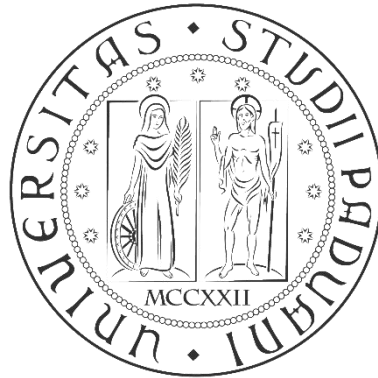


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



**FACOLTÀ DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA**

TESI DI LAUREA

**TRIBOLOGIA IN PROCESSI DI STAMPAGGIO DI LEGHE DI ALLUMINIO
A CALDO: SVILUPPO E CALIBRAZIONE DI APPARATI DI PROVA PER LA
LUBRIFICAZIONE E LA VALUTAZIONE
DI COEFFICIENTI DI ATTRITO.**

***TRIBOLOGY IN HOT STAMPING OF AA ALLOYS: EXPERIMENTAL SET-UPS
FOR THE LUBRICATION AND THE MEASUREMENT OF FRICTION
COEFFICIENTS.***

**Relatore: Prof. Ghiotti Andrea
Correlatore: Ing. Medea Francesco**

**Laureando: Zabeo Mirko
Matricola: 1056923**

anno accademico 2013/2014

*“Ogni fallimento è semplicemente un’opportunità
per diventare più intelligente”*

Henry Ford

a Francesca, Ylenia e Marino

Ringraziamenti

Ringrazio in primis Andrea Ghiotti per aver messo a mia disposizione ancora una volta: la sua serietà, impegno, disponibilità e professionalità affinché raggiungessi questo mio obiettivo; un grazie anche a Francesco Medea per il supporto che m'ha dato in questi mesi di lavoro, scoprendo in lui oltre che un ottimo collega, anche un amico fuori dall'ambiente universitario.

Ringrazio la mia famiglia: Francesca, Ylenia e Marino, a cui dedico questo elaborato, per essere stata sempre presente ed avermi sopportato, in questi miei anni di studio.

Un grazie va rivolto anche agli amici più stretti: Pierluigi, Andrea, Marco, Davide e Matteo che si fan sempre sentire anche quando non lo faccio io, perché questo per me, è essenziale.

Mirko

Padova, 17/07/2014

INDICE

SOMMARIO	1
ABSTRACT	2
1 – INTRODUZIONE	3
1.1 – Il problema industriale	3
1.2 – Ambito del progetto	5
1.3 – Obiettivi dell’elaborato	6
1.4 – Articolazione dell’elaborato	7
2 – STATO DELL’ARTE	9
2.1 – Analisi bibliografica	9
2.2 – Sistemi di lubrificazione e lubrificanti	20
2.2.1 – Lubrificanti liquidi	21
2.2.2 – Lubrificanti solidi	24
2.2.3 – Sistemi di deposizione dei lubrificanti	26
2.2.3.1 – Sistema di lubrificazione a rulli	26
2.2.3.2 – Sistema di lubrificazione a spruzzo	28
2.2.3.3 – Tecniche di deposizione PVD	32
2.2.3.4 – Sistemi di lubrificazione minimale	34
2.2.4 – Lubrificanti scelti per i test	34

2.3 – Test di attrito	40
2.3.1 – Teoria dell’attrito: interpretazione delle curve in uscita dalla macchina di strip drawing test	45
3 – SISTEMI DI PROVA	47
3.1 – Progettazione del modello 3D	47
3.1.1 – Obiettivi e vincoli	48
3.1.2 – L’evoluzione dell’idea	49
3.2 – Elenco dei componenti	61
3.2.1 – Tipologie di ugelli	61
3.2.1.1 – Nebulizzatore aria liquido (Panar SRL)	61
3.2.1.2 – Ugelli spraying aria liquido (Acheson)	63
3.2.1.3 – Aerografi	66
3.2.1.4 – Ugelli nebulizzatori (Vortex)	67
3.2.1.5 – Impianti di lubrificazione minimale (ILC)	72
3.2.1.6 – Impianti di lubrificazione (Azeta)	77
3.2.2 – Riscaldamento lamine	78
3.2.2.1 – Piastra per conduzione (HT SPA)	79
3.2.2.2 – Irradiatori ceramici ad infrarossi (ROTFIL)	81
3.2.2.3 – Forni tubolari e forni a muffola	84
3.2.2.4 – Lampade alogene (Laser Lamps)	88
3.2.3 – Sistema di movimentazione	93
3.2.4 – Regolazione di pressione dell’aria	94
3.2.5 – Elettrovalvola	95
3.2.6 – Valvola di non ritorno	95
3.2.7 – Altri componenti	96
3.2.8 – Arduino ed interfaccia grafica	96
3.2.8.1 – Programmare Arduino	97
3.2.8.2 – Interfaccia grafica realizzata con Python	98
3.2.9 – Schema generale dell’impianto	100
3.2.10 – Confronto tra macchina reale e modello 3D	101

3.3 – Macchina di strip drawing test	112
3.3.1 – Funzionamento	112
3.3.2 – Componenti della macchina	114
3.3.3 – Prove di calibrazione	118
3.4 – Piano sperimentale	121
3.4.1 – Caratterizzazione del materiale	121
3.4.2 – Parametri di prova	125
3.4.2.1 – Rugosità	125
3.4.2.2 – Stroke	128
3.4.2.3 – Velocità	129
3.4.2.4 – Forza e pressione di contatto	129
4 – RISULTATI	131
4.1 – Risultati: deposizione lubrificanti	131
4.1.1 – Deposizione PulveD18A (spray)	132
4.1.2 – Deposizione PulveBND60A (spray)	136
4.1.2.1 – Deposizione a freddo	136
4.1.3 – Deposizione BonderiteL-FM747	139
4.1.3.1 – Deposizione a freddo con rullo	139
4.2 – Risultati: coefficiente d'attrito	142
4.2.1 – Campagna prove	142
4.2.2 – μ : PulveD18A depositato e testato a freddo	144
4.2.3 – μ : PulveBND60A depositato e testato a freddo	150
4.2.4 – μ : BonderiteL-FM747 depositato e testato a freddo, con rullo	157
5 – CONCLUSIONI	159
A – TARATURA DELLA PIASTRA SULLA MACCHINA DI STRIP DRAWING TEST	165
A.1 – Posizionamento della lamina e saldatura delle termocoppie	165
A.2 – Acquisizione dati	170
A.3 – Confronto dei risultati ottenuti	171
A.4 – Commenti e risultati ottenuti	176

B – GUIDA ALL’UTILIZZO DELLA MACCHINA DI STRIP DRAWING TEST	181
B.1 – Tutorial prove a caldo	181
B.2 – Tutorial prove a freddo	186
C – LINGUAGGI DI PROGRAMMAZIONE	187
C.1 – Programmazione con Arduino	187
C.2 – Programmazione con Python 2.7	188
D – TAVOLE DEI COMPONENTI IN 2D	191
D-2 Piano inferiore struttura	192
D-3 Piano di appoggio mezzeria struttura	193
D-4 Piano appoggio superiore	194
D-5 Binario superiore	195
D-6 Binario inferiore	196
D-7 Profilato pieno posteriore	197
D-8 Profilo pieno laterale 1	198
D-9 Profilo pieno laterale 2	199
D-10 Profilo pieno interno	200
D-11 Sostegno trapezoidale	201
D-12 Piano appoggio guida ugelli	202
D-13 Guida ugelli	203
D-14 Plexiglass posteriore su	204
D-15 Plexiglass posteriore giù	205
D-16 Plexiglass laterali	206
D-17 Plexiglass tappo	207
D-18 Plexiglass tappo 2	208
D-19 Plexiglass porta	209
D-20 Coperchio lampade	210
D-21 Profilato sostegno lampade	211
D-22 Base per lampade	212
D-23 Componenti avvicinamento lampade	213
D-24 Blocchetti ripara lampade	214

D-25 Sostegni verticali porta	215
D-26 Sostegni orizzontali porta	216
D-27 Guida per tubo cilindrico 1	217
D-28 Guida per cilindro pieno 2	218
D-29 Cilindro pieno orienta lamine	219
D-30 Blocca lamina base: lamine orizzontali	220
D-31 Blocca lamina coperchio: lamine orizzontali	221
D-32 Blocca lamina base: lamine a 45°	222
D-33 Blocca lamina coperchio: lamine a 45°	223
D-34 Rialzo carrello	224
D-35 Profilato base forato	225
D-36 Profilato di presa	226
D-37 Flangia di blocco profilato	227
D-38 Blocco di appoggio profilato	228
D-39 Lamierini piccoli senza svaso	229
D-40 Placca	230
D-41 Placca fissaggio	231
D-42 Lamierini doppi per fissaggio	232
D-43 Lamierini fissaggio lampade	233
D-44 Lamierini guida	234
D-45 Lamierini guida 2	235
D-46 Lamierini guida 3	236
D-51 Copri macchina posteriore	237
D-52 Copri macchina laterali	238
D-53 Copri macchina anteriore	239
D-A Complessivo A	240
D-B Complessivo B	241
D-C Complessivo C	242
D-D Complessivo D	243
D-E Complessivo E	244
BIBLIOGRAFIA	245

SOMMARIO

L'elaborato è incentrato sull'argomento Tribologia: esso infatti viene a trattare il comportamento del coefficiente di attrito mediante apparati di prova, realizzati nei laboratori dell'Università di Padova.

Durante i test si confronteranno le curve di attrito in uscita, con diverse combinazioni delle variabili in gioco: più lubrificanti, diverse pressioni di contatto e differenti velocità di strisciamento tra i corpi; tutto ciò verrà commentato e discusso, trovando eventuali problematiche e giustificandole opportunamente.

Un'altra sezione della tesi è dedicata invece alla realizzazione vera e propria di un macchinario, che permetta di eseguire dei test di deposizione sia a freddo che a caldo, mediante ugelli nebulizzatori; nell'elaborato verrà infatti trattata sia la parte relativa al modello 3D, con i diversi concept creati, sia la parte relativa alla produzione e alla scelta dei componenti.

ABSTRACT

The paper focuses on the Tribology: It will be studied the behavior of the coefficient of friction using a test equipment that was manufactured in the laboratories of the University of Padua.

During the tests will be compare the output curves of friction, with different combinations of the variables involved: different contact pressures and lubricant, and different sliding speeds between bodies; everything will be commented and discussed, finding any problems and justifying them appropriately.

Another section of the thesis is devoted instead, to the construction of a machine that allows to run cold and hot tests, of lubricant's deposition, with spray nozzles; in the text will be treated the part related of 3D model, with different concepts created, and also the part relating to the production and selection of components.

1 – INTRODUZIONE

1.1 IL PROBLEMA INDUSTRIALE

Nei processi tecnologici di lavorazione dei metalli subentra sempre il problema dell'usura e dell'attrito; non si può pensare di affrontare un processo senza dispersione di energia, la quale si manifesta il più delle volte sotto forma di calore. Anche quando si creano delle simulazioni, per aver maggiormente sotto controllo il processo e i risultati, bisogna dare in input il valore di coefficiente d'attrito medio (dico medio perché la maggior parte dei software ha bisogno di un numero che riassume il valore dell'attrito, quando invece nella realtà l'andamento di μ varia localmente, anche di molto, nello stesso processo; esso dipende da moltissime variabili che vedremo esplicate nel secondo capitolo).

Prendendo in considerazione alcuni processi industriali come per esempio il machining, lo stampaggio di lamiera,... in tutti essi si manifesta l'attrito e quindi poi l'usura.

In un processo di machining per esempio, come potrebbe essere una semplice tornitura, se non venisse lubrificata la zona di contatto tra utensile e pezzo da lavorare vi sarebbero dei coefficienti di attrito elevati, con conseguente surriscaldamento del pezzo: si pensi a componenti atti a formare banchi ottici, dunque di elevata precisione, se vi fosse un eccessivo riscaldamento vi potrebbe essere anche un cambiamento della microstruttura interna, con conseguenti variazioni che potrebbero ripercuotersi anche sulla

superficie esterna e sulla geometria del pezzo. Oltre al riscaldamento, come conseguenza negativa del valore alto di attrito, c'è anche il consumo eccessivo dell'utensile, che comporta quindi a un cambio più frequente e così a un maggior costo del processo (il prezzo di un utensile da taglio è alto perché realizzato con materiali nobili e molto resistenti).

Nei processi di stampaggio, come quelli che riguarderanno il nostro elaborato, l'attrito è un cattivo componente e se presente con valori troppo elevati può portare anche alla rottura della lamiera durante la fase di deformazione come mostra figura 1.2.



figura 1.1 – Lamiera deformata senza alcuna frattura

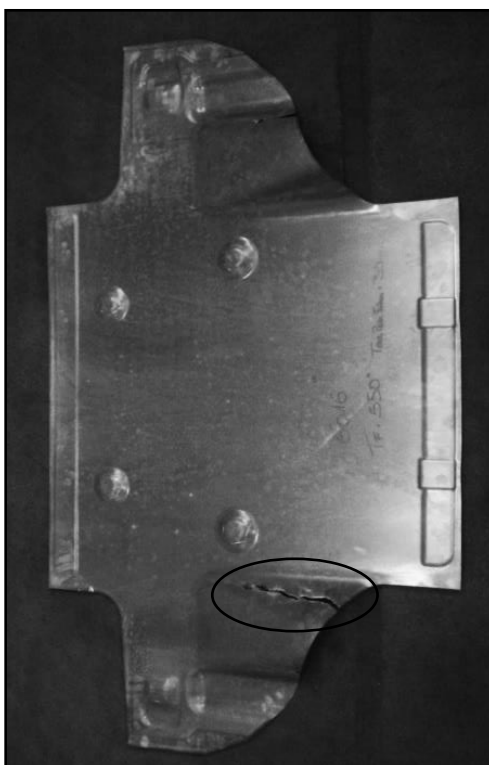


figura 1.2 – Lamiera deformata con frattura

Per abbassare μ , si usano quindi dei lubrificanti che vengono applicati sulla lamiera o anche direttamente sullo stampo.

Avere un coefficiente di attrito basso significa quindi abbassare l'usura degli stampi stessi e allo stesso tempo essere sicuri che il componente sotto l'azione deformante non generi fratture; il vantaggio è quello di essere sicuri che il processo tecnologico avvenga nel modo più corretto possibile, riducendo il costo legato al processo: il cambio stampi avviene così meno di frequente.

C'è da sottolineare inoltre che l'acquisto dei lubrificanti può alzare il prezzo del processo, seppur in maniera esigua; il fine dell'elaborato è quello sì, di rendere più rada la sostituzione degli stampi, ma allo stesso tempo risparmiare sul quantitativo dei lubrificanti creando un apparato di prova che soddisfi tali esigenze, studiando quindi la quantità impiegata in ogni processo, generando una campagna prove con dei tempi di spruzzata precisi. Prendere una quantità non precisa di lubrificante per poi accorgersi che un quarto o addirittura un terzo non sia stato manco usato sarebbe uno spreco in termini di costo di processo.

1.2 AMBITO DEL PROGETTO

Nel corrente elaborato si tratterà di analizzare il comportamento di lamiere di alluminio utilizzate nel campo dell'automotive.

Il materiale che si testerà è una lega di alluminio AA6016, usata, nel caso specifico per coprire il fondo delle automobili onde evitare la risalita di detriti: si pensi alle gare di Rally, in quel caso il rischio di portare componenti estranei all'interno del sistema di trasmissione e motore è più elevato (si vedano in particolare le figure 1.1 ed 1.2).

Come verrà trattato anche successivamente nell'analisi bibliografica, la quantità in termini di peso dell'alluminio nelle automobili, è aumentato esponenzialmente negli ultimi decenni. Il motivo sta nelle emissioni delle stesse auto che aumentano proporzionalmente, al peso della stessa.

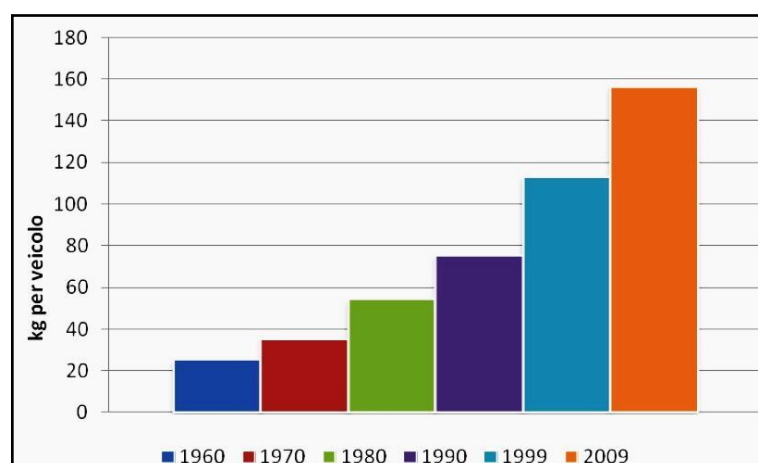


figura 1.3 – Quantità in kg, di alluminio nei veicoli

Attualmente nelle costruzioni automobilistiche vi sono dei settori ben precisi in cui l'uso dell'alluminio è radicato e consolidato:

- nei gruppi operativi: testata motore, collettori aspirazione, scatola cambio, carcassa alternatore e calotte del motorino di avviamento, parte per l'aspirazione di turbocompressori, coppa dell'olio ed in qualche caso monoblocchi
- nell'autotelaio: cerchi ruote, scatola dello sterzo, barre di protezione laterali
- nel sistema di raffreddamento: radiatore, pompa acqua e raccordi per manicotti
- nei componenti del climatizzatore: condensatore, evaporatore, carcassa del compressore

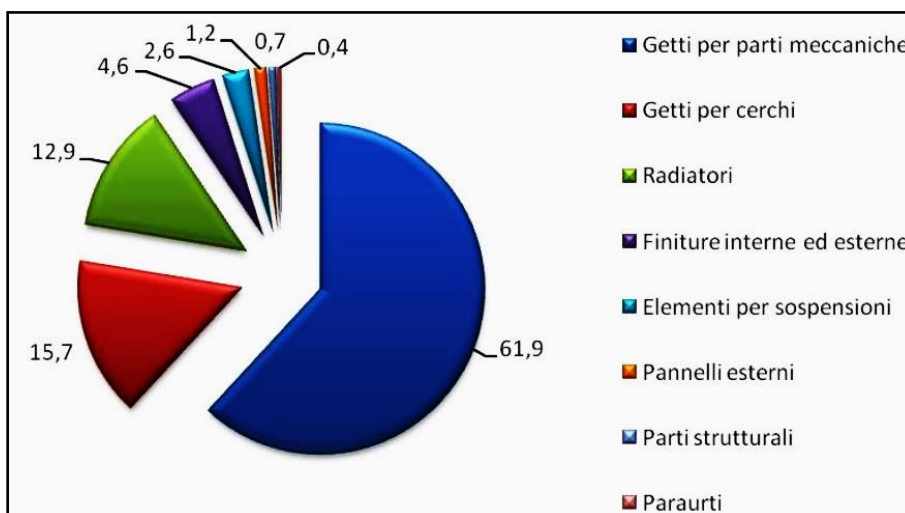


figura 1.4 – Grafico a torta che descrive le parti di un veicolo realizzate in alluminio

1.3 OBIETTIVI DELL'ELABORATO

L'elaborato in questione verrà suddiviso in due parti:

1. la prima si baserà sulla realizzazione di un impianto di lubrificazione
2. la seconda tratterà la macchina di strip drawing test, con le dovute prove a freddo e tiepido/caldo sulle lamine precedentemente lubrificate

Gli obiettivi di talune sezioni sono i seguenti:

1. realizzare una macchina il più possibile
 - o stabile: evitare vibrazioni e fluttuazioni
 - o flessibile: che possa garantire un posizionamento corretto nello spazio, degli ugelli

- economica, senza penalizzare la qualità dei test
 - funzionale: che sia il più semplice possibile nel suo funzionamento cosicché chiunque possa utilizzarla
2. i test fatti sulla macchina di strip drawing (già presente in laboratorio) dovranno essere effettuati su lamine di alluminio precedentemente lubrificate, solo in tal modo si potranno avere risultati confrontabili e proponibili. Questa macchina da come risultato il coefficiente di attrito μ .

1.4 ARTICOLAZIONE DELL'ELABORATO

Capitolo 1: in questa fase viene introdotto il problema dal punto di vista industriale, dunque ciò che riguarda i costi legati al processo ed anche al coefficiente di attrito, con conseguente descrizione dei componenti reali sui quali si lavorerà, che sono atti alla copertura del fondo delle automobili.

Capitolo 2: questo capitolo si focalizza sull'analisi bibliografica in generale, riportando una serie di articoli con relativi risultati; successivamente si introdurranno le tipologie di lubrificanti (con anche la rispettiva scheda tecnica) ed i metodi convenzionali per la loro applicazione sulle lamine; l'ultima parte del capitolo, da una veloce guida su come interpretare le curve in uscita dai test di attrito più usati in laboratorio.

Capitolo 3: è il più corposo, nel quale si prevede la descrizione della macchina dal punto di vista teorico, quindi modellazione 3D, partendo dai primi concept fino ad arrivare al modello finale; successivamente si verranno a descrivere i singoli componenti presi in considerazione a partire dalle tipologie di ugelli, passando per i metodi di riscaldamento delle lamine ed arrivando infine a descrivere anche la parte elettronica di regolazione; verrà data una descrizione con aiuto di immagini, della macchina reale finita; si è deciso infine di riportare una descrizione relativa alla macchina di strip drawing test, con relativo funzionamento e prove di calibrazione; nella parte finale del capitolo si verrà a caratterizzare: il materiale da testare, ad analizzare le superfici degli stampi e delle lamine mediante profilometro e a stilare la campagna prove con le relative variabili che entreranno in gioco.

Capitolo 4: si presentano e si descrivono i risultati ottenuti con la deposizione dei lubrificanti e successivamente quelli ottenuti dai test di attrito; tra i vari grafici vengono descritte le problematiche riscontrate.

Capitolo 5: in esso si tireranno le somme di quanto analizzato, descritto e testato nell'intero elaborato, con critiche e problematiche incontrate nel percorso; sono utili i confronti tra differenti rugosità, quantitativi di lubrificante e coefficienti di attrito.

Appendici: la A, descrive il procedimento di taratura della piastra nella macchina di strip, dalla saldatura delle termocoppie fino all'elaborazione delle curve di temperatura nel tempo; nella B invece viene descritto il procedimento delle prove di attrito vere e proprie, sia con piastra calda che fredda; l'appendice C invece riporta i linguaggi di programmazione riguardanti la regolazione dei tempi di spruzzata e dell'interfaccia grafica; la D riporta le tavole in 2D dei componenti della macchina addetta alla lubrificazione

2 - STATO DELL'ARTE

2.1 ANALISI BIBLIOGRAFICA

Prima di descrivere il funzionamento delle due macchine in questione, si vuole vedere e capire cosa già, sia stato fatto in campo internazionale sulla "lubrificazione dell'alluminio".

Il coefficiente di attrito è un parametro molto importante, esso può influire in buona percentuale sui costi di realizzazione di un componente, mi spiego: abbassare il coefficiente di attrito può essere un fattore positivo se si pensa all'attrito che può nascere tra componente e stampo. Se tra essi vi fosse un valore elevato di μ , vi sarebbe un aumento dell'usura, e dunque una maggiore frequenza nel sostituire uno stampo, il che allora comporterebbe a maggiori costi di processo.

Non è da sottovalutare tale aspetto in campo industriale, in quanto il costo di uno stampo è spesso una discreta parte del costo totale del macchinario.

A questo punto per abbassare il valore del coefficiente di attrito intervengono i cosiddetti lubrificanti, dei quali vi sono tra le più svariate tipologie, ma anche quando si trattano i lubrificanti, bisogna agire con ragionevolezza, pensando che anch'essi hanno un loro costo e che dunque, non devono essere sprecati.

La ricerca bibliografica ha la primaria funzione di aumentare la conoscenza nel campo corrente, evitando quindi spiacevoli sorprese, qualora si pensasse

di aver inventato un qualcosa di nuovo, che magari viene già studiato da mesi, se non anni.

[W.S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A.J. Wittebrood, P. De Smet, A. Haszler, A. Vieregge - Recent development in aluminium alloys for the automotive industry (2000)]

Questi autori trattavano già nel primo decennio del 2000 l'importanza dell'alluminio nel settore automobilistico: la tendenza era ed è, sempre più, quella di ridurre il peso delle automobili, aumentandone le prestazioni in termini di accelerazione (da 0 – 100 km/h in tot secondi, per esempio) e velocità. Riuscire a convertire le parti d'acciaio di una automobile, in alluminio comportava anche un abbassamento delle emissioni, e una riduzione notevole dei consumi: hanno stimato che riducendo di un 10% il peso di un'automobile si riusciva a risparmiare fino all'8% di carburante. Naturalmente la conversione da acciaio ad alluminio non può essere totale in quanto quest'ultimo pecca di rigidità rispetto al primo; la conversione tratta infatti alcune parti del motore, i pistoni, le portiere,... il telaio mantiene ancora la sua buona percentuale di acciaio. Le leghe di alluminio utilizzate, in tal caso erano, la 6000 per gli esterni e 5000 per interni.

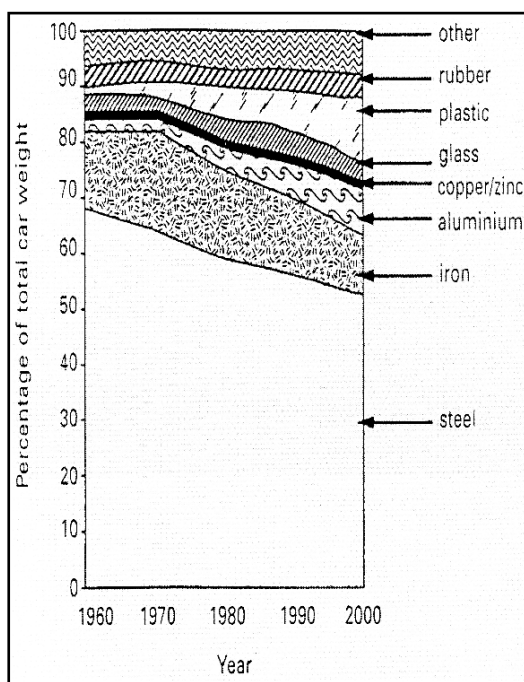


figura 2.1 – Percentuale dei materiali in un'automobile, al passare dei decenni presa dall'articolo [W.S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A.J. Wittebrood, P. De Smet, A. Haszler, A. Vieregge - Recent development in aluminium alloys for the automotive industry (2000)]

Qui in seguito viene riportata una tabella che mette a confronto le proprietà e i prezzi di alcuni metalli.

Materiale	Tensile Yield Strength [MPa]	Elastic Modulus [GPa]	Cost [\$ /kg]	Scrap Value [\$ /kg]
Carbon steels	345	175	0.73	0.09
Stainless steels	515	200	2.53	0.40
Aluminum	95	70	1.87	0.50
Magnesium	95	45	4.00	1.00
Bronze	345	115	1.65	0.55
Nickel alloys	600	195	11.00	0.55
Ductile iron	515	165	0.29	0.07

tabella 2.1 – Prezzo di alcuni metalli con relative proprietà

L'obiettivo di tutta la trattazione è appunto quello di valutare il coefficiente di attrito μ : bisogna però fare attenzione, perché vi sono due tipologie di coefficienti di attrito.

Nelle lavorazioni massive si utilizza m , mentre nella lavorazione della lamiera, come nel caso nostro si utilizza μ , dove:

μ = coefficiente di attrito = attrito secondo Coulomb

m = fattore di attrito = attrito secondo Tresca

Attrito secondo Coulomb	Attrito secondo Tresca
$T = \mu N$	$T = m k$

tabella 2.2 – Confronto tra le due tipologie di attrito

T = forza tangenziale [N]

N = forza normale [N]

k = tensione di snervamento [MPa]

La macchina di strip drawing, grazie a due celle di carico, riesce a misurare la T ed N , che con un successivo semplice rapporto, dà il valore di μ .

[Hyunok Kim e Nimet Kardes - Sheet Metal Forming Fundamentals (capitolo 7: Friction and lubrication)]

Autori come *Hyunok* e *Kardes* hanno studiato gli effetti dei lubrificanti e quindi del coefficiente di attrito sulle variabili di processo, che vengono così elencate qui in seguito in modo riassuntivo e conciso:

- Lamiera
 - proprietà del materiale
 - rivestimento superficiale
 - geometria
- Condizioni di produzione
 - temperatura
 - umidità
 - caratteristiche del macchinario
- Stampo
 - materiale
 - finitura superficiale
 - proprietà termiche
 - geometria
- Lubrificante
 - viscosità
 - spessore del film
 - pressione
 - temperatura

I seguenti riferimenti bibliografici proposti, trattano anche l'acciaio, e ciò non deve deviare la nostra attenzione, in quanto vengono elencati solo per avere un quadro più preciso delle variabili che influenzano μ , che sono le stesse per entrambi i materiali.

[Kuniaki Dohda e Zhrgang Wang - Effects of average lubricant velocity and sliding velocity on friction behavior in mild steel sheet forming]

Si focalizza sia sulle velocità di scorrimento relative tra i due corpi a contatto sia sulla velocità del lubrificante stesso.

[Francesco Medea - Tribological behaviour of dies materials for hot stamping of 22MnB5]

Studia la velocità di scorrimento, la temperatura e la pressione di contatto, e propone dei grafici dove si vedono i diversi valori di μ al variare delle tre variabili proposte.

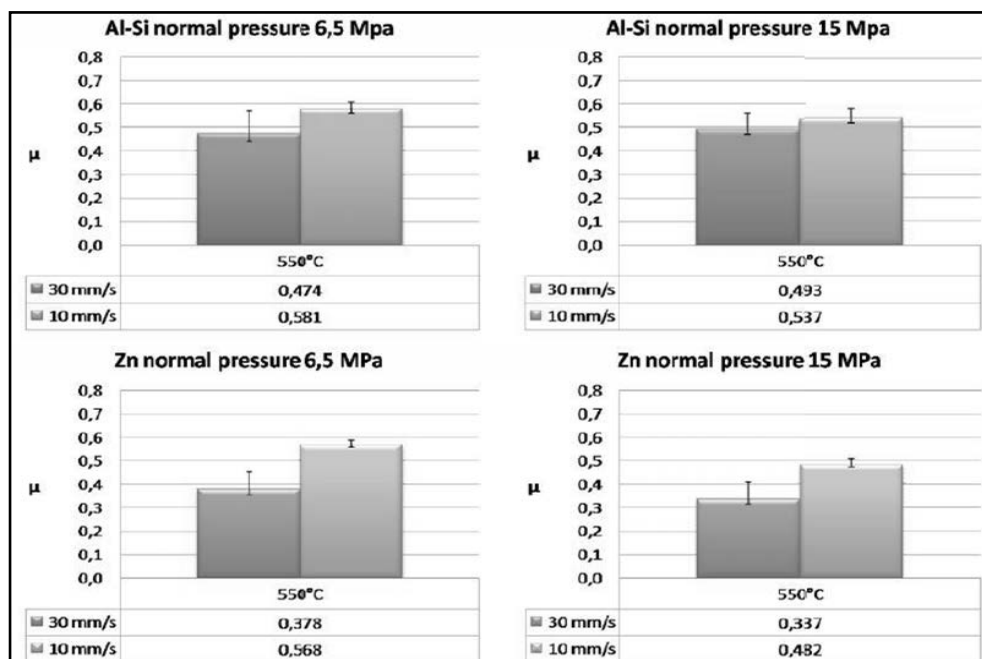


figura 2.2 – Risultati: valori di μ in funzione dello strato di lubrificante, temperatura, pressione di contatto e velocità di scorrimento, tratto dalla Tesi [Francesco Medea - Tribological behaviour of dies materials for hot stamping of 22MnB5]

Si nota subito come all'aumentare della velocità relativa, temperatura e pressione di contatto, si abbassa il coefficiente di attrito. Perché?

Aumentando il valore della velocità relativa tra i corpi in contatto, non si dà il tempo di creare aderenza tra le due superfici; aumentando la temperatura invece, lo strato più esterno della lamina in questione diventa morbido; infine aumentando la pressione si appiattiscono le asperità e dunque diminuisce la rugosità.

È proprio la rugosità che ora verrà trattata nel prossimo articolo, come un ulteriore parametro che incide su μ .

[Rui Zhoua, Jian Caoa, Q. Jane Wanga, Fanming Menga, Krystian Zimowskia, Z. Cedric Xiab - *Effect of EDT surface texturing on tribological behavior of aluminum sheet*]

Codesti autori hanno esaminato in particolar modo la finitura superficiale delle lamiere di alluminio. Lavorando la superficie dei rulli di laminazione, si riusciva ad imprimere alla lamiera, una texture particolare, con apposite fossette che avevano la principale funzione di intrappolare il lubrificante, abbassando così il valore di μ . Le tecniche che rendono possibile ciò sono principalmente due:

- EBT: Electron Beam Texturing, dove un fascio di elettroni, crea delle piccole depressioni o crateri, sulla superficie del laminatoio
- EDT: Electro Discharge Texturing, lavorazione laser sui rulli

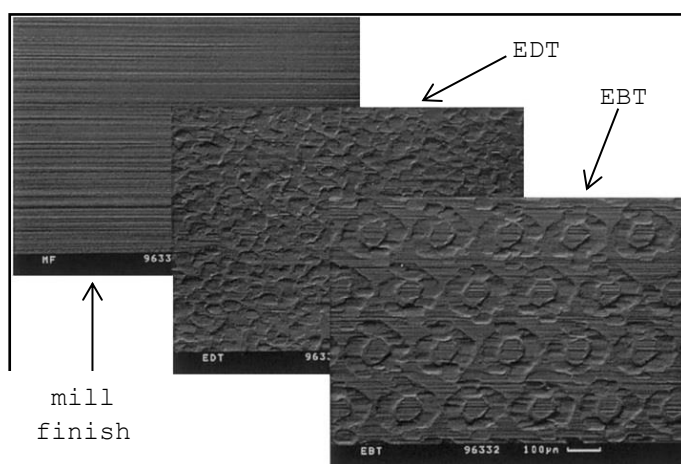


figura 2.3 – Diversa finitura dei rulli durante la fase di laminazione con tecniche EDT, EBT e mill finish, immagine tratta dall'articolo [Rui Zhoua, Jian Caoa, Q. Jane Wanga, Fanming Menga, Krystian Zimowskia, Z. Cedric Xiab - *Effect of EDT surface texturing on tribological behavior of aluminum sheet*]

Normalmente la finitura standard superficiale delle lamiere è “mill finish”, per avere una idea più chiara di come sia la superficie si veda figura 2.3.

La tecnica EDT viene impressa al rullo mentre ruota, sotto il fascio laser. Una lamiera lavorata secondo tale tecnica, presenta delle migliorie anche dal punto di vista estetico, dove per esempio nella fase di verniciatura, il liquido, grazie alla presenza delle fossette, tende a stabilizzarsi meglio e dunque si elimina il cosiddetto effetto a “buccia d’arancia”.

In precedenza invece, con il mill finish, la verniciatura non era il massimo vista la presenza delle striature/linee dettate dalla direzione del laminatoio.

Davis nel 2008, si soffermò anche sulla forma di tali fossette, stabilendo, dopo studi ed esperimenti sul campo, che realizzando delle sacche di forma

rettangolare, si poteva ridurre anche di un 40% il valore del coefficiente di attrito, rispetto ad una normale finitura da laminatoio. Un tale studio, così specifico sulla forma delle fossette viene ulteriormente confermato grazie all'analisi FEM, nella quale c'è la possibilità di far variare i parametri in gioco con facilità; grazie al FEM sono riusciti a capire che influiva non solo la geometria del perimetro della sacca, ma anche il fondo di quest'ultima. Fossette con fondo piatto infatti, garantivano una migliore distribuzione del lubrificante (anche della vernice nel qualcaso fossimo nell'ultima fase di verniciatura), abbassando così il valore di μ rispetto a quelle che invece avevano il fondo irregolare.

La tecnica EDT ha dei vantaggi ed in particolar modo gli autori hanno voluto confrontare il valore del coefficiente di attrito per tre diverse finiture superficiali:

- RD = finitura con striature in direzione longitudinale
- TD = finitura con striature in direzione trasversale
- EDT = Electro Discharge Texturing

Da figura 2.5, si vede come tutte le curve per le tre differenti texture e per le quattro differenti pressioni di esercizio, abbiano un andamento decrescente all'aumentare della velocità di sliding; significa che μ si abbassa all'aumentare della velocità.

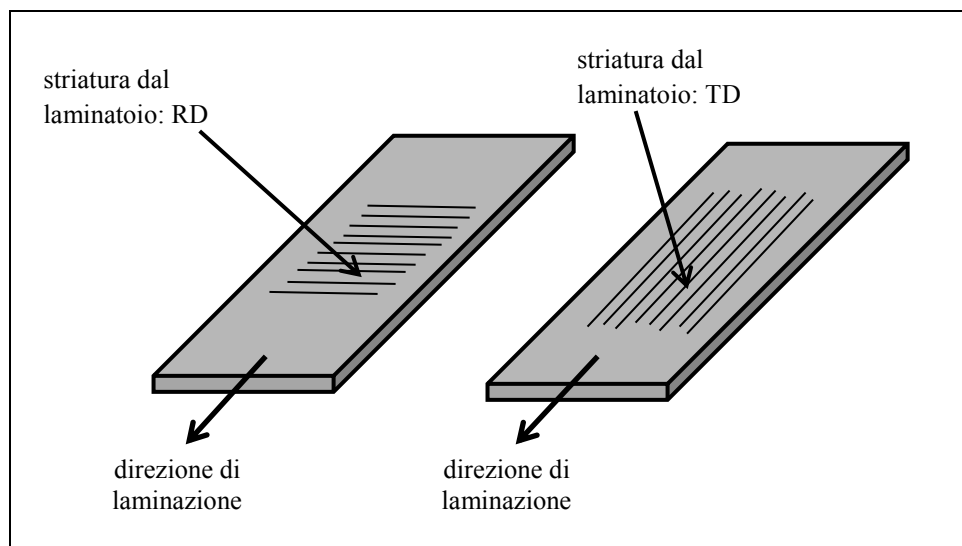


figura 2.4 – Differente texture, sulla lamiera d'alluminio in uscita dal laminatoio

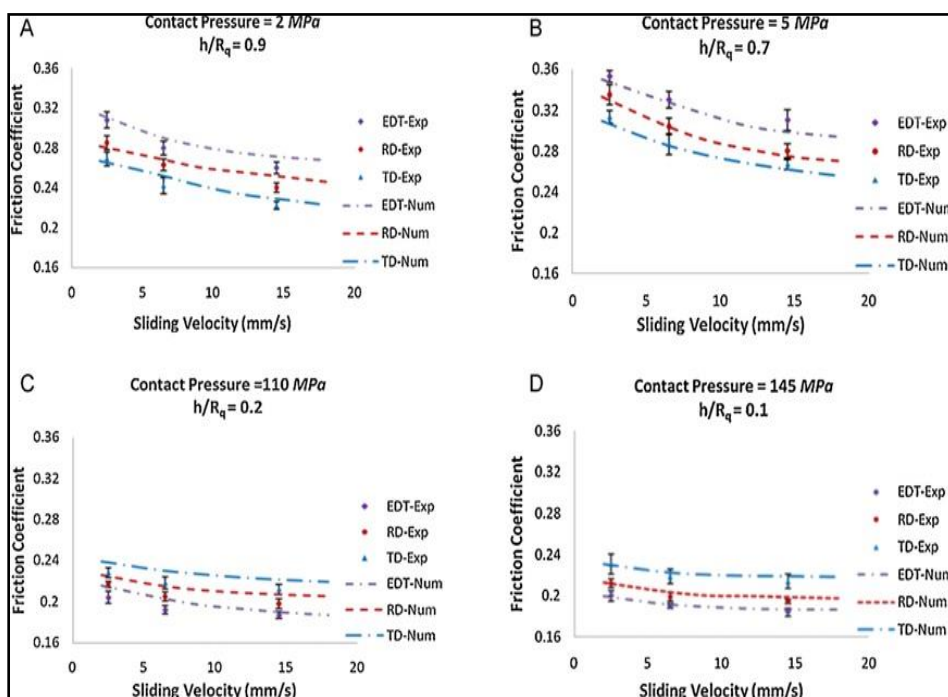


figura 2.5 – Risultati, ed andamento del coefficiente di attrito per tre diverse finiture superficiali, con variazione della velocità di scorrimento e della pressione di esercizio; immagine tratta da [Rui Zhoua, Jian Caoa, Q. Jane Wanga, Fanming Menga, Krystian Zimowska, Z. Cedric Xiab - Effect of EDT surface texturing on tribological behavior of aluminum sheet]

Tale effetto si può giustificare, come già descritto in precedenza, in una mancata aderenza tra le due superfici in questione.

