perimetrale di 2.0 (±0.1) mm

Campione: I campioni per il test sono rettangoli di lamiera di Al7075 allo stato T6 o solubilizzati, delle dimensioni di $43.0 (\pm 0.1) \times 149.0 (\pm 0.1) \times 2.0 (\pm 0.1)$ mm, più una zona di ancoraggio con un foro che permette l'aggancio alla piastra riscaldante tramite una mascherina e una vite passante attraverso il campione, mostrato in Figura 4.17



Figura 4.17 Fotografia di un campione dopo lubrificazione e Strip Drawing Test

La Strip Drawing Machine è comandata da terminale con software LabVIEW, tramite un RIO con vari moduli, dedicati ai vari componenti della macchina. Per eseguire i test è necessario seguire una precisa procedura poiché l'elettronica della macchina è stata progettata e costruita per *step* successivi ed è quindi essenziale eseguire esattamente il processo indicato di seguito come elenco. quindi avviare macchinario come segue:

1. Aprire il rubinetto dell'acqua di raffreddamento
2. Assicurarsi che gli interruttori di finecorsa siano disabilitati
3. Accendere l'interruttore generale
4. Attendere almeno tre minuti
5. Attivare l'interruttore di precarica
6. Abilitare gli interruttori di finecorsa
7. Accendere il pc
8. Accendere il RIO con l'apposito interruttore
9. Accendere i due amplificatori di segnale collegati alle due celle di carico
10. Premere *measure* sull'amplificatore collegato alla cella di carico perpendicolare
11. Aprire da software labVIEW il programma "*Strip_definitivo*"
12. Impartire il comando *Run*

È presente inoltre un interruttore di sicurezza dedicato alle cartucce riscaldanti, è buona norma lasciarlo sempre premuto e disinserirlo solo al momento di effettuare la prova, così da evitare che per qualsiasi motivo si abbia un riscaldamento imprevisto della piastra. Si estrae quindi tramite il motore elettrico il carrello da sotto la struttura a castello che regge la vite, si smonta la mascherina porta campione e si porta in temperatura la piastra riscaldante, misurando tramite la termocopia inserita al suo interno, controllando il tutto da terminale. Una volta raggiunta la temperatura desiderata si monta il campione tramite la vite passante che, assieme ad altre due viti laterali, tiene in posizione il campione e la mascherina. Si attendono quindi 100 secondi per essere certi che il campione raggiunga la temperatura desiderata, senza che però abbia il tempo di subire variazioni microstrutturali e si riporta il carrello al di sotto del castello che regge la vite ed il punzone, di modo che il campione sia nella posizione desiderata. Si allenta quindi la vite a grano che tiene il punzone sollevato e si lascia cadere quest'ultimo sulla superficie del campione. Per raggiungere le basse rugosità richieste sulla superficie del punzone, con il fine di simulare gli stampi industriali, è stato necessario lucidarlo tramite un lapidello a mano, il che non garantisce la perfetta planarità della superficie che va ad applicare la pressione sul campione. Durante il serraggio della vite che applica la forza perpendicolare la presenza di un angolo di incidenza tra punzone e campione avrebbe quindi portato alla presenza di una forza tangenziale iniziale non trascurabile e non costante tra le varie prove (poiché diverse lucidature avrebbero potuto portare a diversi angoli di incidenza e quindi a diverse forze). Si è quindi ricorsi ad uno stratagemma, ovvero svincolare il carrello dal motore elettrico e quindi dalla cella di carico tramite un perno estraibile e spostare leggermente il braccio del motore, serrare la vite fino alla forza tangenziale desiderata, ed in seguito appoggiare il perno sopra il braccio del motore il cui foro non era più allineato a quello del carrello, così che il perno non potesse tornare in sede e rendere solidali braccio e carrello. Facendo muovere poi il motore a bassissima velocità (ad esempio 1 mm/s) in direzione del carrello si otteneva la caduta per semplice gravità del perno nella sua sede senza aver caricato la cella di carico orizzontale di nessuna forza esterna al test. Una volta preparato il *set-up* descritto è necessario azzerare gli amplificatori che processano il segnale delle celle di carico rendendolo compatibile con il RIO ed il software labVIEW; impostare la velocità di prova ed eseguire il test. Dopo ogni prova, in assenza di adesione, il punzone è stato accuratamente lavato per rimuovere i residui di lubrificante ed in caso di adesione è stato nuovamente lucidato.

Si riporta di seguito nel dettaglio l'utilizzo del programma "*Strip_definitivo*". Una volta aperto e lanciato il programma con il comando *Run* è possibile variare i parametri come indicato in Figura 4.18

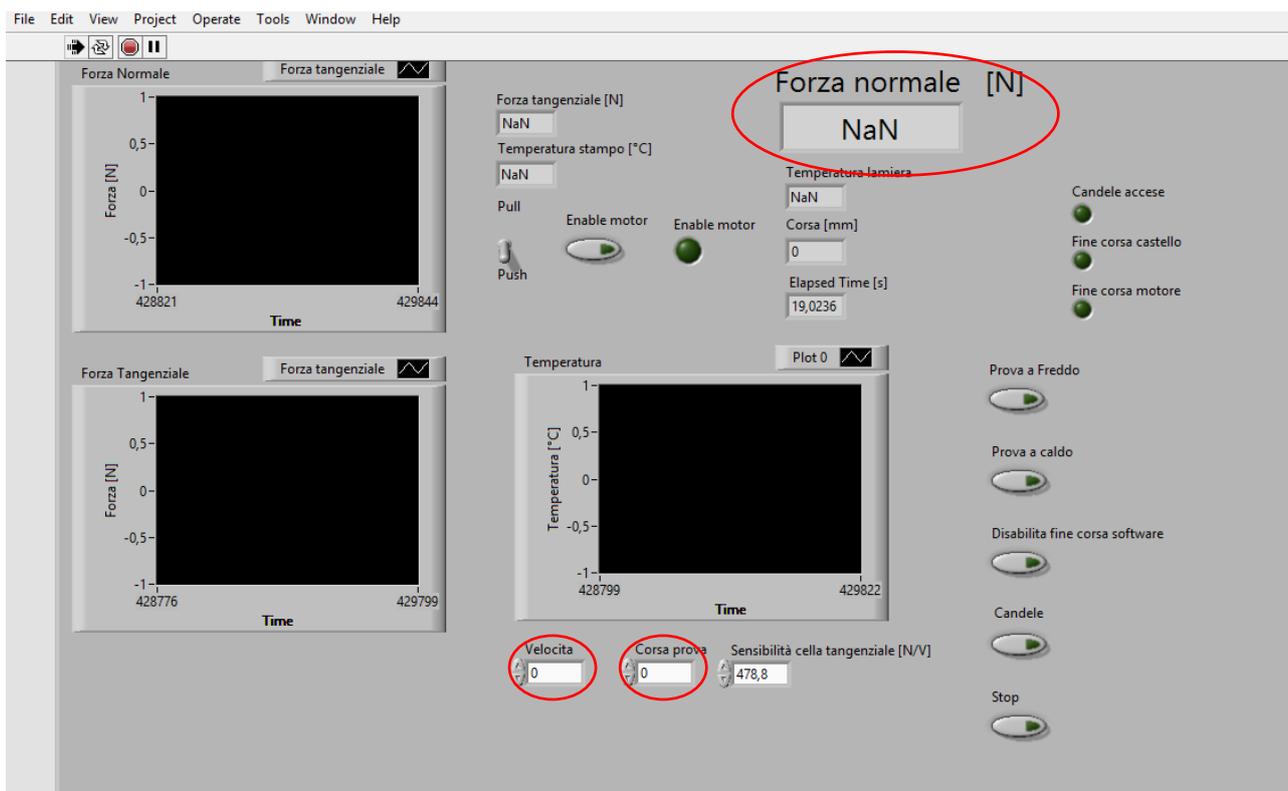


Figura 4.18 Schermata di comandi per Strip Drawing Test a freddo. Evidenziati in rosso i parametri modificabili dall'operatore

Le forze tangenziale e perpendicolare vengono graficate, qualora vengano applicate nei due quadrati neri, mentre tutti gli altri parametri possono essere modificati con gli appositi comandi.

Qualora la prova sia a caldo, selezionabile da menu principale, la schermata di comando è la seguente in Figura 4.19

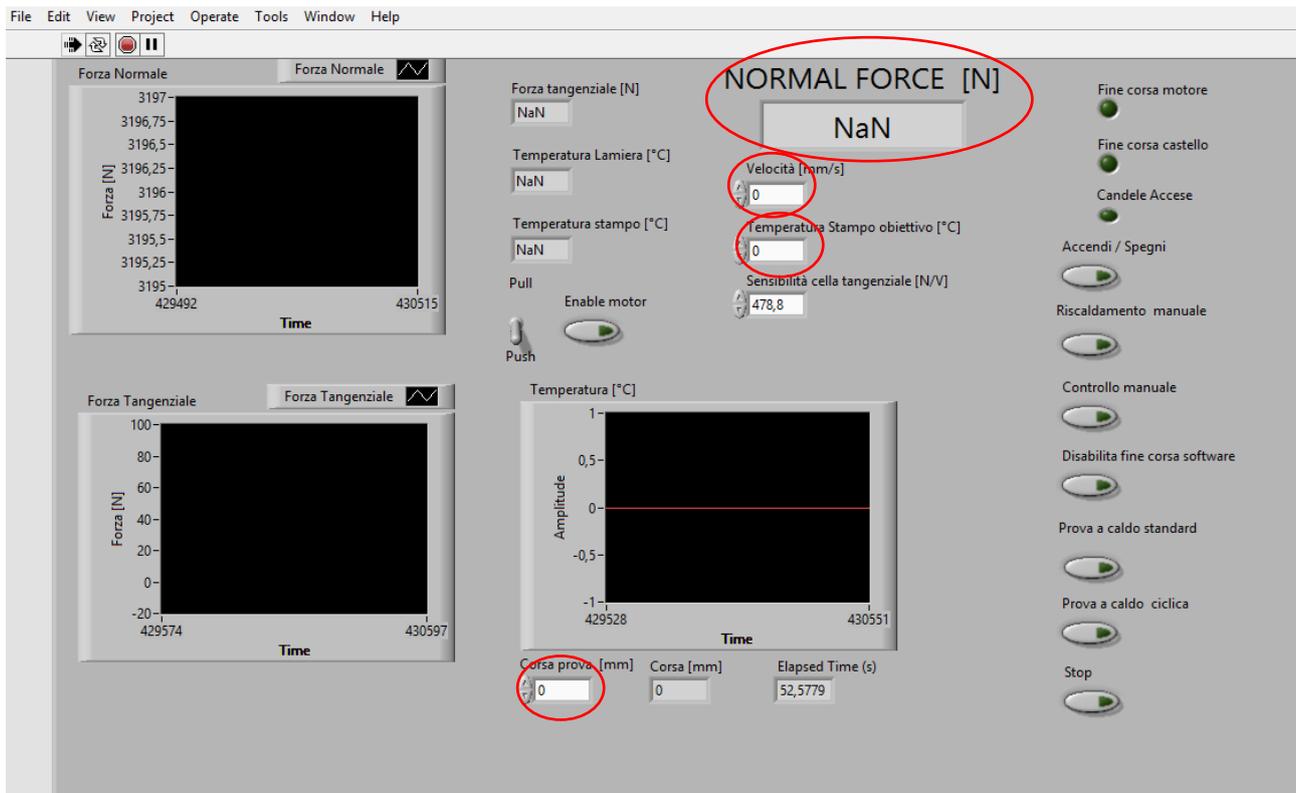


Figura 4.18 Schermata di comandi per Strip Drawing Test a caldo. Evidenziati in rosso i parametri modificabili dall'operatore

L'andamento della temperatura rilevato in rosso, una volta attivata la prova, è il medesimo riportato successivamente in fase di taratura.

Un'ulteriore modifica apportata al macchinario è stata la movimentazione del fine-corsa dal lato castello. Il fine-corsa consiste in una fotocellula che consente di bloccare automaticamente il carrello qualora si porti troppo avanti in direzione del castello, per evitare che questo possa uscire dalla sua guida e cadere a terra. Il fine-corsa è disattivabile da software così che qualora il carrello si trovi nella posizione di fine corsa sia possibile riportarlo indietro disattivando la fotocellula temporaneamente dando modo al motore di muoversi, per poi riattivarla subito dopo. Lo spostamento del fine-corsa di 35 mm verso il motore è stato effettuato fissando la fotocellula su una piastra metallica bullonata con il fine di impedire al motore di arrivare alla fine della corsa esterna del suo braccio prima che la fotocellula ne fermasse il movimento. Varie volte infatti quando il braccio del motore giungeva alla fine della sua corsa esterna rimaneva poi incastrato in quella posizione, richiedendo lunghe operazioni per farlo rientrare. Lo spostamento del fine-corsa ha quindi ridotto la lunghezza del campione utile ad effettuare la prova a 50 mm, avendo a tutti gli effetti limitato il raggio di azione del motore elettrico, senza però grosse conseguenze sulla qualità dei dati ottenuti da test. Effettuando il test su

una lunghezza superiore con questo nuovo assetto si sarebbe rischiato di far scorrere il campione del tutto al di fuori dell'area di contatto con il punzone, lasciando così quest'ultimo caricato dalla vite e dalla molla precompressa ma senza alcuna superficie dal lato opposto che potesse sorreggere il carico, con conseguenze catastrofiche e pericolose, data la delicatezza dei cavi e delle cartucce riscaldanti che si sarebbero trovate proprio al di sotto del punzone. Si riporta di seguito uno schema delle forze e delle temperature coinvolte nel processo Figura 4.20



Figura 4.20 Grafico dell'andamento delle forze e della temperatura durante Strip Drawing Test

4.5.1 Taratura macchina Strip Drawing

La taratura della macchina è stata eseguita per verificare a che temperatura si trovasse effettivamente la superficie della lamiera e quale fosse lo scarto con la temperatura indicata dalla termocoppia inserita nella piastra riscaldante. La temperatura rilevata da quest'ultima infatti difficilmente poteva essere la medesima del campione, dato che quest'ultimo è esposto all'aria e può quindi facilmente dissipare parte del calore fornito, oltre che tramite la mascherina e le viti.

Si sono quindi saldate due termocoppie sulla superficie del campione e si è scaldata la piastra fino alle temperature dei test da effettuare (200 (± 2) °C, 250 (± 2) °C, 300 (± 2) °C, 350 (± 2) °C, 400 (± 2) °C e 450 (± 2) °C). Come previsto la temperatura del campione era inferiore a quella misurata dalla termocoppia interna alla piastra riscaldante. Si è quindi alzata la temperatura di comando da terminale fino a che la temperatura esatta non fosse rilevata dalle termocoppie sulla superficie e non da quella sottostante. La Figura 4.21 rappresenta le temperature rilevate dalle due termocoppie e da quella interna alla piastra in funzione del tempo durante la taratura per effettuare test a 350 °C, l'andamento

a dente di sega è dovuto al funzionamento della macchina stessa e al modo in cui la piastra viene riscaldata.

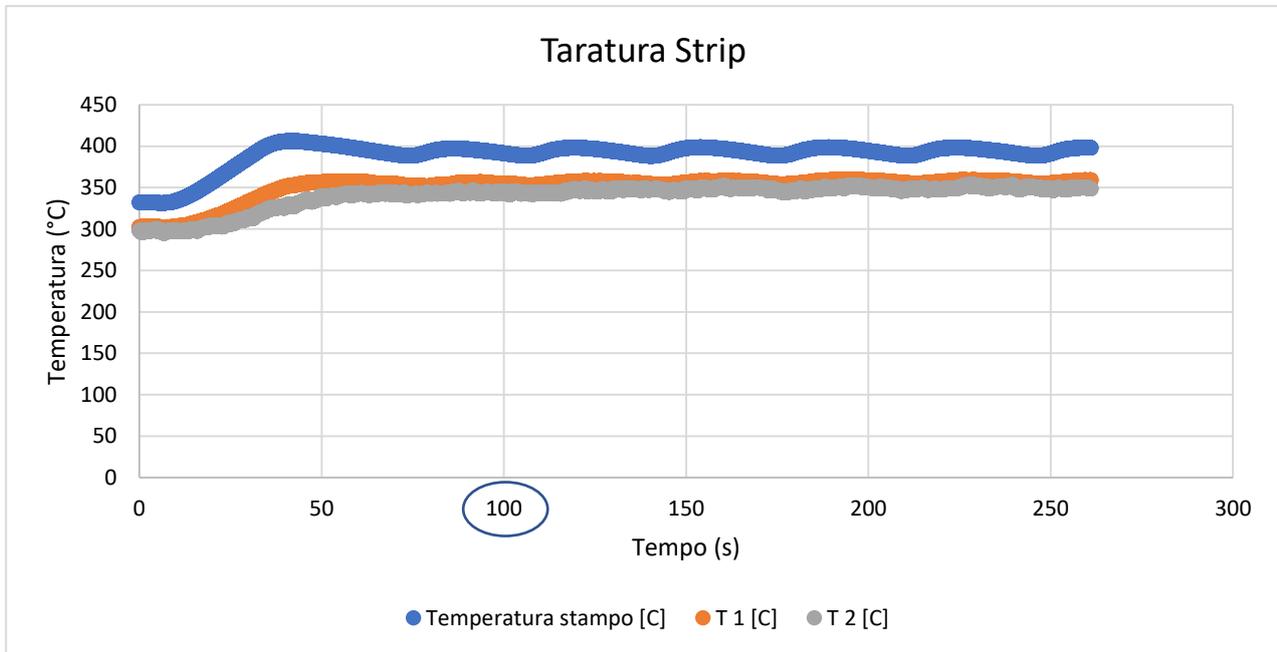


Figura 4.21 Esempio di taratura per test a 350 °C. Si noti come trascorsi 100 secondi la temperatura si possa considerare stazionaria

Se infatti la temperatura misurata (interna alla piastra) è inferiore a quella di comando vengono accese le cartucce riscaldanti e una volta raggiunta la temperatura target vengono spente. L'inerzia termica del metallo fa sì che la temperatura si alzi ulteriormente, prima di calare fino ad essere inferiore a quella di comando, facendo ricominciare il meccanismo.

Come ovvio la temperatura rilevata in superficie ha lo stesso andamento poiché la sorgente riscaldante è la medesima, è però inferiore a quella rilevata dalla termocoppia interna alla piastra, motivo per cui è necessario impostare una temperatura di comando da terminale superiore a quella prevista per il test.