Un altro dettaglio interessante che si può scorgere dalle curve è che la EDT-Exp (sperimentale) ed EDT-Num (numerica) stiano sopra RD e TD per basse pressioni (grafici A e B), ma sotto a quest'ultime per elevate pressioni (grafici C e D): il coefficiente μ , quindi, con elevate pressioni, è più basso per una lamina con lavorazione EDT, rispetto a una normale lavorazione RD/TD. Il concetto di fondo di tutto ciò è, che se si deve lavorare con alti valori di MPa, è bene utilizzare finiture superficiali in EDT, altrimenti normale finitura mill finish RD o TD. L'inversione di tali curve inoltre, in questa esperienza, avviene per un valore di circa 62 MPa. Dai 4 grafici A, B, C e D, si vede come la curva relativa al coefficiente di attrito RD, stia sempre sopra alla TD, per qualsiasi valore di pressione e di *sliding velocity*. Da precisare: nella nostra esperienza si utilizzerà un unico materiale, AA6016, con una rugosità superficiale data dal laminatoio, dunque senza specifiche lavorazioni e con striature RD.

[B.H. Lee, Y.T. Keum, R.H Wagoner - Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming]

Nel corrente articolo invece si vuole introdurre, e con ciò descrivere un'altra variabile che entra in gioco nel campo della lubrificazione, solamente elencata in precedenza, ed è la viscosità. Tali autori hanno creato un modello matematico che descrivesse il variare del coefficiente d'attrito μ , per inserirlo poi in un software di simulazioni numeriche FEM; il valore che si otteneva veniva in seguito confrontato con quello relativo alle prove sperimentali.

La prova tecnologica di riferimento per tale esperienza è una stiratura della lamiera. Il valore di μ finale è una combinazione che tiene conto sia della rugosità della lamiera, che della viscosità del lubrificante in questione.

λ = valore della rugosità
 ν = valore di viscosità

$$\begin{array}{ccc} \mu = f(\text{rugosità}) & & \mu = f(\text{viscosità}) \\ = 0,2 \lambda^2 & & = \frac{2,2}{0, \nu^{0,8}} \\ & \searrow & \swarrow \\ = \frac{2,2}{0, \nu^{0,8}} & , & 0 (\nu,)^2 \quad 0,2 (\lambda 0,)^2 \quad 0,2 \end{array}$$

Nei due seguenti grafici, viene mostrato l'andamento di μ .

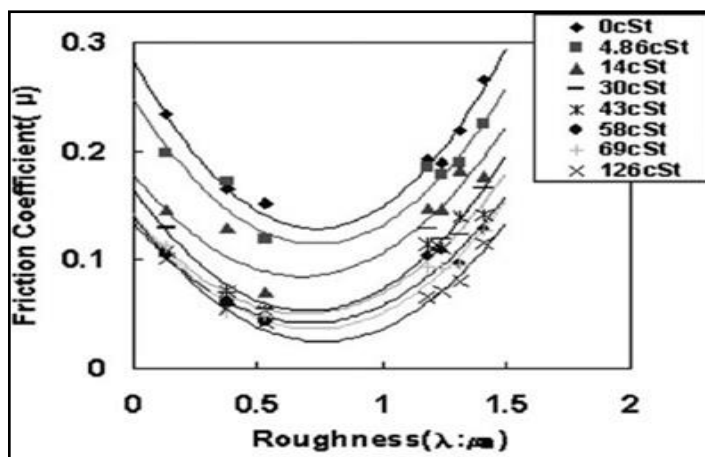


figura 2.6 – Andamento del coefficiente di attrito in funzione della rugosità, immagine tratta dall'articolo [B.H. Lee, Y.T. Keum, R.H Wagoner - Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming]

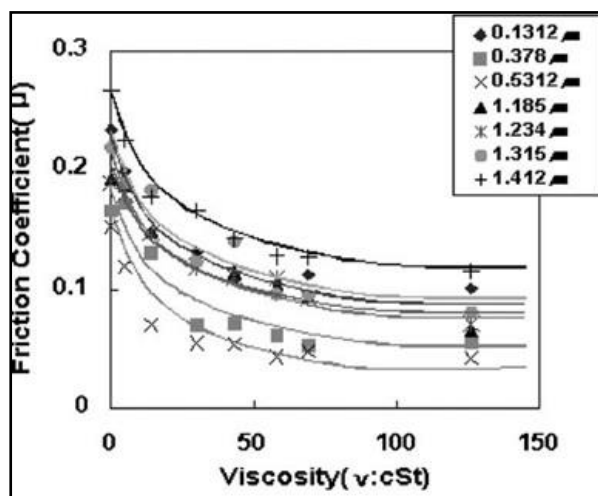


figura 2.7 – Andamento del coefficiente d'attrito in funzione della viscosità, immagine tratta dall'articolo [B.H. Lee, Y.T. Keum, R.H Wagoner - Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming]

Da figura 2.7, si può vedere come un aumento di viscosità provochi un abbassamento del valore di μ , per tutti i lubrificanti presi in considerazione, che nel caso corrente sono rivestimenti in zinco e alluminio.

Un parametro che non abbiamo ancora menzionato è la temperatura, che è direttamente collegata alla viscosità: più un liquido è viscoso e minore sarà la sua temperatura di esercizio; codesta relazione può essere così trascritta come un legame di proporzionalità inversa tra la variabile viscosità e la variabile temperatura.

Per quando riguarda invece il grafico di figura 2.6, si nota che tutte le curve, per un determinato valore di rugosità Ra hanno un minimo. Perché?

Durante la deformazione del provino in alluminio, si vengono a formare le già menzionate sacche d'olio, che intrappolandolo non fanno altro che diminuire il coefficiente d'attrito, dando così forma alle curve di figura 2.6.

Sono state fin qui menzionate diverse fonti dalle quali si è preso spunto per iniziare a focalizzare il problema vero e proprio, e di tutta la discussione finora fatta si possono trarre alcune considerazioni finali, legate a μ ; in particolar modo proprio quest'ultimo dipende da diverse variabili, le quali verranno variate durante le prove in laboratorio per vedere come possa esso cambiare.

Le variabili in questione sono qui in seguito riassunte:

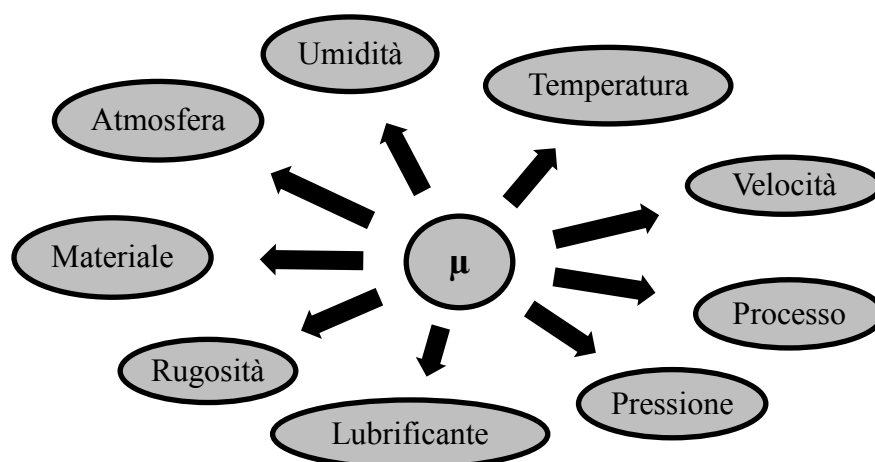


figura 2.8 – Variabili che portano ad una variazione del coefficiente di attrito

Nella ricerca bibliografica finora fatta non è stata menzionata l'umidità, la quale ha anch'essa importanza visto che il lubrificante, che si va a spruzzare, deve attecchire alla lamina e dunque seccarsi; se vi fosse un eccessivo valore di umidità si dovrebbe attendere di più per far in modo che il prodotto si depositi nel modo corretto.

2.2 SISTEMI DI LUBRIFICAZIONE E LUBRIFICANTI

2.2.1 Lubrificanti liquidi

La lubrificazione è una componente importante di tutti i processi tecnologici. Nel caso di lubrificanti liquidi, si possono elencare quattro regimi diversi di lubrificazione, che vengono riassunti sulla curva di Stribeck.

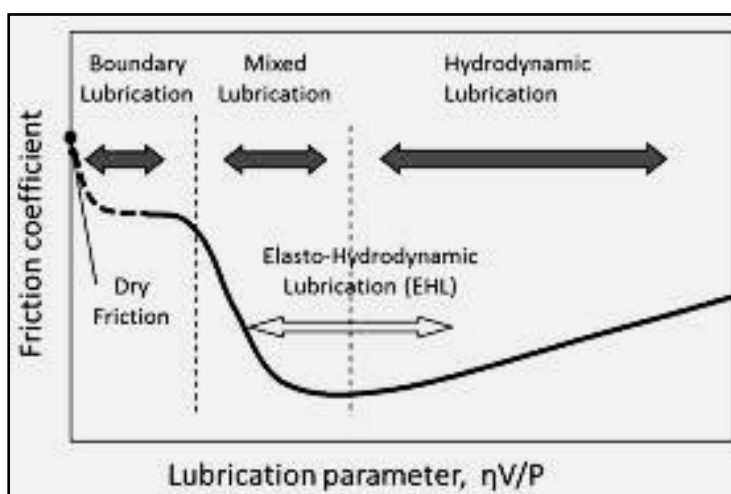


figura 2.9 – Condizioni di lubrificazione in presenza di un lubrificante liquido; andamento della curva di Stribeck

1. dry friction: regime di attrito statico, nessun scivolamento tra i corpi, ma solo deformazione elastica delle giunzioni tra asperità ($\mu > 0,3$)
2. boundary lubrication ($0,1 < \mu < 0,3$)
3. mixed lubrication = lubrificazione mista ($0,03 < \mu < 0,1$)
4. hydrodynamic lubrication = piena lubrificazione ($\mu < 0,03$)

La condizione di *dry friction* riassume una situazione di non lubrificazione tra i due corpi, che sono completamente a contatto tra loro. In realtà il concetto di contatto tra due corpi non è poi così semplice, in quanto se si va a vedere più nel dettaglio la conformazione della superficie di un metallo, non tutte le parti della zona da studiare sono in contatto tra loro; tali inoltre, sono direttamente legate al tipo di lavorazione che viene fatta sulla superficie. Dal punto di vista microscopico quindi, non si può dire che i due corpi siano in completo contatto tra loro, perché vi sarà sempre la presenza di un'area nominale e di un'area reale, dove

$$A_n > A_r$$

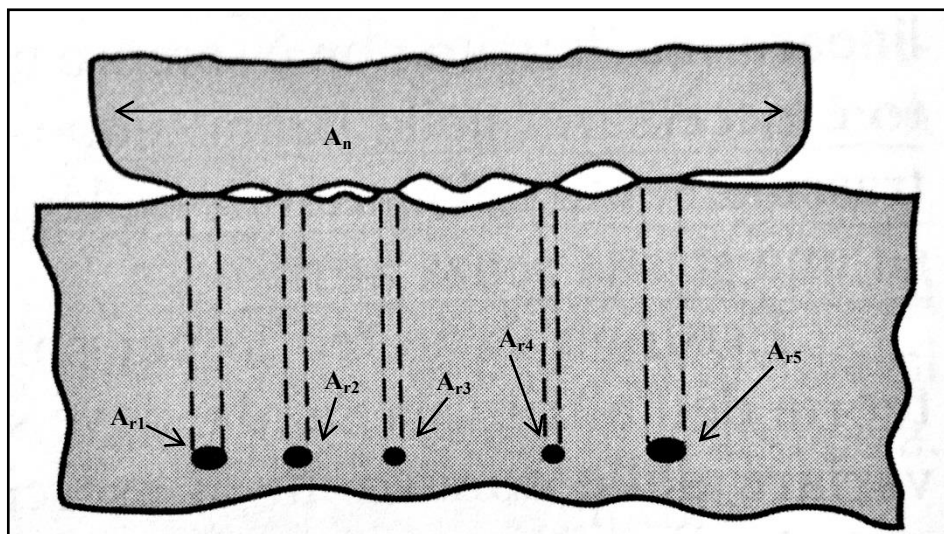


figura 2.10 – Confronto tra area reale ed area nominale

In figura 2.10, l'area reale viene considerata come sommatoria di tutte le parti in contatto tra i due corpi

$$\sum_{i=1}^5 A_{ri} = A_{r1} + A_{r2} + A_{r3} + A_{r4} + A_{r5}$$

La differenza tra le due aree in questione è dipendente anche dalla forza normale N , con la quale avviene l'accoppiamento tra i due corpi. Per chiarire il concetto si osservino le seguenti immagini.

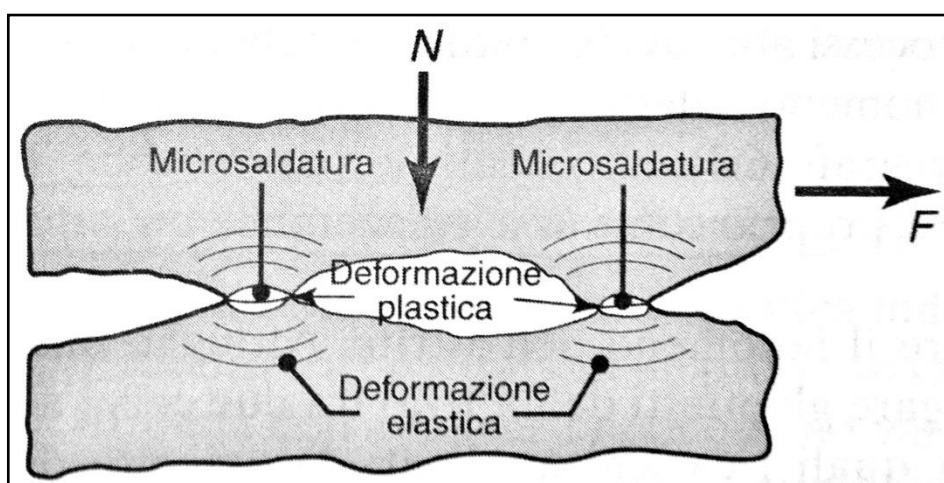


figura 2.11 – Esempio di due corpi in contatto tra loro con presenza della forza normale e tangenziale

Se vi fosse la sola forza N , si verrebbero a creare delle microsaldature tra le asperità in contatto, le quali si deformerebbero plasticamente; se entra in gioco anche la F o T , forza di attrito (detta anche forza tangenziale), vi è il cosiddetto effetto sfregamento o usura, che può comportare anche al distacco di piccole particelle durante il moto, le quali vengono poi a levigarsi. Le particelle che si staccano, si levigano quando i due corpi in questione, hanno un valore di durezza paragonabile; nel caso invece di uno sfregamento tra due corpi con valori di durezza completamente differenti, si vengono a staccare solo le particelle del corpo meno duro, che man mano poi vengono a ridursi di dimensione.

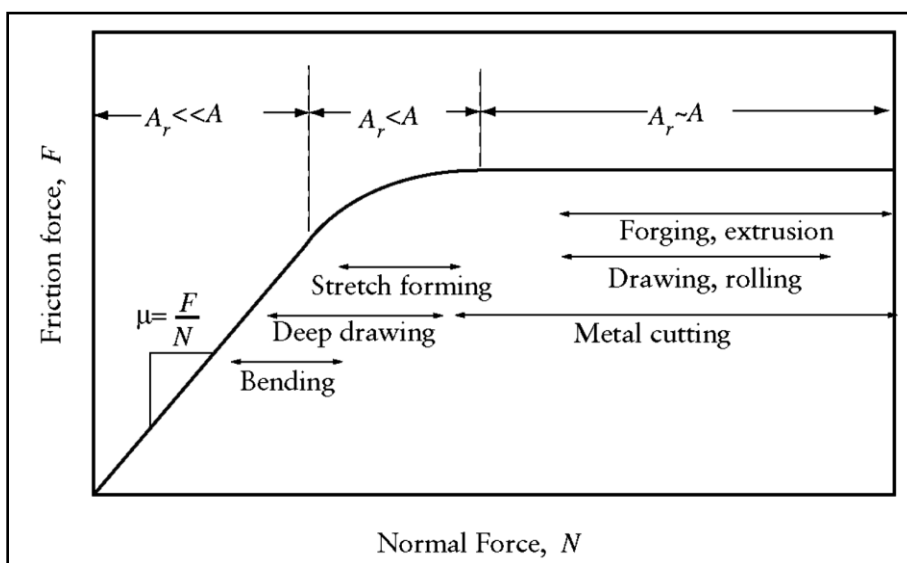


figura 2.12 – Confronto tra area nominale di contatto A , ed area reale di contatto A_r .

Nella precedente figura si può vedere come il valore di A_n ed A_r varino in funzione di N . La curva ha una particolarità: il valore della forza di attrito F o T , non aumenta più dopo un certo valore di N e ciò è dato dall'appiattimento di quasi tutte le asperità presenti, infatti si vede come vi sia, da lì in poi, un'uguaglianza tra l'area nominale e reale.

In figura 2.12 si può osservare anche la pendenza della retta, che viene espressa proprio come rapporto tra le due forze:

$$= \frac{F}{N} = \frac{T}{N}$$

Tale rapporto è quello che si utilizzerà nella macchina di strip.

Qui in seguito vengono messi a confronto i diversi profili di superfici, in relazione alle lavorazioni effettuate.

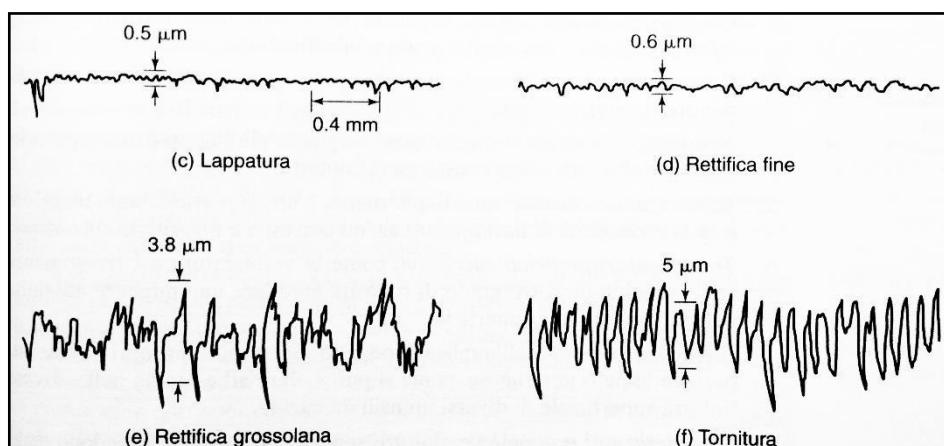


figura 2.13 – Profili della superficie di un metallo, per diverse lavorazioni

La condizione di *boundary lubrication* è lo step successivo: essendovi velocità e viscosità estremamente basse, non si ha la creazione di uno strato di fluido lubrificante tra le due superfici, che quindi entrano ancora in contatto diretto, ed il carico che si presenta, viene supportato tutto dalle asperità. Il coefficiente di attrito per tale condizione si aggira tra 0,1 e 0,4.

Prima di passare alla *piena lubrificazione*, vi è la lubrificazione mista, la quale si verifica quando il carico normale aumenta, o la velocità e la viscosità del fluido diminuiscono. Lo spessore del film di lubrificante presente, diventa tre /cinque più piccolo della rugosità della superficie: in tal caso infatti, le asperità più pronunciate potrebbero ancora toccarsi.

Questo meccanismo presenta coefficienti di attrito che si attestano tra 0,03 e 0,1.

Nella “piena lubrificazione” invece le superfici sono completamente separate da un film di fluido avente uno spessore di almeno un ordine di grandezza superiore rispetto alla rugosità superficiale del pezzo. Un film spesso di lubrificante può essere creato da un movimento relativo tra due superfici in direzione tangenziale e normale, ecco perché si chiama lubrificazione idrodinamica. Il presentarsi di questo tipo di lubrificazione dipende direttamente dalla velocità relativa e dalla viscosità del lubrificante. Con la formazione del film spesso di lubrificante si possono avere tre tipi di lubrificazioni:

- *Hydrodynamic lubrication*: quando il fluido lubrificante è presente tra due superfici, a causa della velocità delle relative tra queste si genera un film di lubrificante pressurizzato che riduce l'attrito e l'usura. Per far sì che questo fenomeno si verifichi è necessario che il lubrificante si incunei nello spazio tra le due superfici in movimento relativo. La lubrificazione idrodinamica pura si basa sull'alta velocità di scorrimento e quindi sull'alta pressione del lubrificante. Le temperature rimangono basse. Questo meccanismo di lubrificazione appare solo in condizioni ideali. Il valore del coefficiente di attrito inoltre si attesta tra 0,001 e 0,02.
- Lubrificazione elasto-idrodinamica, detta anche *EHL*: quando la pressione del lubrificante genera deformazioni elastiche sulla superficie dello stesso ordine di grandezza dello spessore del lubrificante. Quando si hanno carichi molto alti, la deformazione elastica della superficie redistribuisce ed amplifica l'area di contatto. Questo genera un incremento della capacità di carico e dello spessore del film di lubrificante se si confronta con una superficie più rigida.
- Lubrificazione plasto-idrodinamica, detta anche *PHL*: nei processi di lavorazione del metallo, uno strato di lubrificante può essere generato idrodinamicamente tra il pezzo in lavorazione e lo stampo, al fine di ridurre l'attrito e l'usura. La lubrificazione che si sviluppa tra una superficie rigida e una deformata plasticamente è conosciuta come lubrificazione plasto-idrodinamica.

Per tutti e tre i casi precedentemente descritti il valore del coefficiente di attrito non supera il valore di 0,03.

2.2.2 Lubrificanti solidi

Un lubrificante in stato solido, che garantisca un basso valore di attrito come capitava per i liquidi, viene appunto detto lubrificante solido. Tra le varie tipologie di lubrificanti solidi menzioniamo: il disolfuro di molibdeno, la grafite, l'acido borico, il nitrato di boro...

Molti di essi devono le loro proprietà alla struttura lamellare o a cristalli a strati; alcuni inconvenienti che si riscontrano in questa tipologia di lubrificanti sono qui in seguito elencati:

- sono, quasi tutti, cattivi conduttori termici e dunque si ha, che il calore generato nel contatto tra i due corpi non riesce ad essere dissipato

- hanno una vita ad usura finita, e il loro riposizionamento sulla superficie è molto più difficile rispetto ad un lubrificante liquido
- si possono presentare problemi di ossidazione o degradazione del rivestimento dopo un certo periodo di tempo

La struttura lamellare prima menzionata, come si comporta? Gli atomi che stanno sullo stesso piano sono legati in modo molto forte, gli atomi invece, che stanno su piani diversi non hanno legami così saldi ed è perciò che tali piani tendono a scorrere l'uno sull'altro con bassi coefficienti di attrito.

I lubrificanti solidi vengono applicati alle superfici con opportuni adesivi e resine epossidiche per garantire una vita più lunga ad usura; vengono sfregati o spruzzati sulle superfici, altri vengono miscelati a dei gas e spruzzati direttamente sulla superficie. Attualmente vengono preferite le nuove tecniche di deposizione PVD e CVD, che permettono la formazione di un film, piuttosto che l'applicazione di polveri.

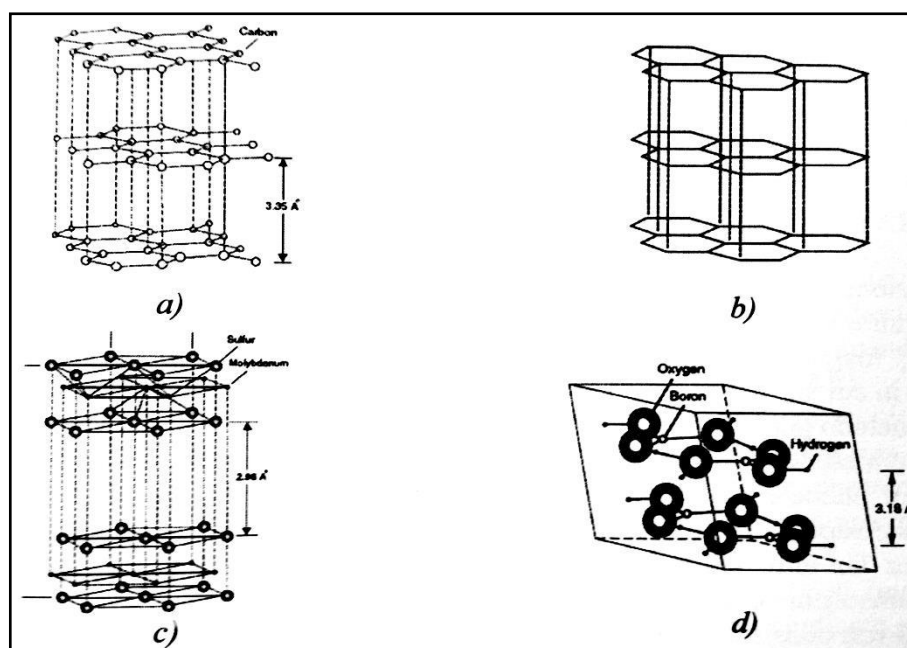


figura 2.14 – Strutture cristalline di alcuni lubrificanti solidi: a) grafite, b) nitruro di boro esagonale, c) disolfuro di molibdeno, d) acido borico

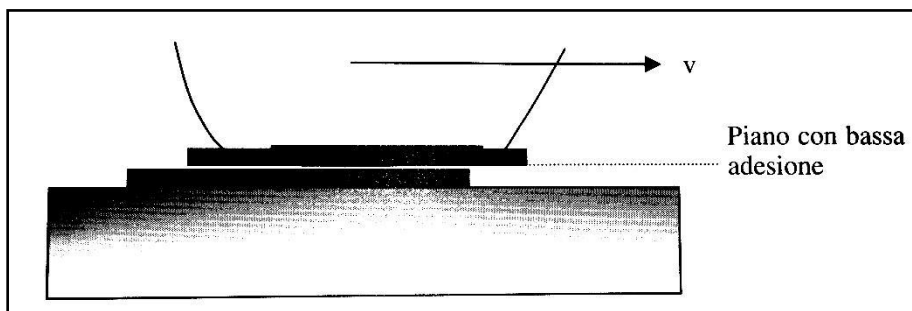


figura 2.15 – Principio di lubrificazione dei solidi lamellari

2.2.3 Sistemi di deposizione dei lubrificanti

Tra le diverse tecniche di deposizione di lubrificanti se ne descrivono in particolare tre:

- Sistema di lubrificazione a rulli
- Sistema di lubrificazione a spruzzo
- Tecniche di deposizione PVD
- Sistemi di lubrificazione minimale

Per tutte e quattro le tipologie si vedrà come il lubrificante, debba presentarsi in un determinato stato, che sia esso solido, liquido o aerosol, è indispensabile che esso sia compatibile con il sistema di lubrificazione scelto.

2.2.3.1 SISTEMA DI LUBRIFICAZIONE A RULLI

Si veda subito figura 2.16, la quale mostra un semplice sistema di lubrificazione a rulli, nel quale si presenta un serbatoio dal quale viene pescato il liquido mediante una pompa volumetrica. Il liquido viene inviato mediante tubazioni ai rulli (con presenza di uno strozzatore a due vie per la regolazione della quantità di lubrificante da inviare ai rulli), i quali sono caratterizzati da numerosi fori su tutta la superficie.

Il tubo che porta il liquido arriva al centro del rullo (coincidente con il suo stesso asse), ed è anch'esso forato per far trafilare il lubrificante verso la superficie del rullo. Il movimento del fluido è dettato dalla pressione con la quale spinge la pompa volumetrica e grazie anche alla regolazione dello strozzatore.

Prima di incontrare la lamiera però, il lubrificante deve passare attraverso uno strato di feltro: per capillarità il fluido bagna il feltro distribuendosi uniformemente su tutta la superficie esterna.

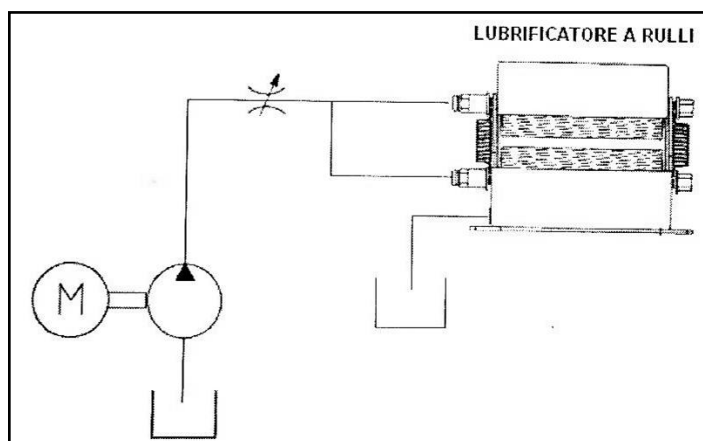


figura 2.16 – Sistema di lubrificazione a rulli

È la lamiera che detta il ritmo della lubrificazione in quanto i rulli sono in folle e allo stesso tempo vengono premuti sulla lamiera da due molle, che quindi hanno la sola funzione di garantire il contatto tra i 3 corpi in questione. Eventuale lubrificante in più viene recuperato da una vaschetta integrata nel sistema a rulli.

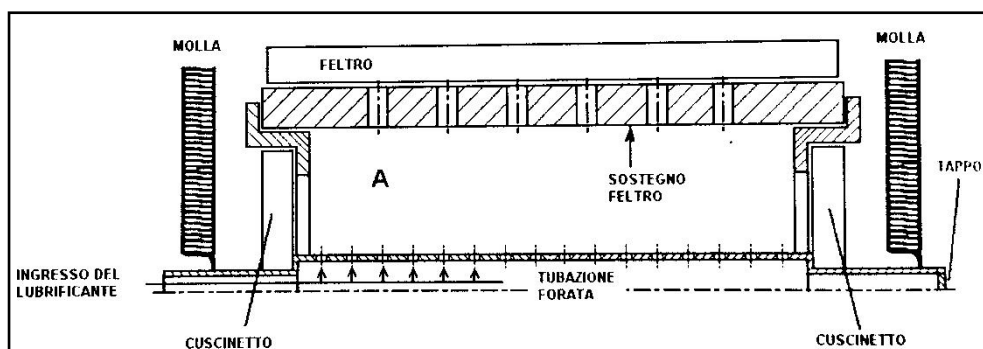


figura 2.17 – Spaccato di un rullo per la lubrificazione

Nelle nostre prove in realtà non vengono usati questi specifici apparati per lubrificare i provini, ma la tecnica è la stessa: viene sostituito tale sistema di lubrificazione con dei rulli di feltro di piccole dimensioni, maneggiabili manualmente dall'operatore, come viene rappresentato in figura 2.18.



figura 2.18 – Rullo in feltro per la lubrificazione manuale

2.2.3.2 SISTEMA DI LUBRIFICAZIONE A SPRUZZO

Il secondo metodo che si analizzerà è quello a spruzzo; esso può essere eseguito in due modi diversi: nel primo c'è bisogno di un ugello che permetta la nebulizzazione tra aria e liquido con conseguente componentistica per la sua regolazione, il secondo metodo invece si avvale di bombolette già pronte all'uso dopo un determinato tempo di agitazione, che creano un effetto aerosol immediatamente all'uscita del terminale di spruzzo.

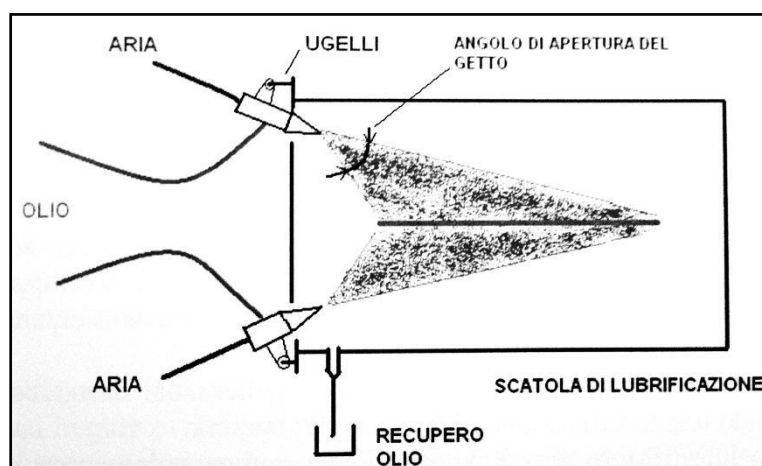


figura 2.19 – Tecnica di deposizione del lubrificante a spruzzo



figura 2.20 – Bomboletta spray per applicare il lubrificante ai provini

La spruzzata può avvenire a sua volta con due tecnologie completamente differenti, o per effetto del Venturi o per pompaggio del liquido.

Come avviene la spruzzata per effetto Venturi?

L'effetto Venturi (o paradosso idrodinamico) è il fenomeno fisico, scoperto e studiato dal fisico Giovanni Battista Venturi, per cui la pressione di una corrente fluida aumenta con il diminuire della velocità. Per capire meglio viene proposto il corrente esempio: si consideri per semplicità un condotto

attraversato da acqua (l'acqua è un fluido incomprimibile), per il principio di conservazione della massa la portata del fluido nel condotto si deve mantenere costante (ciò che entra nel condotto è uguale a ciò che esce a meno delle perdite), quindi la velocità del fluido aumenta dove il condotto è più stretto e diminuisce dove è più larga. Un secondo principio da tenere a mente è quello della conservazione dell'energia e cioè che l'energia del fluido non si distrugge (né si crea) ma si trasforma. Si pensi che la pressione e la velocità siano due modi diversi di manifestazione dell'energia interna del fluido (la stessa energia si manifesta o come velocità o come pressione). L'energia non può crearsi dal nulla quindi all'aumento di velocità del fluido (aumento di energia cinetica) deve corrispondere una diminuzione di pressione e viceversa.

Riassumendo, un restringimento della sezione del condotto provoca un aumento di velocità del fluido, che a sua volta determina una diminuzione di pressione.

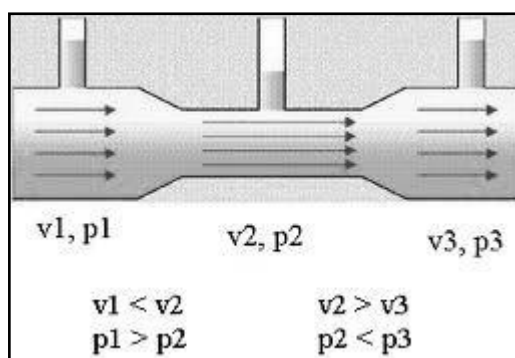


figura 2.21 – Principio del Venturi

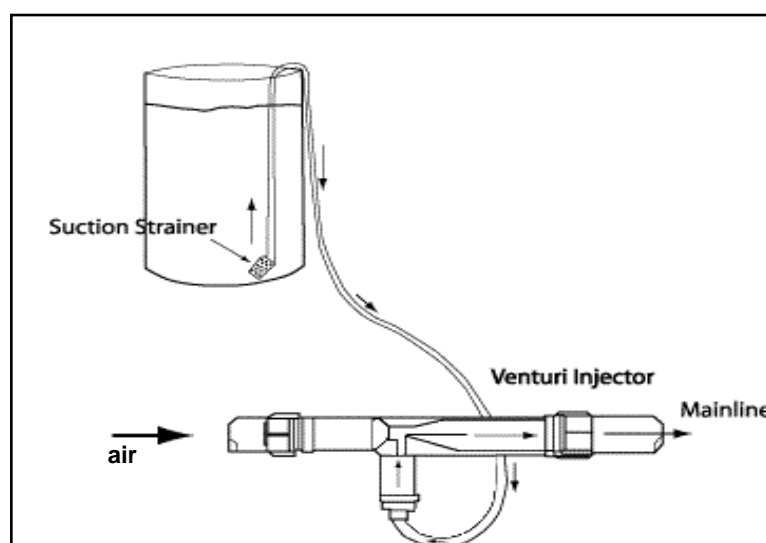


figura 2.22 – Applicazione con effetto Venturi

Ma a cosa serve nel campo della lubrificazione l'effetto Venturi? Quando si tratta di lubrificare un determinato componente, con ugelli atomizzatori e nebulizzatori, la miscela uscente dalla bocca dell'ugello è un misto di aria e lubrificante. Con il Venturi, mandando l'aria lungo il proprio condotto e trovando un restringimento, la pressione cala (depressione); tale abbassamento non fa altro che attirare il liquido (depositato in un serbatoio adiacente), nell'ugello, dove viene miscelato e poi espulso.

Per quanto riguarda invece la spruzzata per pompaggio, la situazione è un po' più complessa in quanto, c'è bisogno innanzi tutto di una pompa che determini la quantità di lubrificante da immettere nei canali diretti all'ugello (la regolazione può avvenire manualmente oppure elettronicamente mediante valvola), il serbatoio dove viene contenuto il liquido in alcune configurazioni deve avere la stessa pressione di immissione dell'aria per garantire una completa e ottimale miscelazione tra le due parti.

Una variante dell'immissione del lubrificante nelle tubazioni potrebbe essere la caduta per gravità del liquido (in tal caso allora il serbatoio viene posto sopra il sistema di pompaggio come mostra figura 2.23).

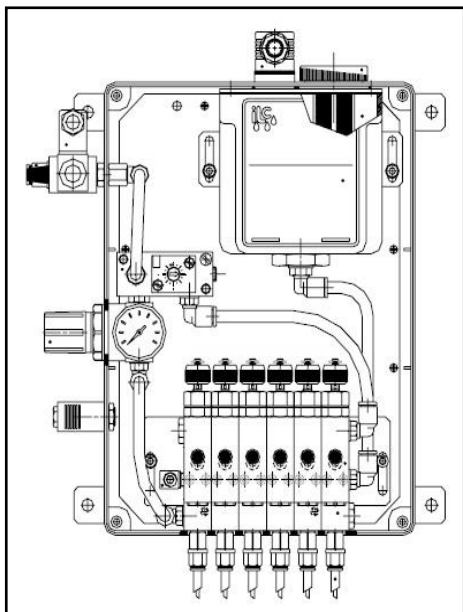


figura 2.23 – Impianto di pompaggio con lubrificante, che per gravità, cade e viene spinto ad una determinata pressione, nel condotto che porta all'ugello

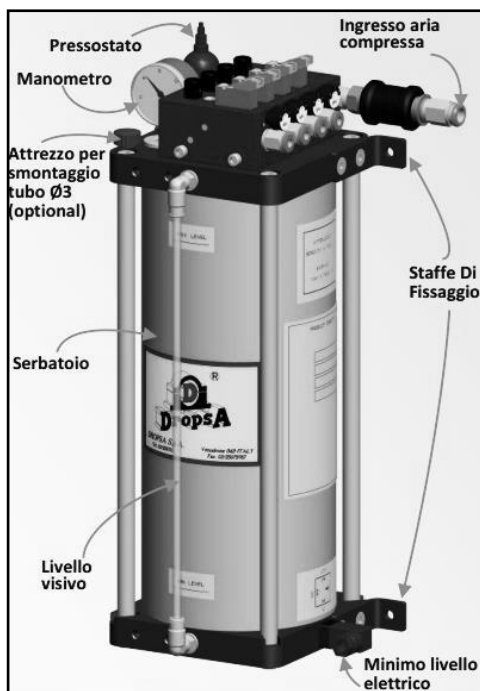


figura 2.24 – Impianto di pompaggio con serbatoio in pressione, qui il lubrificante non cade per gravità

Per quanto riguarda la lubrificazione a spruzzo è di vitale importanza la miscelazione del lubrificante con l'aria. Vi sono due tipologie di miscelazione: esterna ed interna. Queste sono influenzate dalla tipologie di lubrificante ed hanno dei pro e contro rispettivamente.

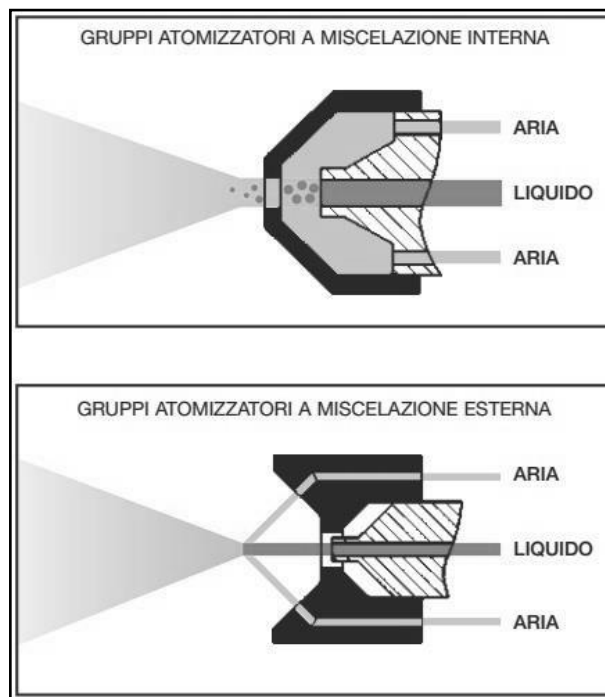


figura 2.25 – Miscelazione interna ed esterna a confronto

Il gruppo atomizzatore è progettato affinché i due fluidi vengano miscelati al suo interno ed il risultante flusso atomizzato venga spruzzato dall'orifizio, o dagli orifizi, dell'ugello. In questo gruppo di atomizzatori, la variazione dei valori di portata o pressione di uno dei fluidi provoca variazioni nella portata dell'altro fluido. L'incremento della portata dell'aria causerà una diminuzione della portata del liquido con gocce più fini, e viceversa; ecco quindi che i canali del lubrificante ed dell'aria devono essere alla stessa pressione per poter garantire una miscelazione corretta (quanto detto quindi comporta una conseguenza: il serbatoio del lubrificante non potrà essere ad una pressione qualsiasi, ma dovrà stare alla stessa pressione di mandata dell'aria). Un vantaggio di questa tecnologia di miscelazione è l'omogeneità della nube in uscita dall'ugello: seguendo le accortezze finora descritte, si avrà una nube equilibrata in termini di quantità, con una miscelazione quasi perfetta.

Nella miscelazione esterna invece i due fluidi vengono spruzzati da orifizi separati e la miscelazione causata dal loro impatto avviene all'esterno

dell'ugello; i valori di pressione possono essere facilmente regolati in modo indipendente l'uno dall'altro e le loro portate facilmente controllate. La miscelazione esterna permette di atomizzare liquidi viscosi o contenenti solidi in sospensione (come nel caso dei nostri lubrificanti). Lo svantaggio è subito chiaro: la miscelazione è meno efficiente rispetto a quella interna in quanto i due fluidi hanno meno tempo per mescolarsi.

2.2.3.3 TECNICHE DI DEPOSIZIONE PVD

È una tecnologia innovativa, eseguita sottovuoto, e sviluppata a livello industriale solo negli ultimi venticinque anni; essa è particolarmente interessante in quanto è caratterizzata da un impatto ambientale praticamente nullo e da una elevata versatilità.

La procedura schematica del processo viene descritta qui in seguito:

- i componenti da rivestire vanno prima lavati e preparati (fase importante perché vi sia l'adesione del substrato), e poi vanno posizionati nella camera di deposizione
- la camera di deposizione viene chiusa e inizia la fase di creazione del vuoto fino a pressioni dell'ordine di $10^{-5} - 10^{-7}$ mbar
- contemporaneamente vengono riscaldati i pezzi da rivestire (in realtà il riscaldamento varia a seconda della tecnologia PVD utilizzata) e in alcuni casi viene attivata la superficie da rivestire con un bombardamento ionico
- degli evaporatori, collocati sulla parete della camera di rivestimento sottovuoto permettono l'evaporazione di differenti tipi di materiali da depositare sui pezzi collocati al centro della camera di deposizione
- i vapori dei materiali ionizzanti si diffondono nella camera di deposizione e vengono attirati (con una differenza di potenziale) sui substrati da rivestire dove condensano formando così il riporto voluto
- l'evaporazione può essere prodotta mediante archi elettrici o altre fonti energetiche generate sui catodi, e il materiale evaporato si combina, in alcuni casi, con i gas reattivi (per esempio N_2 , C_2H_2) in modo da portare alla sintesi di un composto (per esempio TiN) e al successivo rivestimento dei particolari introdotti nella camera di deposizione con tale composto. Per cui la condensazione può avvenire in presenza di un gas di processo introdotto in maniera controllata nella camera di deposizione. In tal caso alla condensazione si accompagnano reazioni chimiche che portano alla

formazione di composti differenti da quelli di partenza (deposizione reattiva)

- finita l'evaporazione e la conseguente condensazione dei riporti sui substrati, inizia la fase di raffreddamento e di successiva apertura della camera di deposizione ed estrazione dei pezzi rivestiti

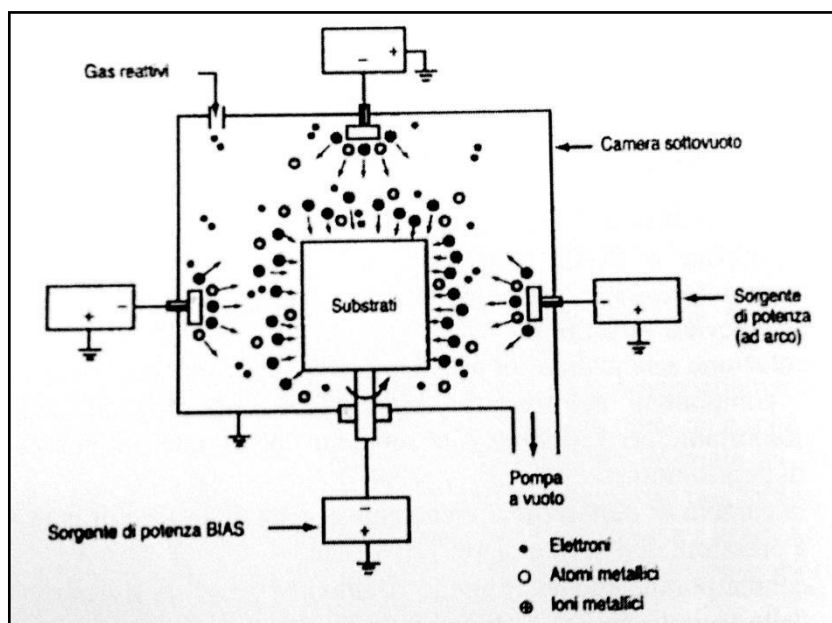


figura 2.26 – Schema di un processo PVD

Gli impianti sono progettati in modo da assicurare una uniformità di rivestimento molto elevata anche sui pezzi di notevoli dimensioni su particolari a configurazione complessa. La temperatura di deposizione può essere compresa tra 150 e 500 °C in funzione del substrato da rivestire. Dei depositi perfettamente aderenti sono stati ottenuti anche con delle temperature inferiori a 150 °C grazie alla forte energia delle particelle incidenti il materiale da rivestire al metodo di decapaggio ionico utilizzato prima della fase di deposizione.

I vantaggi della PVD sono:

- produzione di riporti con elevatissime caratteristiche in termini di: durezza e resistenza all'usura, basso coefficiente d'attrito, stabilità chimica e resistenza alla corrosione, porosità quasi assente
- possibilità di variazione nella temperatura di riscaldamento del substrato e temperature di deposizione relativamente basse
- velocità di rivestimento molto elevata
- eccellente finitura superficiale
- spessore del rivestimento minimo: 0,5 – 2 μm

2.2.3.4 SISTEMI DI LUBRIFICAZIONE MINIMALE

Questi sistemi di lubrificazione mirano ad utilizzare il quantitativo minimo di lubrificante, il quale viene dosato dalle micropompe costruite apposta per essere assemblate con quel tipo di impianto.

Vengono utilizzati spesso nei processi di machining per asportazione di truciolo, dove si applica un piccolo getto di olio solo sul punto di taglio. Salvaguardare la quantità di lubrificante da spruzzare durante tali processi può comportare ad abbassamenti dei costi di processo: vi è meno spreco.

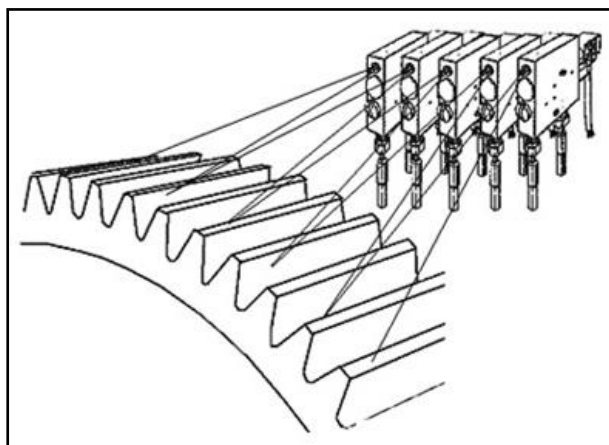


figura 2.27 – Schema di una lubrificazione minima su una ruota dentata

2.2.4 Lubrificanti scelti per i test

Nel settore della ricerca è doveroso provare nuovi sistemi di lubrificazione, nuovi lubrificanti, nuovi componenti. Molto spesso quando si pensa alla lubrificazione, ci si focalizza sul concetto di “olio” che può essere sia di tipo vegetale o minerale; nel nostro caso però l’intenzione è quella di provare tipologie di lubrificanti diverse. Si utilizzeranno infatti:

- Dag®5710: nitrato di boro in acqua
- Pulve®BND60A: aerosol di nitrato di boro
- Bonderite®L-FM747: lubrificante per azioni di sagomatura profonda
- Grafite
- Pulve®D18A: aerosol di bisolfuro di molibdeno

Dag®5710 – sospensione di nitrato di boro in acqua

Descrizione: il Dag®5710 è una dispersione di Nitrato di Boro colloidale (cioè piccole particelle sospese nel liquido, le quali tendono a sedimentarsi con il passare del tempo), in acqua. È un prodotto di uso generico, utilizzato nella lubrificazione ad alte temperature e come agente distaccante. Il

pigmento lubrificante, Nitruro di Boro, raggiunge la miglior efficacia a temperature comprese tra 900 e 1000 °C. Il Dag®5710 non contiene alogeni ed il suo utilizzo comporta i seguenti vantaggi:

- lubrificazione e distacco ad alte temperature
- assenza di alogeni e perciò assenza di fratture indotte da stress termico
- bagnabilità molto rapida
- fusioni pulite e brillanti
- nessuna formazione di depositi sugli stampi
- inibisce la corrosione
- la formazione dei depositi di morchie¹ nei circuiti di lubrificazione è assai limitata, se si seguono le normali indicazioni per l'uso

Le applicazioni tipiche sono:

- lubrificazione di attrezzature per lo stampaggio di acciai speciali e titanio
- forgiatura isoterma del titanio
- anti-aderente ad alte temperature per vetro e alluminio fuso
- lubrificazione generica ad alte temperature

Qui in seguito vengono elencate alcune proprietà fisiche del lubrificante in questione:

aspetto	liquido leggermente tixotropico ²
colore	bianco
pigmento	Nitruro di Boro
pH	11,6
densità	1160 kg/m ³
diluyente	acqua
veicolante	acqua
viscosità	200 mPas circa
dimensione particelle	inferiore a 5 µ
vita del prodotto	24 mesi dalla data di qualificazione in presenza di sigillo originale

tabella 2.3 – Proprietà fisiche del Dag®5710

¹ Morchia = residuo che lascia un liquido sul fondo di una bottiglia, barile o serbatoio

² Tixotropia = in chimica fisica, il fenomeno, presentato da alcuni gel, di passare allo stato liquido per effetto di semplice agitazione o sotto l'azione di vibrazioni, per poi tornare a coagularsi quando l'azione meccanica perturbatrice viene sospesa (definizione da Treccani)

In caso di rivestimenti permanenti la superficie da trattare va preriscaldata a una temperatura di 100-150 °C.

Per l'utilizzo è necessario mescolare bene il concentrato prima dell'uso ed a seconda dello spessore e del rivestimento richiesto, si consiglia di diluire una parte del prodotto in 10-20 parti di acqua.

Evitare l'uso di acqua troppo dura (max. 2 -30° DH): la durezza potrebbe danneggiare la stabilità del prodotto e le sue caratteristiche.

È possibile applicare il Dag®5710 con le normali attrezzature a spruzzo, mantenendo il prodotto agitato durante l'applicazione.

Per ciò che riguarda il suo trattamento, esso può essere rimosso dalle acque reflue mediante ultra-filtrazione. Sebbene i componenti del Dag®5710 non siano considerati pericolosi, è possibile che i filtri trattengano sostanze di altra provenienza e pertanto si consiglia di trattarli come rifiuto chimico. Il prodotto non richiede speciali trattamenti e normalmente non è necessario mantenere il prodotto sotto agitazione per conservare l'emulsione: il Dag®5710 è concepito per essere applicato a spruzzo.

Alcune informazioni di base:

- il congelamento danneggia la stabilità del prodotto
- lo stoccaggio sotto luce diretta del sole può deteriorare il prodotto
- chiudere i contenitori dopo il prelievo
- seguire le normative vigenti per lo smaltimento
- il prodotto ha una durata di un anno dalla data di produzione, in confezione chiusa

Pulve®BND60A - aerosol a base di nitruro di boro

Pulve® BND 60A è un aerosol a base di Nitruro di Boro che permette la formazione di film refrattari e lubrificante a temperature tra 600 e 1000 °C (viene applicato alla lamina tramite bomboletta spray); esso è costituito da una vernice refrattaria che polimerizza a contatto con l'aria e si utilizza ottenere delle superfici anti-aderenti, refrattarie ed isolanti ad alte temperature sia in atmosfera che sottovuoto. In congruenza della sensibilità del Nitruro di Boro, Pulve®BND60A non è indicato per superfici sottoposte ad umidità a temperatura ambiente.

I campi d'impiego standard per questo lubrificante sono:

- la saldatura dove svolge la funzione di protezione a lunga durata di ugelli e tubi di contatto per torce ad arco a flusso gassoso con processo MAG e MIG, protezione degli assemblaggi contro la proiezione di grani metallici, protezione dei morsetti per la saldatura di testa e protezione del corpo porta elettrodi per macchine di saldatura a punti multipli
- in vetreria funge da protettivo anti-aderente degli stampi e dei portastampi senza rischio di sporcare il vetro
- nella forgiatura dell'acciaio refrattario e delle leghe di titanio senza rischio di ricarburazione e nella forgiatura dei metalli ad alte temperature sotto vuoto. Limita la formazione di depositi per torce al plasma.

Grazie alla forma aerosol, necessaria per la particolare composizione, Pulve® BND 60A permette la formazione di un film lubrificante su qualunque superficie a temperature superiori a 500 °C, temperature alla quali il coefficiente di frizione raggiunge valori molto bassi. A temperatura ambiente il film polverizza in 15 minuti, ma a temperature di lavoro si rinforza incrementando le proprietà refrattarie.

Dopo una leggera vulcanizzazione a una temperatura inferiore a 100 °C il film diventa completamente insolubile nei normali solventi e raggiunge la massima resistenza all'abrasione.

Bonderite®L-FM747 – olio sintetico a base vegetale

È un lubrificante utilizzato per operazioni di sagomatura profonda di acciaio, acciaio inox e alluminio (presentandosi in stato di liquido viscoso viene applicato con un rullo come quello di figura 2.18). Il Bonderite® L-FM 747 è un formulato sintetico sviluppato in alternativa ai composti pigmentati ad alta viscosità, per operazioni complesse e di sagomatura profonda, è una soluzione esente da cloro e i suoi vantaggi sono:

- ridotto attrito radente on carichi elevati
- ottima resistenza alla corrosione
- residui morbidi di tipo oleoso
- nessun apporto alla filiera
- compatibile con i prodotti Henkel per i processi di pretrattamento metalli della serie Bonderite

Il Bonderite®L-FM747 può essere diluito in una o più parti di acqua, formando soluzioni stabili che non richiedono agitazioni supplementari per mantenere la stabilità. L'applicazione può avvenire mediante tutti i sistemi convenzionali: spruzzo, spalmatrice a cilindri, immersione. Aggiungere acqua al prodotto concentrato con una mescolatrice per garantire una miscela uniforme.

Concentrato	
aspetto	liquido ambrato
colore	
pigmento	
pH (20 °C), DIN 51369	8,0 + 0,2
densità (20 °C), DIN 51757	1160 + 0,02 g/cm ³
infiammabilità, DIN ISO 2592	> 100 °C
stoccaggio	Da -10 °C a +50°C
viscosità (40 °C), DIN 53211	92 + 40 mm ² /s
dimensione particelle	inferiore a 5 µ
vita del prodotto	

tabella 2.4 – Proprietà fisiche del Bonderite®L-FM747

Emulsione	
aspetto	soluzione ambrata trasparente
pH (6% acqua DI), DIN 51369	7,9 + 0,2

tabella 2.5 – Proprietà fisiche del Bonderite®L-FM747

Questo lubrificante inoltre, può congelare se stoccato al di sotto di 0 °C, in tal caso scongelarlo in luogo tiepido e mescolare accuratamente prima dell'uso.

Il prodotto deve essere stoccato nei contenitori originali, in luogo asciutto e ventilato, non dev'esser gettato nelle acque reflue, ma va inviato sempre a un sistema di smaltimento specifico per lubrificanti oleosi.

Grafite – soluzione di grafite miscelata in più parti di acqua

Un altro lubrificante che si utilizzerà è la grafite miscelata con acqua (circa 0 pa rti d'acqua e di grafite).

Questa miscela si applica solo su superfici precedentemente riscaldate.

La grafite è un lubrificante solido molto utilizzato nei processi tecnologici: si può presentare in lamine sottili o anche in polvere.

Nel primo caso tali lamine possono essere applicate per esempio su punzoni in processi in imbutitura, nelle prove Nakashima o nelle prove di compressione, con il solo obiettivo di ridurre gli attriti.

Se si presenta in forma di polvere, la grafite può essere miscelata con una determinata quantità d'acqua, come nei nostri test di lubrificazione.

La sua predisposizione ad abbassare l'attrito è legato alla sua struttura interna, caratterizzata da strati lamellari connessi tra loro in modo debole.

Le molecole dello stesso piano sono legate da forti legami, molto più che non quelli che invece esistono tra piani adiacenti; tale proprietà viene sfruttata per rendere più fluido lo scorrimento tra corpi in contatto.

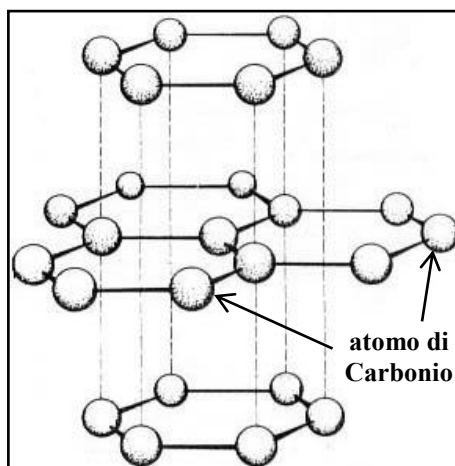


figura 2.28 – Struttura molecolare della grafite

- Pulve®D18A – aerosol a base di bisolfuro di molibdeno

Il Pulve®D18A è un aerosol a base di bisolfuro di molibdeno (MoS_2), di finezza colloidale che, a seguito dell'evaporazione del solvente, forma un film secco di lubrificante lamellare e protettivo su tutti i tipi di superficie (viene applicato alla lamina con una semplice bomboletta spray). Viene impiegato nel pre-trattamento di superfici come per esempio: tra parti che lavorano sotto attrito, per migliorare le prestazioni di oli e grassi e aumentare la capacità di resistenza a carichi elevati (cuscinetti, ghiera, lamine,...) oppure anche come strato protettivo contro la corrosione.

Altri impieghi riguardano la lubrificazione integrale a secco; viene quindi impiegato su tutti i meccanismi che necessitano di basso coefficiente di attrito (piccoli meccanismi con camme e cursori), o su ghiera, viti bulloni e dadi.

Proprietà fisiche: tale lubrificante forma un film di bisolfuro di molibdeno in grado di resistere a temperature comprese tra -200 e $+390$ °C, con velocità di scorrimento fino a 15 m/s. Sopporta carichi fino a 28000 kg/cm² con scorrimenti molto lenti.

Metodo d'uso: i film ottenuti sono protettivi e sono insensibili a oli, grassi e solventi petroliferi, ma possono essere rimossi facilmente con solventi polari come, alcool, acetone, solventi clorurati.

L'applicazione deve essere effettuata su superfici con temperature inferiori a 35 °C. Il bisolfuro di molibdeno ha le migliori caratteristiche di resistenza allo sfregamento a temperature fino a 350 °C.

Anche la sua manipolazione e il magazzinaggio sono importanti:

- lo stoccaggio sotto la luce diretta del sole può deteriorare il prodotto
- i contenitori vanno chiusi dopo il prelievo
- seguire le normative vigenti per lo smaltimento
- il prodotto ha una durata massima di 24 mesi dalla data di produzione, in confezione chiusa

2.3 TEST DI ATTRITO

Il coefficiente di attrito (che può essere di Coulomb o Tresca a seconda della lavorazione), viene calcolato per via teorica con le formule già viste nel corrente capitolo.

Per via pratica si sono sviluppati diversi metodi per ricavarlo; tra tutti i test che ora si elencherà, solo uno è di vitale interesse per la tesi svolta, ovvero, lo Strip Drawing Test.

- *Ring Test Compression*: si tratta di comprimere un anello con materiale e dimensioni date da normativa. I risultati vengono mostrati sotto forma di curve non asettiche (se cambio il materiale, cambiano anche le curve), su un piano cartesiano, dove sull'asse delle ordinate si ha la percentuale di riduzione del diametro interno dell'anello, mentre sull'asse delle ascisse si ha la riduzione

percentuale della sua altezza. Il fascio di curve ottenute è funzione del coefficiente di attrito, il quale influisce anche sulla forma dell'anello dopo il test. In figura Q inoltre, si può aggiungere anche la curva ottenuta sperimentalmente, dunque per punti: essa sarà tanto più precisa e meno dispersiva, più si avvicinerà a una delle curve teoriche già presenti.

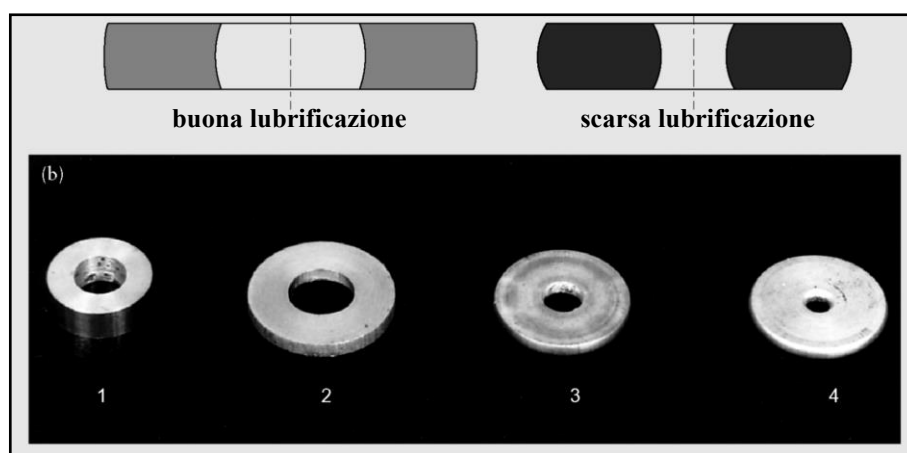


figura 2.29 – Ring Test Compression: in alto vi è la sezione di un anello con buona lubrificazione (sinistra) e scarsa lubrificazione (destra). Sotto invece sono riportate quattro configurazioni reali di un anello, prima e dopo una prova sperimentale con differenti condizioni di lubrificazione.

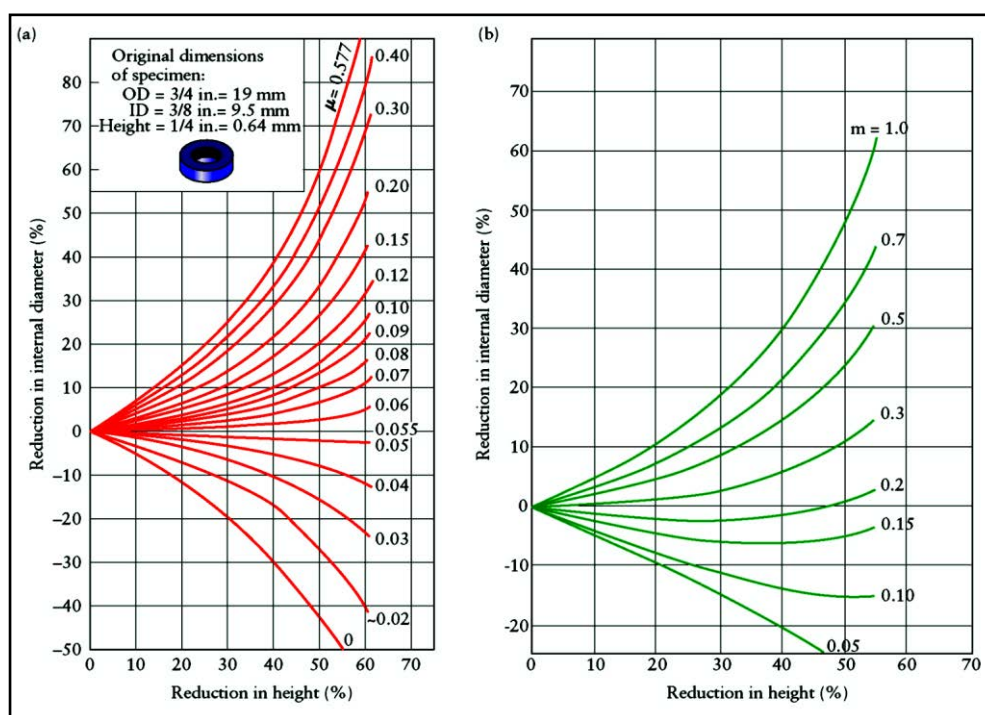


figura 2.30 – Curve dei risultati del Ring Test Compression: si noti come vi sia la costanza del coefficiente di attrito lungo la curva considerata.

- *Double Cup Extrusion*: tale test si avvicina molto alle condizioni di estrusione, processo dal quale assume il nome. Viste le alte pressioni e forze in gioco, si utilizza il fattore di Tresca m , e non più il coefficiente di attrito μ . Tale test può essere condotto in tre differenti maniere: diretta, inversa e combinata, ed inoltre il risultato viene espresso mediante delle curve con andamento diverso a seconda del fattore di Tresca. In ordinata si ha il rapporto tra le due altezze H_1 ed H_2 (dove H_1 è legato alla estrusione inversa mentre H_2 alla estrusione diretta), ed il suo valore è sempre maggiore di 1, quindi

$$H_1 > H_2$$

in ascissa invece si ha la corsa del punzone espressa in millimetri. Le curve formano una gobba fino a circa 4 mm della corsa del punzone, il che è dovuto al transitorio: con ciò si capisce come i risultati di tale test di considerino solo dopo un determinato valore della corsa del punzone. Nel grafico vengono raffigurate sia le curve teoriche, che la sperimentale (rappresentata dai punti); è vantaggioso che quest'ultima sia più vicina possibile a una delle teoriche per avere dei risultati più precisi e con valori di dispersione meno elevati.

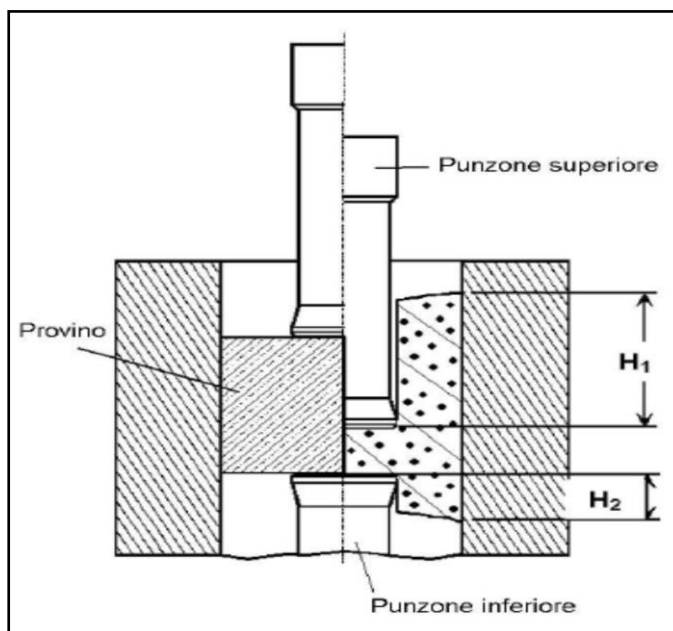


figura 2.31 – Configurazione del Double Cup Extrusion: si vede come il materiale (evidenziato dalle linee oblique), all'avanzare del punzone si muova nello spazio disponibile, adiacente creando le due altezze H_1 ed H_2 , che permettono in seconda battuta, di ricavare le curve di figura 2.32

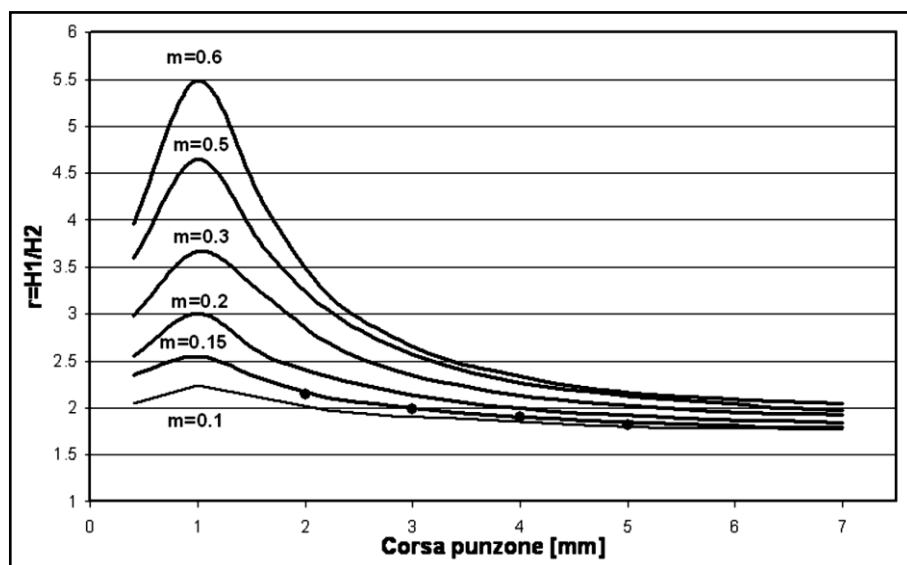


figura 2.32 – Risultati del Double Cup Extrusion, sotto forma di curve in funzione del fattore di Tresca m

Se il *RTC* e il *DCE*, trattano il coefficiente d'attrito su lavorazioni di tipo massivo; per la lavorazione della lamiera vi sono altri test, sui quali ci soffermeremo su uno in particolare.

- *Pin on Disk Test*: tale test, permette di ricavare il coefficiente di attrito μ , in funzione della forza con il quale viene premuto il *pin*, sul disco che ruota. La prova può essere realizzata sia a freddo che a caldo. Le dimensioni del *pin* sono molto piccole per poter creare alte pressioni sul disco, ma oltre un certo valore non posso andare, in quanto si dovrebbe diminuire ancor di più la sezione del cilindretto, abbassandone così la resistenza. Alla fine del test, si ha un solco sul disco.

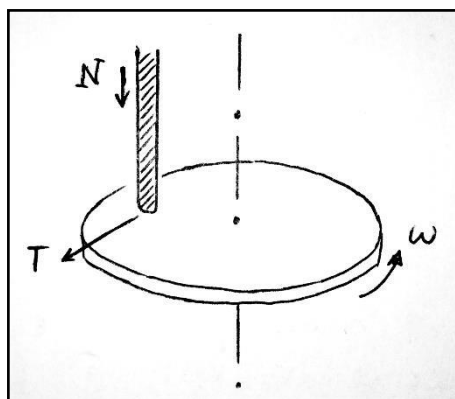


figura 2.33 – Configurazione della macchina Pin on Disk

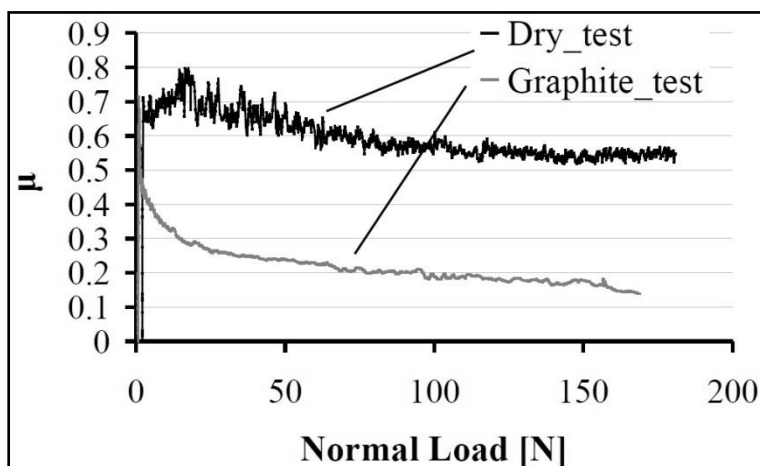


figura 2.34 – Curva in output dal Pin on Disk Test

- Test di simil imbutitura: si tratta di deformare una lamiera che viene bloccata da dei prelamiera, dunque si ha una stiratura e così una diminuzione dello spessore del provino. Il punzone ha una forma emisferica, mentre la lamiera ha la particolarità di avere un foro al centro. Quando il punzone va a spingere sulla lamiera e dunque sul foro, esso si comporterà in modo differente a seconda che sia o meno lubrificato: se vi fosse una buona lubrificazione tra punzone e lamiera il foro tenderebbe ad allargarsi, se invece la lubrificazione fosse scarsa il foro sotto spinta del punzone, non si allargherebbe.

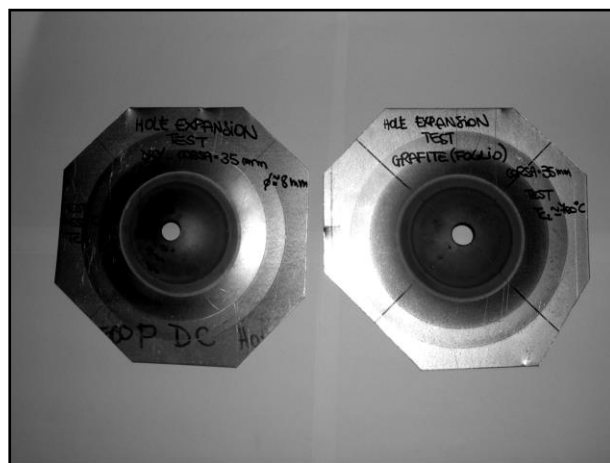


figura 2.35 – Lamiera dopo il test di simil imbutitura

- *Strip drawing test*: è il test che utilizzeremo anche nel corrente elaborato, con prove sperimentali su lamierini di alluminio opportunamente lubrificate. È la prova che da il risultato, in termini di coefficiente d'attrito, nel modo più diretto e semplice in assoluto,

in quanto apponendo due celle di carico, una che misuri la forza tangenziale, l'altra la forza normale, dal semplice rapporto di questi due valori ottengo il risultato voluto.

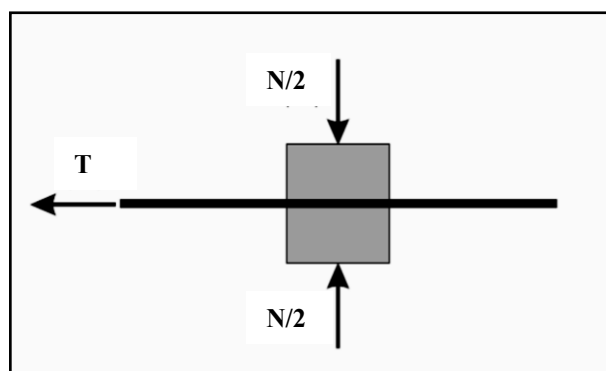


figura 2.36 – Concetto del funzionamento della macchina di Strip Drawing Test

Per quanto riguarda la macchina che si utilizzerà per le prove, dedichiamo un capitolo in seguito più approfondito, con relativi manuali d'utilizzo.

2.3.1 Teoria dell'attrito: interpretazione delle curve in uscita dalla macchina di strip drawing test

Per innescare il moto relativo tra due corpi tenuti in contatto da una forza normale N è necessario applicare una forza tangenziale T' , detta anche forza di attrito; il rapporto tra T' ed N come già scritto in tabella 2.2 è il coefficiente di attrito statico μ_s . In genere il coefficiente μ_s è indipendente dall'area nominale di contatto, mentre può dipendere da N , dalla durata del contatto in quiete prima di innescare il moto e dai materiali a contatto. Per mantenere il moto tra i due corpi con una velocità relativa v , è necessario mantenere applicata una forza tangenziale T , ed il rapporto tra T ed N è detto coefficiente di attrito cinematico.

Anche μ è generalmente indipendente dall'area nominale di contatto, mentre può dipendere da N , dalla velocità di strisciamento relativo e dai materiali a contatto. Il coefficiente di attrito statico è solitamente più grande di quello cinematico di circa un 20-30 % perché durante il contatto statico vi possono essere dei fenomeni di rilassamento locale della deformazione plastica, che causano un aumento di A_r . Quando $\mu_s > \mu$ può verificarsi il fenomeno dello stick-slip, il quale causa intense oscillazioni attorno al valore medio; tale fenomeno viene descritto come segue: l'elevato lavoro di adesione e la bassa velocità di strisciamento, che aumenta la durata dei contatti tra le asperità, favoriscono la formazione di giunzioni tenaci che inducono un

elevato attrito. Sotto l'azione della forza tangenziale applicata, le giunzioni si staccano e la velocità di strisciamento aumenta improvvisamente. Le giunzioni che si formano subito dopo il distacco sono evidentemente molto meno tenaci e l'attrito cala. Lo stick-slip è quindi originato dai fenomeni che avvengono nelle zone di contatto e può essere minimizzato riducendo il lavoro di adesione, aumentando così la velocità di strisciamento o aumentando la durezza del sistema tribologico.

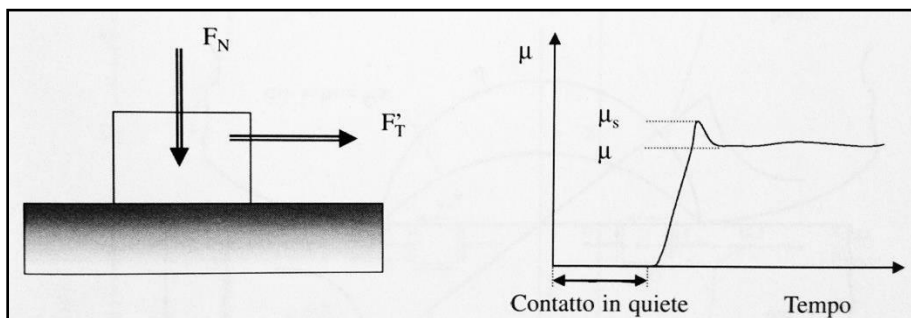


figura 2.37 – Coefficiente di attrito statico e cinetico

I materiali metallici possono subire, durante lo strisciamento, fenomeni di ossidazione superficiale con la formazione di uno strato di ossidi sulla superficie delle asperità, molto più spesso di quello spontaneo. Questo comporta la modifica delle condizioni di contatto, e il coefficiente di attrito risulta solitamente inferiore al valore che si avrebbe nel caso di contatto puramente metallo/metallo. La formazione di uno strato di ossido compatto e aderente dipende da vari fattori, tra i quali la severità del contatto, la durezza del metallo e la reattività del metallo con l'ossigeno.