Dall'immagine 4.21 si evince inoltre perché si siano attesi 100 secondi tra il montaggio del campione sulla piastra calda e l'esecuzione del test, è infatti il minor tempo possibile comunque sufficiente ad essere certi che il campione sia in temperatura. L'elenco delle temperature da impartire come comando per ottenere quelle effettive di test è riportato in Tabella 4.4

Tabella 4.4 Confronto tra temperature inserite da terminale e temperatura effettive misurate sulla superficie del campione

TEMPERATURA DA TERMINALE (°C)	TEMPERATURA DI TEST (°C)
200	230
250	275
300	340
350	390
400	445
450	475

4.6 Strumenti per lucidatura e analisi metallografica

4.6.1 Lucidatura del punzone

Con il fine di simulare la rugosità degli stampi industriali si è lucidato il punzone ogni qualvolta si sia presentata adesione durante uno *Strip Drawing Test*. La procedura di *polishing* usuale consiste nell'inglobare il metallo in una resina polimerica e successivamente lucidare la superficie ricorrendo ad un lapidello (automatico o manuale) equipaggiato con carte abrasive al carburo di silicio e raffreddando la superficie con acqua corrente. Qualora la rugosità da raggiungere sia particolarmente bassa si passa poi all'utilizzo di panni impregnati con sospensioni di diamanti di granulometria via via decrescente. È importante lavare accuratamente con acqua e sapone la superficie da lucidare prima di ogni passaggio ad una carta abrasiva a grana più fine, in modo da evitare che scorie o particelle di materiale possano andare a segnare la superficie nella fase successiva. Tale accorgimento, di secondaria importanza se si opera con materiali particolarmente duri, diventa essenziale qualora si lavori con leghe metalliche più tenere. Nel caso del punzone per lo *Strip Drawing Test* non è stato possibile seguire questa procedura a causa delle dimensioni eccessive del pezzo che non sarebbe entrato agevolmente negli stampi per colare la resina epossidica a disposizione; inoltre i tempi molto lunghi richiesti dalla resina bicomponente per asciugare avrebbero reso impossibile l'effettuazione del grande numero di test effettuati. Nemmeno utilizzare una macchina inglobatrice a caldo è stato possibile sempre a causa della geometria del punzone, che è stato quindi lucidato su lapidello

raffreddato ad acqua su carte abrasive a grana via via decrescente (220, 500, 800, 1200, 2000) semplicemente afferrandolo con una mano ed applicando la pressione richiesta con l'altra. Ovviamente tale processo non è dei più precisi e richiede una certa abilità da parte dell'operatore, oltre a produrre una *texture* differente nella direzione di lucidatura e nella perpendicolare. In ogni caso la rugosità S_a ottenuta per il punzone era uguale a $0.019(\pm 0.005) \mu\text{m}$, misurata tramite profilometro. La Figura 4.22 mostra la rugosità media nella direzione concorde alla direzione di test e nella direzione perpendicolare, entrambe compatibili con la pratica industriale.

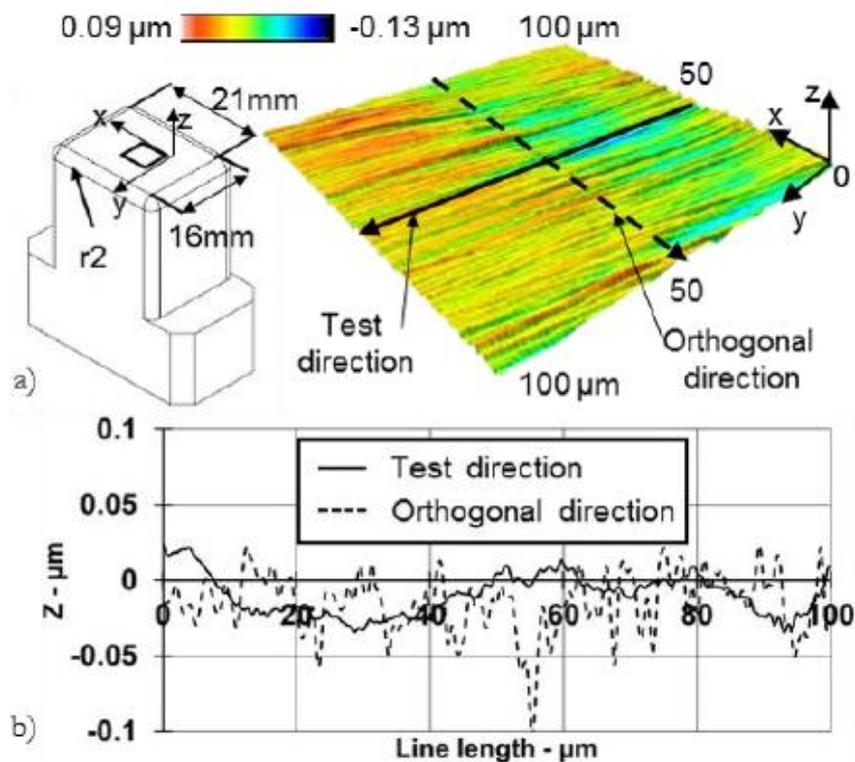


Figura 4.22 a) Disegno e mappa 3D della superficie evidenziata b) Profilometrie nelle due direzioni concorde ed ortogonale alla direzione di test

4.6.2 Analisi metallografica

Le indagini metallografiche condotte sono state volte principalmente a verificare che il trattamento termico di solubilizzazione fosse andato a buon fine, eliminando quindi il più possibile i precipitati dovuti al trattamento di invecchiamento. Si è inoltre verificato che la dimensione della grana cristallina non risultasse alterata dal trattamento di solubilizzazione, poiché ciò potrebbe variare le proprietà meccaniche ed inficiare l'esito dei test successivamente effettuati. I campioni di lamiera della dimensione di 10.0 x 10.0 x 2.0 (± 0.1) mm, sia allo stato T6 che solubilizzati, sono stati quindi inglobati in resina epossidica bicomponente, attendendo 24 ore per la solidificazione della stessa. In questo caso l'inglobamento a caldo non era una strada percorribile poiché la lamiera solubilizzata sarebbe stata sottoposta a temperature attorno ai 200 °C per circa 30 minuti, così da rendere probabile la riprecipitazione di alcuni composti, rendendo così inutile il trattamento termico stesso. Si è quindi proceduto alla lucidatura manuale su lapidello raffreddando con acqua corrente, con carte abrasive al carburo di silicio di grana decrescente (220, 500, 800, 1200, 2000, 4000) e successivamente su panni lubrificati con una sospensione di diamanti di granulometria nominale di 6 μm , 3 μm e 1 μm . In questo caso data la scarsa durezza della lega di alluminio, soprattutto allo stato solubilizzato, è stato di importanza ancora maggiore il lavaggio tra una carta abrasiva e l'altra e tra un panno ed il successivo; oltre a rendersi necessario il lavaggio dei panni stessi prima e dopo l'utilizzo, per evitare che particelle estranee o derivanti da lavorazioni precedenti potessero segnare la superficie del campione ad uno stato di lucidatura avanzato.

È bene ricordare che dato lo spessore esiguo dei campioni si deve prestare attenzione a non applicare una pressione eccessiva durante la lucidatura, specialmente con le prime carte abrasive, in modo da non consumare tutto lo spessore del campione. Dopo aver lucidato, lavato con acqua e sapone e successivamente con alcol etilico, ed aver asciugato i campioni si procede all'attacco chimico. Per la lega Al7075 l'attacco più adeguato [17] è quello di Graff-

Sargent, che viene preparato secondo i quantitativi riportati in Tabella 4.5

Tabella 4.5 *Composizione dell'attacco d Graff-Sargent*

COMPOSTO CHIMICO	QUANTITÀ
Acqua demineralizzata	84 mL
HNO ₃	15.5 mL
HF	0.5 mL
CrO ₃	3 g

Si è quindi attaccato la superficie lucidata per tempi di 30 s, 60 s, e 90 s, per essere poi sicuri di avere campioni osservabili; attaccati abbastanza da mettere in evidenza la microstruttura e non così tanto da corrodere tutta la superficie. Si è proceduto quindi all'esaminazione al microscopio ottico a riflessione dei campioni, tenendo presente che un cattivo lavaggio avrebbe potuto corroderne le lenti, dato che l'attacco chimico contiene acido fluoridrico. Sono state scattate micrografie dei campioni allo stato T6 e solubilizzato ad ingrandimenti da 200x a 1000x per valutare quanto precedentemente descritto riguardo la microstruttura; come mostrato a titolo esemplificativo in Figura 4.23

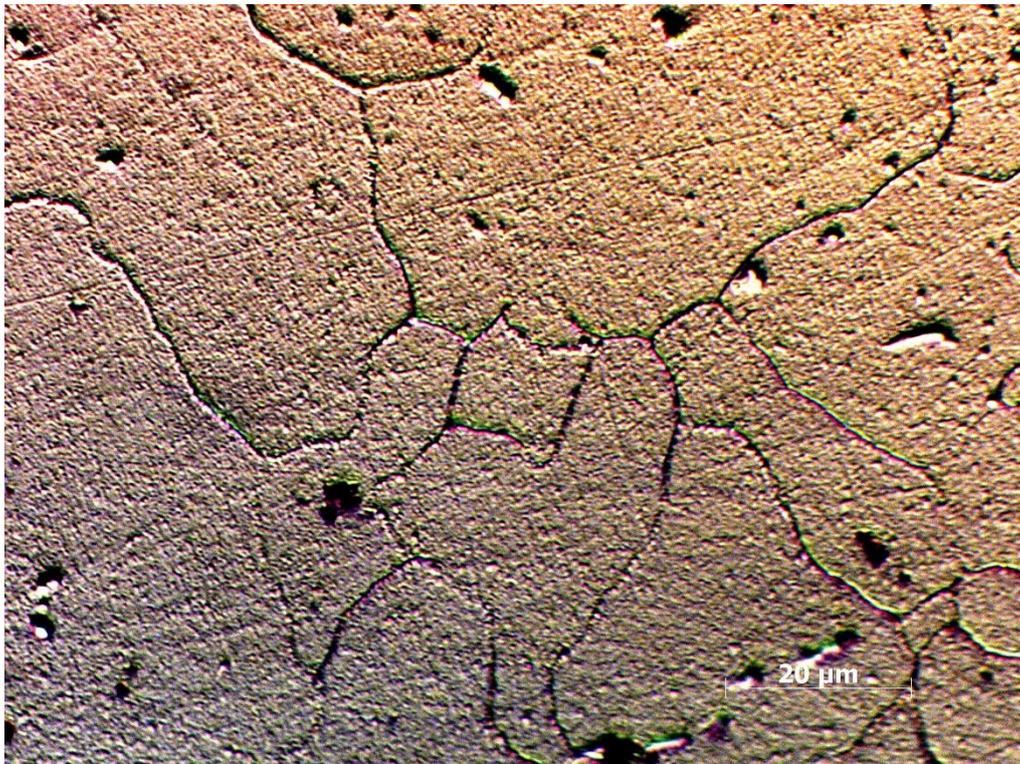


Figura 4.23 Esempio di micrografia con ingrandimento 1000x effettuata al microscopio ottico su un campione allo stato T6

5 Risultati

5.1 Trattamenti termici e micrografie

Il trattamento termico T6 nelle leghe di alluminio consiste nella solubilizzazione completa della lega, seguita da invecchiamento artificiale, ovvero portando il materiale ad una temperatura tale e per un tempo sufficiente a far precipitare i precipitanti, dando precipitati della dimensione adatta ad ottenere il massimo delle proprietà meccaniche della lega [18]. Le lamiere fornite erano allo stato T6, trattamento effettuato dopo le operazioni di laminazione così che il materiale fosse allo stato richiesto ma non indurito per lavorazione meccanica. La campagna sperimentale è stata condotta su lamiere sia allo stato T6 che solubilizzate, è stato quindi essenziale verificare che le lamiere fornite fossero effettivamente allo stato richiesto e che il trattamento termico di solubilizzazione da noi effettuato fosse efficace. Per lamiere di Al7075 dello spessore di circa 2mm il trattamento termico di solubilizzazione ottimale richiede il mantenimento a 480 °C della lega per 35 minuti seguito da tempra in acqua [19]. Con il fine di ridurre i tempi e di avere quindi la possibilità di effettuare più test si è provato ad eseguire il trattamento termico alla stessa temperatura indicata in letteratura ma per soli 10 minuti, verificando poi se vi fossero differenze con i campioni solubilizzati più a lungo. Per verificare che la solubilizzazione fosse avvenuta già dopo 10 minuti è stata misurata la durezza a temperatura ambiente di campioni solubilizzati con tempi differenti, senza riscontrare alcuna differenza significativa. Allo stesso modo si sono effettuati test di rottura a trazione che hanno confermato l'equivalenza delle proprietà meccaniche tra i campioni solubilizzati per 35 minuti e quelli solubilizzati per 10 minuti.

Si sono infine realizzate varie micrografie confrontando la microstruttura della lamiera T6 e di quella solubilizzata. La Figura 5.1 mostra come la quasi totalità dei precipitati non sia più presente dopo il trattamento di solubilizzazione, il che conferma come 10 minuti a 480 °C siano sufficienti per le dimensioni dei nostri campioni a dare completa dissoluzione dei precipitati.

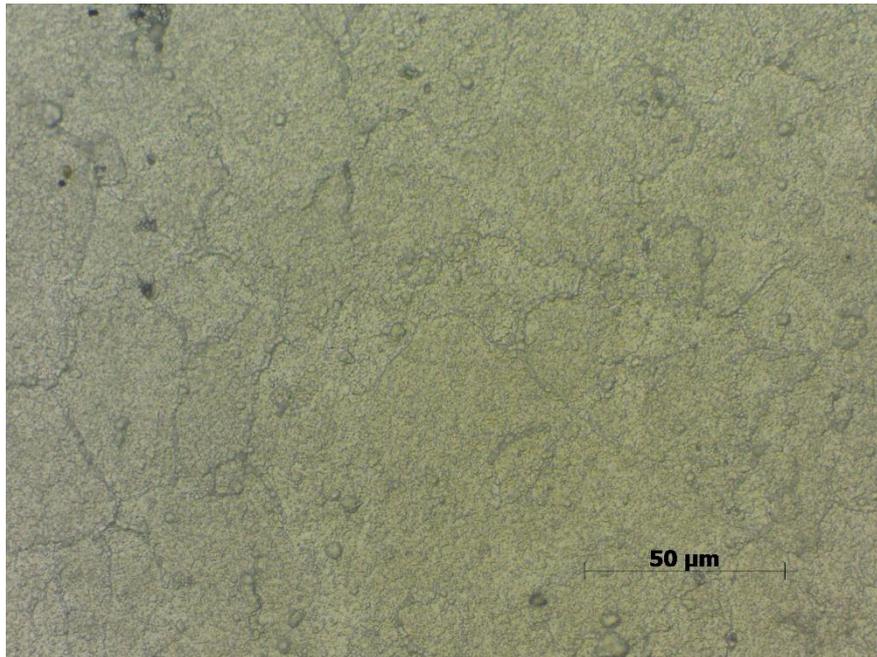


Figura 5.1 Micrografia su un campione solubilizzato per 10 minuti a 480 °C. I precipitati sono quasi totalmente assenti

Uno studio di Sudhanshu S. Singh et al. [20] Riporta come allo stato T6, i principali precipitati siano di due tipi, uno caratterizzato dalla presenza di ferro e l'altro dalla presenza di silicio. Le indagini EDX condotte l'hanno infatti confermato; in Figura 5.2 si può notare la micrografia scattata al SEM ed i tre punti su cui si è eseguita l'analisi elementare EDX, rispettivamente P1 sulla matrice, P2 su un tipo di precipitato che si è rivelato contenere ferro e P3 sul secondo tipo di precipitato contenente silicio.

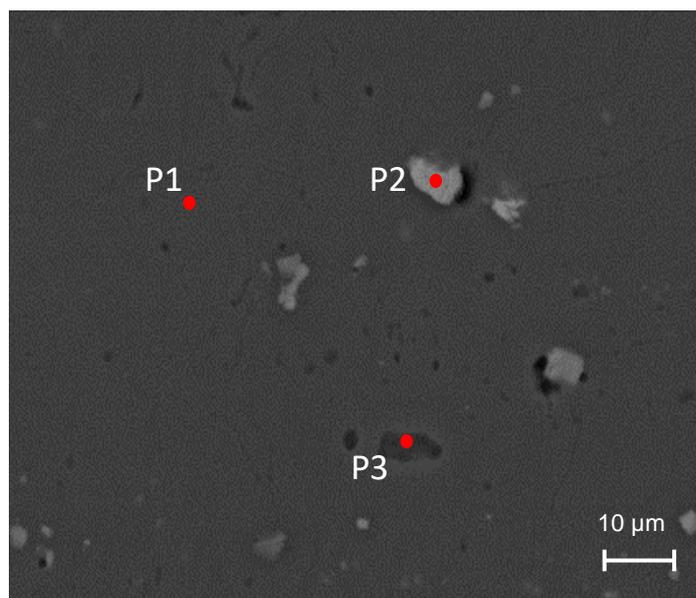


Figura 5.2 Immagine al microscopio elettronico con evidenziati i punti in cui è stata effettuata l'analisi EDX

L'analisi quantitativa rivela che i rapporti atomici del precipitato chiaro P1 sono circa 7:2:1, suggerendo che probabilmente si tratti di Al_7Cu_2Fe ; mentre per il precipitato più scuro P2 sono di circa 2:1, rendendo probabile che si tratti di Mg_2Si , come peraltro similmente rilevato nello studio sopracitato [20].

Le percentuali di alluminio elevate rilevate in tutte le analisi EDX, per esempio anche all'interno del precipitato P2, sono dovute in parte all'esigua dimensione dei precipitati. Per come sono stati preparati i campioni infatti i precipitati in evidenza sono quelli che venivano tagliati dal piano di lucidatura, il loro spessore quindi è dell'ordine di grandezza di qualche micron, facendo sì che la sonda rilevi i picchi relativi all'alluminio della matrice sottostante. Sono riportate di seguito in Figura 5.3 i risultati delle analisi EDX effettuate.