Durante lo strisciamento, tuttavia, si può avere anche la rottura all'interno della giunzione. È infatti possibile che alcune giunzioni che si formano durante lo strisciamento risultino più resistenti del materiale sottostante, anche in seguito all'accumulazione di danneggiamenti per la ripetuta deformazione plastica alle asperità. In questi casi il coefficiente di attrito cambia di valore, non si può quindi pensare di non tener conto di tale effetto qualora capitasse.

3 – SISTEMI DI PROVA

3.1 PROGETTAZIONE DEL MODELLO 3D

Quando si realizza un macchinario da zero è bene porsi gli obiettivi da raggiungere e i conseguenti vincoli da rispettare; le domande alle quali bisogna rispondere, per fare chiarezza sull'idea di macchina da proporre, sono le seguenti:

- Perché si vuole costruire questo macchinario?
- Come lo si vuole realizzare?
- Quali sono le specifiche da rispettare?
- A cosa serve?

L'obiettivo è quello di andare a lubrificare dei lamierini d'alluminio.

Detta così, appare semplice la questione, ma non lo è affatto in quanto bisogna prima capire come applicarlo e quanto applicarne.

Vi sarà una prima fase di progettazione con l'elaborazione dell'idea e la proposta di diversi modelli di macchina, e successivamente certificato che l'idea sia quella che fa al caso nostro, vengono contattati i fornitori dei componenti scelti e mandata in produzione.

Nella progettazione di tali macchine, si è soliti dividere il periodo di lavoro in 4 fasi fondamentali:

1. Concept design: fase nella quale si realizza lo *sketch*, lo schizzo a matita, nel quale si decidono già una buona parte dei costi del macchinario
2. Initial design: fase nella quale si iniziano a porre gli ingombri, le dimensioni di base, le configurazioni del macchinario da progettare, anche con l'aiuto di software di supporto.
3. Design changes: fase già avanzata, nella quale si entra più nei dettagli dei componenti, e si propongono variazioni mirate sulle idee precedentemente fatte.
4. Data dissemination: condivisione contemporanea di tutti i dati relativi al progetto e di tutte le risorse che concorrono al progetto.

Ognuna di queste fasi peserà diversamente in termini di tempo sul totale; in particolar modo, il concetto di fondo è quello di concentrare gli sforzi, errori, indecisioni, variazioni,... nella prima fase di *Concept design*. Il perché di tale affermazione è giustificabile grazie a una spiegazione relativa al tempo e ai costi: costa meno correggere degli errori all'inizio della progettazione, che non alla fine quando molte delle scelte fatte sono già state messe su carta. Tale approccio è anche detto *Concurrent engineering* (CE), il quale mira appunto ad abbassare i costi ed i tempi nella realizzazione della macchina.

Ciò che insegna il CE inoltre, ci può essere d'aiuto, non solo nella suddivisione delle fasi di progettazione, ma anche nel metodo, nel modo di procedere: esso consiglia di portare avanti parallelamente più aspetti della progettazione come le prestazioni dei componenti, i costi, la qualità, la compatibilità,... e solo dopo che si ha completa certezza che il piano proposto sia corretto si manda in produzione.

3.1.1 Obiettivi e vincoli

L'obiettivo è quello di realizzare una macchina che lubrifici dei lamierini di alluminio, e si vuole che:

1. il posizionamento degli ugelli sia il più flessibile e semplice possibile, nello spazio a disposizione
2. che vi sia la possibilità di utilizzare più tipologie di ugelli e di lubrificanti
3. che vi sia un posizionamento preciso della fonte di riscaldamento delle lamine
4. che il riscaldamento avvenga in modo rapido ed omogeneo su tutta la superficie delle lamine

5. l'assemblaggio totale deve essere concettualmente e quindi anche nella realtà, il più semplice possibile
6. deve poter essere utilizzata da tutti coloro i quali fossero interessati all'argomento
7. non sprecare lubrificante
8. i componenti scelti devono essere realizzati, facendo attenzione al costo, ma soprattutto alla loro qualità durante il funzionamento

I vincoli invece, sono:

1. si deve utilizzare la struttura portante già presente in laboratorio, dunque lo spazio e gli ingombri sono già assegnati
2. bisogna tener conto delle norme di sicurezza, per chi la utilizzi

3.1.2 L'evoluzione dell'idea

Partendo dagli obiettivi e sottostando ai vincoli elencati nel paragrafo precedente, si inizia con l'idealizzare la macchina: il primo prototipo sviluppato è stato il seguente

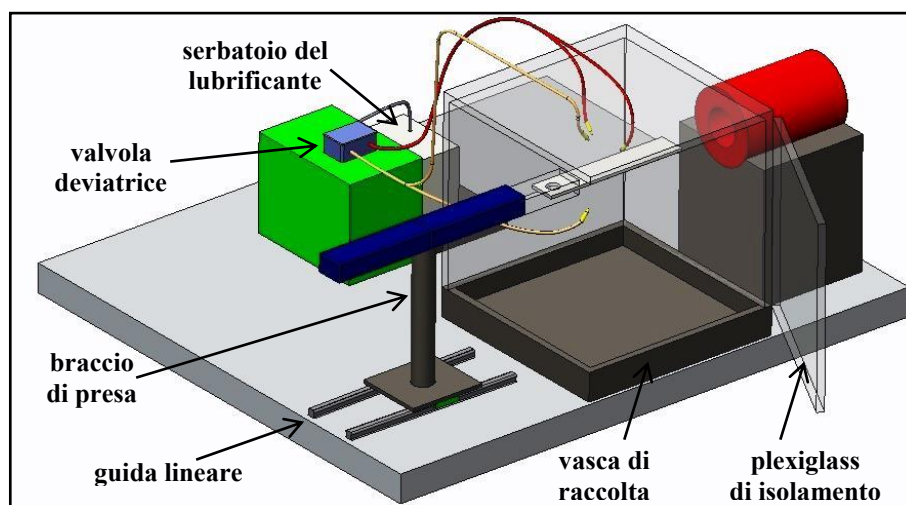


figura 3.1 – Primo concept realizzato con PTC Creo® 1.0

In figura 3.1, si vede un assemblato con diversi componenti tra cui:

- 1 forno tubolare
- la lamina da riscaldare
- 4 ugelli
- tubazioni per far arrivare il lubrificante nel punto stabilito
- 1 vasca per la raccolta del lubrificante
- protezione in plexiglass

- 1 valvola deviatrice di portata
- 1 serbatoio che contenga il lubrificante
- 2 guide lineari per la movimentazione

Questa prima idea di macchina è sensata, teoricamente, molto semplice: la lamina, viene bloccata dal braccio meccanico che è libero di traslare avanti e indietro lungo le guide lineari; se si volesse descrivere il funzionamento in più step di avrebbe:

1. la lamina entra nel forno tubolare finché non raggiunge la temperatura prestabilita
2. grazie al sistema di presa e movimentazione, raggiunta la temperatura obiettivo, viene fatta uscire e si posiziona nella zona ugelli
3. gli ugelli tramite comando elettrico rilasciano un preciso quantitativo di lubrificante

In questa prima fase di *Concept design* avanzato, si capisce subito come la macchina di figura 3.1 sia irrealizzabile con questa configurazione, in quanto mancano tutti i collegamenti tra le parti, le tubazioni non sono fissate a nessun sostegno, gli ugelli qualora fossero lasciati liberi, con la pressione del liquido non manterrebbero mai quell'orientamento.

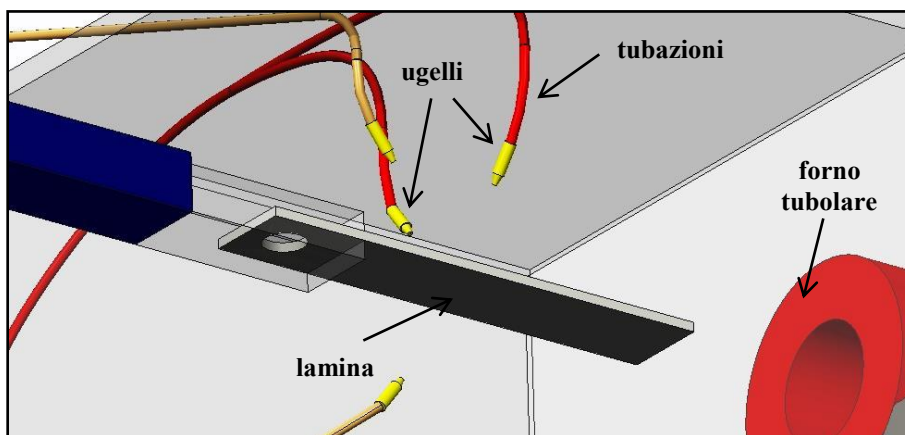


figura 3.2 – Dettaglio primo concept

Un concept come il precedente è utile per capire a grandi linee i componenti da inserire, infatti di quelli elencati in precedenza, molti se ne troveranno anche nella configurazione finale della macchina.

Elaborare la configurazione migliore, non è semplice, infatti si è passati per diversi concept prima di arrivare alla macchina nella sua configurazione

finale e l'unico componente che rimane invariato è la struttura di base che si vede anche in figura 3.3.

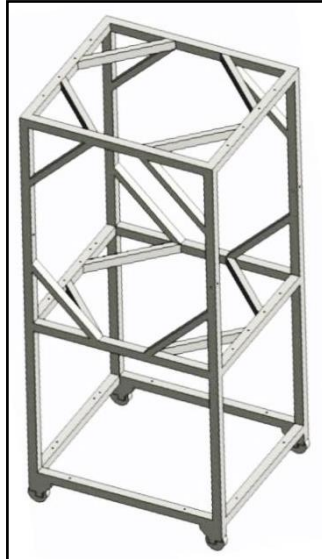


figura 3.3 – Struttura di base

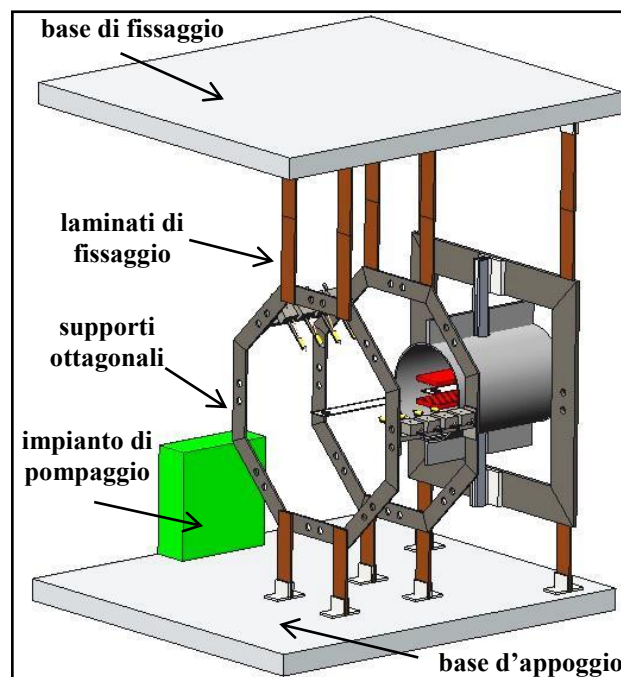


figura 3.4 – Secondo concept realizzato con PTC Creo® 1.0

Per semplicità vengono proposti altri concept, senza struttura di base, per esigenze di spazio.

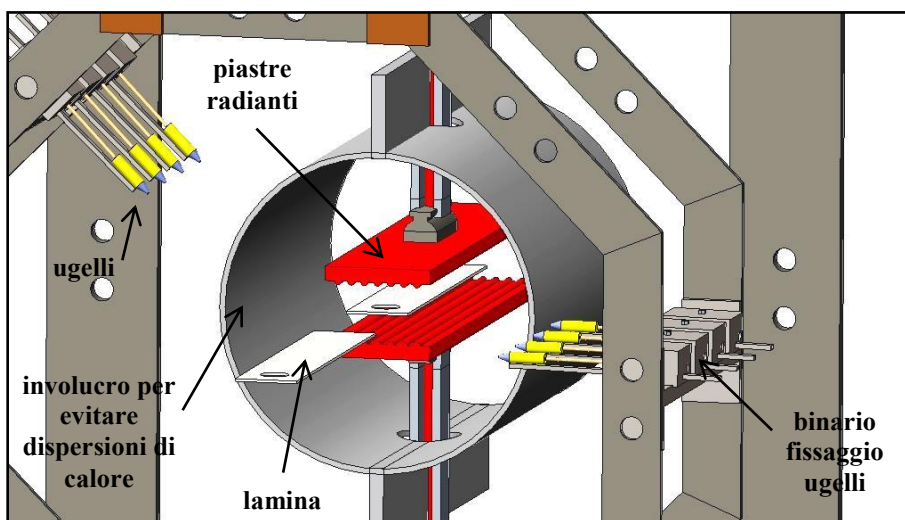


figura 3.5 – Dettaglio secondo concept

Con questa configurazione viene mantenuto lo stesso funzionamento del primo concept, con qualche variazione sui componenti della macchina, infatti si vede la sostituzione del forno tubolare con delle piastre ad irraggiamento. La configurazione è migliore dal punto di vista del fissaggio degli ugelli ai supporti ottagonali, a loro volta bloccati alle piastre in acciaio, tramite dei laminati.

I contro sono:

- la struttura risulta essere esile e potrebbe entrare in vibrazione durante il funzionamento;
- la base di lavoro è troppo limitata in termini di lunghezza: se si posizionasse anche un sistema di presa della lamina che trasli dalla zona di riscaldamento a quella di lubrificazione, non si riuscirebbe più a inserire la macchina nella struttura di base già presente

Il passo successivo è quello di provare una nuova configurazione, mettendo da parte, solo momentaneamente, il vincolo “struttura di base” per posizionare il tutto su un supporto che abbia uno sviluppo maggiore in lunghezza, come potrebbe essere per esempio una cattedra. Tale radicale cambiamento, verrà bocciato per problemi di isolamento della “zona lubrificazione”, in quanto si vedrà che i profilati e laminati di supporto tenderebbero a sporcarsi in modo eccessivo, durante la fase di spruzzaggio e ciò comporterebbe una pulizia frequente della macchina.

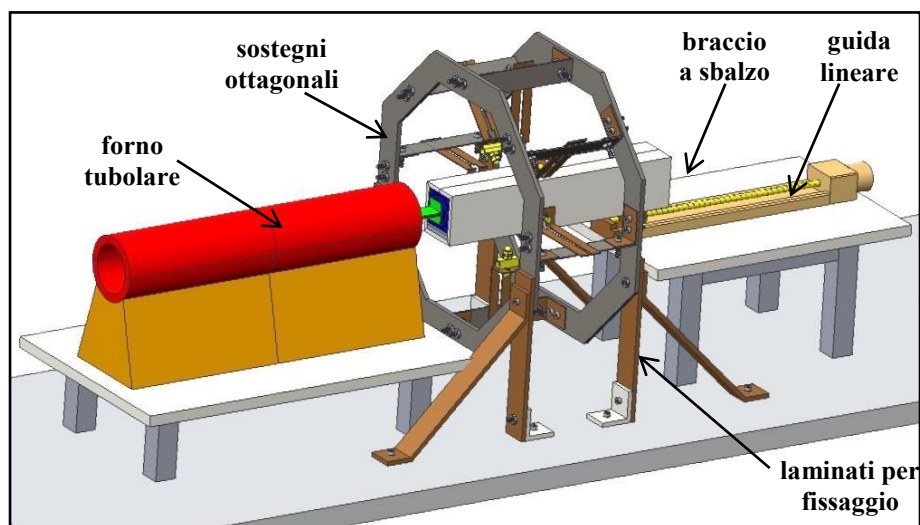


figura 3.6 – Terzo modello realizzato con PTC Creo® 1.0

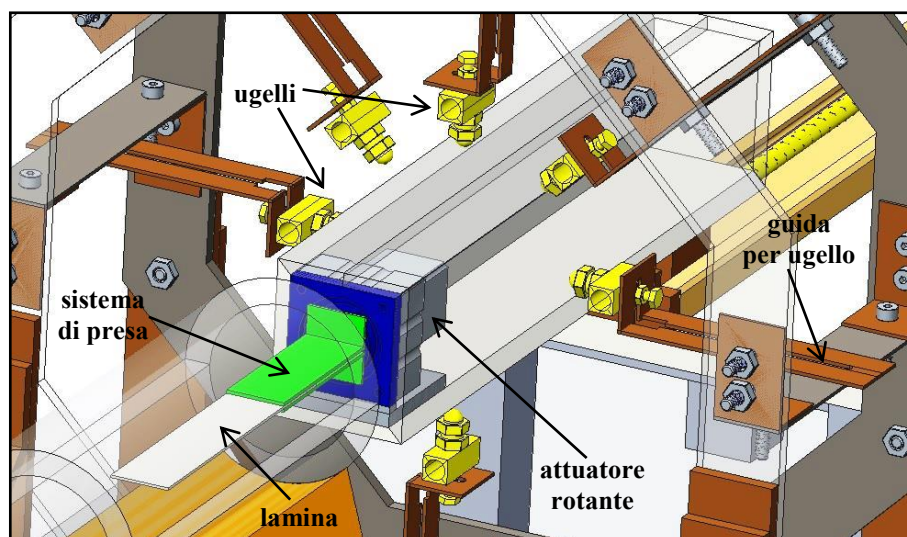


figura 3.7 – Dettaglio del terzo modello

Dai precedenti modelli, a quello di figura 3.7, si vede come aumentino sempre più i dettagli: aggiunta dei bulloni, dei dadi, la precisione nella geometria della guida lineare, presa da catalogo come anche gli ugelli (le specifiche riguardanti i componenti, verranno trattate al capitolo successivo nel quale si tratterà il modello definitivo della macchina, con la sua messa in opera). Si ritorna nuovamente all'utilizzo del forno tubolare, e vi è l'introduzione di un attuatore rotante, proprio all'estremità del braccio che blocca la lamina.

Nell'immagine che mostra il dettaglio del modello tre, sono state inserite delle trasparenze per migliorarne la visualizzazione.

I contro di questo modello sono:

- la pulizia delle parti dopo la lubrificazione
- l'esilità della guida ugelli
- la dispersione di calore del forno tubolare
- il peso del braccio a sbalzo con sopra l'attuatore: si potrebbero generare delle fluttuazioni nel movimento di traslazione
- la struttura è ancora esile, e va rinforzata

Proprio a causa dell'esilità della struttura, si è deciso di modificarla, rendendola più stabile come nel modello quattro: punto a favore; allo stesso tempo però non si è curata la parte relativa alla pulizia della macchina, punto vincolante visto che i lubrificanti che si andranno a utilizzare sporcheranno i componenti al suo interno. In modello quattro prevede alcune varianti rispetto al tre, con la presenza di profilati già opportunamente sagomati e fissati tra di loro (l'azienda che li produce è la Item24™). L'ingombro è notevole, sia in lunghezza che in altezza: 2000 mm in lunghezza, tenendo conto dello sbalzo del braccio fissato alla guida lineare e circa 900 mm di altezza dal piano del tavolo all'apice dell'ottagono. A causa di questi punti a sfavore, si deciderà di accantonare la *versione su cattedra* con tale configurazione, forse troppo complessa, per ritornare a quella con la *struttura di base*.

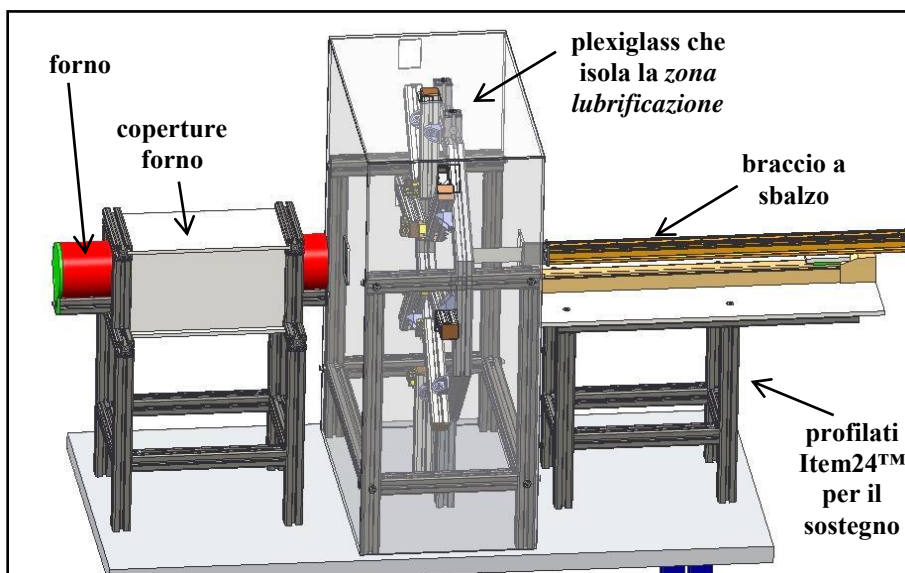


figura 3.8 – Quarto modello realizzato con PTC Creo® 1.0

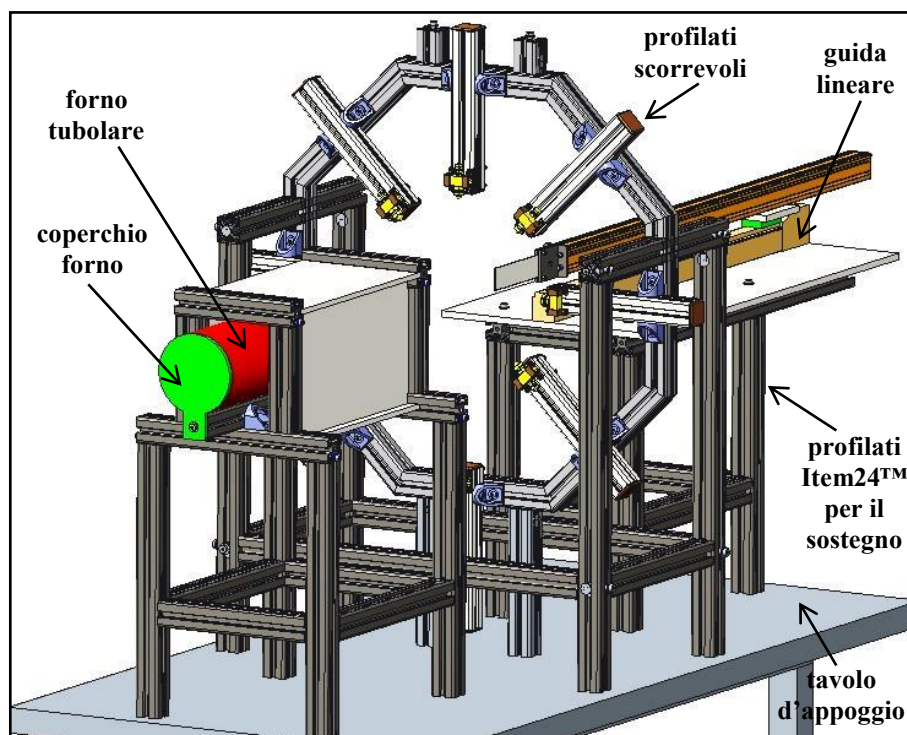


figura 3.9 – Quarto modello realizzato con PTC Creo® 1.0

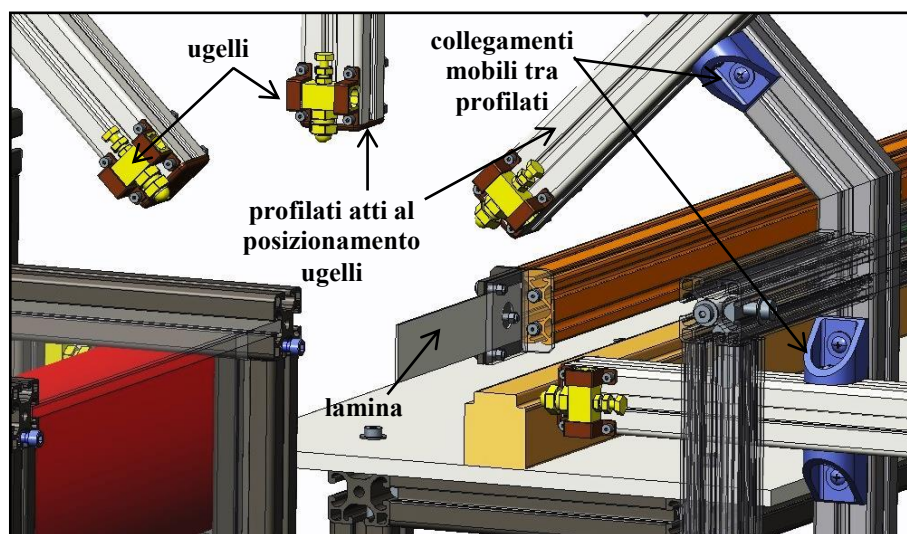


figura 3.10 – Dettaglio del quarto modello

Il quinto modello, rispetto al quarto, è ben più semplice nella sua configurazione: si vede come in esso venga nuovamente riproposto il forno tubolare, il profilato della Item24™ di circa 1000 mm di lunghezza, che permette manualmente di orientare la lamina, mentre attorno alla struttura vengono posizionate le guide con gli ugelli e relativi supporti. Visto lo

spazio ridotto della *struttura di base*, in questo quinto modello, il forno è esterno a tutta la struttura.

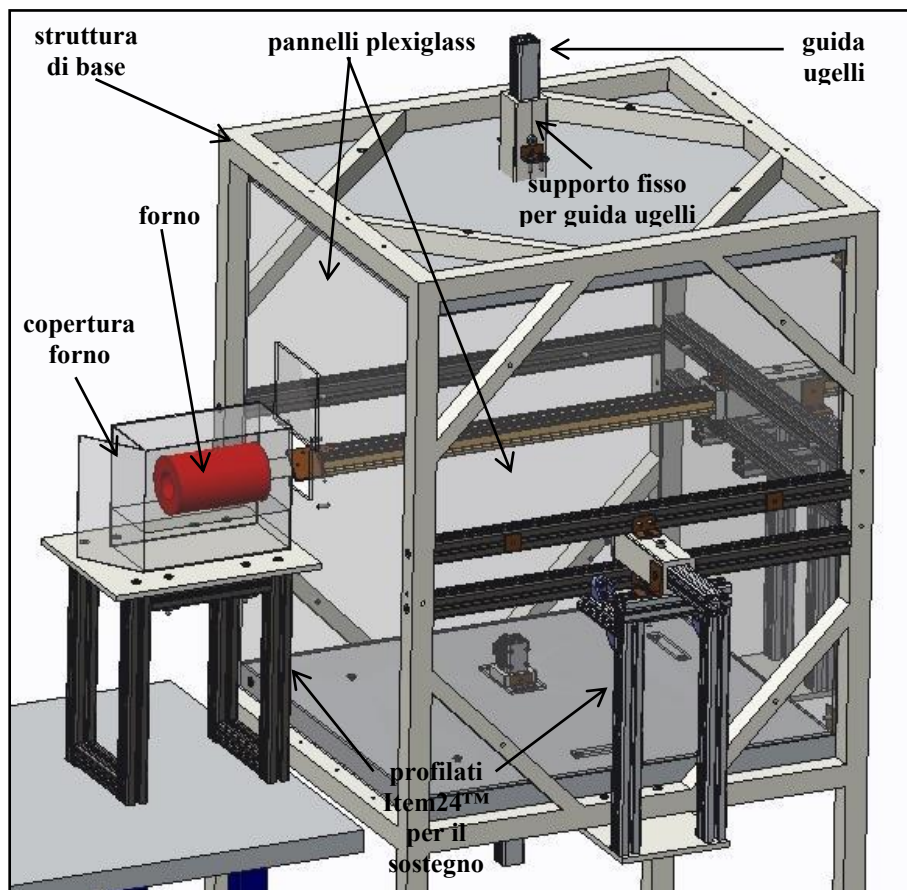


figura 3.11 – Quinto modello realizzato con PTC Creo® 1.0

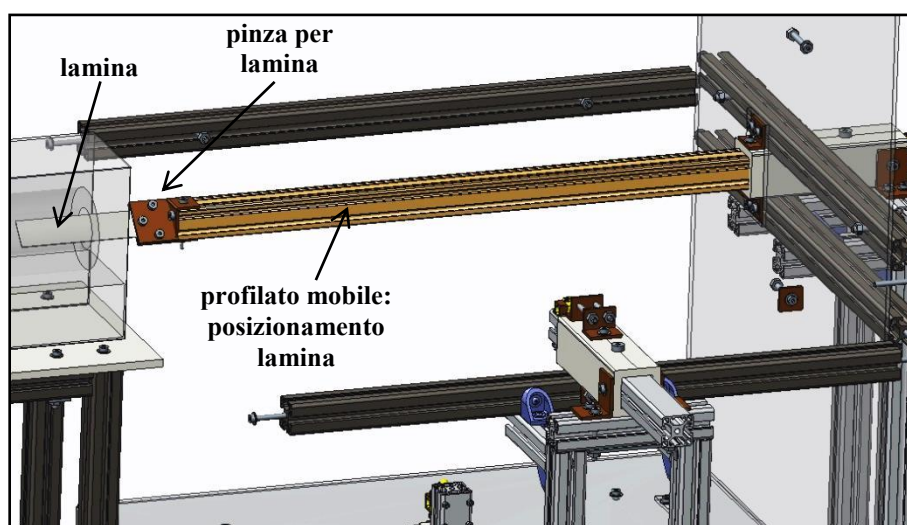


figura 3.12 – Dettaglio del quinto modello

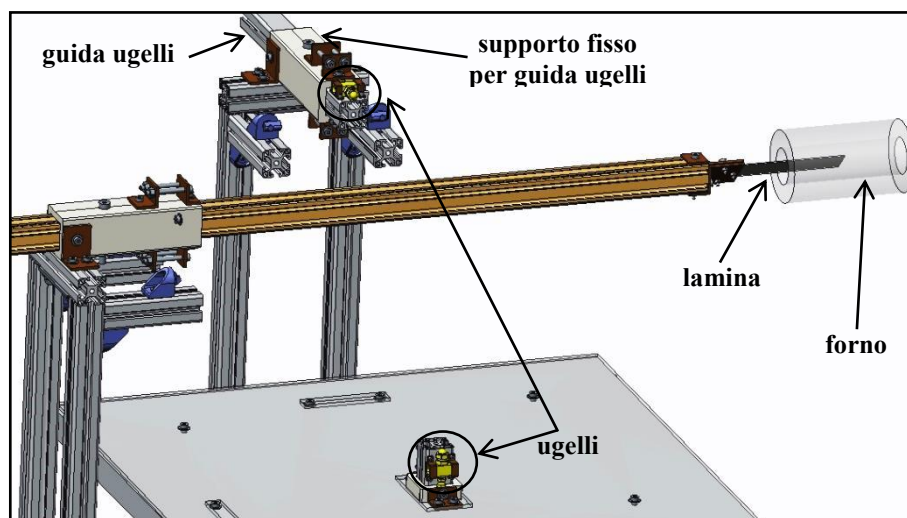


figura 3.13 – Dettaglio del quinto modello

La configurazione si avvicina sempre più a quella finale: la pulizia dei componenti ora non è più un problema, l'involucro trasparente in plexiglass viene sostenuto dalla *struttura di base* e isola le guide e i supporti delle guide degli ugelli. Il problema ora potrebbe riguardare il costo della macchina in relazione alla sua configurazione: è necessario proporre tutti profilati Item24™? Non è più conveniente utilizzare profilati Item24™ solo dove necessario? in modo da ottimizzare anche il fattore costo del macchinario, come proposto negli obiettivi?

A questo punto, si è deciso di porre più attenzione al metodo di riscaldamento delle lamine, esso infatti influisce molto sulla configurazione della macchina, ed il concetto che traduce tale problematica viene schematizzato nei due seguenti punti:

1. configurazione con riscaldamento statico e lamina in movimento: tipica del forno tubolare, nel quale una lamina si muoveva su guida lineare o su particolari accoppiamenti;
2. configurazione con riscaldamento in movimento e lamina ferma al centro della zona di lubrificazione.

Se finora i modelli/concept proposti si sono basati sul primo punto, d'ora in poi cambia, in quanto viene scartato il forno tubolare in quanto oneroso in termini di prezzo e non preciso nel garantire una omogeneità sulla superficie della lamina stessa. Si passa ad un metodo di riscaldamento, come espresso nel punto 2, in movimento: la tecnologia è ad irraggiamento, non tramite piastre radianti, come nel secondo concept, ma con lampade alogene.

Verranno così montate due/quattro lampade alogene su una struttura mobile, definita *pinza*, la quale verrà a sua volta appoggiata su dei sostegni al centro della zona di lubrificazione; l'operatore dovrà afferrare la pinza e orientarla orizzontalmente o verticalmente a seconda che le lamine da lubrificare, siano verticali od orizzontali. In seguito vengono proposte delle immagini della struttura e della *pinza*.

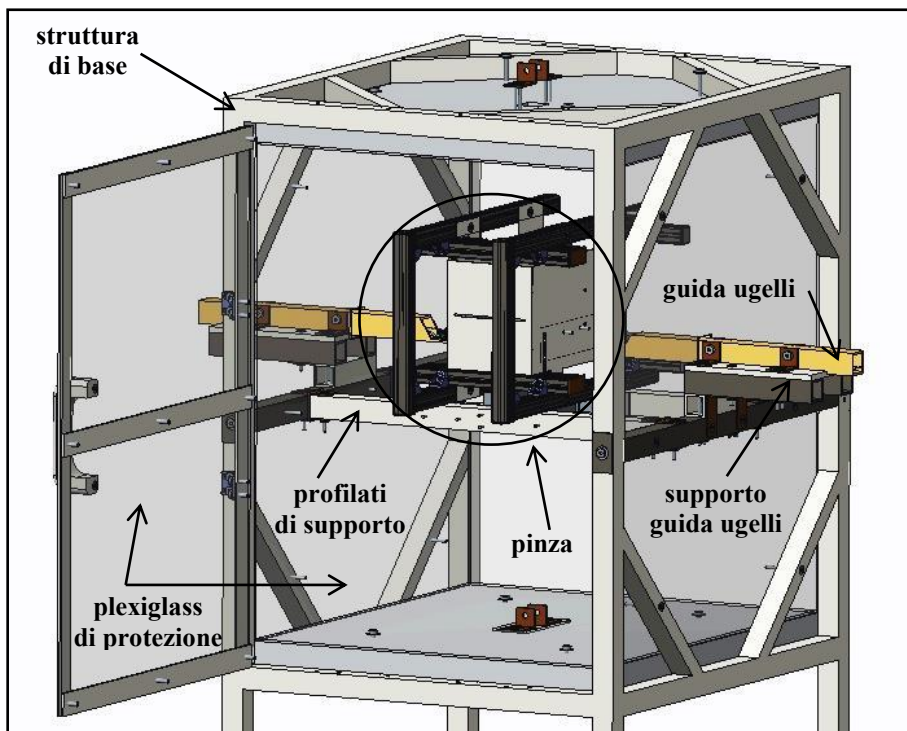


figura 3.14 – Sesto modello realizzato con PTC Creo® 1.0

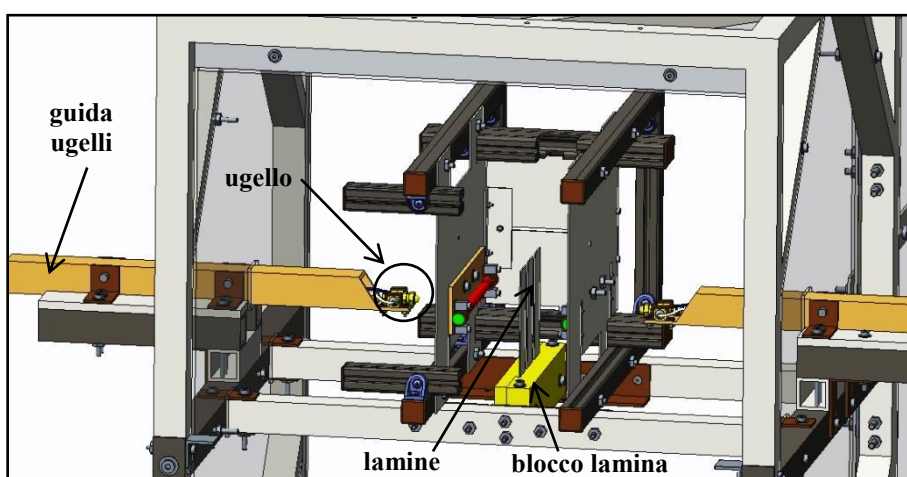


figura 3.15 – Dettaglio del sesto modello

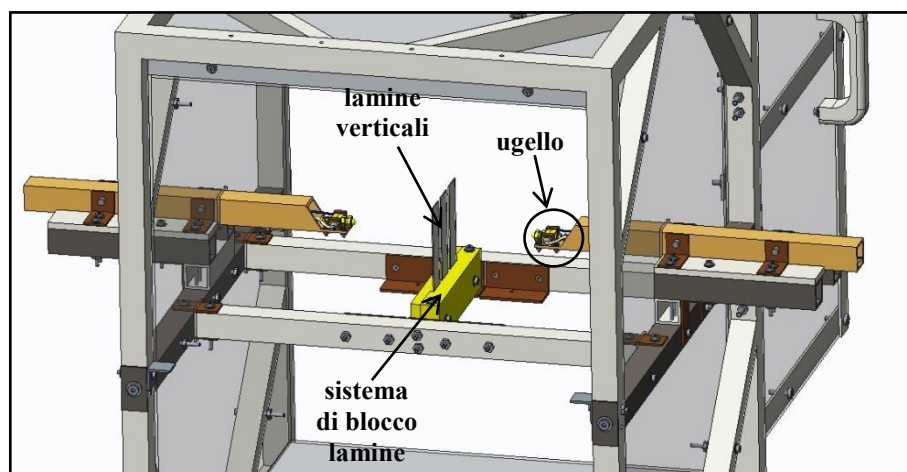


figura 3.16 – Dettaglio del sesto modello

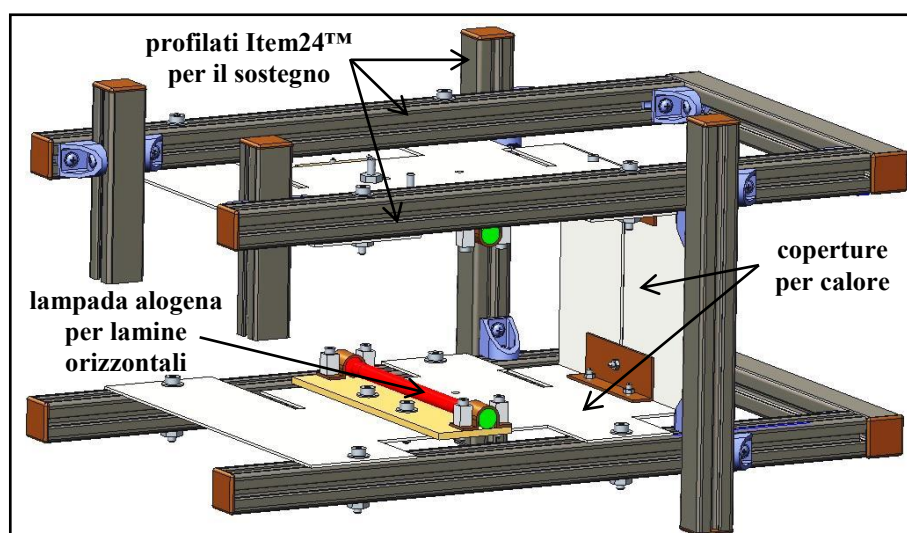


figura 3.17 – Dettaglio della pinza con orientamento orizzontale

Una configurazione di questo tipo potrebbe essere valida: per quanto riguarda la pulizia il problema è minimo in quanto, la pinza, dopo il riscaldamento viene estratta dall'involucro di plexiglass, e la spruzzata di lubrificante avviene con la struttura vuota.

La flessibilità della pinza è elevata, in quanto può essere posizionata sui supporti senza grosse modifiche, orientandola nel modo adeguato, o come mostra figura 3.17 o come 3.18.

La problematica principale risiede nel peso della pinza: dovendo per forza realizzarla con materiali non plastici, vista la presenza delle alogene che possono arrivare anche a 400°C, essa ha un peso di circa 7/8 kg, il che non è poco. Maneggiando un oggetto da 500x320x230 mm con tale peso si rischierebbe di non essere così precisi nel posizionamento o addirittura non

riuscire proprio a sollevarlo; essendo anche ad elevate temperature, vi sarebbe anche l'obbligo di un utilizzo di guanti protettivi al momento dell'impugnatura.

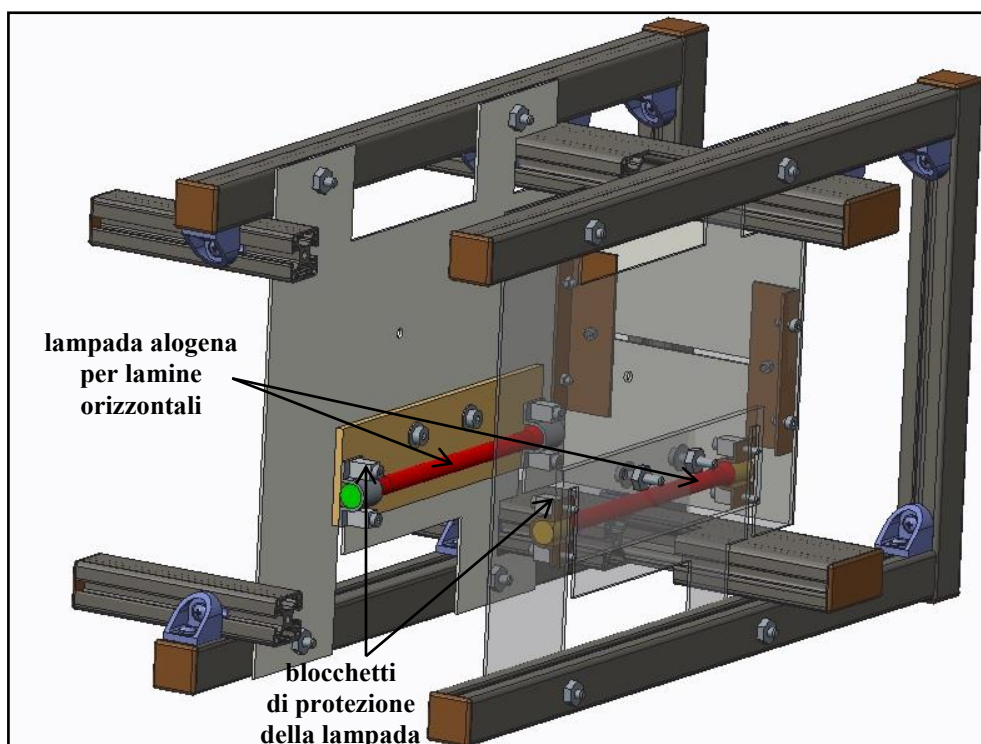


figura 3.18 – Dettaglio della pinza con orientamento verticale

A questo punto possiamo fare il punto della situazione: partendo da un concept iniziale, senza elementi di sostegno per gli ugelli, con geometrie realizzate senza prendere spunto da cataloghi, siamo arrivati pian piano al modello finale della macchina. Ci sono voluti 6 step prima di raggiungerlo, nei quali si è cercato di cambiare e valutare tutte le possibili configurazioni della macchina, andando persino ad escludere la struttura di base nei modelli tre e quattro.

Si vede come dal primo concept al sesto modello, la complessità della macchina aumenti sempre più, aggiungendo i fori sui piastroni, con le opportune viti, della giusta misura e lunghezza e tutto ciò è dovuto all'esperienza che si è sviluppata sul campo man mano: partendo da una richiesta del realizzare una macchina che lubrificasse e riscaldasse delle lamine, si sono studiati i componenti che potessero eseguire tali azioni.

Partendo da una vasta gamma di ugelli, di tipologie di riscaldamento, ci si è sempre più focalizzati su dei componenti che potessero fare al caso nostro, individuando in loro poi l'oggetto migliore; questo lo si può vedere anche

nella raffigurazione degli ugelli, dove nel primo concept hanno una forma non così dettagliata, come invece succede dal terzo modello in poi quando si aveva già deciso quale fosse la tipologia migliore da utilizzare.

Il prossimo capitolo mira proprio a descrivere le caratteristiche tecniche, geometriche e i perché delle scelte fatte, oltre che a dare una descrizione della configurazione finale della macchina, che sarà quella che poi verrà portata in produzione.

3.2 ELENCO DEI COMPONENTI

Nel corrente paragrafo si tratterà la configurazione finale della macchina addetta alla lubrificazione dei lamierini di alluminio; si valuteranno i componenti che risiedono in essa con riferimenti alle opportune schede tecniche.

3.2.1 Tipologie di ugelli

La scelta dell'ugello è di primaria importanza in quanto da esso dipende la componentistica del sistema di lubrificazione. Come prima cosa bisogna capire se utilizzare o meno l'effetto del Venturi.

Vi sono in commercio tra le più svariate tipologie di ugelli, che per l'appunto di differenziano non solo per il funzionamento, Venturi o meno, ma anche per altre caratteristiche:

- materiale di cui è composto
- geometria della rosa di spruzzaggio e del getto e gittata media
- compatibilità con determinati lubrificanti

3.2.1.1 NEBULIZZATORE ARIA LIQUIDO DELLA PANAR S.R.L

Lo spaccato in figura 3.19 mostra la geometria dell'ugello: si possono vedere in legenda le due entrate (1-entrata dell'aria; 3-entrata del liquido) e l'unica uscita (2-uscita della miscela).

I materiali plastici di questo dispositivo non garantiscono una durata infinita, tanto più se si pensa al fatto che esso viene prodotto così come lo si vede in figura, senza possibilità di aprirlo per far pulizia al suo interno.

I condotti infatti, sono angusti e non avendo modo di pulirlo c'è la possibilità, che rimangano incrostazioni al suo interno senza che esse siano visibili, causando così un malfunzionamento inaspettato dell'ugello.

Oltre a tale fatto che riguarda la pulizia, bisogna capire quanto esso possa funzionare bene con i lubrificanti che si hanno a disposizione: se al suo interno passa un fluido, tipo una miscela di liquido con particelle in

sospensione, esse devono poter passare senza causare intasamenti nell'ugello.

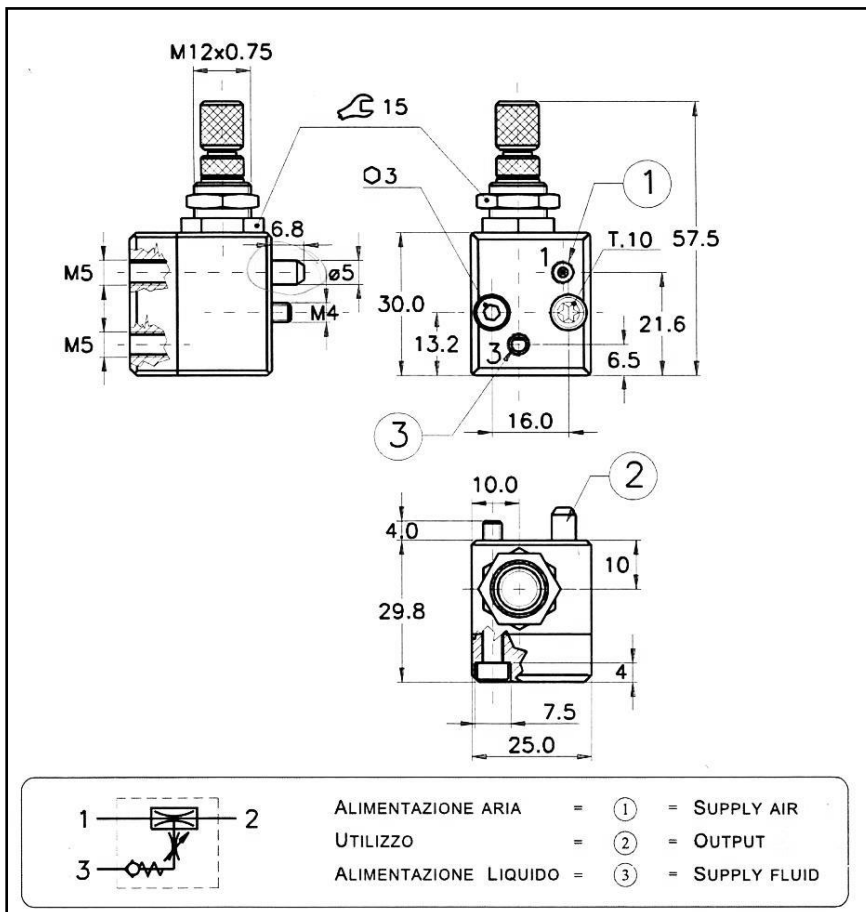


figura 3.19 – Nebulizzatore aria-acqua su principio Venturi

L'unica parte in ottone del componente è il sistema di regolazione: si tratta di una vite con un terminale a forma d'ago, il quale scendendo va ad otturare l'entrata dell'aria nell'ugello. La regolazione quindi avviene sempre e solo per mezzo dell'aria: quantificando la portata d'aria, riesco a regolare il quantitativo di lubrificante che passa.

Per quanto riguarda la geometria della rosa, non vi è possibilità di variarla sia in termini di grandezza che di forma; la grandezza della rosa può essere variata solo avvicinando l'ugello all'oggetto da lubrificare.

Il prezzo di questo dispositivo è basso, in quanto si tratta di un componente realizzato con materiali poco nobili e con prestazioni non sempre all'altezza.

Fluido	Fluid	Aria compressa filtrata, lubrificata e non Filtered lubricated or not lubricated air
Liquidi utilizzabili	Usable liquids	Acqua e/o olio (con densità non superiore a 1.1) Water and/or oil (with density not higher than 1.1)
Fissaggio	Fixing	Dado M12x0.75 - Vite M4x30 (a corredo) M12x0.75 nut - M4x30 screw (included)
Attacchi	Connections	① ③ = M5 ② = Ø5
Sistema di funzionamento	Working system	Effetto Venturi Venturi effect
Diametro nominale	Nominal diameter	0.8 mm
Portata nominale	Normal rated flow	11 NI/min (6 bar)
Pressione di esercizio	Working pressure	2 ÷ 10 bar
Diagramma di funzionamento	Working diagram	Vedi retro Please turn over
Temperatura ambiente	Ambient temperature range	-10°C ÷ +80°C
Temperatura del fluido	Fluid temperature range	+5°C ÷ +80°C
Materiale del corpo	Body material	Tecnopolimero Tecnopolymer
Materiale sistema regolazione	Fixing thread material	Ottone Brass
Materiale guarnizioni	Seals material	NBR
Peso	Weight	0.084 kg

figura 3.20 – Scheda tecnica del nebulizzatore aria-acqua basato sul principio Venturi

3.2.1.2 UGELLI SPRAYING ARIA LIQUIDO DELLA ACHESON

Si tratta di ugelli spray, quindi ancora nebulizzatori, molto simili ai precedenti.

Possono essere installati su bracci robotizzati addetti alla lubrificazione: si vengono a creare delle apposite sedi in cui si inseriscono tali ugelli, che per la loro forma sono semplici da installare. La nebulizzazione è esterna, come mostrano le figure che seguiranno: vi è un canale per il lubrificante concentrico a quello dell'aria, i due fluidi si incontrano solo dopo la bocca dell'ugello, si miscelano nella nube stessa.

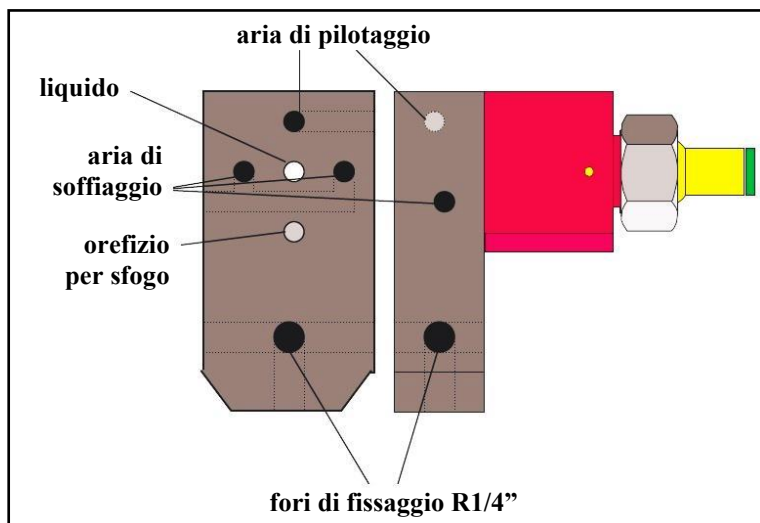


figura 3.21 – Disegno 2D dell'ugello a nebulizzazione esterna dell'Acheson

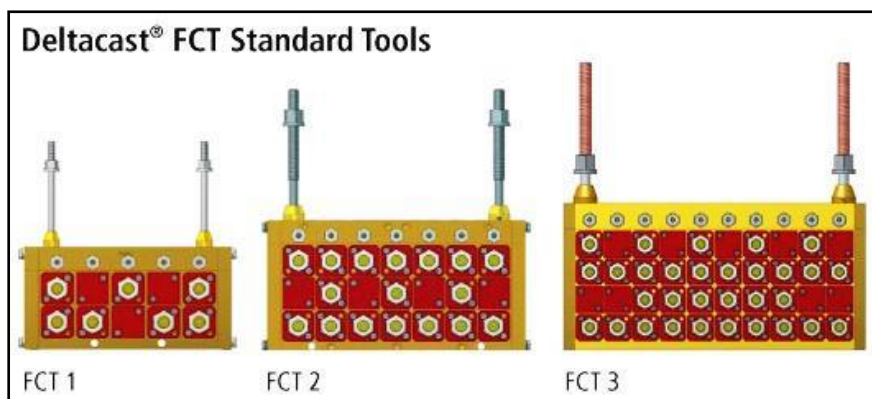


figura 3.22 – Più ugelli inseriti in apposite sedi per la lubrificazione di parti estese

External Atomization - Principle

Deltacast[®] and Flextool[™] nozzles and spray tools. Leading edge spraying technology for your process.

Flextool[™] Spray Nozzle

Deltacast[®] Spray Nozzle

- Powerful and economical • Precise • Variable • Reliable
- Patented technology • Valve technology inside spray head
- External atomization

figura 3.23 – Sistema di nebulizzazione esterna con ugelli spray dell'Acheson

Hanno un costo non eccessivo e sono abbastanza precisi nella loro mansione: la forma del getto può assumere geometrie diverse a seconda del terminale che si inserisce.

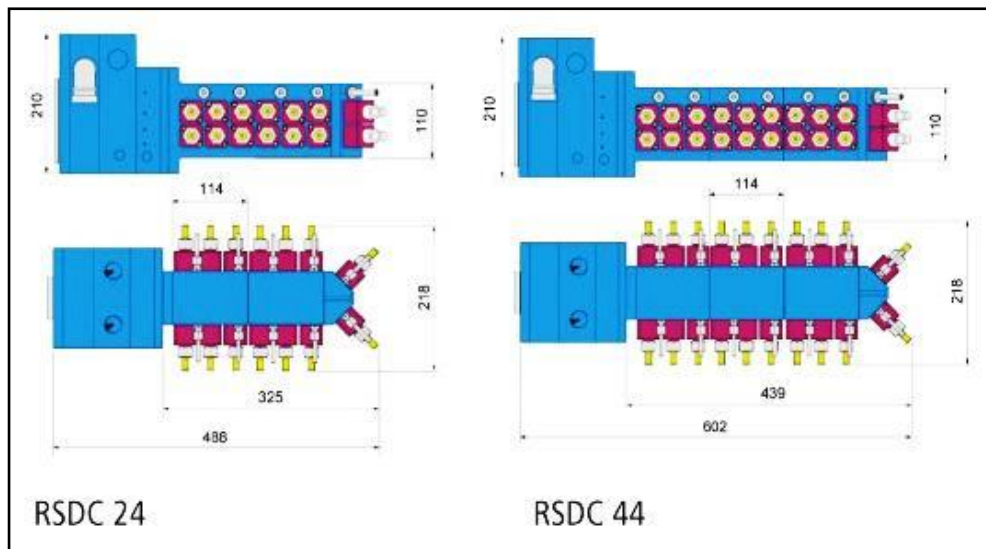


figura 3.24 – Terminale di un braccio robotizzato addetto alla lubrificazione

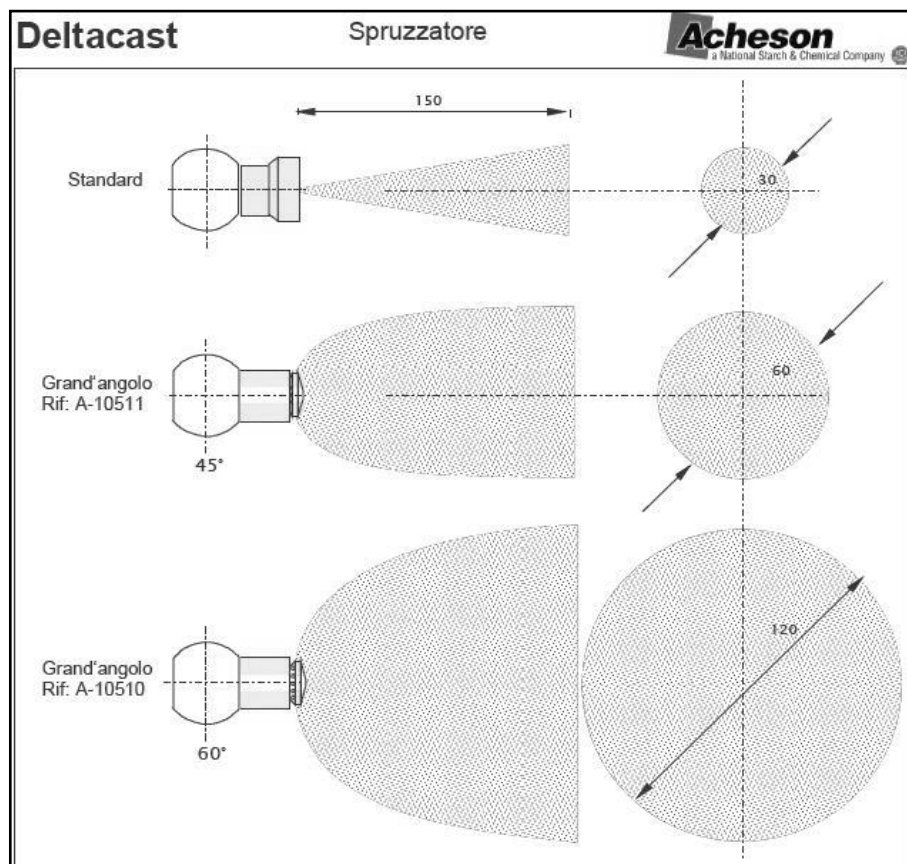


figura 3.25 – Geometria della rosa a seconda del terminale installato

Nel caso si scelga un ugello con rosa circolare piena per variarne le dimensioni bisogna avvicinarlo o allontanarlo dal componente da lubrificare.

3.2.1.3 AEROGRAFI

Si vogliono dare delle informazioni anche su dei terminali che hanno lo stesso principio degli ugelli precedentemente descritti, ma che hanno una configurazione completamente diversa.

L'aerografo (o aeropenna) è uno strumento che viene utilizzato per spruzzare vernici di vario tipo nebulizzandole tramite aria compressa. Viene usato in lavori di precisione per produrre linee molto sottili, campiture di colore uniformi e toni sfumati. Il principio di funzionamento dell'aerografo è relativamente semplice, tramite una sorgente di aria compressa che genera una depressione al livello dell'ugello, la vernice viene aspirata e proiettata polverizzata sulla superficie da noi scelta.

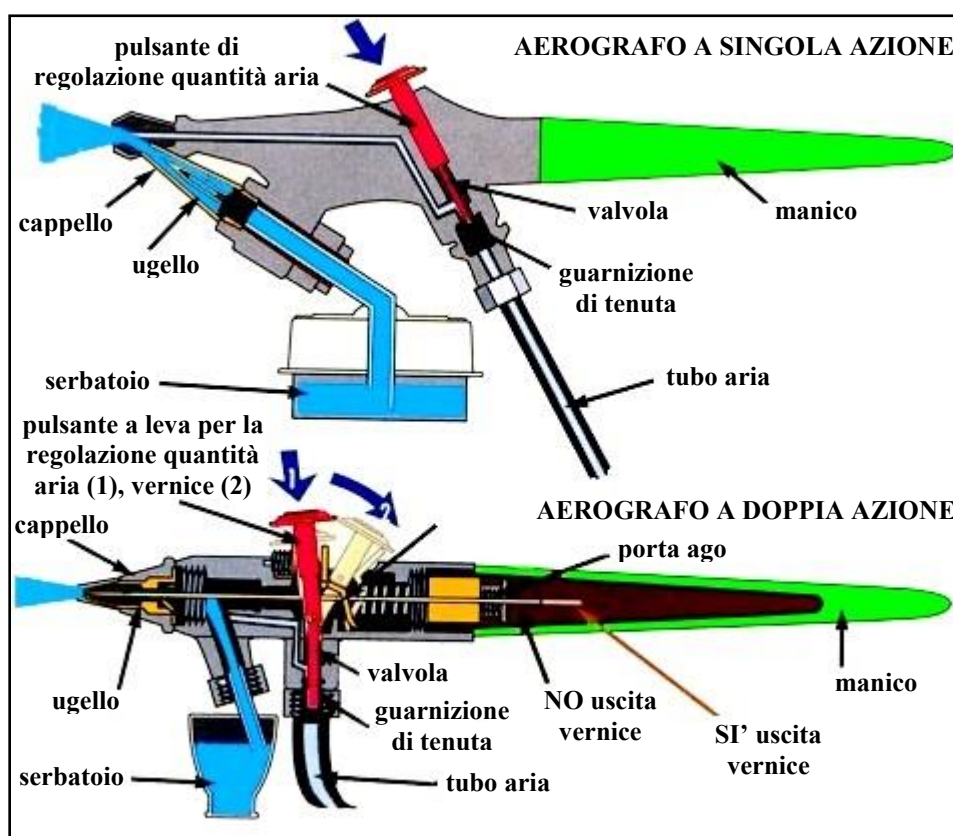


figura 3.26 – Aerografo a singola azione (in alto); aerografo a doppia azione (in basso)

La famiglia degli aerografi si divide in tre tipi: aerografo a singola azione, quello a doppia azione ed uno speciale aerografo a turbina che dato il costo e la troppa specificità d'uso si ritiene sia inutile descrivere.

Singola azione significa che alla semplice pressione sul pulsante dell'aeropenna, dall'ugello esce un flusso di aria e vernice fissa, senza la possibilità di regolare la quantità di colore e di aria tramite il pulsante; la regolazione della quantità di vernice avviene svitando o riavvitando una rotella zigrinata. Nel doppia azione invece, agendo sul pulsante si ha la possibilità di regolare sia la quantità di vernice che la quantità di aria in uscita dall'ugello (premendo il pulsante regoliamo la quantità d'aria, spingendo lo stesso indietro regoliamo la quantità di colore erogato). Viene da sé che il singola azione è riservato per i lavori che non richiedono grande finezza, mentre con il doppia azione ci si può sbizzarrire a fare una ampia gamma di effetti con il movimento del dito. È chiaro che, la differenza tra i due tipi incide anche sul prezzo e di solito un doppia azione costa il doppio o più del doppio del singola azione, la sua manutenzione è più delicata.

L'aerografo non fa al caso nostro, in quanto è progettato per essere utilizzato con le vernici, che hanno una composizione diversa rispetto a un lubrificante, quale un nitrato di boro o una grafite. Vista l'inesperienza in tal campo, si è preferito scartarlo, rimanendo sui normale ugelli per la lubrificazione.

Anche la pulizia stessa dell'aerografo poteva divenire un problema invalicabile: nell'utilizzo di questo dispositivo con vernici, la pulizia veniva fatta alternando spruzzate di acqua tra un cambio di vernice ed un altro; e nel nostro caso? Eravamo sicuri di pulirlo con discreta precisione tra un cambio di lubrificante e l'altro? Questo concetto non deve essere trascurato, perché qualora non vi fosse una corretta pulizia di tutte le parti, si rischierebbe di far attecchire alle lamine non un tipo di lubrificante, ma una miscela, che poi comprometterebbe quasi certamente i valori di μ , durante le prove sulla macchina di strip drawing test.

3.2.1.4 UGELLI NEBULIZZATORI VORTEX®

La tipologia di ugelli Vortex® scelta per l'apparato di prova è quella mostrata in figure 3.27 e 3.28.

Il terminale lavora ancora una volta per effetto Venturi: la particolarità di questo dispositivo è quella di poter essere smontato in ogni sua parte per essere pulito a dovere, il che è un enorme vantaggio in quanto vi è la possibilità di utilizzare più tipologie di lubrificanti, senza che vi siano cali di prestazioni. I canali al suo interno permettono il passaggio di particelle in

sospensione nei lubrificanti scelti (che si vedranno esaminati nei seguenti paragrafi), senza alcun tipo di problema legato ad otturazioni.

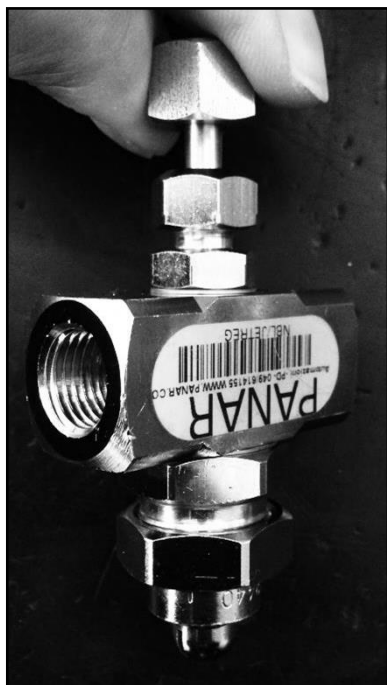


figura 3.27 – Ugello atomizzatore della Vortex®

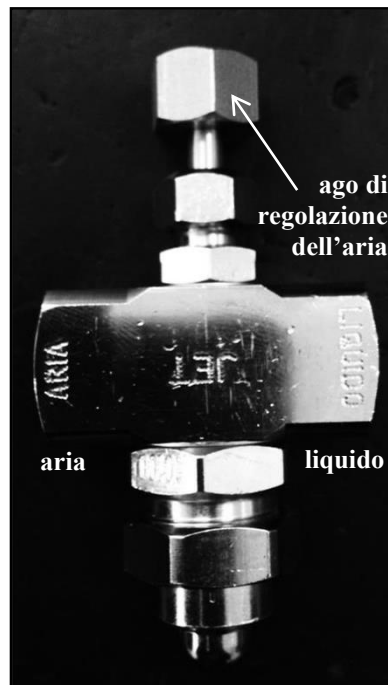


figura 3.28 – Ugello atomizzatore della Vortex®, con particolare delle due entrate: a destra il liquido, a sinistra l'aria in pressione

Il vantaggio di tale ugello è che potendolo smontare, si può cambiare la testa e quindi la geometria sia del getto che della rosa; questo nelle tipologie finora viste non era possibile se non cambiando completamente l'ugello: è un ulteriore pro di questo dispositivo. Le forme delle rose possono essere personalizzate: dal semplice cerchio, all'anello, al rettangolo (che è quello che verrà utilizzato nelle prove),... oppure spruzzare contemporaneamente, in due zone separate, lavorando opportunamente la sezione d'uscita dell'ugello.

Il funzionamento è semplice: il condotto dell'aria in pressione (a sinistra in figura 3.28), che viene appositamente strozzato, crea una depressione al suo interno la quale attira il liquido (a destra in figura 3.28), i due si miscelano in testa all'ugello in una piccola camera e solo successivamente escono.

Questa miscelazione anticipata prima della sezione d'uscita dell'ugello, permette di avere una distribuzione sicuramente migliore e più equilibrata delle particelle di aria e lubrificante nella nuvola esterna.

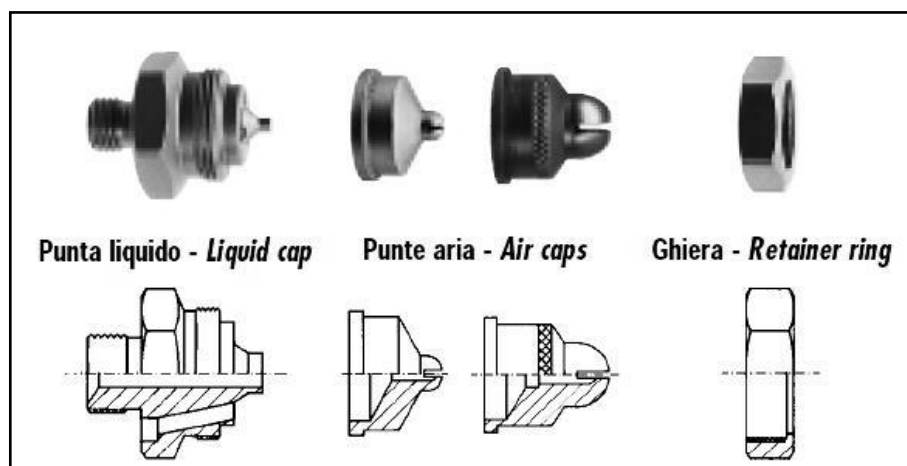


figura 3.29 – Spaccato della testa dell'ugello Vortex®



figura 3.30 – Particolare della sezione d'uscita rettangolare dell'ugello Vortex®

La dimensione della nuvola dipende da diversi parametri, quali: la pressione dell'aria, la miscelazione tra lubrificante ed aria, il tipo di lubrificante stesso, la sezione d'uscita ed anche la distanza tra l'ugello e il dispositivo; dare delle definizioni precise delle dimensioni della rosa che spruzza tale ugello non è semplice perché può variare di volta in volta, i risultati sono stabiliti solo da prove sul campo.

La tabella che si vede in figura 3.31, presa dalla scheda tecnica di codesto ugello, mette in relazione la gittata e la distanza che vi è tra il terminale ed il serbatoio da dove viene pescato il lubrificante: le configurazioni possibili possono essere due in tal caso, o per semplice caduta o con presenza di un sifone come mostra la seguente immagine.

Insieme di spruzzo Spray set-up number	Combinazione punta liquido e punta aria Liquid cap and air cap combination	Aria atomizzante Atomizing air		Portata liquido (litri ora) Liquid capacity (litres per hour)				Dimensioni del getto (Altezza sifone 20 cm) Spray dimensions (Siphon height 20 cm)																								
		Pressione Pressure (Bar)	Portata Capacity (l/min)	Altezza di caduta Gravity head		Altezza dal sifone Siphon height				Pressione Pressure	A	B	C	E																		
				45 cm	30 cm	15 cm	10 cm	20 cm	30 cm						60 cm	90 cm																
501	Punta liquido - Liquid cap	0,7	28,0	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,6	0,5	0,7	20,3	26,7	38,1	2,1																
	2850																1,4	40,2	1,2	1,1	1,1	1,0	0,9	0,7	0,6	1,4	21,6	29,2	38,1	2,1		
	Punta aria - Air cap																														73420	2,1
502	Punta liquido - Liquid cap	1,4	52,7	3,8	3,6	3,4	2,9	2,7	2,5	2,3	2,1	1,4	22,9	31,8	38,1	2,7																
	35100																2,1	68,5	3,3	3,2	3,1	2,8	2,7	2,5	2,4	2,2	2,1	24,1	34,3	41,9	2,7	
	Punta aria - Air cap																															120432
503	Punta liquido - Liquid cap	4,1	114,7	1,7	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0			4,1	27,9	39,4	48,3	2,7																
	40100																1,4	64,0	5,1	4,8	4,5	3,8	3,6	3,5	3,0	2,3	1,4	19,1	22,9	26,7	3,4	
	Punta aria - Air cap																															122435
504	Punta liquido - Liquid cap	2,8	99,7	3,7	3,5	3,3	2,5	2,2	2,0	1,7		2,8	21,6	26,7	30,5	3,0																
	122435																3,4	117,0	2,2	2,0	1,7		1,4	59,5	7,6	7,2	6,5	5,6	5,3	5,0	4,4	3,5
	Punta aria - Air cap																															
122440	2,8	92,9	6,9	6,6	6,2	5,4	5,1	4,6	3,9		2,8	20,3	26,7	33,0	3,4																	
Punta aria - Air cap																109,6	4,2	3,7	3,2	2,6		1,4	16,5	21,6	26,7	3,4						

figura 3.31 – Dimensioni della nuvola con annesse variabili

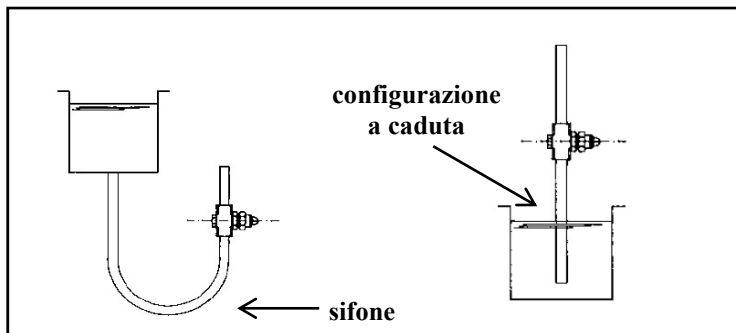


figura 3.32 – Esempio di due tipologie di installazione per l'ugello Vortex®

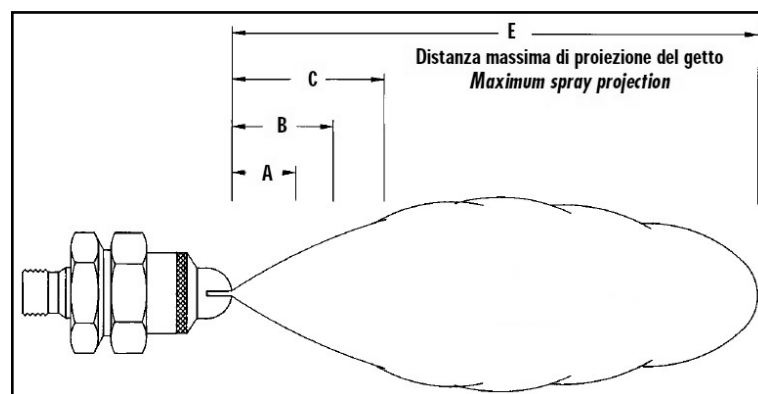


figura 3.33 – Nuvola con distanze di gittata espresse in figura 3.31

Un ugello che lavora sul principio Venturi funziona bene entro un certo range di pressioni: per questa tipologia si consiglia di far lavorare il terminale intorno ai 3,5-4 bar, ed a una distanza di circa 200/250 mm dall'oggetto da lubrificare.

Più si avvicina l'ugello alle lamine da lubrificare e minore dovrà essere la pressione dell'aria, altrimenti la spruzzata arriverà con eccessiva energia e si creerà l'effetto goccia sulla superficie, indesiderato nel nostro caso; la situazione opposta invece, capita quando si allontana il terminale dalle lamine e qui lo svantaggio è di vedere arrivare una nuvola troppo rarefatta, la quale potrebbe non depositare una giusta quantità di lubrificante, per contrastare tale effetto si deve alzare la pressione dell'aria, ma facendo ciò porto l'ugello a lavorare ancora una volta in condizioni sfavorevoli, in quanto uscirei dal range di pressioni ammesso.

La regolazione dell'aria avviene avvitando/svitando la manopola che si vede nelle figure 3.27 e 3.28: vi è una strozzatura che chiude il passaggio dell'aria in entrata all'ugello che successivamente verrà miscelata, prima di uscire.

Questo ugello infine permette sì, la regolazione della grandezza della rosa sull'obiettivo di spruzzata, tramite avvitamento della manopola posta sul lato opposto della bocca di uscita, ma non risulta essere così efficiente qualora la riduzione o l'aumento di questa siano particolarmente pronunciati, in tal caso infatti il problema viene risolto, avvicinando semplicemente l'ugello alle lamine.

3.2.1.5 IMPIANTI DI LUBRIFICAZIONE MINIMALE ILC

Un'alternativa valida nel campo della lubrificazione, sono gli impianti che mirano a dosare la quantità di lubrificante con un sistema diverso rispetto al principio Venturi: tramite pompaggio del lubrificante nel canale di mandata.

Si tratta di sistemi precostruiti, con serbatoio, pompe, tubi, canali, regolatori di portata,... il motivo per il quale non sono stati utilizzati nel nostro caso è il seguente: avendo dei lubrificanti particolari, come nitruro di boro, graffite che hanno particelle in sospensione, non si era sicuri del corretto funzionamento di tali impianti; un secondo problema era dato anche dal fatto che sarebbe stato difficile pulire il tutto una volta che si fosse deciso di cambiare lubrificante. Questi sistemi vengono usati prettamente con oli classici tipici della lubrificazione; è comunque interessante vederne la configurazione.

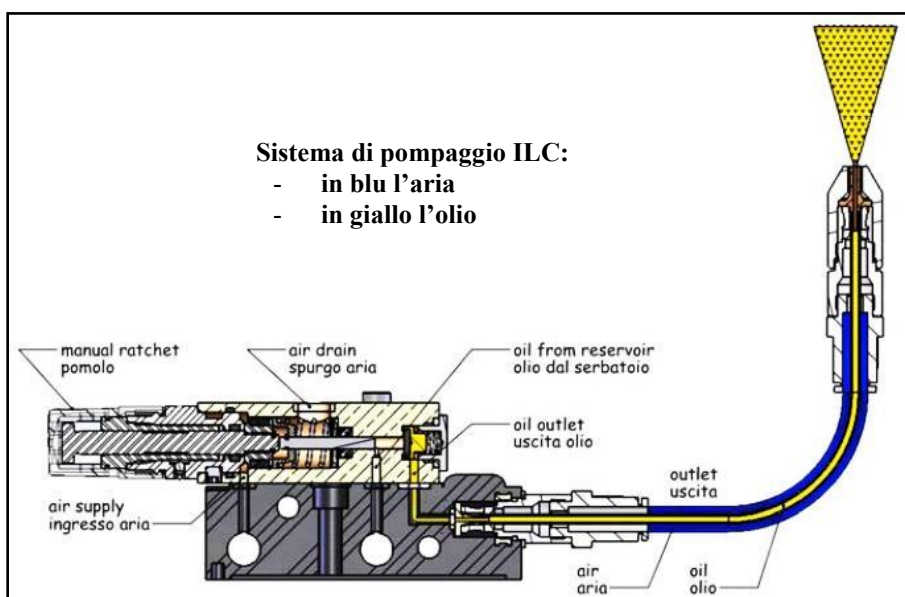


figura 3.34 – Spaccato del sistema di pompaggio

La micro pompa pneumatica dosa una piccolissima quantità di lubrificante che, attraverso il tubo capillare interno della tubazione coassiale, arriva all'ugello di spruzzo. Il lubrificante viene prelevato dall'aria compressa che lo polverizza e lo proietta verso il punto di contatto utensile/pezzo, formando un sottile rivestimento.

La pompa pneumatica a semplice effetto è azionata con una pressione dell'aria da 5-8 bar. Quando l'aria entra nel circuito, il pistone pneumatico esegue una corsa, azionando il pistoncino idraulico che invia una predeterminata quantità di lubrificante all'uscita. Quando l'aria viene tolta il

pistone torna indietro tramite una molla, riempiendo la camera nuovamente per una nuova corsa. La frequenza può essere regolata da 3 colpi al secondo a 1 minuto attraverso il generatore di frequenza e questi valori possono cambiare in base al tipo di lubrificante utilizzato e alla pressione dell'aria. La portata per corsa viene regolata, per mezzo del pomolo da 0 a 41 mm³: ruotare il pomolo in senso orario per ridurre la quantità d'olio e in senso antiorario per incrementarla.