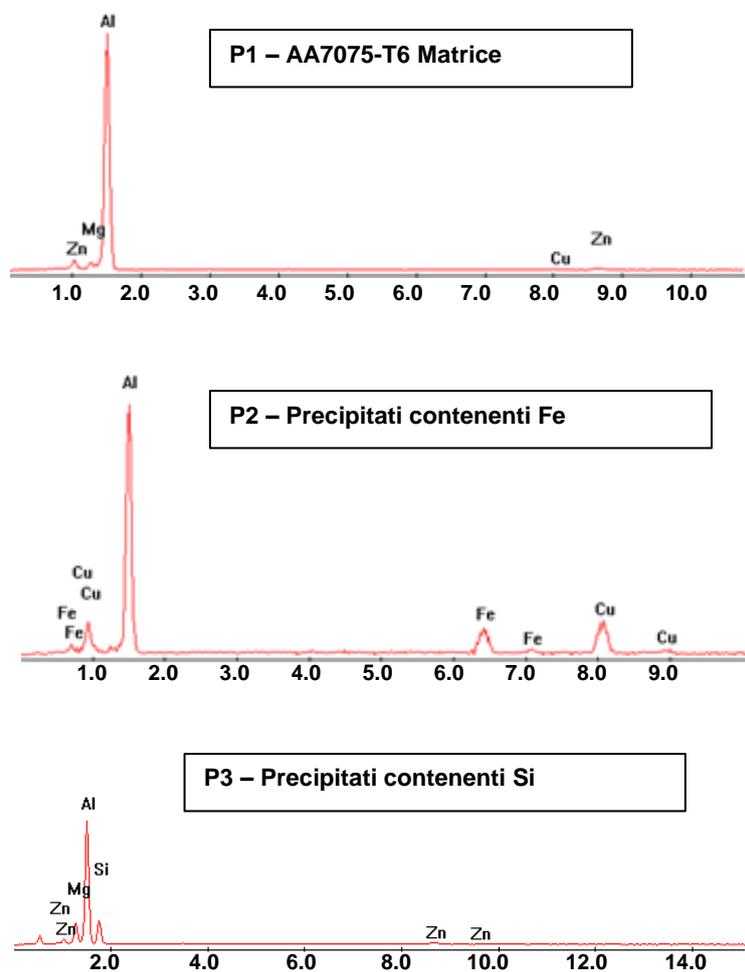


Figura 5.3 Risultati dell'analisi quantitativa EDX effettuata sui tre punti P1, P2 e P3

5.2 Lubrificazione

Per la lubrificazione si è proceduto come precedentemente descritto a riscaldare i campioni tramite lampade infrarosse e successivamente alla spruzzatura della soluzione al 15% di Bonderite® L-GP Aquadag in acqua demineralizzata. Poiché la lubrificazione può influire drammaticamente sui risultati dello *Strip Drawing Test* è estremamente importante che tutti i campioni vengano lubrificati uniformemente tra di loro e coerentemente con la quantità di lubrificante utilizzata in ambito industriale, così da rendere le prove utili ai fini produttivi. Si è quindi seguita la procedura precedentemente descritta avendo cura di scartare tutti i provini la cui lubrificazione non risultasse ottimale per qualsiasi motivo. Questi campioni sono stati lavati accuratamente con acqua e acetone, asciugati ed eventualmente nuovamente lubrificati. Per verificare la deposizione ottimale i campioni, una volta numerati, sono stati sottoposti a pesatura prima e dopo lubrificazione per verificare la quantità di grafite effettivamente aderita alla superficie.

La ripetibilità e l'omogeneità del processo di lubrificazione si sono rivelate eccellenti, fornendo per tutti i campioni pesati una quantità di grafite di $1.5 (\pm 0.2) \text{ g/m}^2$, considerando chiaramente solo la superficie effettivamente lubrificata, senza considerare quindi la zona di aggancio forata del campione. Analizzando un'immagine scattata al SEM ed una profilometria di un campione lubrificato prima di eseguire lo *Strip Drawing Test* si è verificato come lo strato di lubrificante sia uniforme e dato il suo spessore relativamente esiguo non vada a coprire la rugosità superficiale del campione.

Si è rilevato inoltre come la lubrificazione da entrambi i lati del provino non apportasse alcuna variazione ai risultati dello *Strip Drawing Test* rispetto alla lubrificazione della sola superficie in contatto con il punzone. Per come è strutturata la prova infatti la deformazione e lo scorrimento di due superfici si ha esclusivamente tra lamiera e punzone e non tra lamiera e piastra riscaldante, rendendo così superflua la lubrificazione dal lato opposto. Nella pratica industriale, in cui si hanno stampi da entrambi i lati della lamiera è invece necessario lubrificare entrambe le superfici, poiché si ha scorrimento e quindi attrito tra lamiera e stampi da entrambe le parti. Chiaramente è stato tenuto conto di ciò nel misurare la quantità di lubrificante applicata, calcolando esattamente la variazione di peso rispetto all'effettiva superficie lubrificata, ottenendo in ogni caso gli stessi risultati sopra descritti.

5.3 Risultati prove di trazione

Le prove di trazione sono state una delle modalità con cui si è andati a caratterizzare le proprietà meccaniche della lega, sia allo stato T6 che solubilizzata, a tutte le temperature di test, come precedentemente descritto. I campioni della lunghezza utile di 65 mm sono stati deformati in tensione fino a rottura con uno *strain rate* di $0,1 \text{ s}^{-1}$. Il dato più interessante ricavato dai test di trazione è stato carico di rottura della lega nei due stati ed al variare della temperatura. Il carico di snervamento può essere parimenti inferito dai dati raccolti sia allo stato T6 che per la lega solubilizzata a tutte le temperature di test; non è tuttavia un dato particolarmente significativo poiché trattandosi di uno studio volto ai processi di stampaggio a caldo si dà per scontato che durante il processo industriale lo stress applicato al materiale superi di gran lunga il carico di snervamento. Anche l'allungamento a rottura non è stato approfondito particolarmente per varie ragioni. Innanzi tutto esso può avere una notevole variabilità da un campione all'altro causato da difetti o particolarità del singolo campione, rendendo difficile un'eventuale comparazione dei dati; inoltre il dinamometro a MTS-322 50kN non è lo strumento più indicato per questo tipo di misura. La deformazione è infatti misurata dalla macchina calcolando di quanto la ganasca superiore si sia mossa rispetto a quella inferiore che invece rimane ferma, al momento della rottura del campione, ovvero quando le celle di carico rilevano una forza necessaria a muovere la ganasca pari alla sola forza peso della ganasca stessa. In questo modo qualsiasi assestamento del campione o qualsiasi piccolo movimento o scivolamento va ad inficiare la veridicità della misura. Un sistema molto più preciso utilizzato nei laboratori del dipartimento di ingegneria industriale è il sistema ARAMIS. Questo è un sistema di misura senza contatto che si basa sulla correlazione di immagini digitali rilevate da un'apposita videocamera. Per pura speculazione scientifica si sono confrontati i risultati di elongazione a rottura con quelli ottenuti tramite sistema ARAMIS in un precedente studio svolto presso l'Università di Padova [21] rivelando differenze anche di decine di punti percentuali, proprio a causa della scarsa affidabilità della semplice prova di trazione per questo tipo di misure.

5.3.1 Prove a temperatura ambiente con lamiera solubilizzata

Le prime prove effettuate, nonché le uniche effettuate a temperatura ambiente, sono state su campioni solubilizzati rispettivamente per 35 e 10 minuti a 480 °C e temprati in acqua, con il fine di accertare che non vi fossero differenze tra i due trattamenti termici e poter quindi scegliere di effettuare sempre il secondo, più veloce e pratico. Le prove sono state effettuate con ripetibilità di tre e non hanno evidenziato alcuna differenza statisticamente significativa tra i campioni che avevano subito un trattamento termico più lungo e quelli solubilizzati solamente per 10 minuti. A titolo esemplificativo si riportano in Figura 5.4 i diagrammi di sforzo-deformazione di due campioni solubilizzati con le due diverse modalità; si tenga presente che lo sforzo misurato è quello ingegneristico poiché calcolato dividendo la forza misurata istantaneamente dalla cella di carico per la sezione iniziale del provino e che la deformazione, anch'essa ingegneristica, è rilevata come descritto precedentemente e non tramite sistema ARAMIS poiché poco interessante ai fini dello studio.

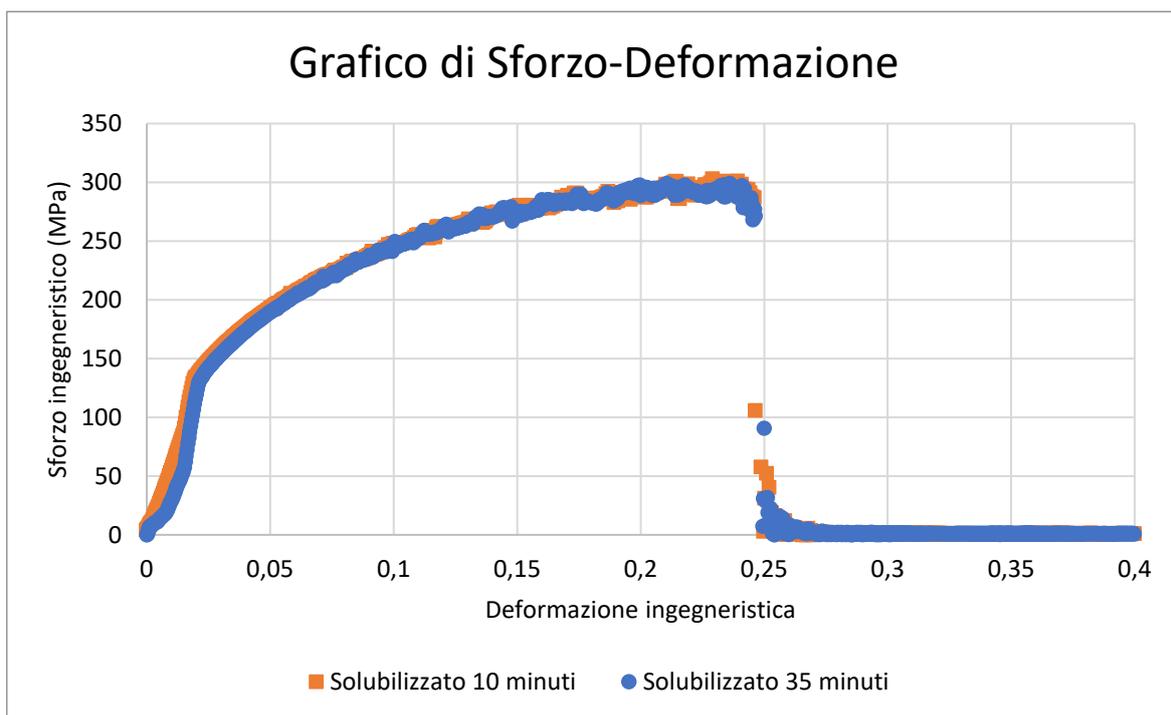


Figura 5.4 esempi di curve Sforzo – Deformazione di due campioni solubilizzati per 10 e 35 minuti. Si può notare come le due curve siano sovrapponibili

Si noti come non vi siano praticamente differenze tra i due campioni, i cui carichi di rottura misurati sono nello specifico rispettivamente 299 (± 3) MPa e 303 (± 3) MPa. Il tratto crescente della curva con andamento "seghettato" è dovuto alle ganasce a viti della camera climatica. Benché sia stato

effettuato a temperatura ambiente il test ha utilizzato le ganasce proprie della camera climatica poiché essa si trovava già montata sul dinamometro con il fine di eseguire successivamente prove a temperature superiori. Queste ganasce si serrano manualmente con quattro viti ciascuna invece che chiudersi idraulicamente come le normali ganasce della macchina di trazione e questo fa sì che il loro afferraggio non sia ugualmente forte, dato che sono progettate per test di materiali ad alta temperatura. La resistenza della lega era infatti al limite con la capacità di afferraggio delle ganasce, dando così una curva dalla forma peculiare, dovuta a microscopici scivolamenti ed assestamenti successivi dei campioni. Queste curve sono in effetti un buon esempio di come la deformazione a rottura non possa essere misurata in maniera soddisfacente con questa strumentazione.

5.3.2 Andamento del carico di rottura su campioni T6 e solubilizzati

Un altro obiettivo delle prove di trazione era valutare come le proprietà meccaniche della lega variassero al variare della temperatura e come variassero alla medesima temperatura tra lo stato T6 ed i campioni solubilizzati. Generalmente la solubilizzazione rende la lega meno resistente e più deformabile, poiché elimina i precipitati che si oppongono al movimento delle dislocazioni. Non è però facile valutare a priori l'estensione di questi cambiamenti attesi, infatti la dimensione e la distribuzione dei precipitati, nonché la loro quantità totale, sono parametri cruciali nel determinare la differenza di proprietà meccaniche tra la lega solubilizzata e allo stato T6. Inoltre a temperature elevate entrano in gioco anche le interazioni tra la matrice ed i precipitati; qualora infatti ad esempio i precipitati avessero le dimensioni e la distribuzione ideale per ancorare il movimento delle dislocazioni ma la matrice abbia proprietà scadenti a causa dell'elevata temperatura si potrebbe avere un comportamento complessivo del campione allo stato T6 che si avvicina molto a quello della sola matrice o della lega solubilizzata.

La Figura 5.5 mostra l'andamento del carico di rottura in funzione della temperatura dai 200 °C ai 400 °C, confrontando la lega allo stato T6 con quella solubilizzata e fa riferimento a test eseguiti con ripetibilità tre. Come prevedibile il carico di rottura va calando al crescere della temperatura in entrambi i casi e quello della lega T6 è generalmente superiore a quello della lega solubilizzata, soprattutto alle temperature più basse.

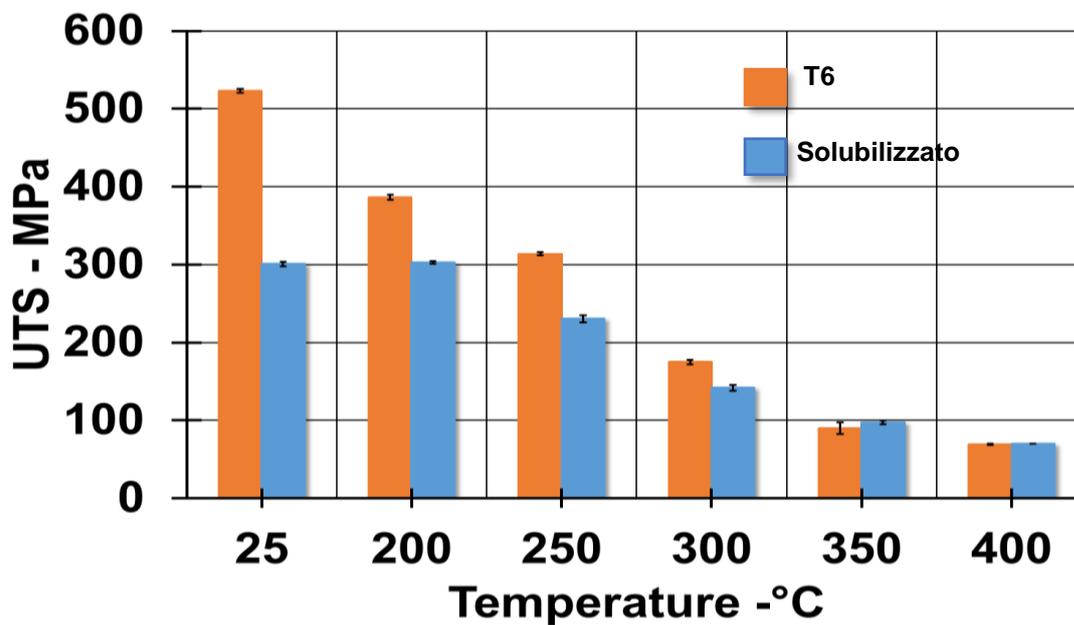


Figura 5.5 Andamento del carico di rottura o UTS (Ultimate Tensile Stress) di campioni T6 e solubilizzati al crescere della temperatura

È interessante notare come nelle prove a 350 °C e 400 °C non vi sia una differenza apprezzabile nei carichi di rottura della lega nei due stati. Ciò potrebbe essere dovuto al fatto che si è vicini alla temperatura di solubilizzazione di 480 °C, ed i precipitati nella lega T6 potrebbero quindi avere iniziato a tornare all'interno della soluzione solida formando una sola fase. Oppure viceversa restando a temperatura elevata la lega solubilizzata potrebbe aver iniziato ad invecchiare; avendo i componenti dei precipitati l'energia sufficiente alla segregazione dalla fase primaria. Se queste considerazioni possono essere sicuramente vere dal punto di vista termodinamico non lo sono altrettanto dal punto di vista cinetico; i campioni riscaldati tramite passaggio di corrente sono rimasti infatti alla temperatura necessaria al test per soli 10 secondi rendendo fortemente improbabile una variazione della microstruttura. Per i test eseguiti in camera climatica potrebbe rimanere il dubbio, comunque fugato per due ragioni: la prima, la camera climatica può arrivare solo a 315 °C, tutti i test nell'intervallo 350 °C – 450 °C sono quindi stati eseguiti con l'ausilio del generatore ad alta potenza; la seconda, gli altri test sono stati ripetuti con i due metodi di riscaldamento dando gli stessi risultati per quanto riguarda il carico di rottura. Inoltre è comunque improbabile che i 100 secondi necessari per il test nella camera climatica siano sufficienti a modificare sensibilmente la microstruttura, se paragonati ai 35 minuti suggeriti per il trattamento di solubilizzazione. La motivazione quindi più plausibile per questa differenza così minimale tra i carichi di rottura della lega nei due differenti stati tra i 350 °C ed i 450°C è da ricercare nelle proprietà meccaniche della matrice della lega allo stato

T6, che a temperature così elevate sono fortemente compromesse. Se la matrice quindi deforma plasticamente con molta facilità si perde l'effetto di ancoraggio delle dislocazioni dovuto ai precipitati, poiché le dislocazioni hanno energia sufficiente a muoversi in ogni caso.

La Figura 5.6 mostra le curve di trazione della lega nei due stati T6 e solubilizzato, a tutte le temperature a cui è stato effettuato il test. Lo sforzo mostrato è quello ingegneristico così come la deformazione.

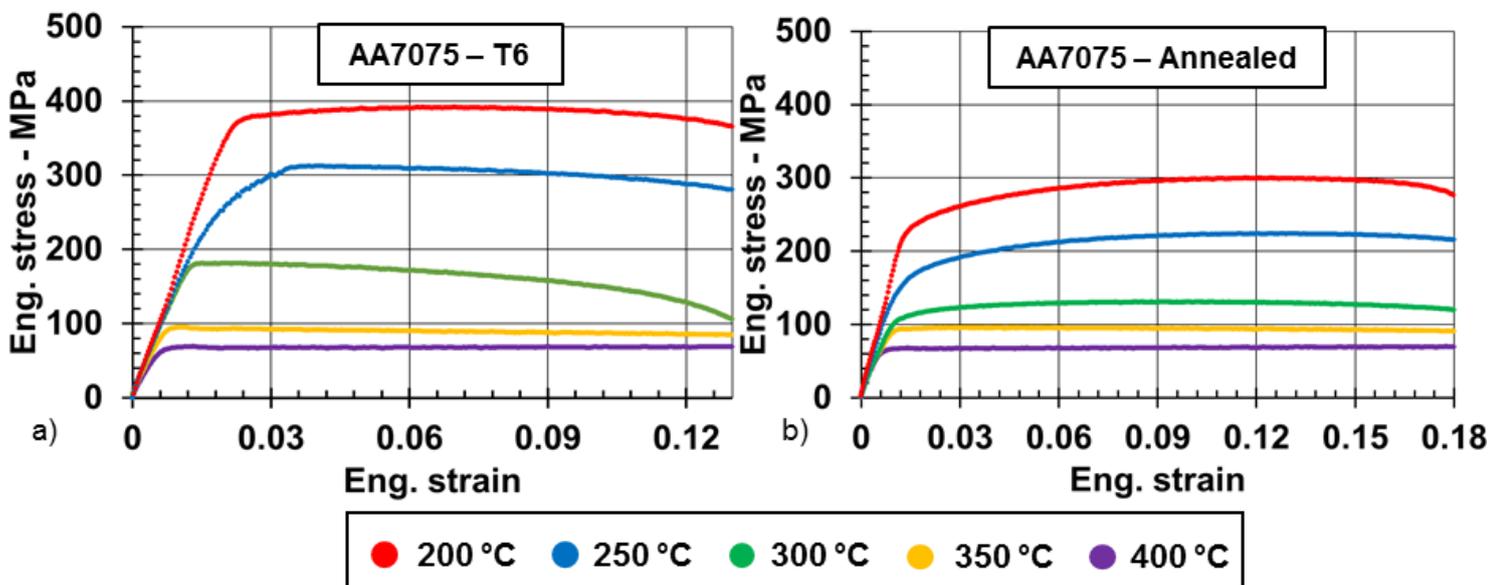


Figura 5.6 Curve di trazione riguardanti campioni T6 e solubilizzati al crescere della temperatura

Si noti come in entrambi i casi all'aumentare della temperatura vadano riducendosi gli sforzi di snervamento, così come i carichi di rottura, come già precedentemente sottolineato e come previsto. È interessante notare come anche in questo caso non vi sia una differenza marcata tra gli sforzi di snervamento tra la lega T6 e quella solubilizzata a temperature dai 350 °C ai 450 °C, come anche per il carico di rottura, probabilmente per le stesse ragioni di perdita di proprietà meccaniche della matrice della lega T6, che la rende molto simile a quella solubilizzata. Inoltre a partire dai 300 °C nel solubilizzato e dai 350 °C nella lega T6 diventano simili tra loro anche gli sforzi di snervamento a temperature via via più elevate riguardanti uno stesso tipo di lega. Alle temperature di test più elevate quindi non solo non vi sono sostanziali differenze tra un trattamento termico e l'altro a parità di

temperatura ma non vi sono grosse differenze neanche su uno stesso tipo di lega al variare della temperatura, purché resti nell'intervallo 350 °C – 450 °C.

5.4 Risultati prove di durezza

Le prove di durezza sono state un'altra metodologia con cui indagare le proprietà meccaniche dei campioni nei diversi stati di invecchiamento nonché l'unico modo di testare le proprietà meccaniche del punzone. Non si avevano a disposizione infatti campioni dello stesso materiale del punzone e con lo stesso stato di tempra e rinvenimento per effettuare prove di trazione o altre caratterizzazioni meccaniche.

5.4.1 Durezza de punzone

Si è scelto quindi di tagliare un vecchio punzone non più utilizzato, dello stesso materiale e con gli stessi trattamenti termici effettuati dallo stesso fornitore; per effettuarvi le prove di durezza a caldo. Particolari accorgimenti sono stati presi per rendere affidabili i dati acquisiti in seguito. Innanzitutto i campioni, precedentemente descritti, sono stati ricavati dalle superfici esterne del punzone e le prove sono state effettuate su quelle medesime superfici così da ottenere dati della durezza effettiva del punzone, comprensiva di materiale e trattamento termico. Una prova effettuata sulla superficie interna, creata attraverso il taglio del punzone potrebbe infatti dare risultati di durezza minore a quella reale del punzone a causa del differente trattamento termico superficiale o anche maggiore a causa di un possibile incrudimento dato dalle operazioni di taglio; piuttosto difficoltose data l'elevata durezza del materiale e lo spessore del punzone. Un ulteriore accorgimento è stato di rettificare con un lapidello semiautomatico la superficie ottenuta dal taglio del punzone così da essere sicuri al contempo che poggiasse perfettamente sulla superficie di prova del durometro, non dando modo al campione di muoversi a causa di equilibri instabili dati da eventuali bave o imprecisioni di taglio; e che la superficie esterna da testare fosse perfettamente perpendicolare all'indentatore. L'operazione di rettifica è stata eseguita con abbondante liquido refrigerante e lubrificante e con velocità di passata molto bassa. Data infatti l'ingente quantità di materiale da asportare, a causa anche di un taglio non ottimale, e la durezza del materiale si correva il rischio di surriscaldare la superficie e tutto il pezzo, così da inficiarne il trattamento termico. In Figura 5.7 sono riportati i risultati dei test di durezza su punzone da temperatura ambiente a fino a 450 °C, effettuati con ripetibilità cinque, attendendo 100

secondi dall'inserimento del pezzo nella camera di riscaldamento in temperatura all'inizio del test, come descritto in precedenza.

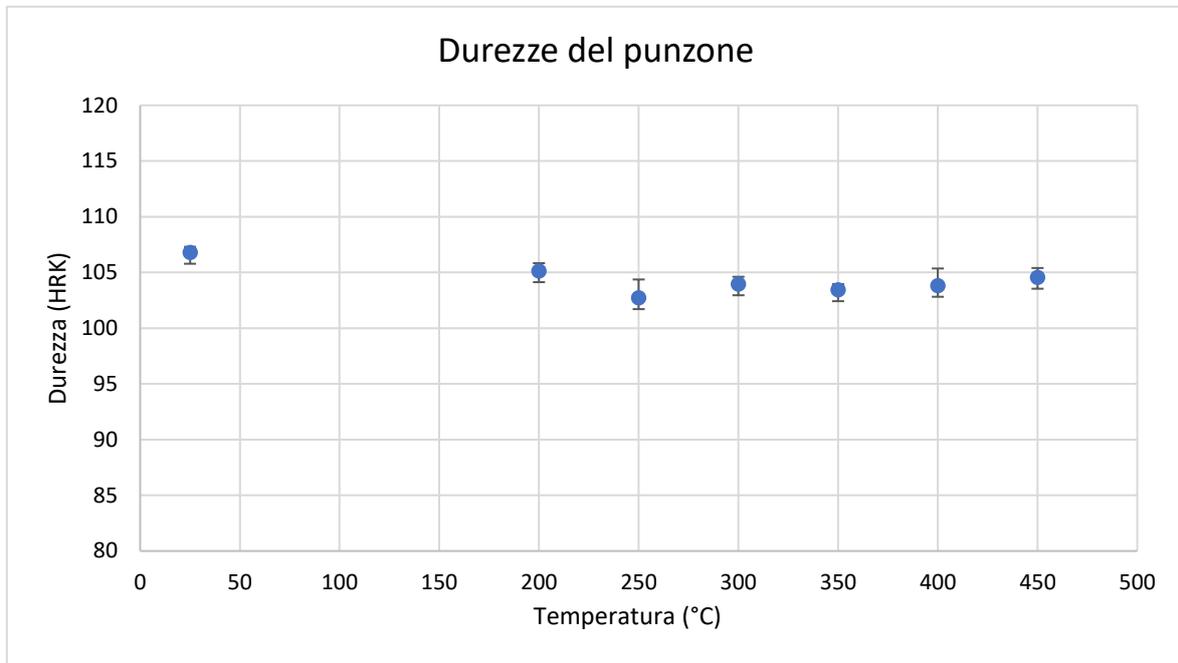


Figura 5.7 Durezze HRK del punzone al variare della temperatura. Non vi sono sensibili variazioni di durezza a tutte e temperature indagate

Si noti come non vi siano differenze statisticamente rilevanti tra le durezze del punzone a tutte le temperature. Ciò ci permette di escludere poi che durante lo *Strip Drawing Test* vi siano influenze sui risultati date da variazioni di proprietà meccaniche del punzone dovute al cambio di temperatura invece che dovute al comportamento chimico-fisico del campione.

5.4.2 Confronto tra solubilizzazione di 10 e 35 minuti

Una seconda campagna di prove sperimentali è stata effettuata per verificare anche nel caso della durezza, come nei test di trazione a rottura, che il trattamento termico di solubilizzazione adottato di 10 minuti a 480 °C fosse equivalente a quello suggerito di 35 minuti. Si sono quindi solubilizzati i campioni precedentemente descritti con le due diverse modalità, sono stati temprati in acqua per “congelarne” la microstruttura e sono stati eseguiti i test di durezza superficiale a temperatura ambiente. Non sono stati effettuati in questo caso test ad elevata temperatura, il fine infatti era semplicemente di verificare che 10 minuti fossero sufficienti alla solubilizzazione dei campioni e non la completa caratterizzazione delle durezza in funzione della temperatura. In Figura 5.8 sono riportati i risultati delle prove di durezza sui campioni solubilizzati rispettivamente 10 minuti e 35 minuti.

Immagine xxx

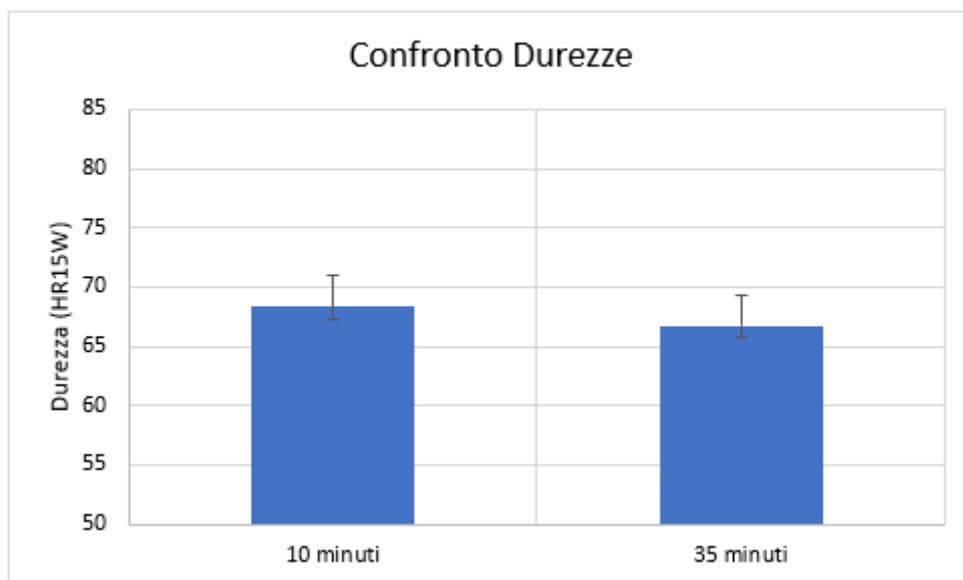


Figura 5.8 Confronto tra la durezza di campioni solubilizzati per 10 minuti e per 35 minuti. Non vi sono differenze di durezza rilevanti

Non si notano differenze statisticamente rilevanti, ad indicare come i due trattamenti termici siano fondamentalmente equivalenti per quanto riguarda la variazione di durezza della lega; similmente a come già rilevato nel caso della prova di trazione. Non si è ritenuto necessario effettuare questo tipo di analisi a temperatura più elevate confrontando i due trattamenti termici di solubilizzazione in quanto non vi è motivo per cui due campioni della stessa lega, per quanto solubilizzati con modalità differenti, che abbiano le stesse proprietà meccaniche a temperatura ambiente debbano mostrare differenze aumentando la temperatura. Il fatto che la durezza sia la medesima e che le curve di

trazione siano sovrapponibili tra campioni trattati con le due metodologie suggerisce che di fatto la microstruttura ottenuta con i due trattamenti sia analoga e fondamentale indistinguibile, per quanto venga raggiunta con modalità differenti. Ciò è confermato anche dalle indagini metallografiche previamente descritte che mostrano come nella nega trattata per 10 minuti non vi sia praticamente traccia di precipitati. Considerando entrambi i tipi di test meccanici effettuati e le indagini metallografiche si può definitivamente stabilire la sostanziale equivalenza dei due trattamenti termici al fine di ottenere la stessa microstruttura e di conseguenza le stesse proprietà meccaniche.

5.4.3 Andamento della durezza su campioni T6 e solubilizzati

Ultimati i test preliminari su punzone e lega solubilizzati si è passati all'analisi a varie temperature della lega allo stato T6 e solubilizzata per verificare come la durezza andasse variando in funzione della temperatura di test. La Figura 5.8 mostra i risultati delle prove di durezza caldo.

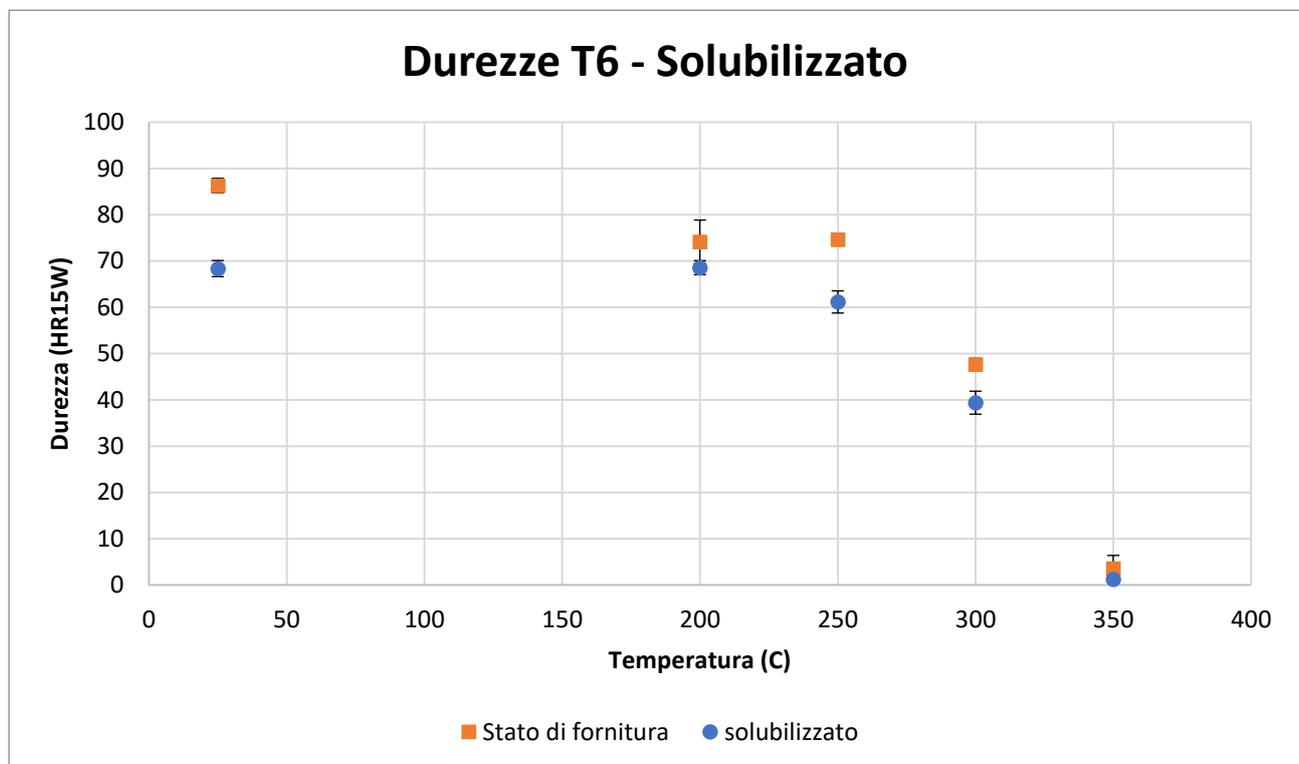


Figura 5.8 Variazione della durezza di campioni T6 e solubilizzati al variare della temperatura

Come precedentemente descritto la procedura adottata è stata quella del test HR 15W, poiché l'unica con un carico sufficientemente basso da essere compatibile con le proprietà meccaniche della lega e con gli indentatori a disposizione. Si noti come entrambe le leghe abbiano durezze che calano all'aumentare della temperatura con lo stesso andamento; la lega allo stato T6 ha una durezza media superiore a quella solubilizzata di circa il 15% a tutte le temperature testate.

Si può notare inoltre come sopra i 250 °C si abbia un calo piuttosto repentino di durezza per entrambi i tipi di lega, che comunque lascia invariato il fatto che la lega T6 abbia una durezza superiore e sempre mediamente della stessa percentuale.

Le temperature testate sono state temperatura ambiente, 200 °C, 250 °C, 300 °C e 350 °C; non è stato possibile eseguire prove a temperature più elevate come per la trazione e lo *Strip Drawing Test* poiché la lega sopra i 350 °C presenta caratteristiche meccaniche troppo scarse ed una tensione di snervamento così bassa che l'indentatore andava a deformare il campione in tutto il suo spessore, invece che solo superficialmente come previsto dal tipo di test. Si ottenevano infatti a temperature più elevate risultati numerici privi di significato dalla macchina tarata per il test di durezza a caldo ed evidenti rigonfiamenti sul campione attorno alla zona di test dovuti al mantenimento del volume del campione sottoposto a deformazione plastica nel suo spessore. Una semplice ispezione visiva inoltre era sufficiente a notare che il campione aveva perso in quelle condizioni la sua planarità e sulla faccia opposta a quella su cui veniva eseguito il test si vedeva una chiara deformazione data dalla reazione vincolare della superficie sottostante. Per questi motivi si è deciso di interrompere i test a 350 °C poiché proseguire a temperature più elevate sarebbe stato difficile praticamente e non avrebbe dato alcun risultato utile allo studio.

5.5 Confronto tra durezze e carico di rottura

Una volta ottenuti i dati su durezze e prove di trazione riguardanti i campioni nei due stati T6 e solubilizzato si ha una caratterizzazione delle proprietà meccaniche della lega al variare della temperatura. Si può valutare infatti come tali proprietà vadano variando considerandole in funzione della temperatura o confrontando la lega solubilizzata con quella T6 nelle stesse condizioni. La Figura 5.9 riporta l'andamento del carico di rottura e della durezza della lega allo stato T6 con il variare della temperatura.

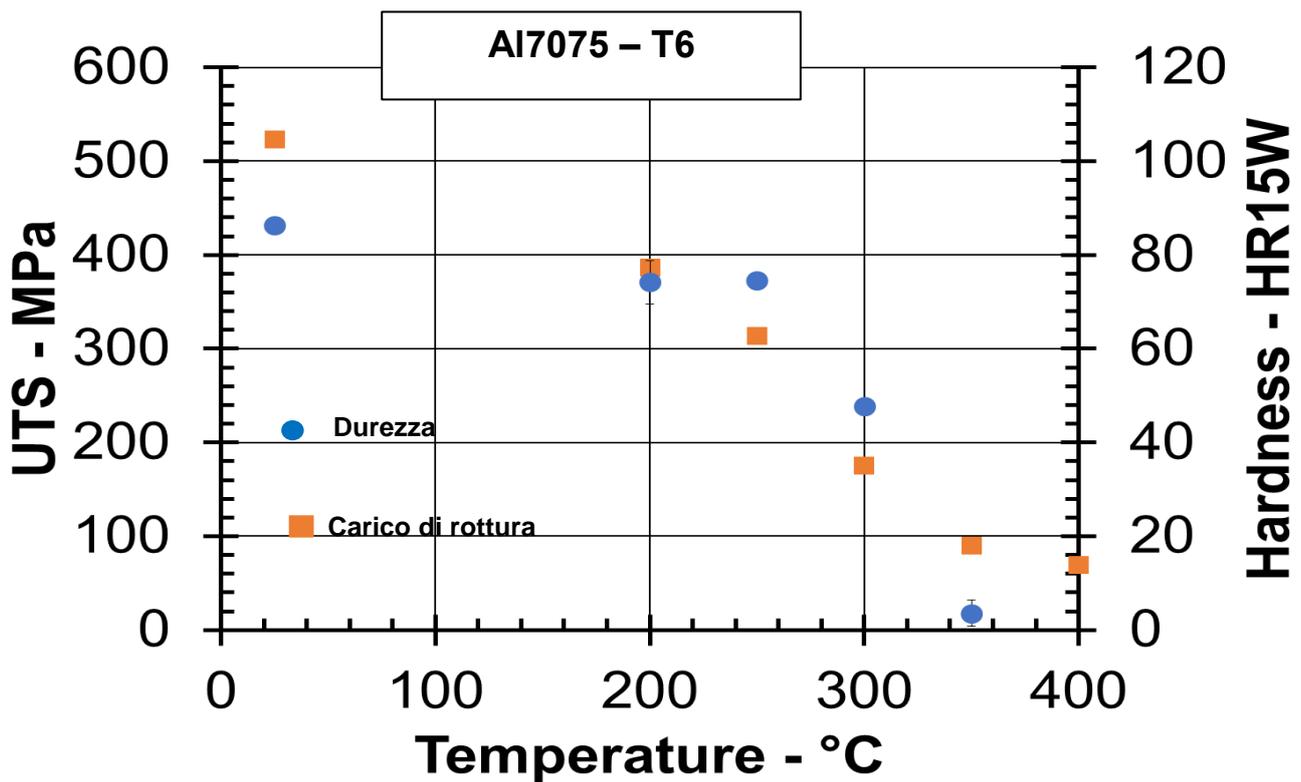


Figura 5.9 Confronto tra l'andamento del carico di rottura UTS e la durezza di campioni T6 al variare della temperatura

I dati riportati vanno da temperatura ambiente fino a 350 °C per le durezze per le ragioni sopra descritte mentre per il carico di rottura sono stati inseriti anche i dati per quanto riguarda la temperatura di 400 °C.