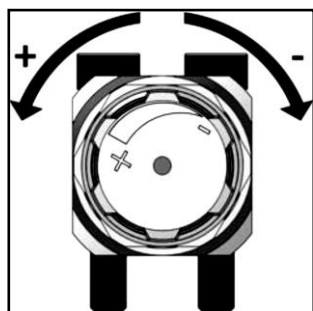


figura 3.35 – Pomolo di regolazione della portata

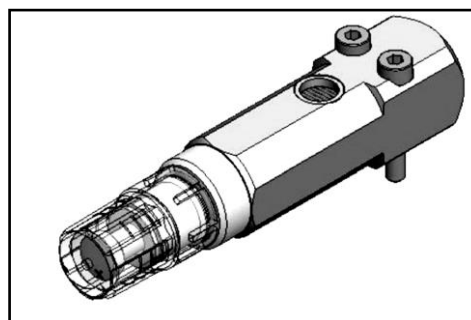


figura 3.36 – Pompa

Scatti (increments) [/]	Portata/ciclo (discharge/cycle) [mm ³]
Click 0	39,00
Click 1	37,23
Click 2	35,47
Click 3	33,70
Click
Click 21	1,89
Click 22	0,12
Click 23	0,00
Click
Click 27	0,00

tabella 3.1 – Portata in funzione dei click del pomolo

In figura 3.37 si ha una mappa del sistema a lubrificazione minimale

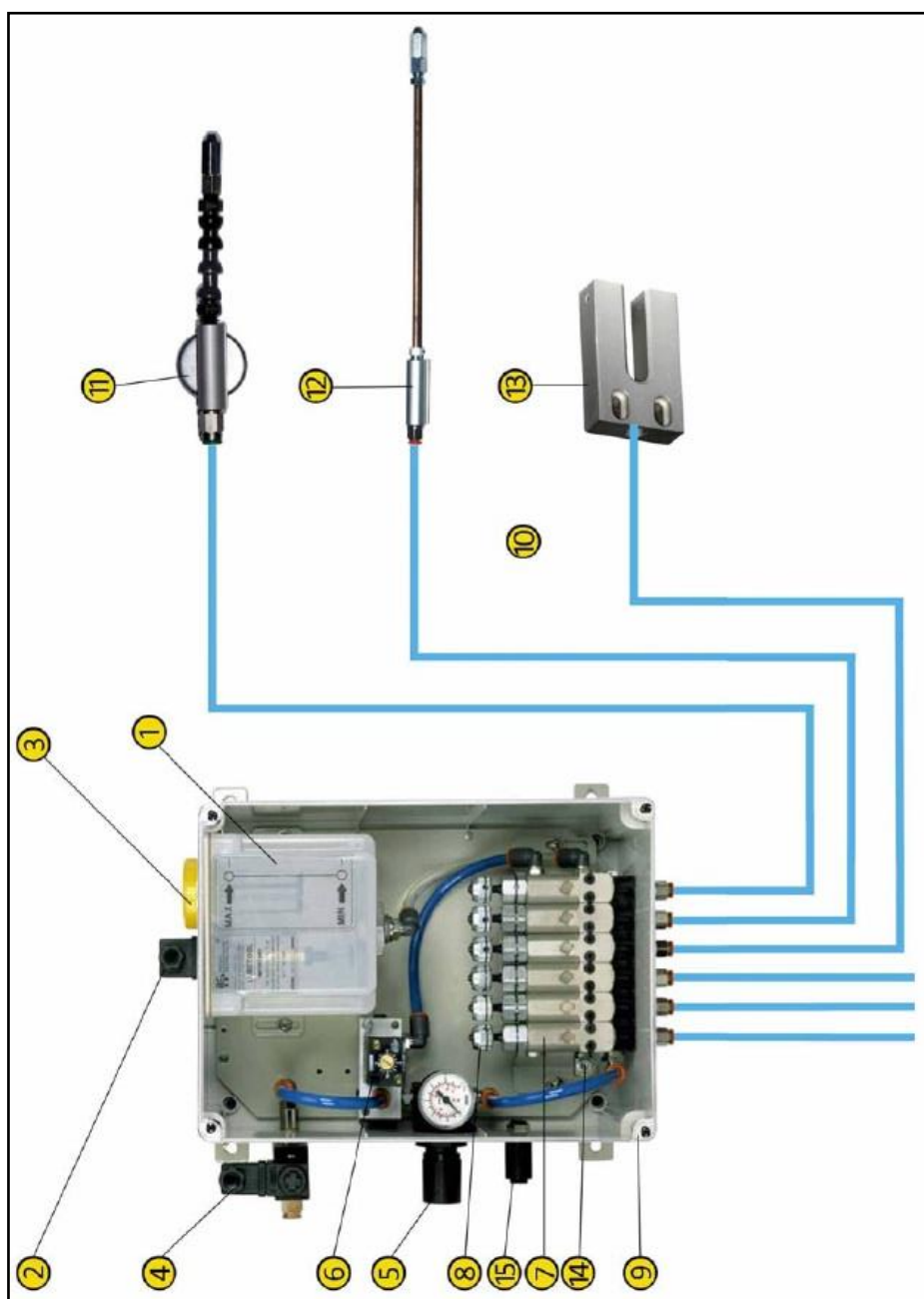


figura 3.37 – Schema riassuntivo per un sistema di lubrificazione ILC con pompe

Si elencano qui in seguito i numeri di figura 3.37 (possono esservi anche altre diverse configurazioni, più complesse, ma verrà proposta solo la corrente per questa tipologia di impianti):

1. Serbatoio: 1,2 – 2,2 – 3,6 l in nylon semitrasparente e resistente agli urti
2. Minimo livello elettrico: il contatto chiude quando il serbatoio si svuota
3. Tappo riempimento: per riempire di olio il serbatoio
4. Alimentazione d'aria: l'aria nel sistema viene inviata mediante una elettrovalvola con bobina da 24 V DC, 115 V AC o 230 V AC. L'aria dovrà avere una pressione non inferiore ai 5 bar e non superiore agli 8 bar. Per evitare che particelle o acqua entrino nel sistema è necessario utilizzare un filtro deumidificatore da 5 micron.
5. Riduttore con manometro: regola il flusso dell'aria da inviare agli ugelli. Ruotandolo in senso orario aumenta l'aria e la diminuisce ruotandolo in senso antiorario. L'aria dovrà avere una pressione non inferiore agli 0,5 bar e non superiore ai 3 bar (si suggerisce 1,5 bar).
6. Generatore di frequenza: questa valvola controlla la frequenza dei cicli della pompa. Per aumentare la frequenza dei cicli della pompa bisogna ruotare la vite di regolazione in senso antiorario.
7. Pompa pneumatica: ogni corsa fornisce una esatta quantità di lubrificante all'uscita
8. Regolazione della portata: i pomoli regolano la portata del lubrificante che viene fornita ad ogni corsa della pompa (regolabile da 0 a 41 mm³/corsa)
9. Contenitore: in plastica, resistente agli urti
10. Tubazioni di mandata coassiali: per inviare olio separato dall'aria agli ugelli
11. Ugello completo di loc-line con base magnetica
12. Ugello completo di tubazione rigida con base fissa
13. Ugello a sella
14. Drenaggio aria: per spurgare l'aria dall'olio
15. Filtro scarico aria

Le varianti di questi sistemi possono essere molte e si differenziano l'una dall'altra per esempio per un aumento o diminuzione del numero di pompe, per la grandezza di queste ultime... spesso il serbatoio in plastica viene sostituito con uno in metallo più resistente agli urti, vi possono essere differenti combinazioni dell'impianto con i terminali.

I terminali con ugello vengono forniti con una lunghezza di 300 mm e possono essere ridotti tagliando una parte della tubazione rigida o eliminando parti del loc-line.

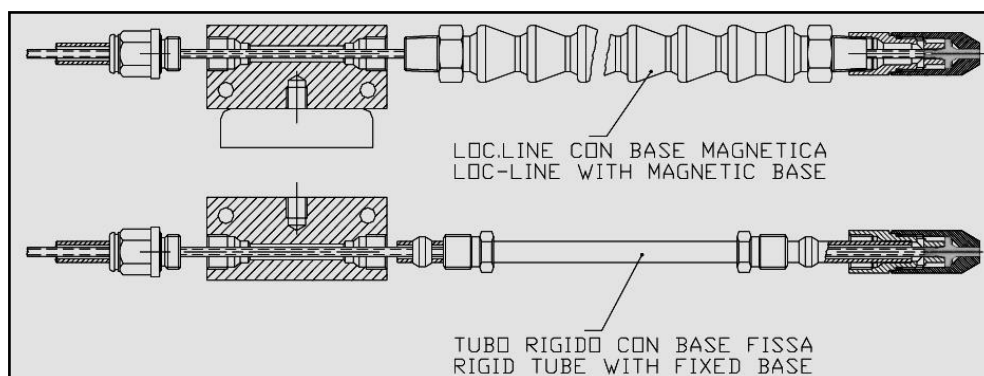


figura 3.38 – Ugelli utilizzati nei sistemi di lubrificazione ILC

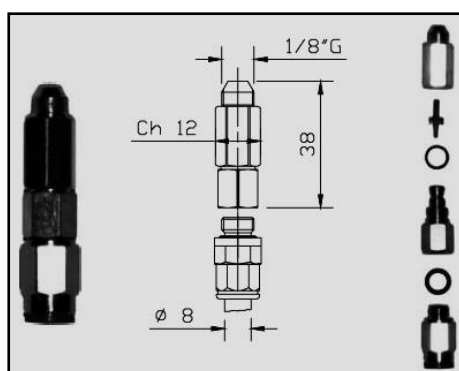


figura 3.39 – Parte finale dell'ugello

Nell'elenco dei componenti fatto in precedenza, è stato elencato anche un'altra tipologia di ugello, definito a *sella*.

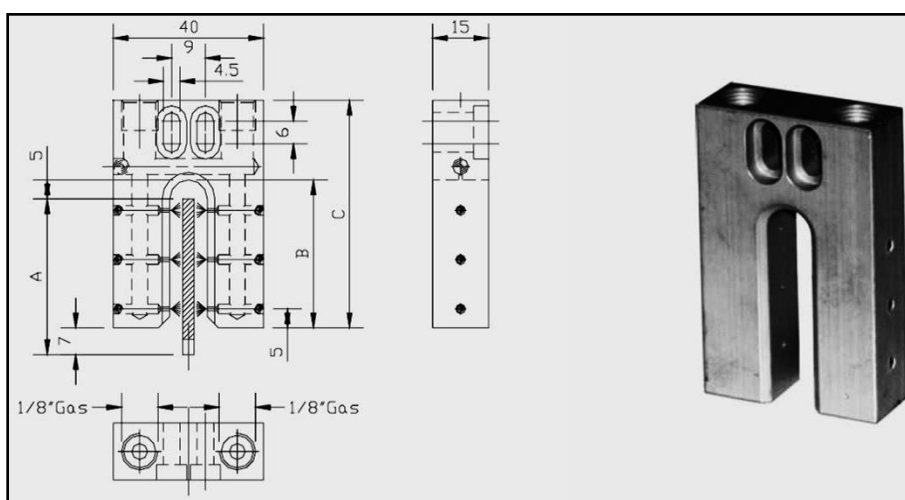


figura 3.40 – Ugello a sella con spaccato in 2D

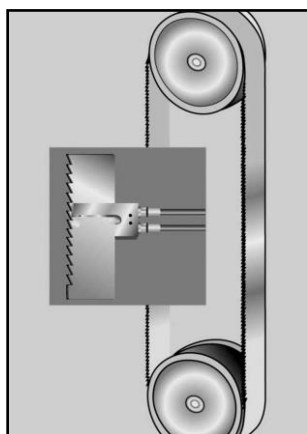


figura 3.41 – Applicazione con ugello a sella

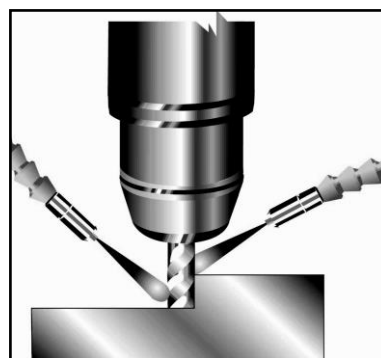


figura 3.42 – Applicazione con ugello completo di loc-line con attacco magnetico

3.2.1.6 IMPIANTI DI LUBRIFICAZIONE AZETA®

La Azeta® è una azienda specializzata nel campo della lubrificazione, essa propone sistemi molto simili ad ILC, dunque già configurati e pronti al funzionamento. Il sistema è composto da il serbatoio di lubrificante, pompe per spingere l'olio all'ugello con una frequenza scelta dall'operatore.

In questi impianti il serbatoio viene spesso posizionato in alto, quando ciò accade significa che il lubrificante arriva alle pompe per forza di gravità; se esso non fosse posizionato sopra il sistema di pompaggio, servirebbe un'ulteriore pompetta che spinga il liquido verso la zona di interesse.

I contro di tali impianti sono gli stessi della ILC: per quanto possano essere efficienti nella loro mansione, non sono così flessibili come viene richiesto dai nostri obiettivi elencati all'inizio. Un semplice cambio di lubrificante potrebbe comportare la pulizia totale dell'impianto, senza sapere che esso sia stato effettivamente pulito nel modo più preciso possibile. Anche le stesse particelle presenti nei lubrificanti scelti possono creare problemi nei minuti meccanismi delle pompe. Non avendo garanzia che un tale impianto potesse quindi rendere al meglio con le nostre applicazioni si è deciso di optare per un sistema più semplice ma non meno costoso quale l'ugello della Vortex® con a seguito tubazioni e attacchi.

Ecco comunque delle tipologie di impianti Azeta®, riportate nelle seguenti figure:



figura 3.43 – Impianto di lubrificazione di bassa pressione

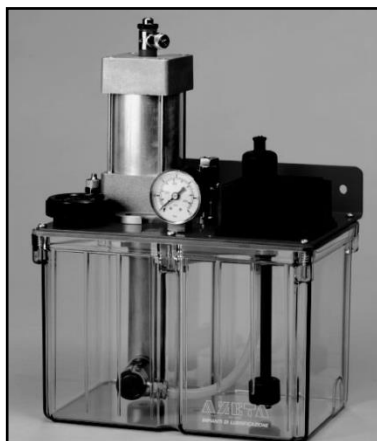


figura 3.44 – Impianto di lubrificazione di media pressione

Per l'immagine 3.44, si ha a che fare con un sistema a media pressione con: pompa pneumatica volumetrica a media pressione costituita da cilindro pneumatico a doppio effetto, pompa volumetrica, valvola di rilascio unidirezionale, manometro e pressostato controllo linea, ad azionamento con aria compressa e rapporto di pressione prestabilito teorico tra aria e olio; ad ogni azionamento corrisponde la quantità di lubrificante prestabilita.

Capacità serbatoio: 3 litri

Portata max: 25 cm³ per azionamento

Dimensioni: 215 x 150 x 310h mm

Per l'immagine 3.43 invece, si tratta di un sistema a bassa pressione: pompa volumetrica ad azionamento automatico elettrico-ciclico (con motoriduttore) e manuale (con pomello); ad ogni azionamento corrisponde la quantità di lubrificante prerogolata. L'erogazione del lubrificante avviene per mezzo di un pistone tuffante spinto da una molla meccanica, opportunamente dimensionata e precaricata.

Capacità serbatoio: 1,2 litri

Portata regolabile: da 1 a 3 cm³

Dimensioni: 132 x 99 x 228-255h mm

3.2.2 Riscaldamento lamine

Come si è potuto vedere dalle informazioni scritte nei differenti lubrificanti elencati al paragrafo precedente, c'è bisogno di preparare la superficie dell'alluminio per far attecchire il lubrificante.

Lubrificanti come il Dag5710, per creare uno strato di lubrificante sulla lamina hanno bisogno di una temperatura di 100-150 °C, dunque è doveroso inserire anche un sistema di riscaldamento con movimentazione a seguito.

Il corrente paragrafo elencherà alcune tipologie di riscaldatori considerati: alla fine si verranno a scegliere delle lampade alogene flessibili, efficienti e più economiche rispetto ad altre tipologie di riscaldamento, come forni tubolari.

Inizialmente si sono considerati due metodi per lo scambio di calore: conduzione ed irraggiamento; la convezione è stata scartata per i seguenti motivi: per prima cosa riscaldare dei lamierini per convezione forse era la tecnica migliore per quanto riguardava l'omogeneità di temperatura sul pezzo, ma utilizzare l'aria come agente convettivo non è efficiente perché essa ha un valore basso del coefficiente di convezione; immergendo le lamine in un liquido in movimento che potesse cedervi calore era una tecnica più rapida e sicuramente migliore dell'aria, ma ben si capisce che nel nostro caso non si possono bagnare le lamine in quanto potrebbero crearsi delle problematiche relative all'attecchirsi dei lubrificanti in un secondo momento.

Ci si è focalizzati quindi, sulla conduzione.

3.2.2.1 PIASTRA PER CONDUZIONE – CONSIGLIATA DA HT SPA

Il processo di conduzione permette una distribuzione di temperature migliore sulle lamine di alluminio rispetto all'irraggiamento. Il problema però è più complesso di quello che si pensi: nel nostro caso dopo il riscaldamento, le lamine e le due piastre riscaldate devono separarsi per non venir invase dalla nuvola di lubrificante e tale separazione potrebbe comportare un sistema di movimentazione complesso aumentando inutilmente i costi. Nel caso più semplice si potrebbe pensare a sfilare le due piastre dopo che la temperatura obiettivo sia stata raggiunta, lasciando così le lamine al centro della *zona lubrificazione*, oppure viceversa sfilare le lamine dalle due piastre dopo il riscaldamento.

La tecnologia che sta alla base di questo sistema di riscaldamento sono delle cartucce riscaldanti che generano calore al passaggio della corrente, il cosiddetto effetto Joule (si veda l'opportuna appendice sulla taratura della piastra della macchina di strip drawing test, dove in anch'essa risiedono delle cartucce scaldanti).

In figura 3.45 si può vedere una sezione della piastra proposta dall'HT SPA, con opportuni fori fatti per inserirvi le cartucce scaldanti.

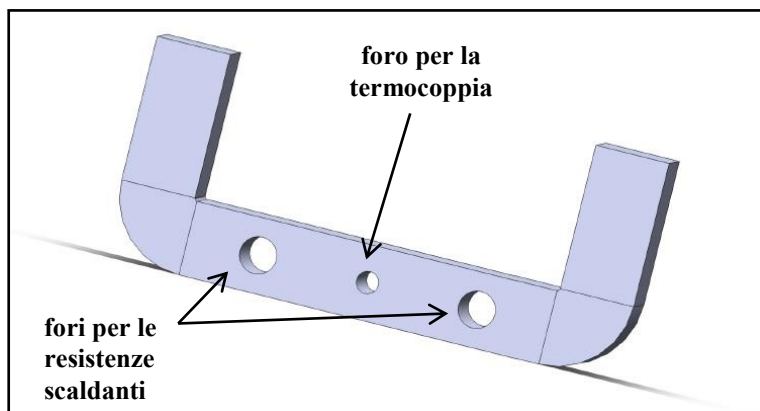


figura 3.45 – Sezione della piastra per il riscaldamento per conduzione delle lamine di alluminio proposta da HT SPA

In seguito a tale proposta si è pensato di realizzare un modello 3D di piastra per il riscaldamento a conduzione.

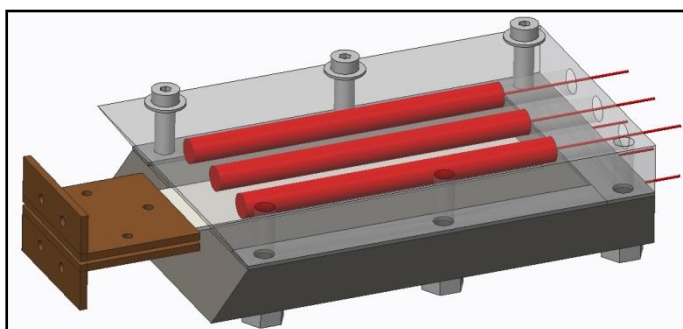


figura 3.46– Piastra realizzata con Creo® 1.0

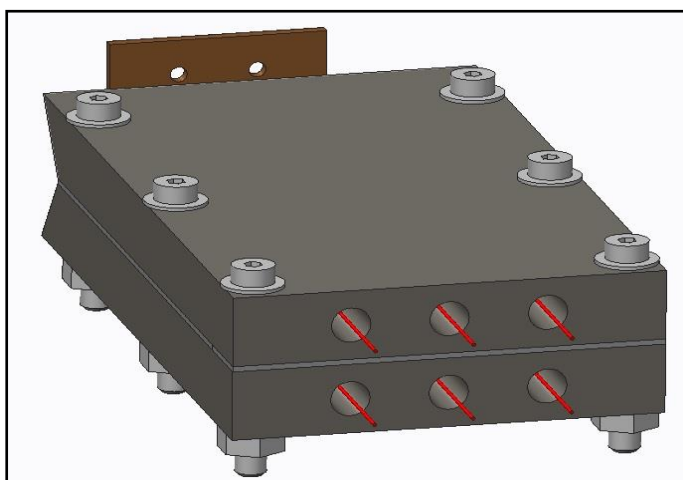


figura 3.47 – Fori su piastra, realizzata con Creo® 1.0

Il modello di piastra idealizzato è semplice concettualmente, ma come già ribadito in precedenza, è difficile da movimentare; è stato dunque scartato, ma non per questo messo da parte per eventuali sviluppi futuri della macchina. Il sistema che riscalda tramite conduzione, deve essere per lo più statico.

3.2.2.2 IRRADIATORI CERAMICI AD INFRAROSSI – ROTFIL

Sistemi di riscaldamento di questo tipo sono più flessibili dal punto di vista della maneggevolezza: sicuramente più leggeri della precedente piastra, ma meno precisi nel dare una temperatura omogenea sulla superficie delle lamine. Se si vuole dare una temperatura di 150 °C alla lamina di alluminio si dovrà portare la piastra ad almeno il doppio di questo valore, perché le perdite legate alle dispersioni di calore sono elevate; ecco perché è stato proposto nel secondo concept di figura 3.5, un involucro per limitare le perdite di calore.

Nel riscaldamento mediante irraggiamento l'energia termica viene trasmessa attraverso onde elettromagnetiche: i movimenti delle molecole dei corpi radianti generano le radiazioni calde.

Quando queste radiazioni incontrano un corpo, in parte si riflettono ed in parte vengono assorbite dal corpo stesso, il quale in questo modo tende a scaldarsi. In particolare si è trovato che le onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda da 314 μm a 0,79 μm , hanno effetti termici, ossia si degradano in calore all'interno dei materiali che li assorbono. Tali onde elettromagnetiche sono collocate tra la luce visibile e le onde Hertziane e sono denominate "raggi infrarossi".

Poiché il calore di un corpo è il risultato delle agitazioni degli atomi e delle molecole del corpo stesso, di conseguenza il corpo aumenta la propria temperatura quando l'agitazione delle particelle interne aumenta. Per aumentare l'agitazione è necessario un apporto di energia. Nel riscaldamento mediante un irradiatore infrarosso è necessario disporre di un corpo caldo e il sistema più pratico per ottenere lo scopo è quello di utilizzare come fonte energetica la corrente elettrica la quale, per l'effetto Joule, passando in un conduttore avente una data resistenza, provoca una dissipazione di potenza proporzionale alla resistenza e al quadrato della corrente ossia si trasforma in calore. Questo provoca una emissione di raggi infrarossi, cioè una emissione di onde elettromagnetiche che colpendo un altro corpo a minore temperatura, gli trasferiscono la loro energia,

provocando in esso una agitazione degli atomi e delle molecole. L'effetto che ne deriva è un aumento della temperatura di quest'ultimo corpo.



figura 3.48 – Irraggiatore ceramico bianco

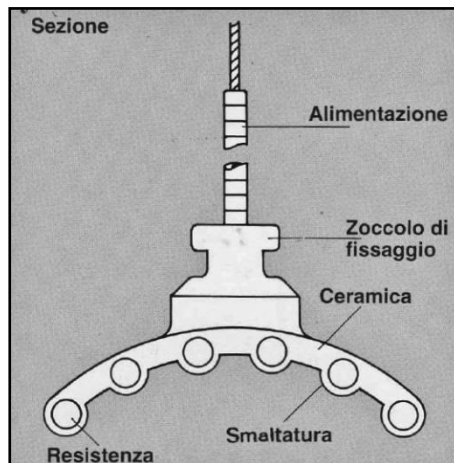


figura 3.49 – Spaccato di un irraggiatore ceramico curvo

La loro configurazione può essere sia piana che convessa, dove la seconda è vista come una miglioria rispetto alla prima in termini di concentrazione di calore, diretto verso un determinato obiettivo. Per indirizzare il calore in modo ancor più efficiente, si posiziona spesso un riflettore sul dorso di quest'ultimo. Un lato svantaggioso di queste piastre in ceramica, sono le dispersioni ai bordi: la lamina deve essere molto vicina alla piastra per rendere efficiente il riscaldamento: il centro della lamina non avrà mai un valore di temperatura uguale ai suoi bordi, possono esservi delle differenze di anche 30 °C, inaccettabili nel nostro caso in quanto causerebbero un attecchimento completamente differente del lubrificante sulle diverse zone, avendo dei conseguenti risultati poco precisi, in termini di coefficiente d'attrito.

Vengono in seguito elencati comunque alcuni vantaggi di questi sistemi di riscaldamento:

- raggiungono temperature superficiali di anche 750 °C e possono essere forniti già con una termocoppia installata
- spesso possono essere anche di colorazioni differenti dal bianco come marrone per esempio e questo perché, nel momento in cui iniziano la fase di riscaldamento, la colorazione della ceramica cambia dando un ulteriore feedback all'operatore (oltre alla termocoppia qualora vi fosse), sul fatto che essa sta andando su in temperatura, cosa che invece non succede con l'irraggiatore bianco

- non essendovi contatto il riscaldamento è pulito, e ciò comporta un non deterioramento della superficie smaltata del corpo in ceramica come invece potrebbe succedere nel caso di riscaldatori metalli ed a fascia

Possono essere utilizzati in diverse applicazioni:

- se si hanno materiali plastici:
 - termoformatura
 - termoformatura a vuoto
 - trattamento termico di parti estruse
 - essiccazione
 - laminazione
- con la carta
 - asciugatura rapida carta rivestita
 - attivazione adesivi
- nel settore della verniciatura
 - essiccazione
 - trattamento termico

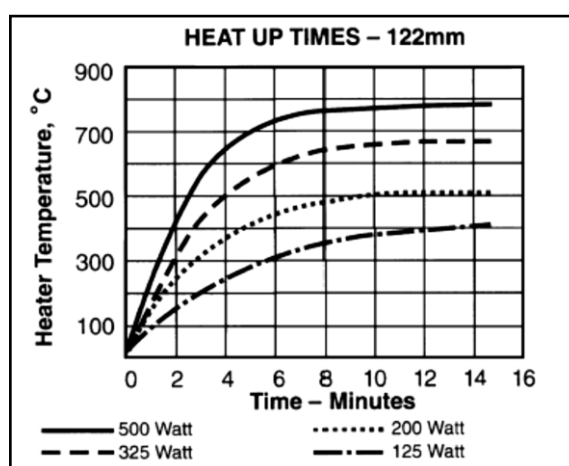


figura 3.50 – Temperatura obiettivo della piastra in funzione del tempo

Un altro punto di forza degli irraggiatori ad infrarossi è la loro velocità di riscaldamento: essi raggiungono la temperatura obiettivo in neanche 15 minuti, dunque un tempo limitato, che consente una gran flessibilità nel momento in cui si vanno a fare prove.

Il prezzo di un irradiatore ad infrarossi è relativamente basso, intorno a qualche decina di euro, paragonabile al prezzo delle resistenze viste nel caso della piastra per conduzione.

3.2.2.3 FORNI TUBOLARI E FORNI A MUFFOLA

Un terzo metodo di riscaldamento considerato è quello relativo ai forni tubolari: in tal caso il prezzo sale in modo esponenziale assestandosi sull'ordine di qualche migliaio di euro.

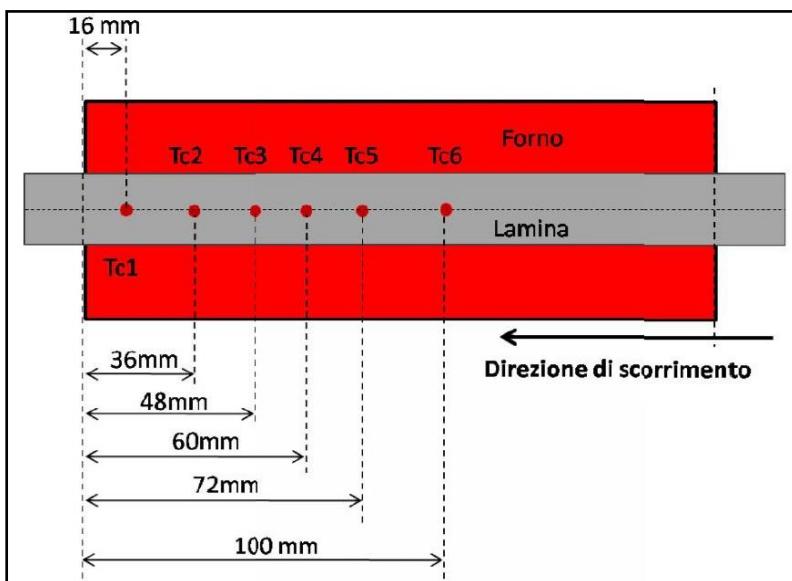


figura 3.51 – Posizionamento delle termocoppie, considerando un forno in fibra di ceramica Watlow come mostrato nelle figure 3.53-54-55

Facendo riferimento a dei risultati già presenti su tesi precedenti, si può affermare come l'omogeneità di temperatura delle lamine non sia la migliore.

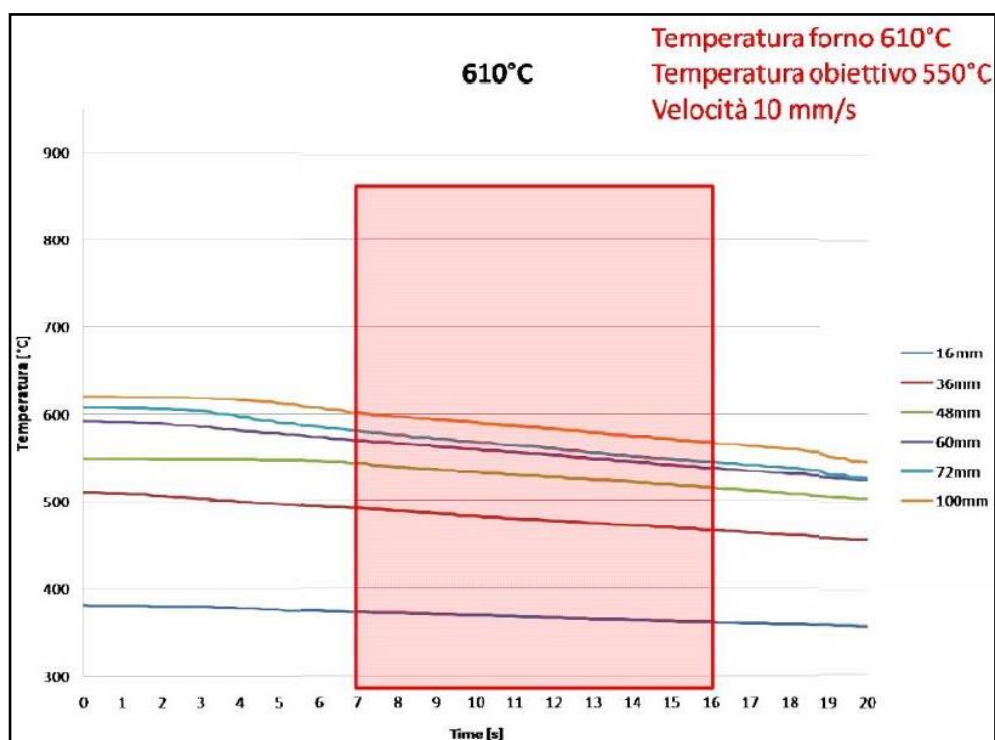


figura 3.52 – Andamento della temperatura all'interno del forno in funzione del tempo, per il forno Watlow delle figure 3.53-54-55

Il rettangolo rosso di figura 3.52 è la sezione del forno tubolare: vengono così posizionate delle termocoppie per monitorare la temperatura della lamiera al suo interno e si vede come vi sia una variazione di anche 100 °C tra la Tc2 e Tc6 (ovvero in 60 mm appena). Se ho bisogno di 150 °C perché il DAG® 5710 possa attecchire alla lamina, una variazione di 100 °C non può essere ammessa. Tutto ciò purtroppo è dovuto alle dispersioni: nel momento in cui si inserisce la lamina, un lato del forno deve rimanere aperto per poter manipolarla e ciò causa perdite di temperatura. La configurazione con forno tubolare è già stata descritta nel capitolo relativo allo sviluppo del modello 3D, nel quale viene rappresentato in molti modelli/concept.

Una tipologia sono i riscaldatori in fibra di ceramica i quali integrano il cavo di riscaldamento ICA (Iron-Chrome-Aluminum) con l'isolamento in fibra di ceramica. Sono atti ad applicazioni radianti senza contatti ad alta temperatura e l'isolamento in fibra di ceramica isola le alte temperature all'interno della camera riscaldata, dall'esterno. I riscaldatori sono a massa bassa, a riscaldamento veloce, con valori di isolamento elevati ed elementi di riscaldamento autosupportati.



figura 3.53 – Forno tubolare in fibra di ceramica prodotto da Watlow®

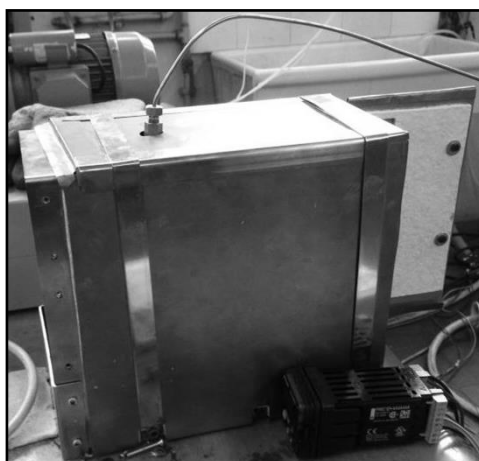


figura 3.54 – Forno tubolare Watlow® con regolatore di temperatura (in basso) e cavo per termocoppia posizionato sopra

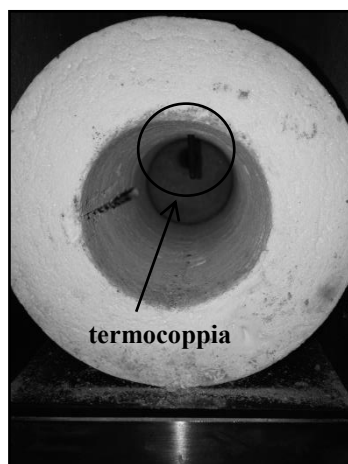


figura 3.55 – Particolare della fibra in ceramica del forno tubolare Watlow®

Da figura 3.55 si può vedere la termocoppia che controlla la temperatura interna del forno, questi forni vengono forniti su richiesta con tale sensore già installato.

Con questo sistema di riscaldamento si possono raggiungere anche i 1200 °C con forno chiuso e le applicazioni per le quali si utilizzano sono elencate qui in seguito:

- fornaci ad alta temperatura
- fusione, mantenimento e trasferimento di metalli
- trattamento dei semiconduttori
- trattamento di cavi, ceramica e vetro
- strumenti analitici
- letti fluidizzati

Da una configurazione semplice come quella appena vista, si passa a sistemi ben più costosi e complessi, con regolazioni PID della temperatura, molto più precise.



figura 3.56 – Forno Carbolite® con regolazione PID ad una sola zona

Tali forni vengono realizzati con misure standard, che nel caso nostro sono fin troppo grandi, vista la dimensione di della lamiera da riscaldare (183x35x1,5 mm); facendoli su misura inoltre il prezzo schizzerebbe ancora più in alto. Per scegliere la grandezza che facesse più al caso nostro si è cercato di vedere quale fosse la dimensione vincolante, in tal caso la larghezza della lamina, 35 mm, la quale doveva essere più piccola del diametro interno del forno per poterci entrare. Un sistema di questo tipo preclude che vi sia una adeguata movimentazione: essa dovrà entrare nel forno fino a circa metà della sua lunghezza senza subire flessioni causate dal calore stesso. Ciò spiega il motivo di forni tubolari molto sviluppati assialmente nel terzo e quarto modello di macchina 3D: si era costretti a sottostare a misure standard dettate dall'azienda.

I forni Carbolite® raggiungono anche i 1800 °C di temperatura operante e vengono utilizzati per applicazioni industriali nel settore ceramico, metallurgico, semiconduttori, nel settore della sintesi o crescita di cristalli e nel settore di ricerca delle scienze dei materiali. Gli elementi riscaldanti metallici sono disposti in spire attorno e integrati al tubo di lavoro per mezzo di una pasta cementizia di fissaggio. La termocoppia si trova in una sede posta parallelamente tra tubo di lavoro ed elemento riscaldante. Lo strumento può essere posizionato in verticale per mezzo di un idoneo dispositivo verticale di sostegno. L'azienda garantisce una buona omogeneità dell'oggetto da scaldare al suo interno ed il riscaldamento avviene per una zona lunga il 90% della lunghezza totale del forno.

Tipologie concettualmente simili di forni, sono quelli a muffola, i quali hanno bisogno di essere completamente chiusi per poter riscaldare gli oggetti al suo interno. Diventa così dispersivo il fatto di estrarre le lamiere dal suo interno per posizionarle nella zona lubrificazione, perché esse nel frattempo si raffredderebbero. C'è bisogno di una movimentazione più veloce e più semplice in modo da ridurre le dispersioni di calore; se si riscaldasse la lamina nel forno a 150 °C nel momento in cui esce e si posiziona nella zona lubrificazione, a che temperatura sarebbe? Si avrebbero dei risultati poco precisi, perché in realtà non si saprebbe con precisione la temperatura delle lamine durante la lubrificazione, essa potrebbe essere calata di 10 o 15 °C, in funzione della velocità di spostamento, dell'effetto convettivo dell'aria stessa che scambiando calore porterebbe per l'appunto ad un abbassamento della temperatura delle lamine.



figura 3.57 – Forno a muffola Carbolite®
(temperatura massima = 1200 °C)



figura 3.58 – Forno a muffola Carbolite®
(temperatura massima = 1600 °C)

La temperatura massima è diversa nei due modelli a causa della loro configurazione: nel forno di sinistra la camera da mantenere calda è ben più grande e dunque dispersiva rispetto a forno a muffola di destra.

3.2.2.4 LAMPADE ALOGENE – CONSIGLIATE DA LASER LAMPS

Ultimo metodo di riscaldamento preso in considerazione è quello con lampade alogene: tale metodo sarà quello scelto per la macchina reale.

La lampadina alogena è una particolare lampada ad incandescenza, ma ci sono alcune fondamentali caratteristiche che la differenziano da quelle comuni. Al gas contenuto nel bulbo viene aggiunto iodio, kripton e, a

volte, xeno per permettere il riscaldamento del filamento fino a oltre 3000 K, in modo da aumentare l'efficienza luminosa e spostare verso l'alto la temperatura di colore.

Nelle alogene il tungsteno che evapora a causa della temperatura elevata reagisce con il gas formando un alogenuro di tungsteno. Successivamente il composto, entrando in contatto con il filamento incandescente si decompone e rideposita il tungsteno sul filamento stesso realizzando un ciclo, il ciclo alogeno. In questo modo la durata di vita di una lampada alogena può essere almeno doppia di una lampadina ad incandescenza normale, sebbene il filamento sia molto più caldo. Poiché il bulbo, per permettere la reazione chimica tra iodio e tungsteno, deve avere una temperatura non inferiore a 250 °C, viene utilizzato un vetro speciale (quarzo) ad alta resistenza.



figura 3.59 – Lampada alogena

I limiti di questi dispositivi sono riconducibili all'emissione di raggi ultravioletti, dannosi per l'occhio umano e capaci di provocare cancro della pelle e causa di sbiadimento degli oggetti illuminati. Il fenomeno è in parte dovuto all'uso del quarzo al posto del vetro per la costruzione del bulbo. Il quarzo è infatti più resistente alle alte temperature ma trasparente ai raggi ultravioletti. La schermatura di queste radiazioni avviene ponendo davanti alla lampada una lastra di vetro, che ne riduce il passaggio del solo 15% e che serve anche come protezione in caso di esplosione accidentale dell'ampolla. Recentemente nella composizione delle ampole sono state introdotte sostanze in grado di bloccare i raggi ultravioletti e dei pigmenti fluorescenti che li convertono in luce visibile, aumentandone l'efficienza complessiva.