Confrontandoli sullo stesso grafico si nota come l'andamento sia il medesimo per le due grandezze, con un brusco calo dopo i 250 °C ed una generale tendenza calante. Il fatto che le due grandezze siano così ben allineate denota che la caratterizzazione è stata eseguita correttamente, individuando il *range* di temperature a cui la lega perde le sue proprietà meccaniche. Questi dati saranno poi utili in fase di progettazione dello *Strip Drawing Test* e di interpretazione dei suoi risultati. Non si può infatti prescindere dalle proprietà meccaniche della lega ad una data temperatura qualora si vogliano trovare i parametri di stampaggio che minimizzino i fenomeni di usura adesiva e l'attrito tra lega e stampi e si voglia dare una spiegazione del perché varino in quel modo. La Figura 5.10 similmente alla precedente riporta l'andamento del carico di rottura e della durezza della lega questa volta solubilizzata con il variare della temperatura.

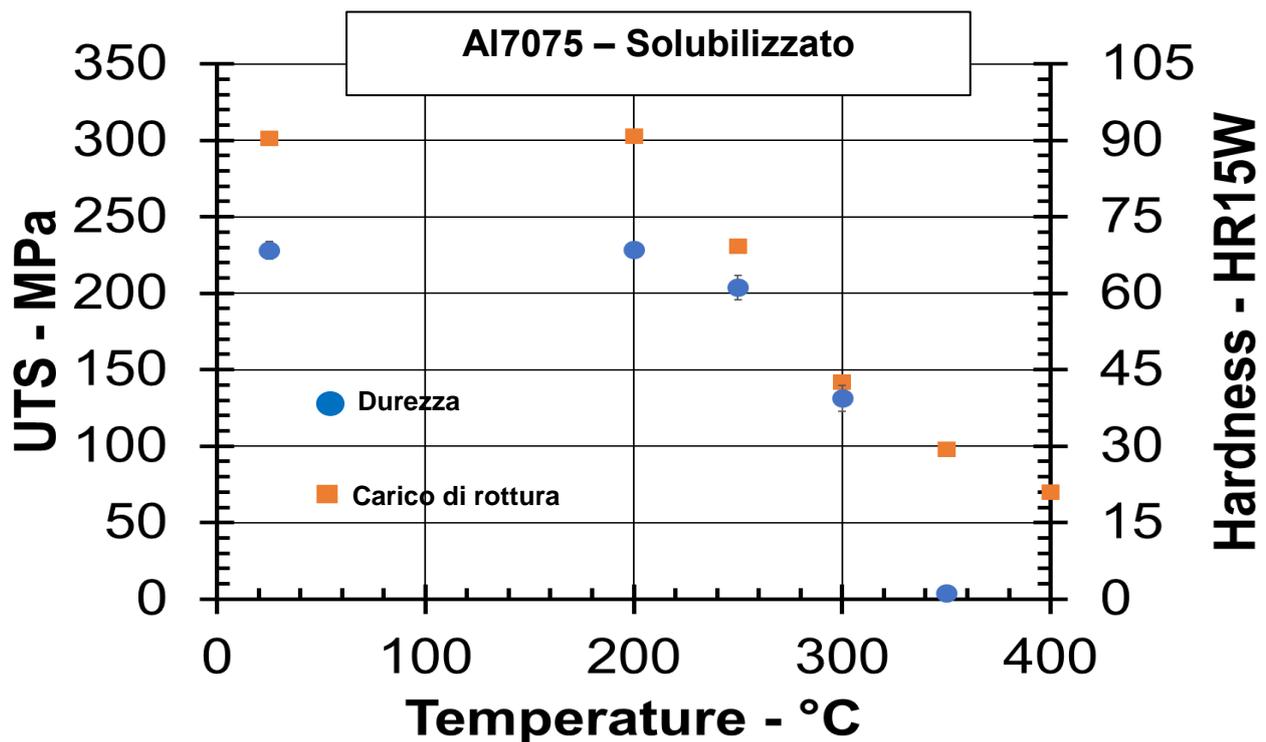


Figura 5.10 Confronto tra l'andamento del carico di rottura UTS e la durezza di campioni solubilizzati al variare della temperatura

Benché l'andamento sia ugualmente decrescente all'aumentare della temperatura si nota che tra temperatura ambiente e 200 °C non vi sono grandi differenze sia in termini di durezza che di carico di rottura, variazione che era invece evidente nel caso della lega T6 tra le due temperature. Inoltre i valori di durezza e carico di rottura sono in ogni caso minori per la lega solubilizzata.

Da questi confronti si può evincere anche come a temperature superiori a 350 °C le proprietà meccaniche siano assolutamente compromesse per le leghe con entrambi i trattamenti termici, sia per quanto riguarda la durezza che il carico di rottura. Le durezze sono infatti così basse che si è reso impossibile misurarle a temperature più elevate ed i carichi di rottura non subiscono sostanziali cambiamenti anche aumentando ulteriormente la temperatura. Inoltre i valori delle due proprietà, generalmente maggiori per la lega allo stato T6, diventano molto simili superati i 350 °C tra le due tipologie di campione; verosimilmente poiché la matrice metallica ha perso completamente le proprietà meccaniche e quindi i precipitati per quanto presenti non possono fungere da blocco per il movimento delle dislocazioni, in quanto già la matrice ne fornisce la possibilità.

5.6 Risultati Strip Drawing

In seguito alla caratterizzazione meccanica ed alle considerazioni precedentemente fatte esaminando i risultati delle prove di trazione e durezza si è proceduto con un'ampia campagna sperimentale basata principalmente sullo *Strip Drawing Test* poiché è quello che più si avvicina alle effettive condizioni di stampaggio a caldo di lamiere di alluminio e che permette effettivamente di verificare se dati parametri di processo portino o meno a fenomeni di usura adesiva. Permette inoltre di misurare il coefficiente di attrito medio ed istantaneo lungo tutta la corsa della prova.

5.6.1 Risultati singola prova Strip

I risultati di uno *Strip Drawing Test* non sono ugualmente immediati come quelli di una prova di durezza in cui viene riportato dall'apparecchiatura il risultato del test appena effettuato; ma necessitano di un'analisi dei dati così da poter inferire le informazioni che interessano ai fini dello studio effettuato. Ciò che viene misurato sono infatti le due forze, perpendicolare e tangenziale, e la loro evoluzione durante la corsa del punzone sulla lamiera. L'informazione che se ne vuole ricavare è il coefficiente di attrito tra lamiera e punzone definito come

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (5.1)$$

In quanto può essere un ottimo indicatore della buona riuscita o meno del processo di stampaggio in quelle condizioni e con quei parametri di processo.

Essendo però le due forze variabili nel tempo si deve stabilire come calcolare tale coefficiente di attrito e come collegarlo alla riuscita o meno del processo di stampaggio. La forza perpendicolare è inizialmente stabilita dall'operatore e dev'essere previamente calcolata considerando l'area effettiva del punzone e la pressione che si vuole utilizzare come parametro di processo. Una volta dato via al test questa forza varia come conseguenza dei fenomeni di attrito ed eventualmente adesione tra lamiera e punzone. La forza tangenziale invece è inizialmente nulla o comunque trascurabile e varia durante la prova per gli stessi motivi. Rilevando per intervalli di tempo, e quindi di corsa, molto ravvicinati le due forze è possibile calcolare istante per istante il coefficiente di attrito e graficarlo in funzione del tempo o della corsa. La figura 5.11 mostra sovrapposti un campione solubilizzato

strisciato a 10 mm/s; 5 MPa e 350 °C senza adesione, e il coefficiente di attrito calcolato come previamente descritto in funzione della corsa.

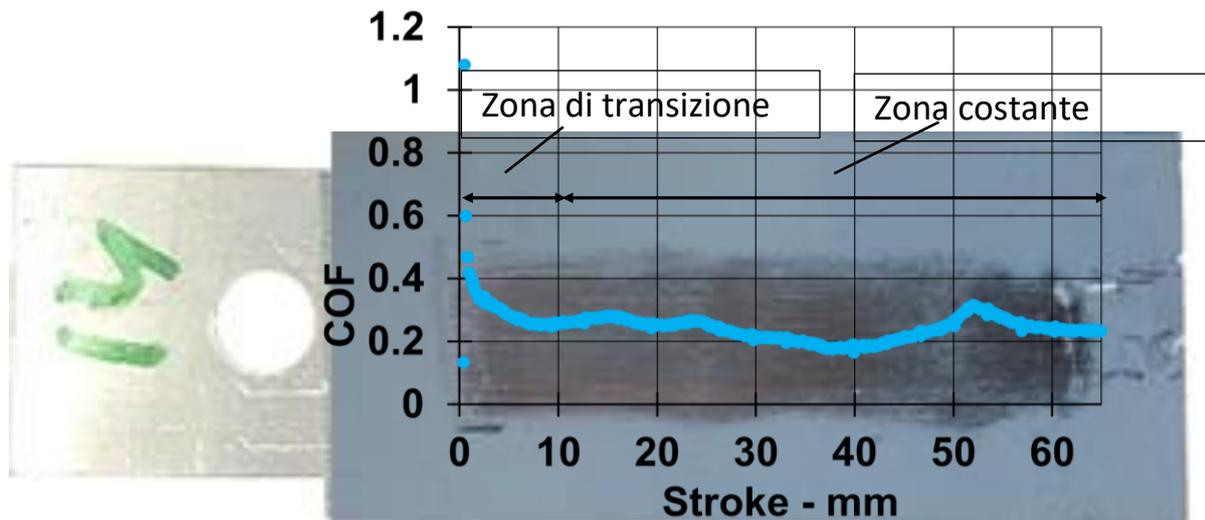


Figura 5.11 Grafico del coefficiente di attrito in funzione della corsa in uno Strip Drawing Test senza adesione

Si noti come vi sia un iniziale picco nel valore del coefficiente di attrito dovuto al passaggio da attrito statico ad attrito dinamico, mentre successivamente, una volta che il punzone ha iniziato a scorrere sul campione il valore resta sostanzialmente inalterato. È stato considerato più significativo ai fini dello studio questo valore piuttosto che quello istantaneo durante la corsa del test. Per comparare quindi vari campioni e varie condizioni operative si è scelto di considerare il coefficiente di attrito come la media dei valori nella zona di test relativamente costante. Seppure fortemente dipendente dall'operatore tale metodo si è rivelato il migliore per valutare l'attrito durante la prova, poiché non è possibile stabilire a priori quale parte della prova considerare. A causa delle molte variabili in gioco infatti il valore numerico del coefficiente di attrito può stabilizzarsi dopo pochi millimetri come dopo svariati centimetri, e verso la fine della prova si possono avere valori più alti a causa di usura adesiva incipiente. Si è quindi preferito valutare caso per caso quale fosse la zona da considerare per mediare i valori del coefficiente di attrito.

La Figura 5.12 mostra invece un grafico riguardante il coefficiente di attrito sovrapposto ad un campione testato nelle stesse condizioni operative previamente descritte (10 mm/s, 5 MPa e 350 °C) ma composto di lamiera allo stato T6 invece che solubilizzata.

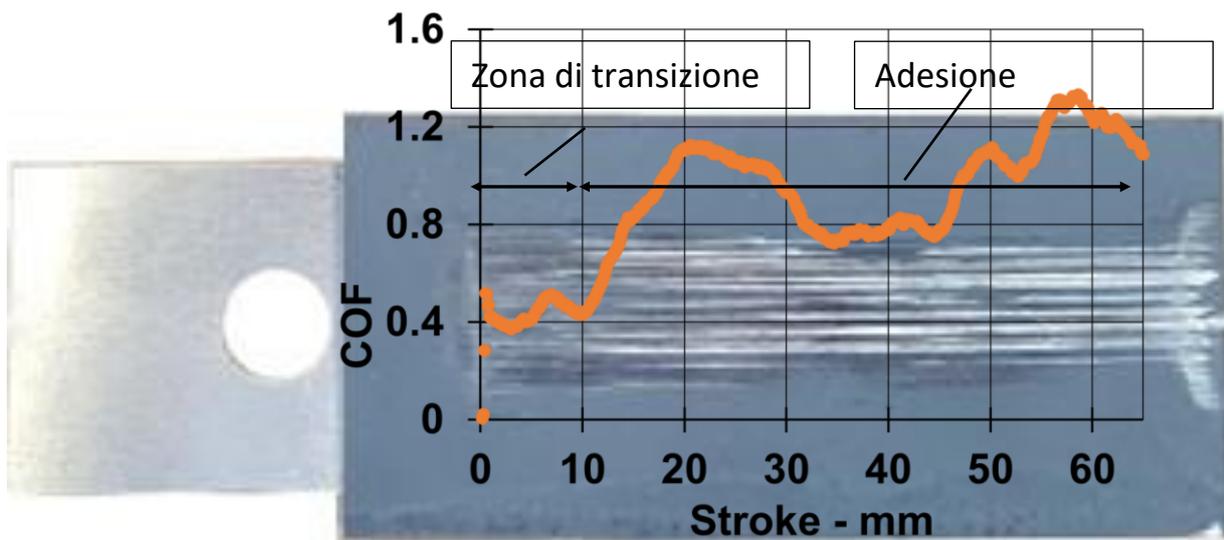


Figura 5.12 Grafico del coefficiente di attrito in funzione della corsa in uno Strip Drawing Test con adesione

Come si può notare dai profondi segni sul campione testato in questo caso è avvenuta una forte adesione della lega sul punzone. Questo fenomeno è accompagnato da un improvviso innalzamento dei valori di coefficiente di attrito misurati; si può infatti notare come dopo un picco iniziale i valori si stabilizzano come nel caso precedente, per poi però crescere a dismisura proprio in coincidenza con l'inizio dei segni di adesione sul campione. Inoltre si noti come, seppure con andamento non monotono, il coefficiente di attrito tenda a crescere continuamente fino alla fine della prova una volta iniziato il fenomeno dell'adesione. Ciò è probabilmente dovuto a come avvengono microscopicamente l'adesione e l'usura adesiva tra lega e punzone. Le asperità delle due superfici entrano infatti in contatto deformando plasticamente quelle della lega di alluminio e producendo un innalzamento della temperatura locale. Ciò non solo favorisce un'ulteriore deformazione plastica abbassando le proprietà meccaniche della lega ma favorisce i processi di trasporto tra composti o elementi affini tra lega e punzone. Come risultato si ha che del *debris* si stacca dalla superficie della lamiera ed incrudisce a causa della deformazione plastica. La parte di quest'ultimo che aderisce al punzone, essendo ora più dura della lega base perché incrudita, continua a deformare plasticamente la superficie vergine della lega, dando luogo anche a profondi solchi nella lamiera; prendendo il nome di *galling* o *plowing*. Questo fenomeno si auto alimenta poiché più materiale aderisce al punzone più sarà grande la sua rugosità effettiva e più saranno le particelle di metallo incrudite fraposte tra le due

superfici, rendendo necessaria una forza tangenziale sempre maggiore, a parità di pressione e quindi forza perpendicolare applicata, aumentando così il coefficiente di attrito.

5.6.2 Confronto tra coefficienti di attrito al variare dei parametri di processo

Con il fine di valutare quali siano i parametri migliori per il processo di stampaggio a caldo della lega Al7075 si è andati quindi a confrontare i coefficienti di attrito al variare di uno solo di essi, cercando poi di riportare i dati su grafici o tabelle che potessero dare una visione d'insieme di quali parametri dessero la maggior variabilità ed i coefficienti di attrito in generale più bassi. Chiaramente è stato tenuto conto di come un set di parametri che desse adesione non fosse adatto al processo di stampaggio e che coefficienti di attrito più bassi sono generalmente migliori ai fini del processo anche qualora non vi sia adesione in ogni caso. I test sono stati eseguiti con ripetibilità tre a causa dell'ingente utilizzo di tempo e risorse necessari per una sola prova, valutando poi i risultati delle singole prove come precedentemente descritto. I parametri che sono stati variati di volta in volta sono stati lo stato del campione (T6 o solubilizzato), la velocità di stampaggio, la pressione e la temperatura. Lo stato del campione può influire poiché come verificato le proprietà meccaniche variano di conseguenza, inoltre i precipitati presenti allo stato T6 potrebbero avere affinità chimica col punzone, dando più facilmente fenomeni di adesione. Come velocità di stampaggio si è scelto di testare 10 mm/s e 50 mm/s; si pensava infatti che uno stampaggio più rapido desse meno tempo per la formazione di microsaldature tra le due superfici e quindi minor incidenza di adesione. La scelta di effettuare i test solamente a queste due velocità è stata dettata dalla volontà di verificare questo andamento più che di trovare la velocità ideale per lo stampaggio. Infatti nel processo produttivo possono essere svariate le ragioni per scegliere una velocità invece di una seconda ed approfondire questo aspetto esulava dai fini dello studio. Il fine principale era appunto verificare se tendenzialmente fosse più adatta una velocità maggiore ai fini di abbassare il coefficiente di attrito ed evitare l'usura adesiva. Per quanto riguarda la pressione si è scelto di operare i test a 5 MPa e a 10 MPa in quanto questo è il *range* principale delle pressioni in gioco nel processo studiato. Come nel caso della velocità il fine era verificare come tendesse a variare il coefficiente di attrito all'aumentare o diminuire della pressione applicata. L'approccio è invece stato leggermente diverso per le temperature, si è infatti optato per testare le temperature nell'intervallo tra quella di invecchiamento, di circa 200 °C, e quella di solubilizzazione di poco più che 450 °C ogni 50 °C. La temperatura è infatti il parametro che più facilmente si può decidere a priori senza andare incontro ad ulteriori

problemi, mentre variando pressione e velocità si possono avere ad esempio difetti superficiali, produttività troppo ridotta o macchinari inadeguati. Vengono riportate in seguito due tabelle (Tabella 5.1 Tabella 5.2) che raccolgono i dati dell'ampia campagna prove effettuata, confrontando i risultati tra prove a velocità di 10 mm/s e 50 mm/s.

Tabella 5.1 Confronto dei coefficienti di attrito nelle varie condizioni sperimentali di campioni T6

T6	5 Mpa	10 MPa
200 °C	μ medio = 0,61	μ medio = 0,49
250 °C	μ medio = 0,36	μ medio = 0,62
300 °C	μ medio = 0,35	μ medio >1,2
350 °C	μ medio = 0,96	μ medio >1,2
400 °C	μ medio = 1,44	μ medio >1,2
Solubilizzato		
200 °C	μ medio = 0,62	μ medio = 0,59
250 °C	μ medio = 0,34	μ medio = 0,29
300 °C	μ medio = 0,32	μ medio = 0,21
350 °C	μ medio = 0,24	μ medio = 0,21
400 °C	μ medio = 0,23	μ medio = 0,22
450 °C	μ medio = 0,4	μ medio = 0,35

Tabella 5.2 Confronto dei coefficienti di attrito nelle varie condizioni sperimentali di campioni solubilizzati

T6	5 Mpa	10 MPa
200 °C	μ medio = 0,37	μ medio = 0,6
250 °C	μ medio = 0,32	μ medio = 0,28
300 °C	μ medio = 0,24	μ medio = 0,24
350 °C	μ medio = 0,23	μ medio = 0,19
400 °C	μ medio = 0,99	μ medio > 1,2
Solubilizzato		
200 °C	μ medio = 0,53	μ medio = 0,35
250 °C	μ medio = 0,33	μ medio = 0,29
300 °C	μ medio = 0,26	μ medio = 0,22
350 °C	μ medio = 0,24	μ medio = 0,22
400 °C	μ medio = 0,22	μ medio = 0,28
450 °C	μ medio = 0,23	μ medio = 0,4

I colori della casella in cui è indicato il coefficiente di attrito stanno a significare il grado di adesione ottenuto nelle prove relative, verde significa che non vi è stata adesione, giallo una lieve adesione mentre rosso un'adesione pesante che ha coperto quasi totalmente il punzone.

La Figura 5.13 mostra la differenza tra un'adesione considerata "gialla" ed una "rossa". Le prove sono state effettuate dai 200 °C ai 450 °C con intervalli di 50 °C come precedentemente indicato, tranne nei casi in cui vi fosse una forte adesione già a temperature più basse; in questi casi si è ritenuto inutile procedere a temperature più alte poiché non si sarebbe potuto ottenere altro che un'adesione ancor più severa.



a)



b)

Figura 5.13 a) esempio di adesione considerata "rossa" nelle tabelle precedenti b) esempio di adesione considerata "gialla" nelle tabelle precedenti

Inoltre aumentare ulteriormente la temperatura avrebbe potuto portare a fenomeni adesivi così intensi da rendere difficoltoso separare punzone e campione una volta ultimato il test, richiedendo molto tempo per il ripristino della macchina con il rischio di danneggiare qualche componente durante gli energici tentativi di separazione.

Dai dati relativi agli *Strip Drawing Test* si evince che proprio per questo motivo i campioni allo stato T6 sono stati testati fino a 400 °C mentre quelli solubilizzati fino a 450 °C; il coefficiente di attrito dei campioni solubilizzati è infatti tendenzialmente più basso a parità di condizioni rispetto a quello dei campioni allo stato T6, ed entrambi crescono al crescere della temperatura. Ciò porta i campioni solubilizzati a poter essere testati fino a temperature più alte prima di subire fenomeni adesivi considerevoli, mentre quelli allo stato T6, partendo da coefficienti già più elevati, aderiscono prima, a temperature inferiori. Sebbene ciò possa sembrare collegato alle inferiori proprietà meccaniche della lega solubilizzata, lo studio ha rivelato che probabilmente non è questa la causa. L'ampia caratterizzazione meccanica precedentemente effettuata ha infatti rivelato come a temperature superiori a 350 °C non vi siano sostanziali differenze nelle proprietà meccaniche tra le leghe sottoposte ai due differenti trattamenti termici; mentre nei coefficienti di attrito vi sono eccome, tanto da rendere impossibile testare la lega T6 a 450 °C. La motivazione più plausibile pare quindi essere la presenza nella lega T6 dei precipitati, invece assenti nei campioni solubilizzati. Questi sono infatti composti da elementi affini a quelli presenti nel punzone, come rivelato dall'indagine metallografica effettuata; fattore che sommato all'elevata temperatura del processo rende probabile che i fenomeni di trasporto termicamente attivati siano i principali responsabili dei fenomeni di adesione.

Dalle medesime tabelle 5.1 e 5.2 si noti come il coefficiente di attrito tenda a calare all'aumentare della temperatura, fino ad un improvviso innalzamento dovuto all'incipiente adesione. Tale innalzamento avviene chiaramente a temperature inferiori per i campioni allo stato T6 rispetto ai solubilizzati, come conseguenza dei fenomeni previamente descritti.

Similmente, e contrariamente a quanto si potrebbe pensare, pressioni maggiori determinano un coefficiente di attrito minore a parità di altre condizioni e qualora non vi sia adesione; in caso contrario il coefficiente di attrito è minore a pressioni minori. L'aumentare della pressione anticipa infatti l'adesione facendola avvenire già a temperature più basse, abbassa però il coefficiente di attrito in caso non vi sia adesione. In altre parole operare a pressioni più elevate fa sì avere un coefficiente di attrito più basso a parità di altre condizioni, ma "accorcia" il tratto discendente della curva di coefficiente di attrito in funzione della temperatura, causando adesione a temperature inferiori.

Si noti infine l'influenza della velocità di stampaggio sul coefficiente di attrito. Operare ad una velocità superiore porta in ogni caso ad avere un minor coefficiente di attrito e minori fenomeni di adesione. La differenza è però notevolmente maggiore nel caso della lega allo stato T6, in cui

aumentare la velocità varia enormemente i coefficienti di attrito e l'inizio dell'usura adesiva a parità di altre condizioni; mentre per i campioni solubilizzati tale riduzione di coefficiente di attrito è meno marcata. Questa riduzione è spiegabile poiché a velocità maggiore vi è meno tempo per le asperità delle superfici per creare microsaldature ed il fatto che allo stato T6 tale fenomeno, assieme a quello dell'usura adesiva, risulta amplificato rispetto ai campioni solubilizzati è in linea con la probabile importanza dei processi diffusivi tra lega e punzone. Si riporta in Figura 5.14 un grafico riassuntivo di tutti i risultati degli *Strip Drawing Test* comprensivi del coefficiente di attrito e della presenza o meno di adesioni in quelle date condizioni sperimentali.

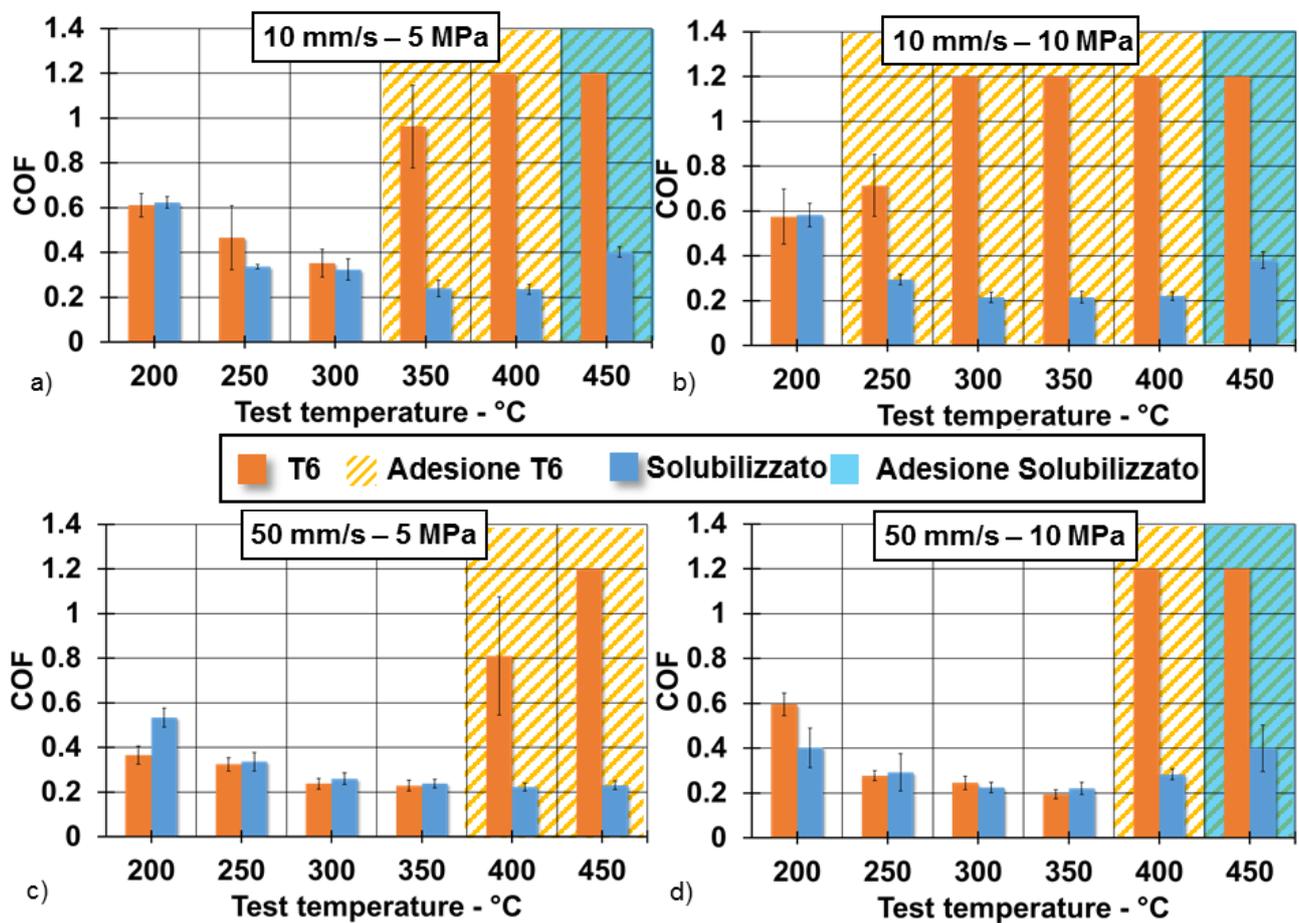


Figura 5.14 Coefficienti di attrito ed eventuali adesioni nelle varie condizioni sperimentali a) 10mm/s e 5 MPa b) 10mm/s e 10 MPa c) 50mm/s e 5MPa d) 50mm/s e 10 MPa

5.7 Analisi delle superfici

Essendo lo studio di ambito tribologico un particolare interesse è stato rivolto all'analisi quantitativa e qualitativa delle superfici, principalmente tramite profilometro e microscopio elettronico. Si è tentato in questo modo di indagare ulteriormente i meccanismi di adesione studiando le varie superfici e come i processi sperimentali come lubrificazione e stampaggio vero e proprio andassero a modificarne la morfologia. La prima verifica riguardante l'analisi delle superfici era volta ad indagare come il processo di lubrificazione andasse ad influire sulla rugosità superficiale, ed in generale sulla profilometria, del campione. Si è quindi lubrificato un campione secondo la procedura standard precedentemente descritta procedendo poi alla pulitura accurata di metà del campione con acqua ed acetone. Per com'è progettata la macchina di lubrificazione è infatti più semplice procedere in questo modo che lubrificare solo metà superficie, poiché sarebbe necessario mascherarla durante la spruzzatura andando incontro a probabili depositi di collante sulla superficie. Anche effettuare l'analisi prima e dopo lubrificazione non sarebbe stato agevole poiché profilometro e macchina di lubrificazione si trovano in due sedi differenti dell'Università di Padova. La Figura 5.14 mostra le profilometrie di due zone dello stesso campione, una lubrificata e l'altra no.

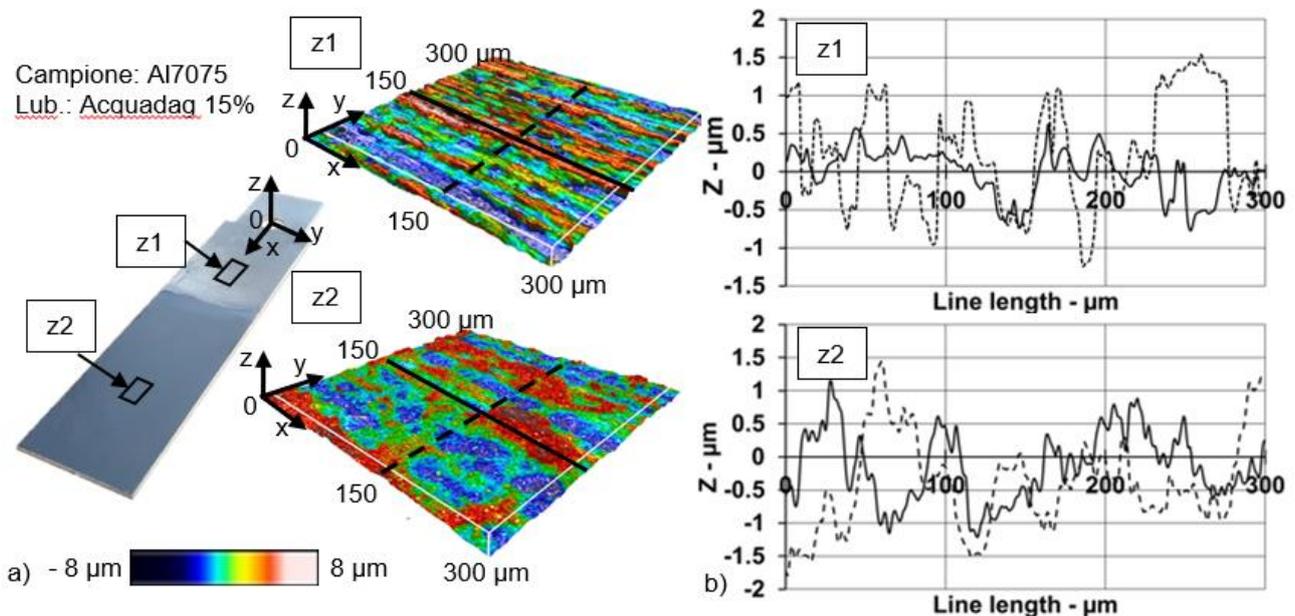


Figura 5.14 a) Mappe 3D e zone da cui sono state rilevate sul campione b)profilometrie in direzione di trafilatura e ortogonale per entrambe le zone analizzate

Ciò che si evince dalla profiometria è che non vi sono differenze notevoli tra campione lubrificato e non lubrificato in entrambe le direzioni, parallela e perpendicolare, alla direzione di laminazione. La rugosità media non risulta quindi variata sensibilmente dal processo di lubrificazione; probabilmente a causa dell'esiguo spessore dello strato di grafite formatosi. Ciò che si nota invece analizzando la mappa 3D più che i grafici è che dopo lubrificazione, mentre le creste rimangono ben visibili e distinguibili, le valli risultano generalmente più "appiattite", con lo strato di lubrificante che rende meno apprezzabile nel particolare la forma di ogni singola valle. Questo suggerisce, come logico, che sebbene il lubrificante copra totalmente la superficie del campione tenda comunque a depositarsi tendenzialmente di più nelle valli rispetto alle creste, non modificando comunque sostanzialmente la morfologia del campione.

Un'ulteriore verifica è stata eseguita tramite microscopio elettronico, per accertarsi che le creste siano effettivamente coperte dal lubrificante, anche se come detto non tanto quanto le valli. Ciò è di cruciale importanza in quanto il primo contatto microscopico tra le superfici avviene mediante le asperità delle stesse, seguito poi dalla deformazione plastica delle asperità del campione qualora venga applicata una pressione sufficiente. Se quindi le creste non fossero lubrificate correttamente si avrebbe un primo contatto metallo-metallo, seguito poi da deformazione plastica ed esposizione del lubrificante depositato più in basso nelle valli. L'immagine 5.15 mostra una delle immagini al microscopio elettronico con cui si è verificata l'ottimale lubrificazione del campione in tutte le sue parti.