Per ridurre il flusso di raggi infrarossi verso oggetti danneggiati da un eccessivo riscaldamento, esistono speciali lampade alogene dicromatiche, dotate

di uno schermo posteriore che riflette solamente la luce visibile lasciando disperdere i raggi infrarossi.

Il rendimento luminoso di una lampada alogena, grazie alla luce più bianca rispetto ad una lampadina ad incandescenza tradizionale, è del 50-100% superiore rispetto a questa, mentre la vita utile varia da 2000 a 6000 ore. Essendo basate sullo stesso principio delle comuni lampade ad incandescenza, le lampade alogene sono spesso progettate con l'obiettivo di poter essere usate come sorgente luminosa ad intensità variabile, e pertanto sono la scelta naturale per i punti luce controllati da un variatore o dimmer. Il bulbo delle lampadine alogene non deve essere toccato con le dita, poiché i depositi di grasso lasciati sul medesimo carbonizzerebbero alla prima accensione a causa della temperatura elevata, annerendo il cristallo e provocandone al limite anche la rottura.

Il deterioramento del vetro di quarzo è causato dall'azione catalitica di questi residui, che innescano un processo di devettrificazione. Il vetro di quarzo è infatti meno stabile dei vetri ordinari. In caso di contatto pulire la superficie con alcool.

In particolare avendo scelto le lampade a raggi infrarossi, o irraggiatori IR, se comparate con le tradizionali forme di riscaldamento come ad esempio l'aria calda, emettono una quantità maggiore di energia per unità di superficie e tale energia può essere focalizzata, concentrata, diretta e riflessa in maniera del tutto simile alla luce. Scegliere questo tipo di tecnologia permette di avere enormi benefici tra cui:

- velocità di riscaldamento del prodotto: le lampade IR in quarzo necessitano di tempi di riscaldamento e raffreddamento brevi in quanto esse iniziano ad operare al massimo regime entro pochi secondi dall'accensione, riducendo i tempi ed ottimizzando l'omogeneità di riscaldamento del prodotto;
- risparmio energetico e minore generazione di calore per l'ambiente circostante: dati i brevi tempi di accensione e possibile riscaldare e quindi accendere gli emettitori solo quando e dove è necessario;
- facilità di controllo delle lampade: le lampade possono essere controllate tramite controlli a treni d'onda o possono lavorare in modalità ON/OFF;
- assenza di contatto con il prodotto e assenza di contaminazione dell'ambiente circostante: lavorando tramite radiazione, non è necessario un contatto diretto con il pezzo da riscaldare;

La tecnologia ad infrarossi è una tecnologia che consente il riscaldamento tramite irraggiamento. L'energia termica è generata da un emettitore e il riscaldamento è generato dall'impatto della radiazione sulla superficie del corpo che vuole essere riscaldato. Una volta riscaldata la superficie il riscaldamento avviene all'interno del corpo per conduzione. La radiazione infrarossa (IR) è quell'emissione elettromagnetica che possiede una lunghezza d'onda che va da 1 μm a 100 μm e che è compresa tra lo spettro della luce visibile e le microonde.

Nei corpi che ne vengono investiti, la radiazione infrarossa si manifesta appunto come calore. Tutti i corpi emettono raggi infrarossi in funzione del materiale di cui sono costituiti e della temperatura a cui si trovano. In campo industriale, per le sue caratteristiche di trasmissione di calore per irraggiamento, l'infrarosso viene utilizzato in diversi trattamenti termici superficiali con lunghezze d'onda che vanno per lo più da 1 a 10 μm . La radiazione infrarossa viene classificata a seconda della lunghezza d'onda di emissione come:

- onda corta (SW): da 1 a 2 μm
- onda media (MW): da 2 a 4 μm
- onda lunga (LW): da 4 a 10 μm

A queste lunghezze d'onda corrispondono radiazioni dal debole contenuto energetico inferiore a $4 \cdot 10^{-19}$ J che svolgono solo una funzione termica senza andare ad interferire con la struttura molecolare della materia. Delle tre, la radiazione ad onda lunga (LWIR) è la più vantaggiosa in quanto ha una maggiore penetrabilità, una bassa potenza specifica che consente di trattare materiali più delicati e una più alta efficienza in quanto con quelle lunghezze d'onda i materiali mostrano una maggiore capacità di assorbimento. Gli emettitori sono i principali componenti della tecnologia e il principio di funzionamento consiste nel riscaldare un filamento metallico ad una opportuna temperatura attraverso il passaggio di una opportuna corrente elettrica. Le caratteristiche degli emettitori dipendono dalla frequenza della radiazione emessa.

Gli emettitori ad onda corta e media lavorano a temperature più elevate oltre i 2000 °C e quindi devono essere posti a distanze superiori rispetto agli oggetti trattati. Le densità di potenza arrivano oltre ai 400 kW/m².

Gli emettitori a onda lunga invece lavorando a temperature più basse, che vanno dai 100 °C ai 450 °C, non sono incandescenti e possono essere

posizionati in prossimità del prodotto da trattare dando la possibilità di evitare sprechi di energia o di un eccessivo carico termico che potrebbe anche danneggiare il prodotto.

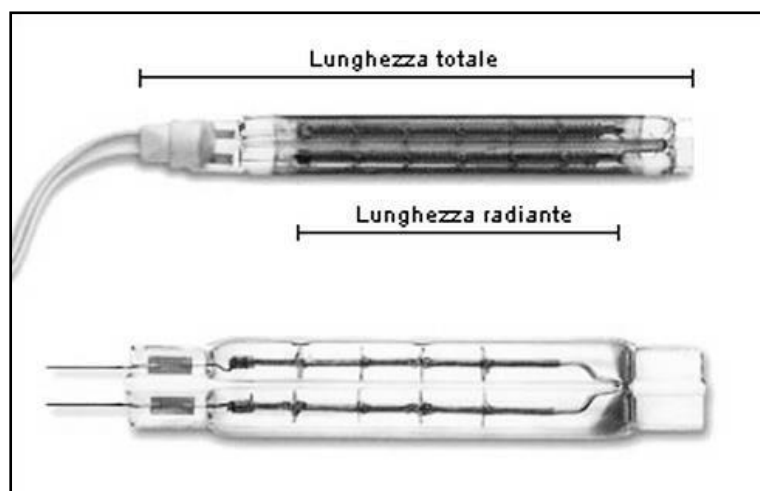


figura 3.60 – Lampade alogene ad onde corte della Laser Lamps® (senza protezione)

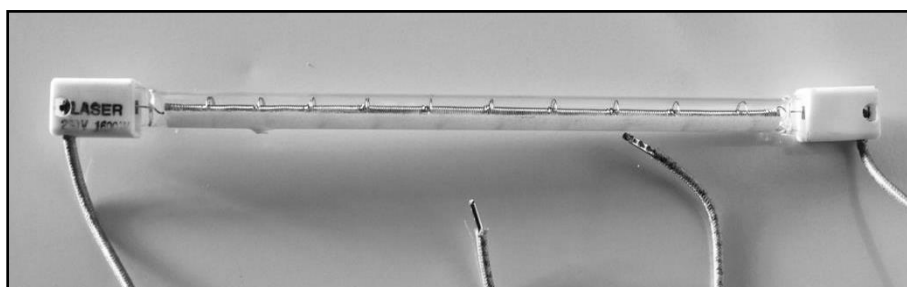


figura 3.61 – Lampada alogena IR utilizzata nella macchina reale, prodotta da Laser Lamps®

Nel nostro caso verrà utilizzata:

- una lampada alogena ad infrarossi ad onda corta
- con tubo al quarzo di diametro 10 mm,
- lunghezza totale della lampada pari a 225 mm (LT)
- lunghezza riscaldata pari a 155 mm (RT)
- riflettore bianco
- cavi che escono da entrambi i lati
- 230V e di potenza pari a 1500W.

3.2.3 Sistema di movimentazione

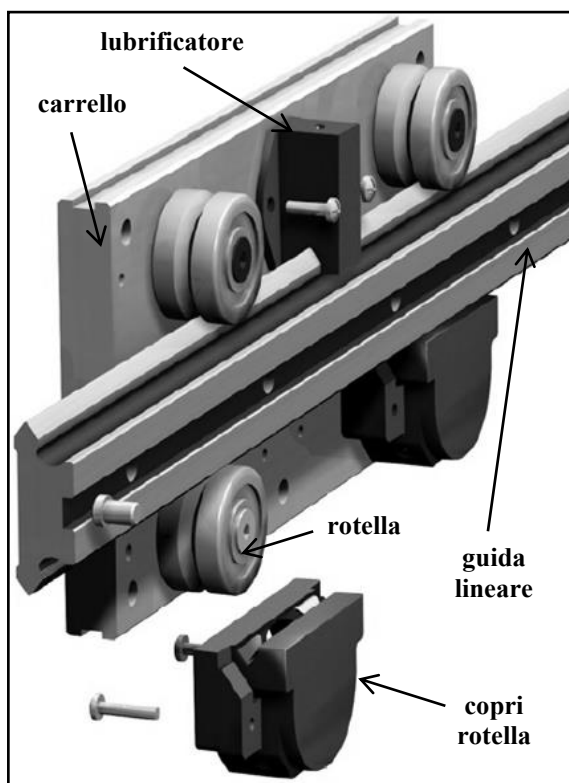


figura 3.62 – Carrello con guida

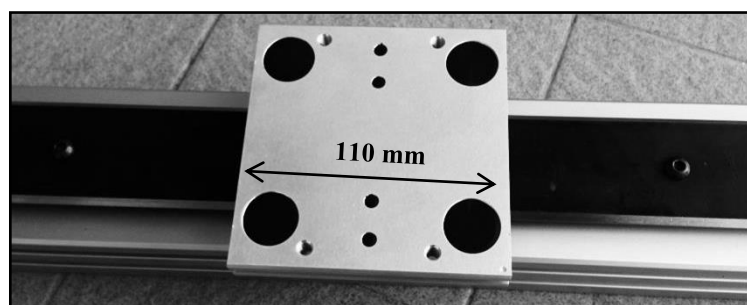


figura 3.63 – Carrello Hepco con guida

Il sistema di movimentazione è basato su un accoppiamento carrello-guida come quello di figura 3.62. Le configurazioni offerte dal gruppo Hepco sono molteplici: nel nostro caso si è scelto un carrello con dimensioni 110 x 112 mm, dove la lunghezza (110 mm) è un vincolo.

È d'obbligo infatti che il carrello non superi tale valore vista la corsa limitata, data dalla struttura già esistente e dalla quale si sono tratte le dimensioni della macchina.

Il carrello in questione inoltre è provvisto di due lubrificatori che rendono fluido il rotolamento delle rotelle sulla guida lineare: la configurazione del

carrello è detta amovibile perché esso può essere sfilato anche lateralmente dalla guida allentando le viti posizionate sulle rotelle stesse. Tale accortezza viene data qualora non vi fosse lo spazio per poter sfilare il carrello longitudinalmente alla direzione della guida; quest'ultima è stata richiesta volutamente con una precisione P2, dove con tale termine si va a sottolineare l'accuratezza della lavorazione, che deve essere massima soprattutto nella zona di contatto.

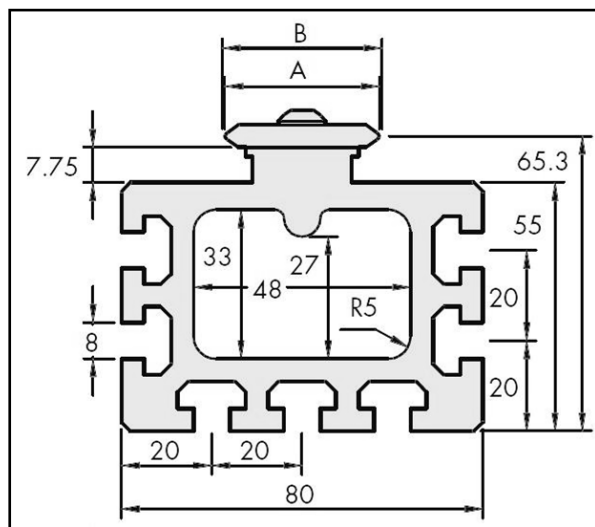


figura 3.64 – Sezione del profilo di supporto

3.2.4 Regolatore di pressione dell'aria

Per il funzionamento della macchina c'è bisogno di inserire un regolatore di pressione, che appunto agisca sulla tubazione dell'aria, passando nel nostro caso, da una pressione della rete di 9 bar ad una pressione ottimale di lavorazione dell'ugello, che si aggira intorno ai 4-5 bar.

Viene posizionata a monte del sistema, subito in sequenza all'uscita della rete dell'aria.



figura 3.65 – Regolatore di pressione dell'aria con manometro

3.2.5 Elettrovalvola

L'elettrovalvola è l'unico componente che funge da anello congiungente tra la parte pneumatica e quella elettrica. Essa oltre ad essere stata scelta con requisiti tali da poter funzionare con la rete elettrica del laboratorio, deve potersi interfacciare con un sistema di controllo, il quale va a regolare la durata dello spruzzo. Siccome uno degli obiettivi del nostro studio è quello, sì di lubrificare, ma di farlo in modo sensato senza causare spreco di lubrificante, si dovrà collegare la valvola ad un microcontrollore.

Essendo molto semplice la fase di regolazione, si è deciso di utilizzare Arduino®, un sistema open source provvisto di parte hardware e software, che permette tramite il proprio linguaggio di programmazione di regolare i tempi di funzionamento dell'impianto. In appendice si può vedere un esempio di programma utilizzato nella macchina per la lubrificazione.

È sufficiente una valvola a due vie con connettore elettrico.



figura 3.66 – elettrovalvola a 220V a bassissimo assorbimento e con connettore elettrico

3.2.6 Valvola di non ritorno

La valvola di non ritorno fa passare il liquido, solo in una direzione. Essa viene posta nel punto in cui il lubrificante viene aspirato dal serbatoio. Per spiegar meglio: durante la prima prova di spruzzata la tubazione è ancora vuota e per riempirla si impiega un tempo; per far in modo che nella seconda prova non vi sia il tempo di riempimento della tubazione si inserisce la valvola di non ritorno la quale blocca il liquido evitando così di farlo scivolare per gravità nel serbatoio.



figura 3.67 – Valvole di non ritorno

Al suo interno vi è una sferetta che lascia aperto il passaggio solo in una direzione; il liquido passa attraverso un filtro, in evidenza in figura 3.67.

3.2.7 Altri componenti

Nelle seguenti figure si possono vedere altri componenti dell'impianto come le tubazioni, gli adattatori.



figura 3.68 – Tubazioni ed adattatori

Vista la semplicità del meccanismo di aspirazione degli ugelli Vortex®, che lavorano per effetto Venturi, il serbatoio non deve essere in pressione, può essere usato un semplice contenitore aperto.

3.2.8 Arduino® ed interfaccia grafica

Per poter dettare i tempi di spruzzata c'è bisogno di un temporizzatore che lasci passare l'aria comandata dall'elettrovalvola solo quando è necessario. Ci si è orientati su un dispositivo più complesso rispetto a un normale temporizzatore, ritenuto troppo scarno e poco flessibile ad eventuali modifiche future; la scelta ricade su un sistema Arduino, più una interfaccia grafica utilizzabile dall'utente.

Il concetto è quello di collegare Arduino al computer, che con il suo monitor ci permetterà di modificare i parametri di spruzzata; servirà una interfaccia grafica nella quale inserire i tempi e dovrà essere provvista, per esempio, di una finestra con un campo dove inserire dei caratteri numerici e dei pulsanti virtuali, che ne confermino l'azione.

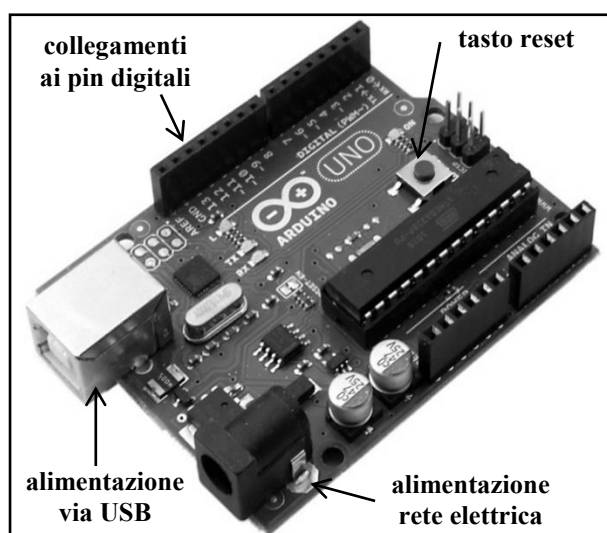


figura 3.69 – Arduino Uno, dispositivo che permette, se collegato all'elettrovalvola, di regolare il tempo di spruzzata



figura 3.70 – Temporizzatore completo di monitor LCD

Arduino viene programmato in linguaggio C++, ed interfacciarlo al computer non è difficile perché viene riconosciuto immediatamente tramite porta USB (si specifica che il sistema operativo sul quale si sta lavorando è Windows 7, ma la compatibilità su tutte le piattaforme Microsoft).

Si è pensato di creare l'interfaccia grafica con Python 2.7 in quanto ritenuto semplice sintetico nel suo linguaggio di programmazione.

3.2.8.1 PROGRAMMARE ARDUINO

Dopo aver installato il software Arduino ci si deve focalizzare su quale sia l'obiettivo dell'esperimento: nel nostro caso si vuole che l'ugello nebulizzatore spruzzi in determinati istanti, intervallati da pause di diverse lunghezze per dar modo allo strato di lubrificante di asciugarsi; si viene a creare un stringa di caratteri dove ognuna delle postazioni è sede o del tempo di spruzzo o della pausa.

Spruzzata1 [mms]	Pausa [mms]	Spruzzata2 [mms]	Pausa [mms]	Spruzzata3 [mms]
1000	2000	2000	1000	2000

figura 3.71 – Schema dell’interfaccia grafica da realizzare

Le postazioni dispari sono i tempi di spruzzo, le pari sono riferite alle pause.

Rilasciando degli impulsi molto piccoli, dell’ordine dei milli volt, l’Arduino non potrebbe mai comandare una elettrovalvola come quella scelta, che invece lavora a 220 V in corrente alternata; perciò si inserirà un relè che possa rendere compatibile il collegamento Arduino-valvola.

Nel programmare il nostro dispositivo ci si è aiutati con un semplice led che ci ha permesso di ricevere un feedback per controllare che si stesse lavorando nella direzione giusta. La libreria di Arduino prevede già dei programmi di base, e tra questi si è scelto di modificare quello relativo al semplice lampeggio di un led, rendendo più complessa la struttura del programma, inserendo come da obiettivo tempi diversi sia in lampeggio/spruzzata, sia con led spento/pausa.

Una volta verificato che non vi siano errori nel programma, lo si carica su Arduino e si passa alla fase successiva: l’interfaccia grafica.

3.2.8.2 INTERFACCIA GRAFICA REALIZZATA CON PYTHON

Per realizzare una finestra di lavoro il più semplice possibile si è deciso di utilizzare Python 2.7; insieme al software vero e proprio sarà doveroso installare altri due pacchetti:

- “*pacchetto seriale*”, il quale permette il riconoscimento dell’Arduino da parte del computer; senza questo non sarebbe possibile comandare la valvola
- “*pacchetto immagine*”, il quale permette di inserire immagini o icone per rendere più piacevole la finestra di lavoro

Python, permette la realizzazione di etichette, campi di testo, bottoni; come primo approccio si è deciso di realizzare una semplice finestra con un solo tasto e un solo campo di testo, proprio come mostra figura 3.72.

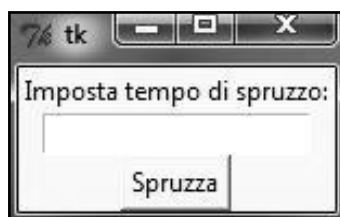


figura 3.72 – finestra dove inserire i tempi di spruzzo

Solo successivamente si è complicata la configurazione della finestra, introducendo più campi di testo ed etichette (variabili in ogni momento dall'utente modificando il linguaggio di programmazione proposto in appendice C); si è deciso inoltre di introdurre una finestra di conferma nel momento in cui si vada a cliccare il tasto “Spruzza”, per evitare click indesiderati da parte dell'utente.

Per rendere più amichevole la finestra di lavoro sono state inserite delle immagini; il tutto può essere apprezzato nella seguente figura.

La struttura della finestra, da parte di Python 2.7 viene gestita come una tabella, dove le etichette e i campi di testo sono inseriti in ogni cella diversa; nell'editor di testo si può vedere come, per ogni etichetta venga data la coordinata in termini di righe e colonne.

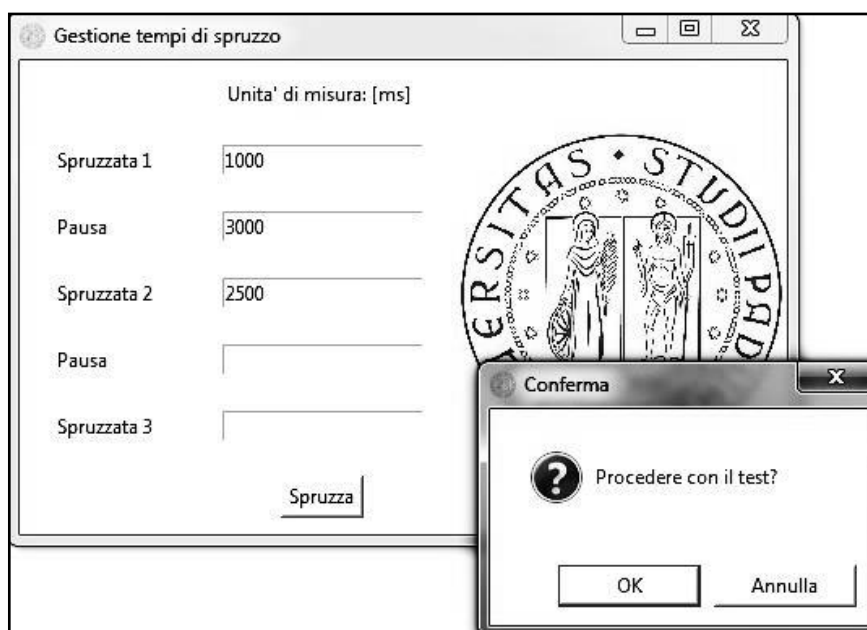


figura 3.73 – Finestra di gestione dei tempi di spruzzo

3.2.9 Schema generale dell'impianto

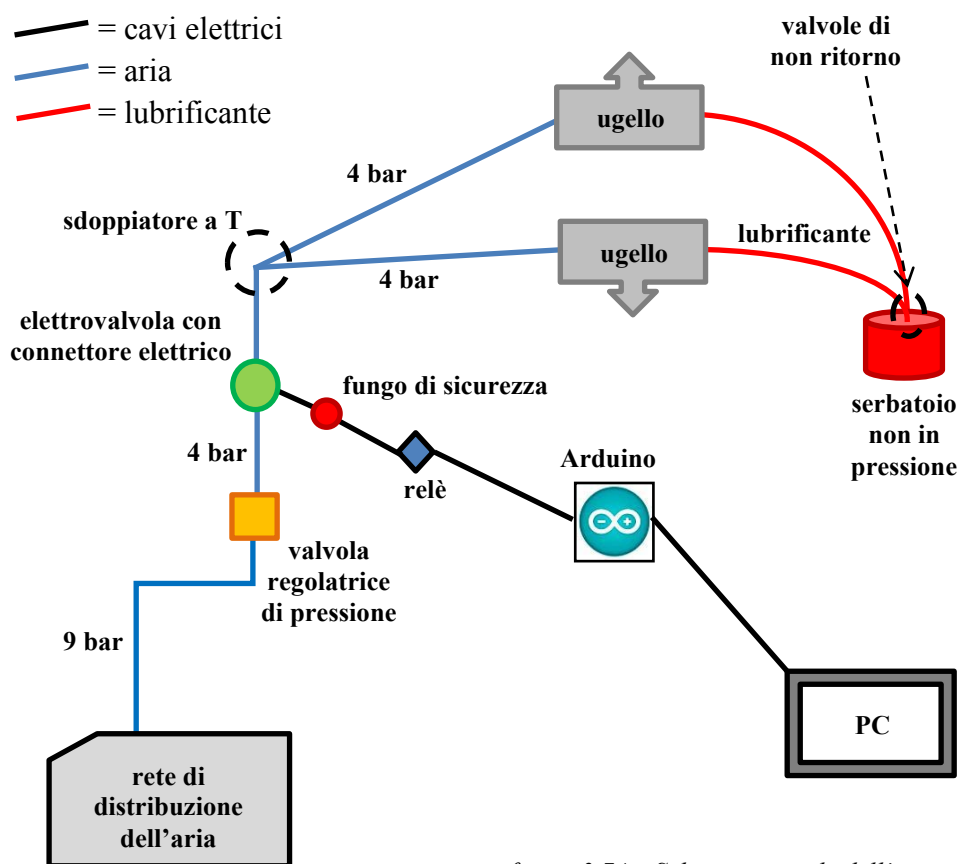


figura 3.74 – Schema generale dell'impianto

I componenti descritti al paragrafo 3.2, sono riportati tutti nello schema di figura 3.74; per agire sulla quantità di lubrificante da spruzzare, bisogna regolare la portata d'aria, e ciò giustifica il perché vi siano presenti più dispositivi, ad interrompere la tubazione, solo sul lato aria.

L'aria compressa viene quindi pescata dalla rete di distribuzione a 9 bar, deve essere ridotta in termini di pressione fino a 4 bar, perché solo nell'intorno di questo valore, l'ugello Vortex® lavora in modo ottimale (vedere il sotto paragrafo relativo a tali dispositivi 3.2.1.4).

Il lubrificante viene di conseguenza aspirato per depressione (effetto Venturi), dal serbatoio a pressione atmosferica, sino all'ugello, dove si miscela in una piccola camera in prossimità dell'uscita del terminale.

Senza un apparato di regolazione l'impianto funzionerebbe di continuo, perciò è doveroso inserire anche la parte elettrica, che ha come compito quello di interrompere il flusso d'aria passante quando necessario.

Il cervello dell'impianto è l'Arduino®, il quale permette di essere gestito tramite il monitor ed interfaccia grafica del computer; essendo l'elettrovalvola con connettore elettrico, un dispositivo normalmente aperto, essa non lascia passare l'aria compressa finché non si dà corrente al sistema, in condizioni di riposo quindi non passa corrente e non passa aria nelle tubazioni.

Per collegare l'Arduino® all'elettrovalvola, bisogna inserire un relè che porti sullo stesso piano i valori di tensione dei due dispositivi; nel caso incorrano dei problemi di qualsiasi genere, blocco del computer, collegamenti elettrici saltati, perdite di lubrificante, il sistema va immediatamente bloccato, ecco il motivo del posizionamento del fungo di sicurezza (normalmente chiuso, quindi a riposo lascia passare corrente), che se schiacciato apre il circuito bloccando il flusso di corrente.

I componenti restanti, già descritti nei sotto paragrafi precedenti, completano l'impianto: ugelli, valvole di non ritorno per far sì che la tubazione del lubrificante sia sempre piena, sdoppiatori a T, serbatoio, le tubazioni e gli adattatori per interfacciare i dispositivi alla rete.

3.2.10 Confronto tra macchina reale e modello 3D

Il modello 3D finito viene qui in seguito descritto, con l'ausilio di alcune immagini che ne aiutano la comprensione; i componenti inoltre sono realizzati in materiali diversi:

- il 65-70 % in lega di alluminio in quanto non costretti a portare carichi lavoro gravosi nel complesso della struttura; inoltre i componenti realizzati in tale lega sono anche quelli più lontani dal calore delle lampade per evitare flessioni dovute al calore avendo l'alluminio un punto di fusione più basso rispetto a quello del ferro o acciaio; la lavorazione di tale lega permette una velocizzazione dei tempi di produzione e un abbassamento del prezzo totale della macchina, andando quindi incontro ad uno degli obiettivi proposti al sotto paragrafo 3.1.1
- il 30-35 % dei componenti è in Fe360 (il sistema di bloccaggio delle lamine e delle lampade stesse), ovvero quei pezzi che risultano essere vicini alla fonte di calore e perciò doveroso che essi mantengano le loro caratteristiche strutturali, di rigidità

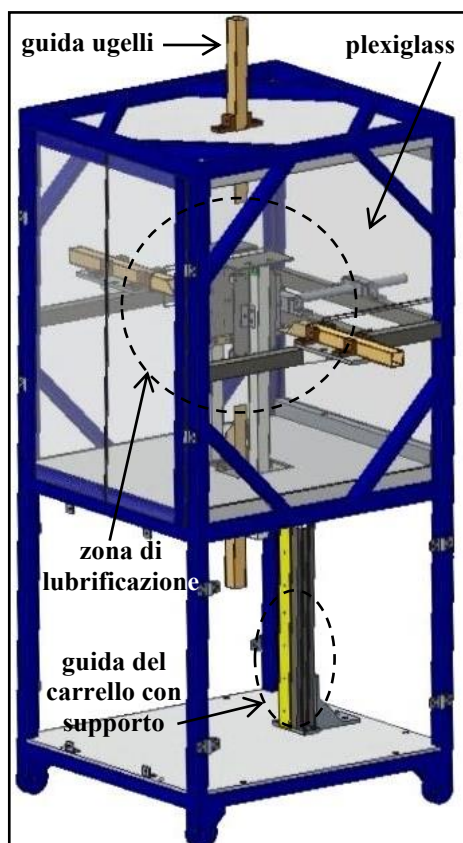


figura 3.75 – Apparato di prova in 3D per la lubrificazione

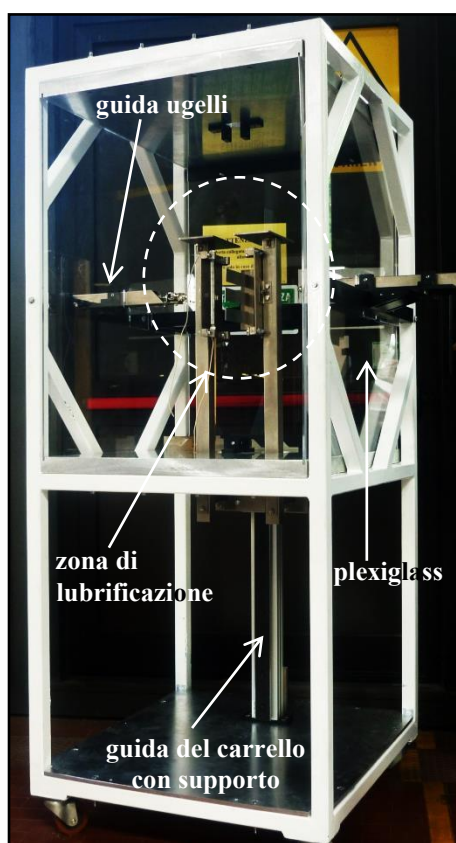


figura 3.76 – Apparato di prova reale per la lubrificazione

La configurazione finale e completa (a parte le lamiere che copriranno la parte bassa della macchina, omesse per rendere più visibile la guida del carrello), è mostrata in figura 3.75 e 3.76, dove la struttura viene divisa in due parti:

- superiore, dove avviene la lubrificazione ed il riscaldamento delle lamine, detta anche *zona di lubrificazione*
- inferiore, dove invece è presente il supporto con annessa guida, per la il sistema di movimentazione basa sul carrello precedentemente descritto

È esplicitiva la coppia di immagini 3.77 e 3.78 dove si mostra il funzionamento dell'apparato di prova costruito per le prove di lubrificazione: in figura 3.77 le lampade alogene sono in fase di riscaldamento, punto morto superiore del carrello; nella figura 3.78 invece, le lampade sono fuori dalla zona di lubrificazione, e i coperchi soprastanti vanno a tappare le cavità sul piastrone di mezzeria in modo tale da isolare le due parti della struttura.

La configurazione è stata pensata in tal modo perché vi sia una maggiore pulizia della zona di lavoro, la quale per l'appunto è completamente isolata.

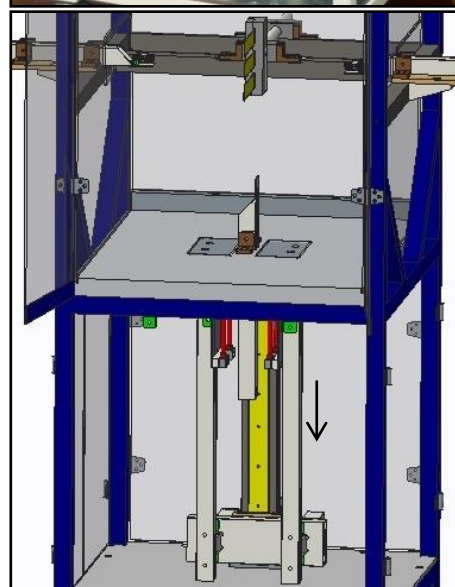
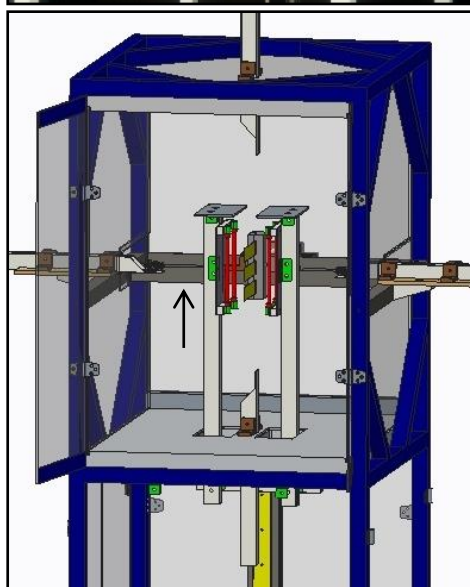
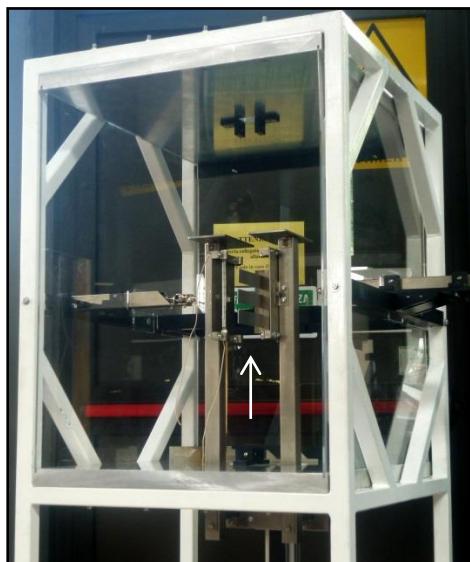


figura 3.77 – Macchina con carrello al punto morto superiore

figura 3.78 – Macchina con carrello al punto morto inferiore

La zona di lubrificazione è racchiusa in un involucro di pannelli di plexiglass trasparenti; si considera infatti di dover pulire tali pannelli una volta al giorno onde evitare incrostazioni, e perciò i piastroni sono dotati di guide che ne permettano lo scorrimento per velocizzare lo smontaggio.

Nelle seguenti figure sono stati riportati alcuni particolari, relativi alla configurazione finale; ora si vuole mostrare anche il sistema, più da vicino, con le lamine e le lampade già applicate alla distanza studiata.

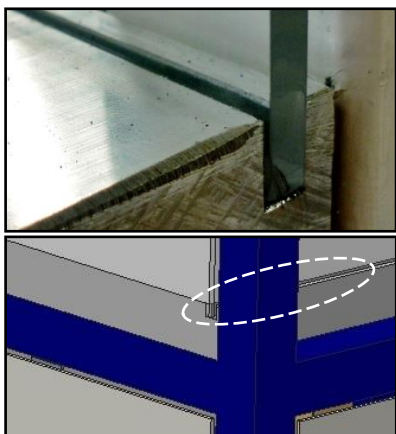


figura 3.79 – Particolare della rotaia dove scorre il plexiglass

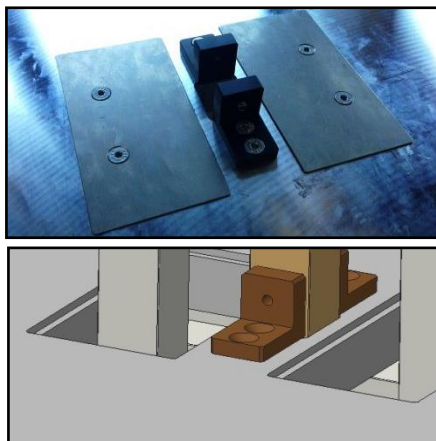


figura 3.80 – Particolare delle cave ricavate sul piastrone di mezzeria della struttura

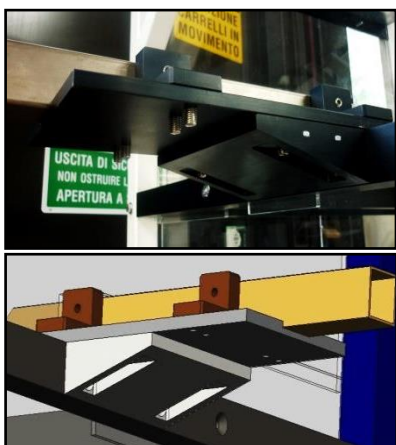


figura 3.81 – Sistema d'appoggio per la guida ugelli

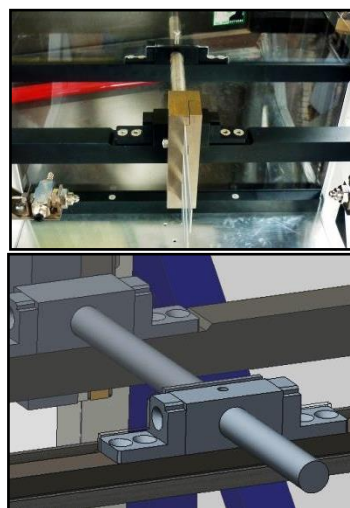


figura 3.82 – Profilo cilindrico orienta lamine con guide

Il posizionamento delle lampade è flessibile, può essere variato sia lungo la lunghezza della lamina, che in direzione ortogonale ad essa, dunque avvicinando o allontanando la lampada; può essere anche posizionata una sola di esse per lato.



figura 3.83 – Sistema di fissaggio dell'ugello al profilo di guida

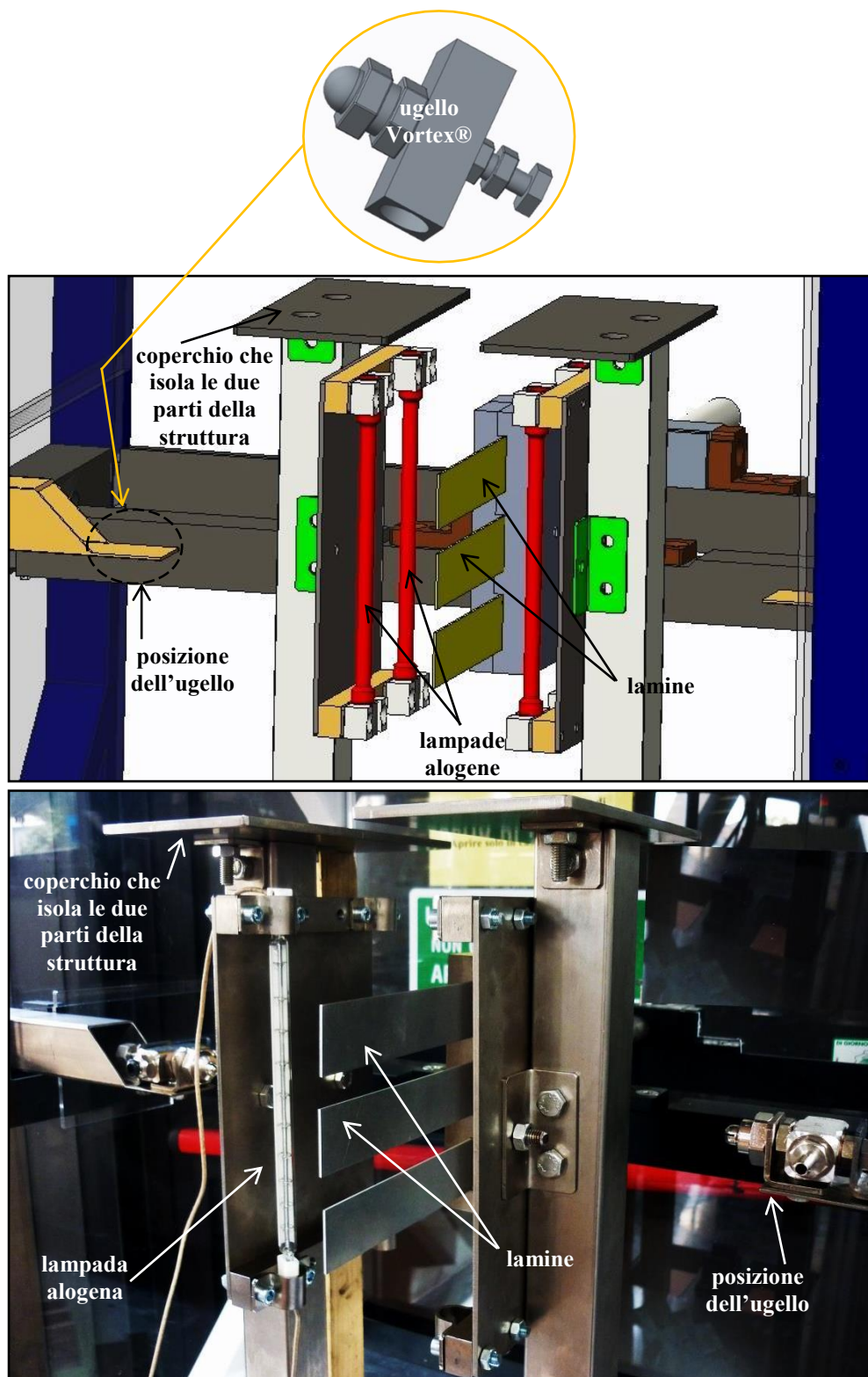


figura 3.84 – Sistema di riscaldamento con lampade alogene e lamine già posizionate

La spruzzata può avvenire sia dai due lati della macchina o dal basso/alto, logicamente le lamine vanno posizionate di conseguenza.