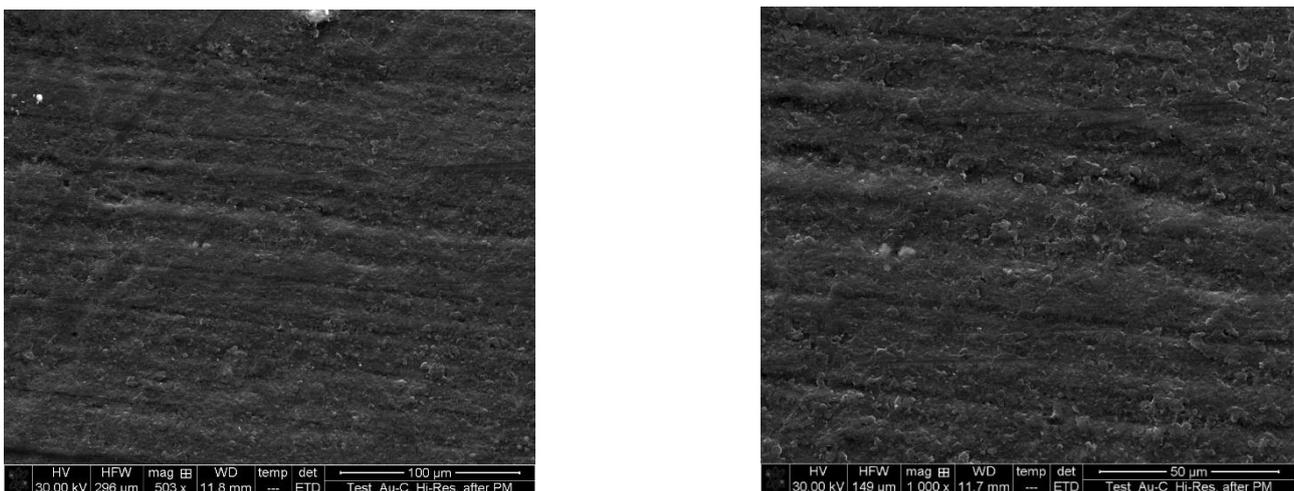
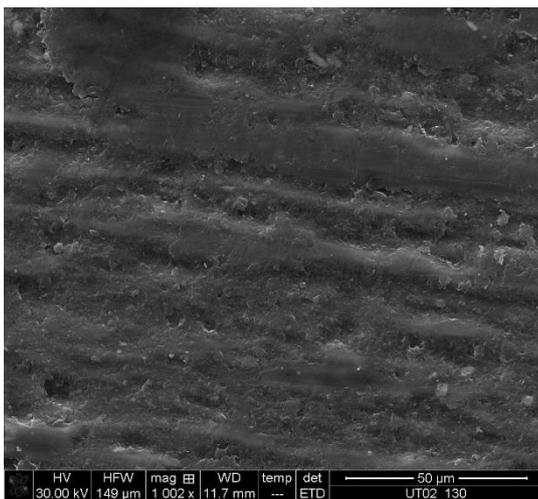
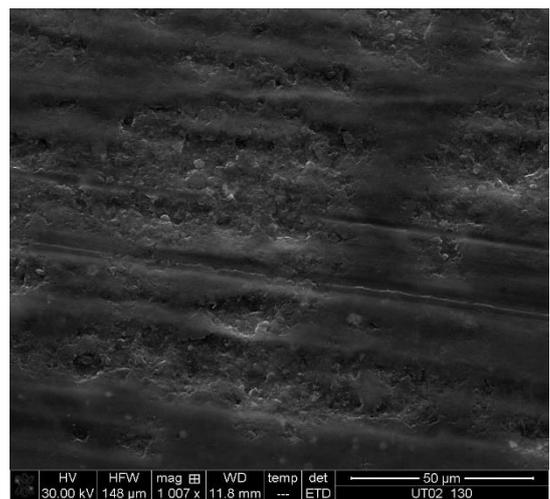


Figura 5.15 Immagini al microscopio elettronico a due differenti ingrandimenti del campione lubrificato, si è verificata così la buona copertura di tutta la superficie da parte della grafite

Si può vedere ad ingrandimenti diversi come la deposizione di grafite sia omogenea e non lasci scoperte le creste della rugosità del campione. Il campione analizzato in questo caso è stato lubrificato e non ha subito ulteriori trattamenti, così da avere una superficie il più possibile coerente con quella presente al momento dello *Strip Drawing Test* o di un'eventuale processo di stampaggio a caldo. Successivamente l'interesse dell'analisi si è rivolto a verificare che il processo stesso di test, con i vari parametri utilizzati, non desse origine a morfologie dello strato di grafite differenti tra loro; in modo da assicurarsi che tale fattore non fosse da considerare come possibile causa di diversi risultati. I confronti sono quindi stati eseguiti tra campioni di lamiera strisciata ma non aderita nelle stesse condizioni di test, variando esclusivamente lo stato della lamiera (T6 o solubilizzata). Successivamente si è andati ad indagare se invece a parità di trattamento termico antecedente al test vi fosse differenza nella morfologia superficiale variando la temperatura della prova stessa. A tale riguardo la Figura 5.16 mostra due campioni su cui è stato eseguito lo *Strip Drawing Test* a 250 °C, 5 MPa e 10 mm/s, in un caso il campione è allo stato T6 e nell'altro è solubilizzato.



a)



b)

Figura 5.16 a) Superficie strisciata e non aderita del campione T6 b) Superficie strisciata e non aderita del campione solubilizzato

La morfologia del campione lubrificato, sebbene come logico diversa da quella precedente al test mostrata in Figura 5.15, è coerente nei due casi, ad indicare come il trattamento termico effettuato precedentemente al test abbia sì profonde influenze sui risultati, ma che tali differenze non siano dovute a differenze morfologiche nel campione o nello strato di lubrificante; giacché non vi sono praticamente differenze.

Si è infine andati a verificare che a parità degli altri parametri la temperatura alla quale è stato eseguito lo *Strip Drawing Test* non modificasse la morfologia del campione lubrificato, parimenti al trattamento termico. La Figura 5.16 mostra a tale proposito due campioni strisciati ma non aderiti testati nelle stesse condizioni, con l'unica differenza che la temperatura è stata in un caso di 250 °C e nell'altro di 400 °C.

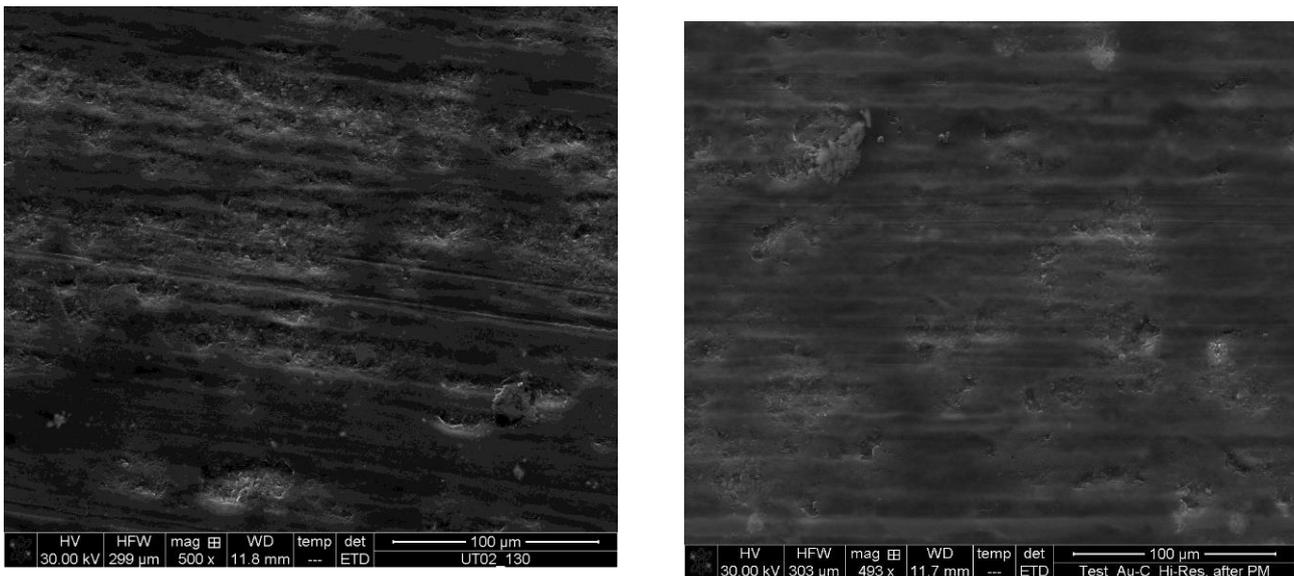


Figura 5.16 Superficie strisciata e non aderita del campione solubilizzato in a) a 250 °C e in b) a 400 °C

Non si notano differenze sostanziali nelle due immagini, così come nelle precedenti. Sebbene queste indagini possano sembrare ripetitive e superficiali è bene ricordarne la cruciale importanza ai fini di valutare correttamente l'influenza degli altri parametri di test nel processo dello stampaggio a caldo di lamiere di Al7075. Essendo infatti un processo che coinvolge fortemente le superfici di lamiera e stampo ed essendo molti i parametri in gioco è realmente necessario fugare ogni dubbio che vi siano fattori non considerati che vadano ad influire falsando i risultati del test, senza che l'operatore abbia modo di accorgersene.

Si è quindi continuato in questa analisi delle superfici andando ad indagare la zona di transizione esistente nei campioni strisciati tra zona esclusivamente lubrificata e zona lubrificata e sottoposta a test. Avendo già analizzato sia la superficie dei campioni lubrificati che di quelli già strisciati ma senza adesione ci si è concentrati questa volta sui campioni con cui erano avvenuti fenomeni di usura

adesiva. L'analisi era volta sì a comparare la superficie di campioni con adesione nelle stesse condizioni ma con trattamento termico differente, ma anche a cercare di ottenere più informazioni riguardo il fenomeno di adesione vero e proprio. A tale riguardo la Figura 5.17 è di grande interesse; mostra infatti i risultati della profilometria eseguita nella zona di transizione tra campione semplicemente lubrificato e campione strisciato con adesione

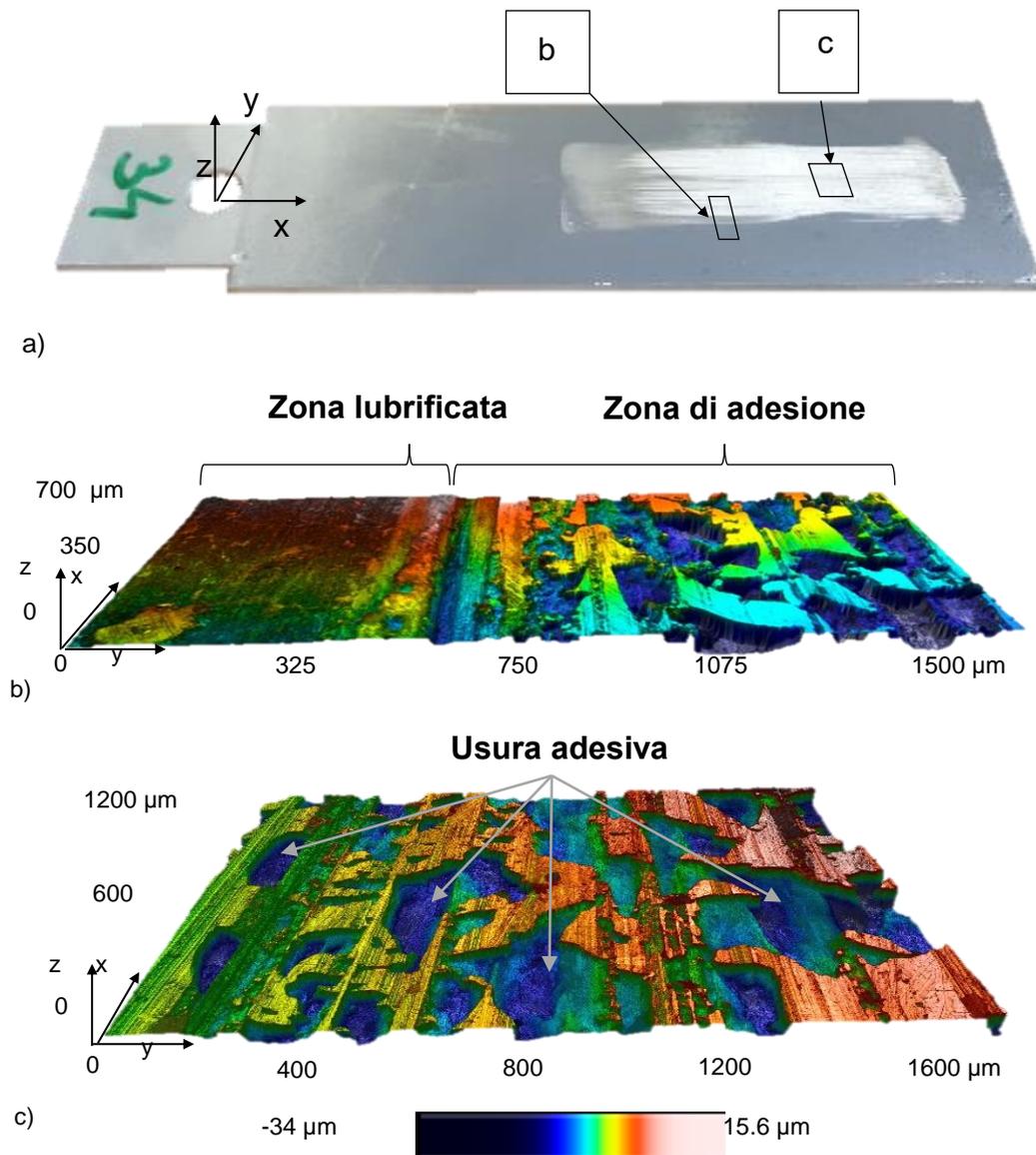
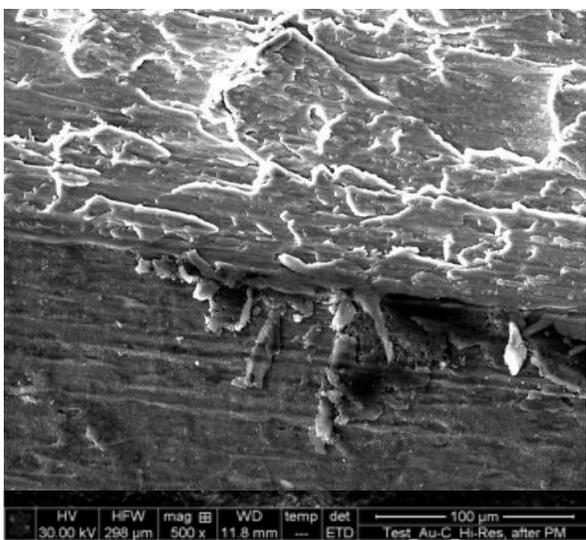


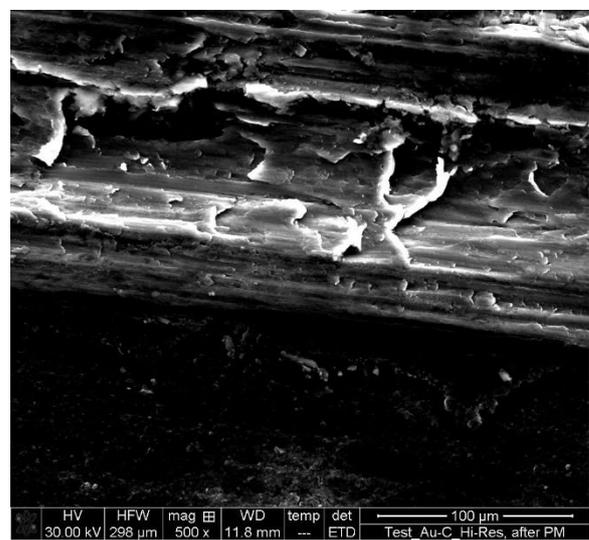
Figura 5.17 a) Campione con evidenziate le zone su cui si è svolta l'analisi b) Zona di passaggio tra adesione e parte non strisciata c) Zona al centro dell'adesione

Si noti come nella parte semplicemente lubrificata il campione sia del tutto analogo a quello mostrato in precedenza, vi sia quindi proseguendo lungo l'asse y indicato in figura un'improvvisa depressione che forma una scanalatura, data dal raggio di raccordo del punzone, che segna il confine tra zona di test e zona lubrificata. Verso il centro del campione si ha quindi la zona di adesione vera e propria, evidenziata ulteriormente in Figura 6.5 c). Questa zona presenta creste appiattite dovute all'azione di deformazione plastica e formazione di *debris* date dal passaggio del punzone, e valli ampie, profonde ed irregolari. Queste profonde depressioni nella superficie sono dovute all'effetto dell'adesione e del passaggio del punzone, con materiale aderito ed incrudito, che scava letteralmente la superficie più deformabile del campione. Il nome di *plowing* che tale fenomeno prende in inglese rende ancor più chiaro questo tipo di usura abrasiva e come il materiale aderito ed incrudito vada letteralmente a scavare la superficie della lamiera a cui va incontro.

Di pari interesse è l'analisi al microscopio elettronico effettuata sullo stesso campione nella zona di passaggio tra adesione e superficie non strisciata. In Figura 5.18 viene mostrata tale zona per il medesimo campione analizzato al profilometro in Figura 5.17, confrontata a sua volta con un secondo campione testato nelle stesse condizioni ma solubilizzato.



a)



b)

Figura 5.18 Immagini al SEM della zona di passaggio tra zona lubrificata e zona strisciata a) campione T6 b) campione solubilizzato

Le zone per così dire scavate dell'adesione si rendono ancor più evidenti quando visualizzate al SEM; inoltre è possibile vedere in questo caso i frammenti staccatisi dalla superficie e non aderiti al punzone poiché si trovavano a lato e non al di sotto di esso, corroborando la tesi che l'adesione avvenga in effetti per distacco di *debris* e successiva unione con la superficie del punzone.

La Figura 5.18 b) rivela come anche allo stato solubilizzato e a parità di altre condizioni l'adesione dia una morfologia del tutto analoga a quella ottenuta allo stato T6, con lembi piuttosto frastagliati e dimensione delle particelle di lamiera rimosse del tutto confrontabili.

La stessa tipologia di analisi è stata successivamente eseguita sul punzone, concentrandosi anche in questo caso sulle condizioni che portassero ad adesione, in quanto in caso contrario la superficie del punzone una volta rimosse le tracce di lubrificante si presenta virtualmente irriconoscibile rispetto a prima dell'effettuarsi del test.

In Figura 5.19 si confrontano al microscopio elettronico due differenti adesioni, date nelle stesse condizioni operative da campioni rispettivamente allo stato T6 e solubilizzato.

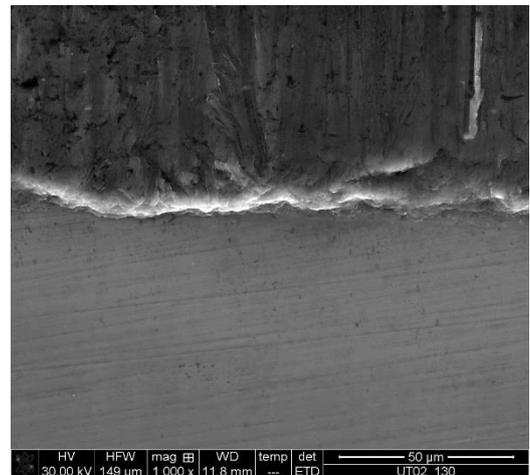
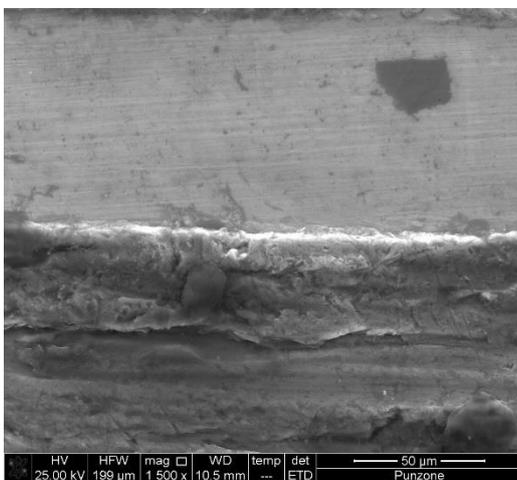


Figura 5.19 Immagine a SEM di materiale aderito sul punzone dopo test a 10mm/s, 10MPa e 450 °C a) Campione T6 e b) Campione solubilizzato

Come per l'analisi sui campioni anche sul punzone la morfologia dell'adesione non presenta particolari differenze tra quelle ottenute tramite i due differenti trattamenti termici. Si nota però come sulla superficie del punzone la zona di confine tra adesione e materiale base sia pulita e piuttosto lineare anche ad ingrandimenti considerevoli, mentre immagini simili sui campioni mettevano in

evidenza la presenza di particolato e frammenti distaccati. Con tutta probabilità ciò è dovuto a come avviene il meccanismo di adesione stessa. Non tutto il *debris* formato durante la strisciata andrà evidentemente ad aderire al punzone, ma parte di esso andrà rimossa in fase di test ed un'altra parte rimarrà attaccata al campione stesso e verrà messa in evidenza dalle immagini al microscopio elettronico. Per quanto riguarda il punzone invece successivamente al test è visibile solo il materiale fortemente aderito, formato da particelle che si sono successivamente distaccate dal campione e saldate alla superficie del punzone. Qualsiasi parte non ancorata fortemente viene immediatamente rimossa dall'interazione tra le due superfici lasciando la parte aderita al punzone con una morfologia assai poco frastagliata.

Un'analisi analoga ma effettuata tramite profilometro è mostrata in Figura 5.20. Due zone differenti di un'adesione ottenuta su lamiera T6 a 350 °C, 10mm/s e 10 MPa, situate agli estremi dell'adesione stessa in direzione di esecuzione del test sono state scansionate e messe a confronto, per indagare ancora una volta come evolvesse l'adesione nell'ambito di una stessa prova.

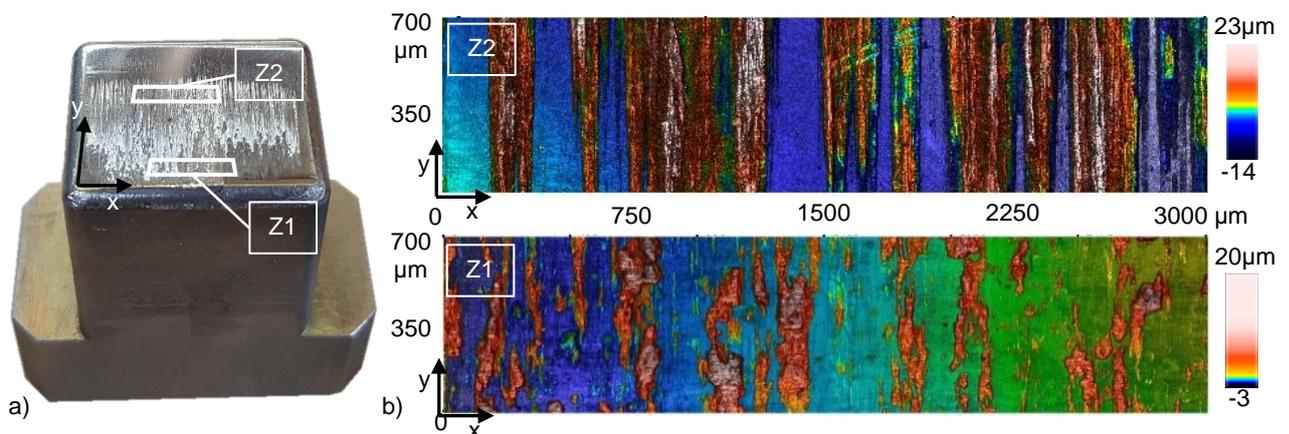


Figura 5.20 a) Foto del punzone aderito con evidenziate le zone in cui sono state effettuate le profilometrie b) Mappe 3D del materiale aderito sul punzone nelle zone rispettivamente indicate

Non si è ritenuto interessante effettuare la medesima analisi anche per il punzone con materiale solubilizzato aderito in quanto già le immagini al microscopio elettronico hanno confermato la sostanziale equivalenza nella morfologia delle due adesioni.

Nella zona denominata Z1 si evidenzia la zona frontale del punzone, quella in cui si ha un'adesione solamente incipiente. Seppur chiaramente orientate nella direzione di test le adesioni non formano

zone continue ed uniformi, ma solo alcune parti del punzone ne sono ricoperte. Questa conformazione ha evidenti similitudini con la morfologia del campione aderito mostrata in Figura 5.17, considerando chiaramente che essendo sul punzone sarà simile al negativo della lamiera, coerentemente con le modalità con cui avviene l'adesione. Ogni zona del campione subisce infatti una sola passata e si vengono di conseguenza a formare le ampie depressioni precedentemente evidenziate a causa dei processi di usura adesiva. La parte frontale del punzone denominata z1 similmente andrà incontro ad un'adesione con questa forma poiché il particolato non ancora aderito viene rimosso e trascinato verso la parte retrostante del punzone in cui può nuovamente aderire o meno. Differente è invece la morfologia evidenziata nella zona z2; tale zona situata nella parte posteriore dell'adesione rispetto alla direzione del test, mostra un'adesione più rilevante al crescere della lunghezza della strisciata, con lunghe linee di materiale aderito allineate alla direzione di test. Oltre alla morfologia anche l'altezza delle creste aderite è differente tra le due zone, con un'altezza media inferiore a $10 (\pm 5) \mu\text{m}$ nella zona z1 e di $20 (\pm 5) \mu\text{m}$ nella zona z2. Coerentemente con le modalità descritte con cui avviene l'adesione si ha quindi nella zona frontale del punzone, in cui è presente un'adesione incipiente, un'altezza delle creste minore e una presenza "a zone" di alluminio solidale alla superficie dell'acciaio, mentre nella parte posteriore, che va incontro a superficie già deformata e con la presenza di più particolato, si hanno creste più alte e adesione più intensa e massiccia.

In Figura 5.21 si ha l'immagine al SEM di inizio di usura adesiva e di forte adesione, corrispondenti sostanzialmente alle zone z1 e z2 illustrate.

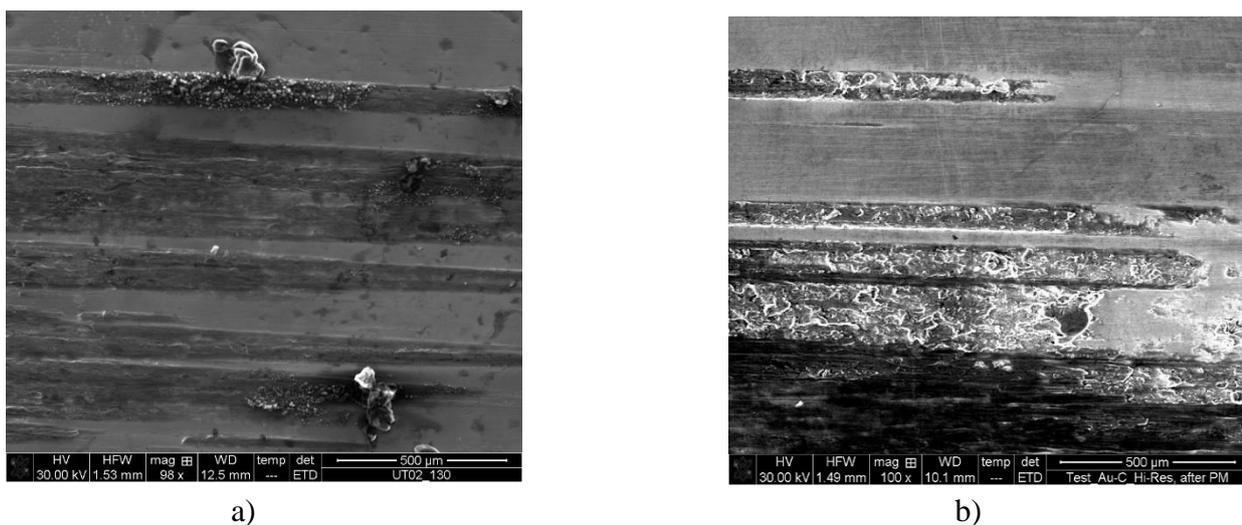


Figura 5.21 *Fotografie al SEM delle adesioni in zone analoghe a quelle evidenziate in figura 6.8, rispettivamente in a) la zona z1 e in b) la zona z2*

Ancora una volta si nota come inizialmente le zone di adesione siano più distanti tra loro sia in direzione di test sia nella direzione perpendicolare ad esso ed il materiale aderito sia generalmente

presente in minor quantità e vi sia del *debris* debolmente ancorato alla superficie, mentre proseguendo con la distanza di strisciatura le adesioni si fanno più ravvicinate, continue e voluminose.

La Figura 5.22 mostra la superficie del punzone ottenuta dopo *Strip Drawing Test* con un campione allo stato T6 a 350 °C, 10mm/s ed abbassando la pressione a 5 MPa.

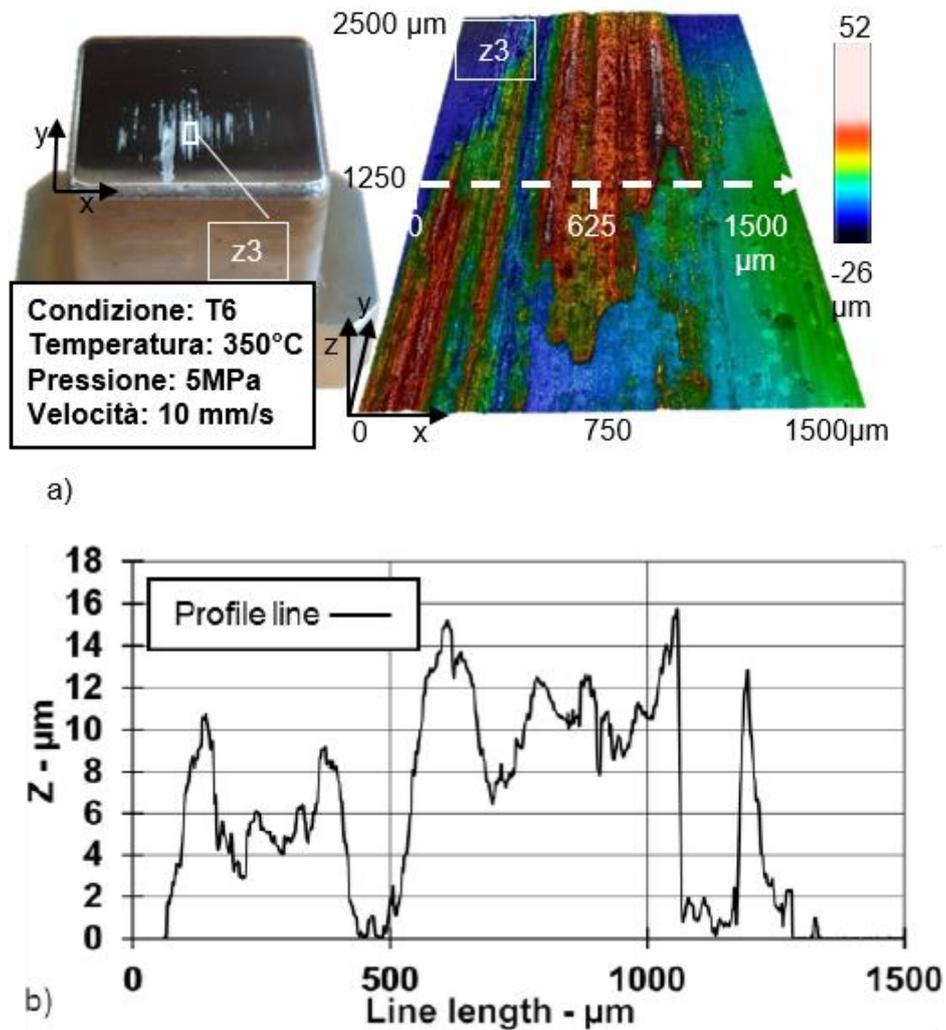


Figura 5.22 a) Fotografia e mappa 3D del punzone con evidenziata la zona di analisi b) Profiometria

Anche in questo caso vi è stata un'importante adesione, riguardante però un'area minore rispetto a quella precedentemente illustrata, con un trasferimento di materiale più pronunciato e localizzato, con un'altezza massima delle creste di materiale depositato di 25 (± 5) μm. Il diagramma in figura 5.22 b) mostra il profilo della superficie in direzione dell'asse delle ascisse con i picchi di materiale aderito e le valli create dal particolato incrudito che viene a crearsi durante il test. Si noti come questa

seconda superficie è stata ottenuta nelle stesse condizioni della precedente in Figura 5.20 con l'unica differenza di ridurre la pressione da 10 MPa a 5 MPa, ottenendo in entrambi i casi considerevole adesione che pare quindi essere debolmente collegata alla pressione normale applicata; il cui effetto principale è il variare l'estensione dell'area aderita più che la presenza o meno del fenomeno stesso di usura abrasiva. Abbassare la pressione nel tentativo di evitare adesione non dà quindi grossi vantaggi, giacché l'adesione è ugualmente presente, con l'unica differenza della disposizione con cui il materiale aderisce alla superficie del punzone. A pressione più elevata infatti si ha probabilmente un'area effettiva di contatto maggiore, che porta ad avere un'adesione più distribuita sulla superficie ma con altezza delle creste inferiore. Quest'ultimo fenomeno potrebbe essere dovuto alla maggior area di contatto effettiva operando a pressioni più elevate, per cui la stessa quantità di materiale si distribuisce su una superficie maggiore dando creste meno alte; oppure al fatto che le maggiori forze in gioco potrebbero far distaccare nuovamente la parte più alta e meno fortemente saldata dell'adesione già avvenuta.

6 Conclusioni

Il lavoro effettuato è stato volto ad analizzare l'adesione nello stampaggio a caldo di lamiere di Al7075; e come i parametri di processo la influenzino. Si è analizzato nel dettaglio il fenomeno tramite *Strip Drawing Test* tra i 200 °C ed i 450 °C, i 5 MPa ed i 10 MPa e tra i 10 mm/s 50 mm/s, oltre ad effettuare una caratterizzazione meccanica completa ad alta temperatura dei materiali di punzone e lamiera tramite prove di trazione e durezza tra i 200 °C ed i 450 °C ed indagini di superficie e morfologiche. Si è misurato quindi il coefficiente di attrito medio per ogni prova in quanto è un buon indicatore della presenza o meno di usura adesiva; e poiché è generalmente più conveniente avere un coefficiente di attrito minore durante il processo. I vari parametri come temperatura, pressione e velocità sono stati variati uno alla volta per indagarne singolarmente l'influenza sui risultati del test; sono stati mantenuti però sempre costanti il tipo di lega Al7075 e la lubrificazione solida tramite grafite, applicata con un apposito apparato. I campioni di lamiera sono stati testati sia nello stato T6 che dopo solubilizzazione, con modalità operative tali da simulare il più possibile il processo industriale.

Si è infine indagato tramite microscopia elettronica ed analisi al profilometro come le superfici vengano modificate dall'usura adesiva e quali spiegazioni si possano dare a tale fenomeno.

I risultati ottenuti nei vari test sono coerenti con la letteratura esaminata e apportano nuove informazioni in questo ambito di studio.

Si è verificato innanzitutto come il trattamento di solubilizzazione, sebbene ampiamente conosciuto ed effettuato con successo, possa essere ridotto per pezzi dalle esigue dimensioni e spessori contenuti a 10 minuti in fornace a 480 °C, seguito da tempra in acqua; ottenendo caratteristiche meccaniche e microstrutturali assolutamente analoghe a quelle ottenute tramite trattamento *standard* [19].

Tali proprietà meccaniche sono state inoltre indagate ad alta temperatura, mostrando come anche se generalmente la lega allo stato T6 ha proprietà meccaniche superiori a quella solubilizzata; sopra i 350 °C non vi siano differenze così marcate né tra i due tipi di trattamento termico né su uno stesso tipo di campione a temperature differenti. Ciò è dovuto probabilmente alla perdita di proprietà meccaniche della matrice a quelle temperature, che rende inefficace l'azione di ancoraggio delle dislocazioni causata dai precipitati nella lega T6; facendo sì che le proprietà meccaniche siano molto simili tra lamiere che hanno subito i due differenti trattamenti termici.

I campioni solubilizzati hanno mostrato valori inferiori di coefficiente di attrito e meno tendenza all'adesione in tutte le condizioni testate; i campioni in entrambi gli stati T6 e solubilizzato mostrano tendenze simili nella variazione del coefficiente di attrito in funzione della temperatura, caratterizzata da un iniziale calo al crescere della temperatura, seguito da un aumento improvviso alle temperature

più elevate con l'aumento dei fenomeni di usura adesiva e trasferimento del materiale della lamiera alla superficie del punzone.

Tra tutti i parametri di processo la velocità di scorrimento sembra avere influenza maggiore rispetto alla pressione sul fenomeno dell'adesione; aumentando la velocità infatti si sposta l'inizio dell'adesione verso temperature di processo più alte.

Essendo inoltre i precipitati nella lega Al7075 T6 simili in composizione agli elementi dell'acciaio per lavorazioni a caldo del punzone, le alte temperature e pressioni accrescono l'affinità chimica che si può considerare responsabile per gli incrementata usura adesiva presente nei campioni allo stato T6.

L'adesione o meno del materiale sembra essere collegata solo debolmente alla pressione normale, i cui effetti principali sono di aumentare l'area di adesione ma non di farla avvenire o meno, a parità delle altre condizioni di test.

Le analisi delle superfici hanno inoltre dato ulteriori indicazioni, seppur qualitative, sulle modalità con cui avviene il fenomeno dell'usura adesiva.

7 Bibliografia

- [1] Marco V. Boniardi, Andrea Casaroli. *L'alluminio e le sue leghe* (versione 4). Failure Analysis & Forensic Engineering
- [2] H. Jost *a report on the present position and industry's needs*. London: H.M. Stationary Office, 1966
- [3] Rudi ter Haar. *Friction in sheet metal forming, the influence of (local) contact conditions and deformation*. Thesis Universiteit Twent, 1967
- [4] ASM Handbook - Vol 18 - *Friction, Lubrication, and Wear Technology*.
- [5] Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid. *Tecnologia meccanica*. Seconda edizione italiana, capitolo 4, Pearson ed.
- [6] K. D. Budinski, *Guide to friction, wear and erosion testing*. ASTM international, 2007
- [7] *Modern Tribology Handbook*, (volume one) Editor-in-chief Bharat Bhushan, pag.806
- [8] A. Ghiotti, S. Bruschi, F. Medea. *Wear onset in hot stamping of aluminium alloy sheets*, Wear 2017
- [9] Francesco Medea, Andrea Ghiotti, Stefania Bruschi, Marco Bellin. *Novel Spraying Apparatus to Investigate the Lubricant Deposition on Metal Sheets at Elevated Temperature*. 2016
- [10] ASM HandBook - Vol 02 - *Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. Cap. Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys
- [11] ASM HandBook - Vol 02 - *Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. Cap. Wrought Aluminum and Aluminum Alloy Designation System
- [12] <http://www.carrarettoloris.it/>. *Scheda tecnica Al7075*
- [13] ASM HandBook - Vol 04 - *Heat Treating*, Cap. Heat treating of aluminum alloys
- [14] Mirko Zabeo. *Tribologia on processi di stampaggio di leghe di alluminio a caldo: sviluppo e calibrazione di*
- [15] Marco Bellin. Tesi di laurea magistrale (embargata)
- [16] <https://exlar.com/product/gsx-series/>
- [17] ASM Handbook vol. 09 - *Metallography and Microstructures*. Cap. Metallographic Techniques for Aluminum and Its Alloys

- [18] Alberto Cigada, Tommaso Pastore. *Struttura e proprietà dei materiali metallici*. Ed. McGraw-Hill Education
- [19] ASM Handbook vol. 04 – *Heat Treating*. Cap. Strengthening by Heat Treatment
- [20] Sudhanshu S. Singh, Cary Schwartzstein, Jason J. William, Xianghui Xiao, Francesco De Carlo, Nikhilesh Chawla. *3D microstructural characterization and mechanical properties of constituent particles in Al 7075 alloys using X-ray synchrotron tomography and nanoindentation*. Journal of Alloys and Compounds, 2014
- [21] Elisa Daniela De Boni. *Formabilità a caldo di leghe di Alluminio serie 6000 e 7000 di interesse automotive*. 2017