Un'altra variazione studiata è stata quella di proporre anche un sistema blocca lamine che permettesse la spruzzata a 45 gradi; per capire meglio quanto finora detto si vedano i due differenti sistemi di bloccaggio con inclinazioni diverse. Tali regolazioni vengono promuoovere uno degli obiettivi proposti al sotto paragrafo 3.1.1, ovvero quello relativo alla flessibilità dell'apparato di prova.

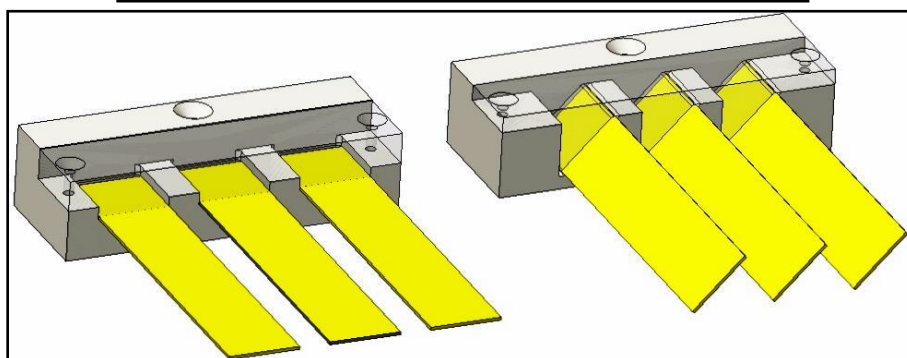
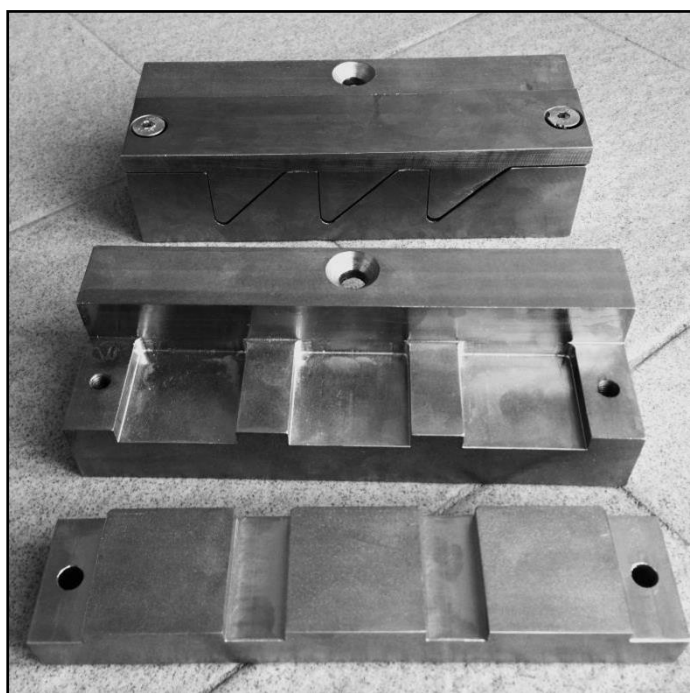


figura 3.85 – Sistema di bloccaggio lamine con orientamento a 90 gradi ed a 45 gradi

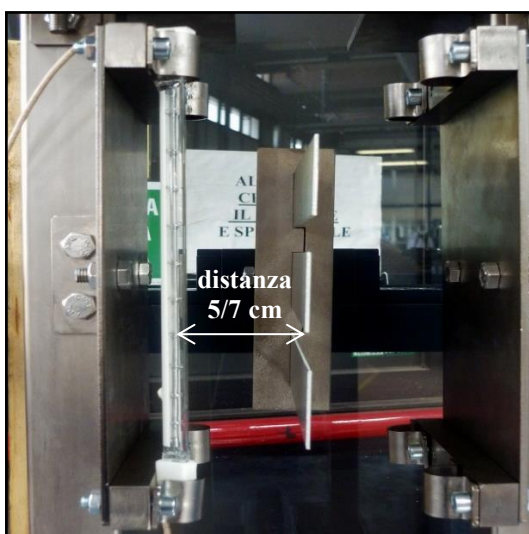


figura 3.86 – Distanza tra lamina e lampada

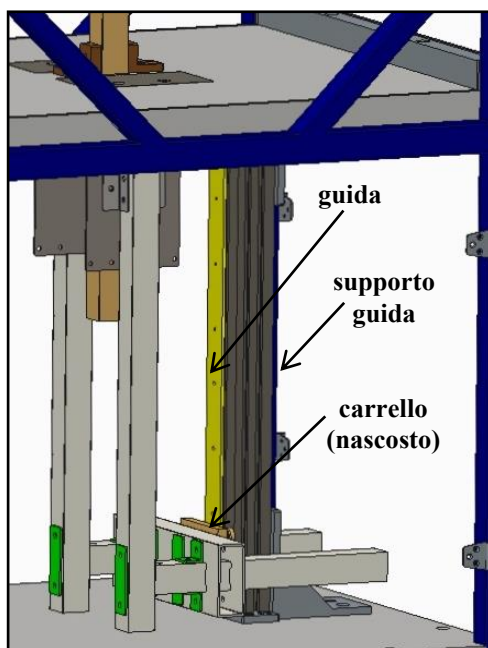


figura 3.87 – Sistema di movimentazione in 3D con guida e carello

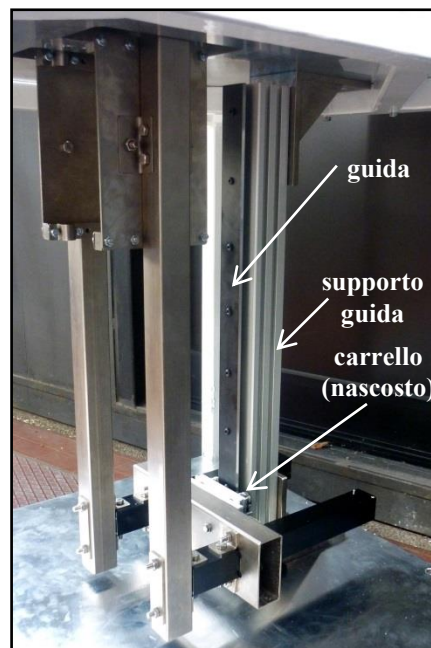


figura 3.88 – Sistema di movimentazione reale con guida e carello

Il sistema di movimentazione è stato studiato inizialmente per un utilizzo manuale, successivamente vi potranno essere delle evoluzioni per rendere il tutto più automatico; è stato realizzato un sistema di incastro tra profilati in alluminio che permette una presa agevole da parte dell'operatore; il tutto inoltre è contenuto nella parte inferiore della macchina, la quale viene ricoperta da lamiere per renderla più piacevole a livello estetico.

Si veda in seguito la sequenza di immagini che mostrano i montaggio dei componenti dalla struttura iniziale sino alla configurazione finale.



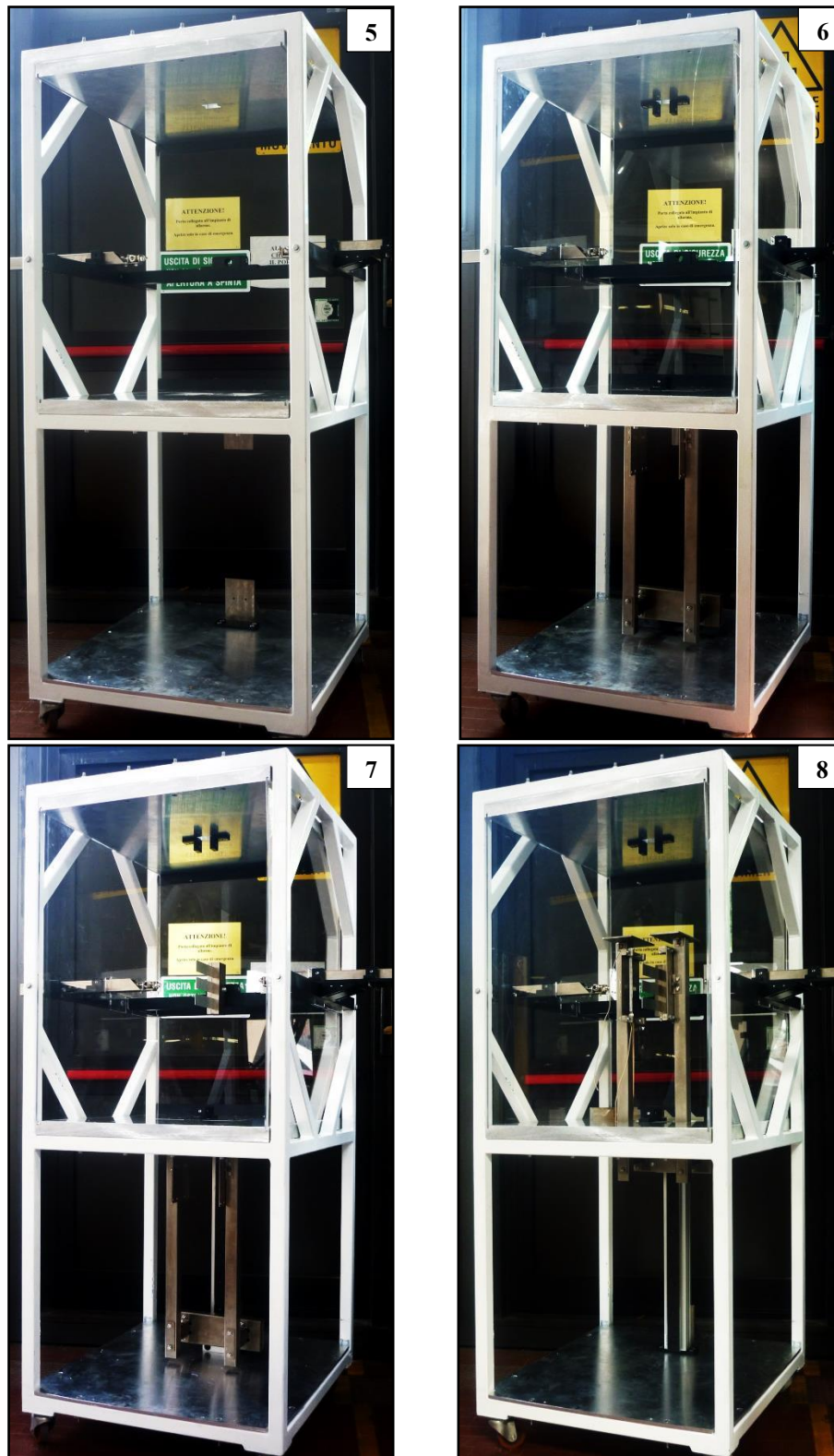


figure 3.89 (1-8) – Mostrano la fase di montaggio dell'intero apparato di prova, considerando sia la zona più alta, di lubrificazione, che la parte bassa della macchina



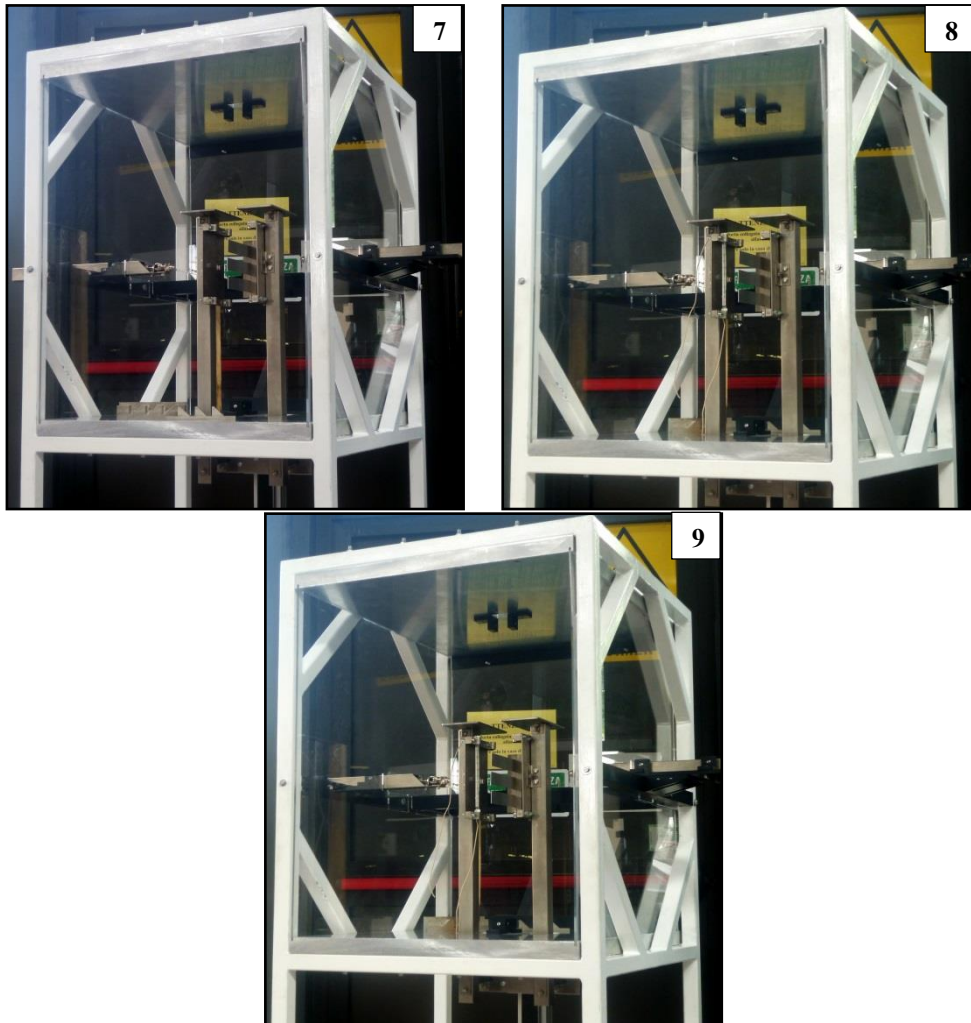


figure 3.90 (1-9) – Mostrano la fase di montaggio per la sola parte alta, dell'apparato di prova per il riscaldamento e la lubrificazione dei provini di alluminio

3.3 MACCHINA DI STRIP DRAWING TEST

Per analizzare il coefficiente d'attrito, che nel nostro caso è anche definito come attrito di Coulomb, c'è bisogno di posizionare le lamine lubrificate sulla macchina di strip la quale permette in modo immediato di ricavare μ come un semplice rapporto di forze.

3.3.1 Funzionamento

Il meccanismo che permette di ricavare il coefficiente di attrito è semplice: grazie alla presenza di due celle di carico, una che misura la forza tangenziale e una quella normale, viene monitorata la forza con la quale si preme lo stampo sulla lamina.

Lo stampo è di due diverse geometrie:

- semicilindrico, quindi contatto di linea
- piano, quindi contatto di superficie

Per capire con quanta pressione si preme lo stampo bisognerà seguire due percorsi diversi a seconda della forma geometrica dello stampo che si viene ad utilizzare.

Considerando lo stampo piano, la trattazione risulta molto semplice, perché vi è un'area ed una forza ben definite, quindi la pressione non sarà altro che il rapporto tra queste due variabili.

$$N \overline{A}$$

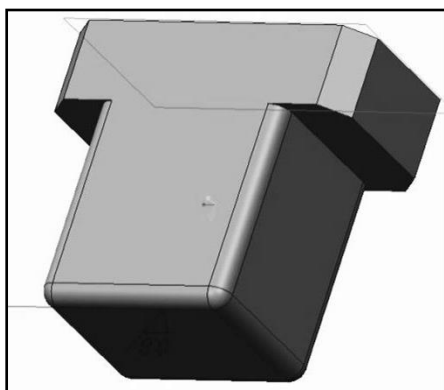


figura 3.91 – Stampo piano per le prove d'attrito

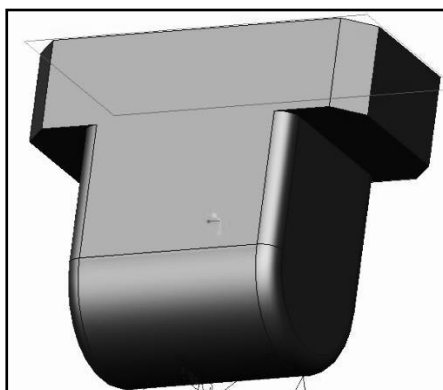


figura 3.92 – Stampo semicilindrico per le prove d'attrito

Con lo stampo semicilindrico invece bisogna fare più attenzione perché vi è un contatto nominale di linea, che però nella realtà diventa anch'esso una superficie in base alla pressione tra i due corpi e al materiale di cui sono

composti. Per analizzare tale contatto quindi bisogna introdurre la teoria Hertziana del contatto.

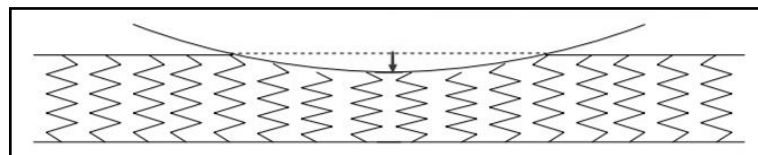


figura 3.93 – Contatto reale tra un corpo piano (lamina di alluminio) ed un corpo semicilindrico considerato di lunghezza infinita (stampo semicilindrico in AISI H11)

Da figura 3.93 si vede come sotto pressione vi sia il cedimento del materiale che presenta un modulo di rigidezza elastica inferiore (in tal caso la lamina di alluminio); quindi si viene a formare una zona di contatto con uno sviluppo parabolico dell'andamento delle pressioni (vedi figura 3.94).

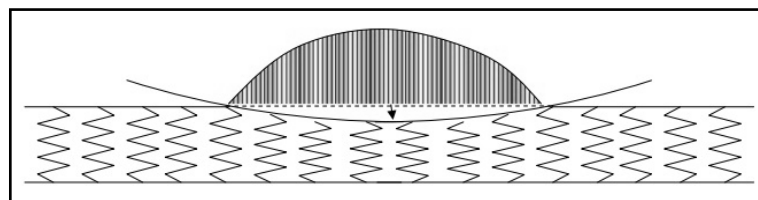


figura 3.94 – Andamento delle pressioni di contatto tra due corpi

$$N_{\max} = \frac{2}{a} \sqrt{\frac{4}{L}} N_{\text{med}} \quad \text{MPa}$$

$$N_{\text{med}} = \frac{2}{a} \sqrt{\frac{4}{L}} N_{\text{med}} \quad \text{MPa}$$

Le equazioni precedenti mostrano il valore della pressione normale media e massima sulla lamina, dove le variabili inserite stanno a rappresentare:

- L = lunghezza dello stampo [mm]
- a = semilarghezza del contatto tra i due corpi [mm]
- N = pressione normale di contatto tra i due corpi [MPa]

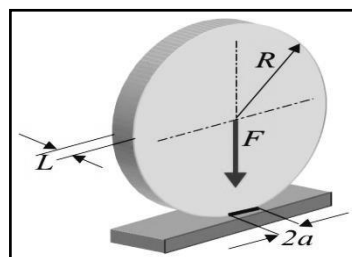


figura 3.95 – Variabili presenti nell'equazione che esprime la pressione normale media e massima

La semilarghezza di contatto “a” però cambia a seconda del materiale e della pressione e va valutata di volta in volta.

$$a = \sqrt{\frac{2 F (m_1 + m_2)}{\pi L B}} \quad [\text{mm}]$$

Dove:

$$m_1 \quad m_2 \quad \frac{1}{E}$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} \quad \frac{1}{R_2} \right)$$

- R_1 = raggio di curvatura del cilindro 1 [mm]
- R_2 = raggio di curvatura del cilindro 2 (nel caso in cui sia un piano si giudica $R_2 = \text{infinito}$) [mm]
- modulo di Poisson -]
- E = modulo di Young [GPa]

La lamina metallica o di qualsiasi altro materiale a seconda della finalità delle prove, viene fissata su una piastra scaldante, che a sua volta è bloccata su un pattino scorrevole a ricircolo di sfere.

Il sistema di movimentazione è azionato da un motore elettrico che muove avanti e indietro il pattino lungo una guida appositamente posizionata.

Il tutto quindi è molto semplice in termini di configurazione e funzionamento.

3.3.2 Componenti della macchina

La macchina di strip ha bisogno di diversi componenti per poter funzionare nel modo corretto, ed ora verrà data una breve descrizione per quelli fondamentali.

- **MOTORE:** il motore ha come compito quello di azionare il pattino collegatovi tramite un braccio parallelo alla direzione longitudinale della guida
- **CELLE DI CARICO:** tali dispositivi sono della Kistler®. Ve ne sono 2: una monitora la forza normale impressa dall'operatore

mediante un accoppiamento di tipo screw e l'altra la forza tangenziale che viene invece dettata dal motore stesso.



figura 3.96 – Cella di carico per la forza normale: viene impiegata sia per misure di compressione che trazione.

Il modello in figura è il 9243A della Kistler®

- STRATO ISOLANTE: sotto la piastra scaldante viene così posto uno strato di isolante Trathermic® MI700 (spessore 10 mm). È un materiale isolante a base di mica ed ha tra i suoi punti di forza un'elevata resistenza meccanica alla compressione e alle alte temperature.

Trathermic® MI700	
Resistenza alla compressione [N/mm ²]	400
Peso specifico [g/cm ³]	2,3
Temperatura di esercizio [°C]	500
Coeff. conduttività termica [W/(m K)]	0,2
Assorb. di umidità 24h [%]	0,5
Formati [mm]	1000 x 1000
Tolleranze sullo spessore nominale [%]	± 8
Parallelismo sullo spessore delle superfici [mm/m]	± 0,1

tabella 3.2 – Caratteristiche tecniche dell'isolante a base di mica: MI700

Il MI700 può essere sostituito con materiali più efficienti; tra questi ricordiamo il vetroceramico Macor®, il quale ha dei costi pronunciati rispetto al MI700; dalla sua parte però il Macor® può essere usato anche con temperature che arrivano ai 1000 °C, ha un'ottima resistenza/rigidità, maggiore isolamento elettrico e termico, zero porosità, bassa conduttività termica.

- PIASTRA RAFFREDDANTE: sotto lo strato di isolante viene posizionata la piastra con i canali di raffreddamento ad acqua. Lavorare con temperature di 500-700 °C od anche superiori qualora

vi fosse il Macor®, significherebbe fondere le componenti in plastica del pattino, dunque essa viene lavorata in maniera tale da poter inserire i canali di raffreddamento, che siano così collegati direttamente alla rete idrica (vedere figura 3.97).

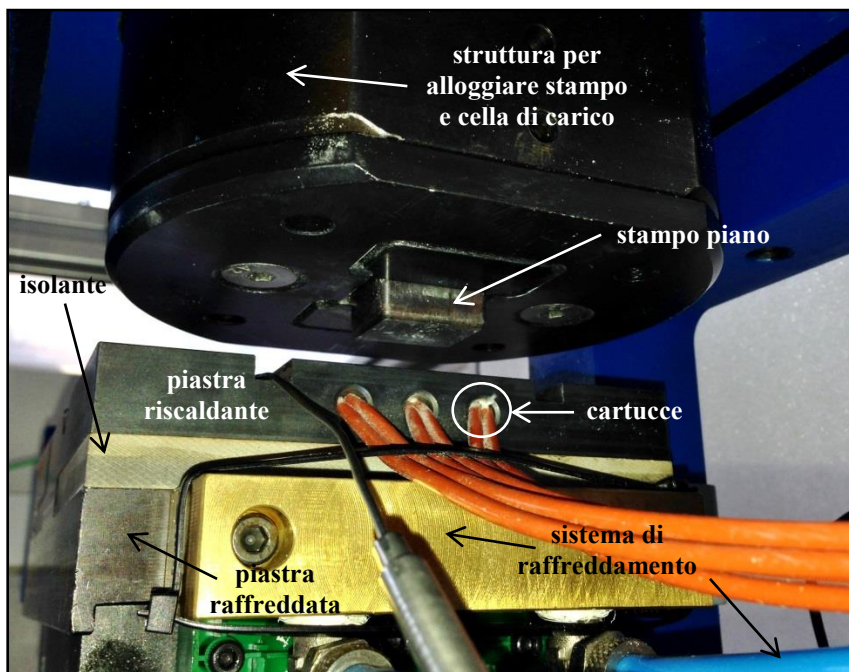


figura 3.97 – Assemblato della macchina di strip con didascalie che ne evidenziano i diversi componenti

- **PIASTRA RISCALDANTE:** tale piastra ha il compito di riscaldare il provino soprastante. In essa infatti sono stati proposti tre fori nei quali vengono inserite le tre cartucce scaldanti. Per monitorare la temperatura viene inoltre applicato un piccolo foro per alloggiare la termocoppia. Nella figura seguente viene rappresentato il modello 3D di tale piastra; c'è bisogno inoltre di eseguire una taratura della temperatura della piastra e ciò viene fatto in Appendice A.

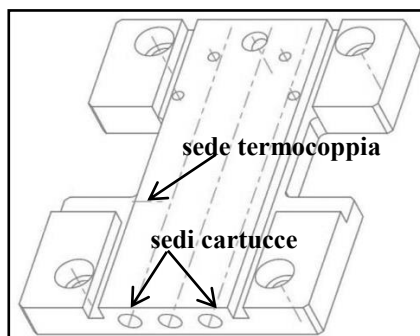


figura 3.98 – Piastra scaldante presente nella macchina di strip

- **PATTINO/GUIDA:** il pattino è stato scelto dal catalogo della Hiwin®. Il modello in questione è un HGW45 (“HG” determina la forma del pattino, “W” sta ad indicare se è flangiato o meno e “45” indica invece la larghezza della guida e dunque del carrello).

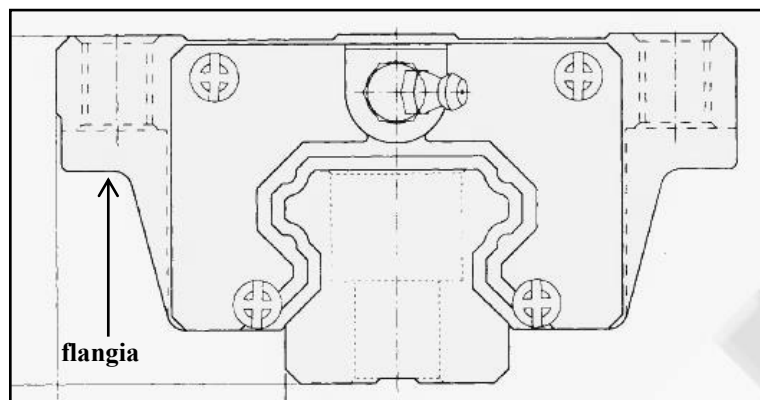


figura 3.99 – Accoppiamento tra pattino HGW e guida

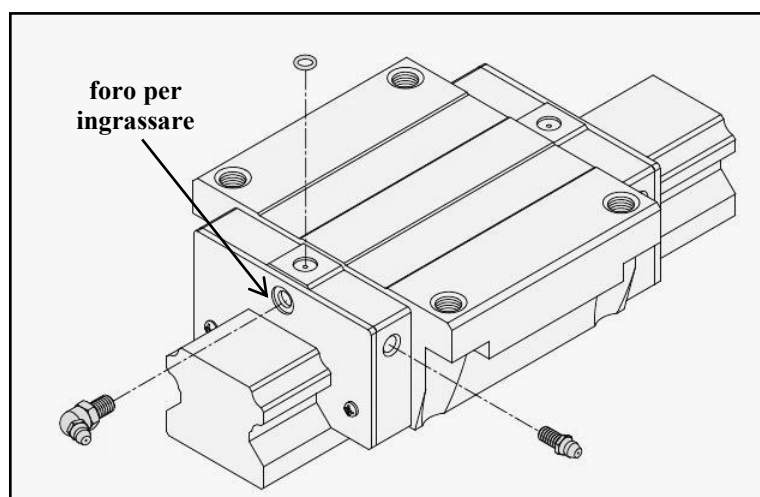


figura 3.100 – Pattino flangiato HGW, con ingrassatore

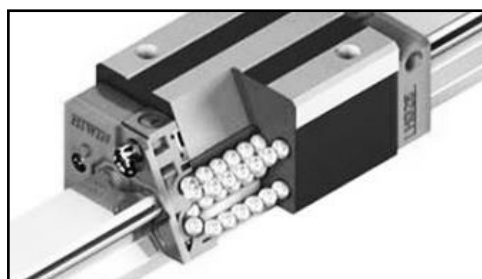


figura 3.101 – Particolare del ricircolo di sfere per il pattino non flangiato della serie HG

Il pattino scorre sulla guida grazie a un ricircolo di sfere, il tutto ha bisogno di essere lubrificato per non avere impuntamenti; viene così inserito un ingrassatore (vedi figura 3.100), in testa al pattino ovvero dove c'è la curva del ricircolo delle sfere.

Per quanto riguarda la scelta della guida invece, vi sono delle dimensioni standard che possono essere accoppiate con la misura del pattino scelto.

3.3.3 Prove di calibrazione

La macchina che si utilizzerà per le prove di attrito è rappresentata in figura 3.102; prima di iniziare ad eseguire i test con il lubrificante è conveniente verificare la costanza della forza tangenziale con prove di spostamento a vuoto (movimentazione del solo pattino) e sotto l'effetto di un carico, che non sia la pressione dello stampo.

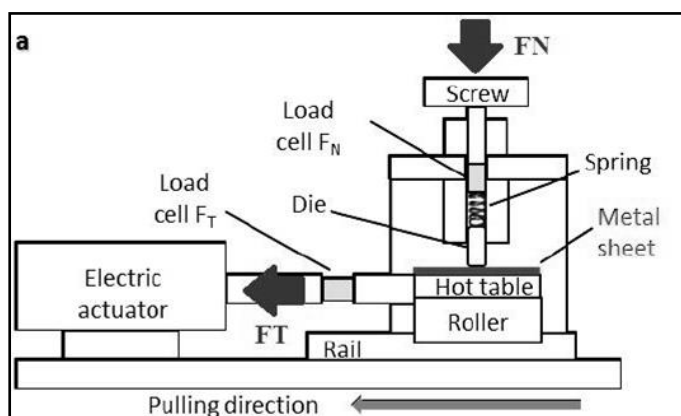


figura 3.102 – Schema complessivo della macchina di strip



figura 3.103 – Complessivo della macchina di strip

Si è deciso di vedere l'andamento della forza tangenziale per i seguenti valori di carico:

- prove di calibrazione a vuoto a 10-25-50 mm/s (stroke = 50 mm)
- prove di calibrazione con 33 kg a 5 mm/s (stroke = 10 mm)
- prove di calibrazione con 99 kg a 5 mm/s (stroke = 10 mm)
- prove di calibrazione con 151 kg a 5 mm/s (stroke = 10 mm)

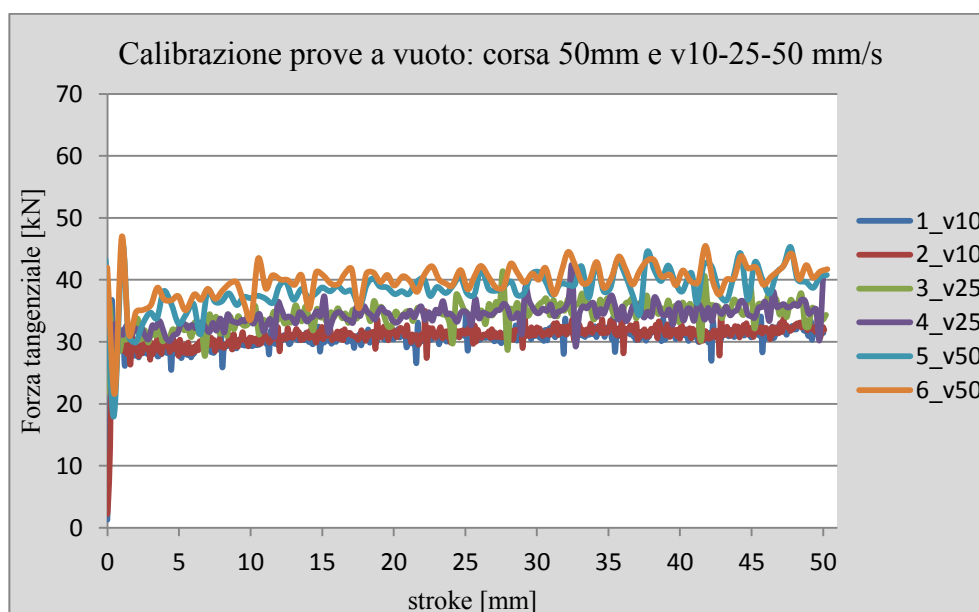


grafico 3.1 – Andamento della forza tangenziale a vuoto in funzione della corsa per tre differenti velocità

Si vede subito dal grafico 3.1, come la forza tangenziale abbia un andamento pressoché piatto, quindi l'accoppiamento motore/pattino avviene in modo regolare e fluido. La cella di carico che misura la forza tangenziale ha una sensibilità di 1 N, ed i picchi presenti, trascurabili, sono dovuti a piccoli impuntamenti del pattino sulla guida, che non sono percettibili ad occhio nudo. Ora è opportuno verificare che lo scorrimento, che avviene per ricircolo di sfere, sia fluido anche con un peso posto sopra il pattino; calibrare il sistema di movimentazione permette di evitare perdite di tempo in seguito durante le prove vere e proprie, se il movimento avviene in modo fluido, in caso di curve anomale si escluderebbe a priori il sistema di movimentazione, e l'attenzione ricadrebbe su altri punti, avendo così maggior padronanza nel commentare e giudicare i risultati ottenuti.

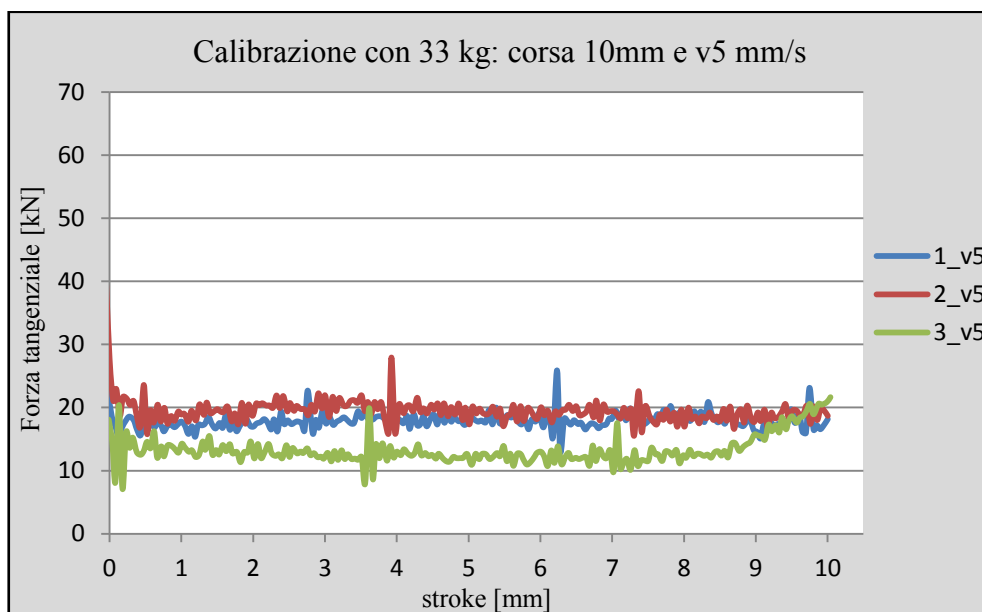


grafico 3.2 – Andamento della forza tangenziale con 33 kg posti sopra il pattino, il tutto in funzione della corsa, per una velocità costante pari a 5 mm/s

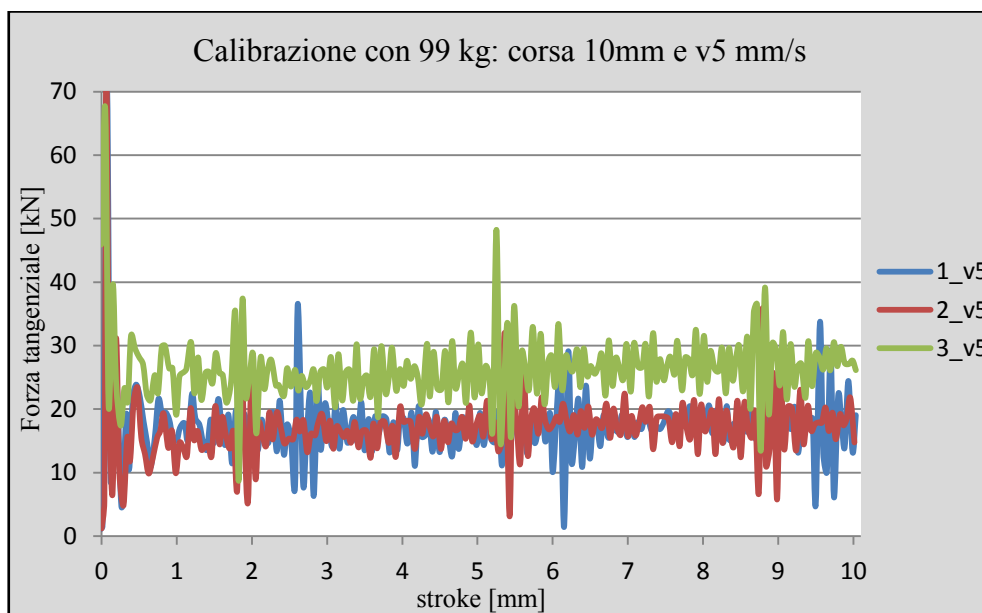


grafico 3.3 – Andamento della forza tangenziale con 99 kg posti sopra il pattino, il tutto in funzione della corsa, per una velocità costante pari a 5 mm/s

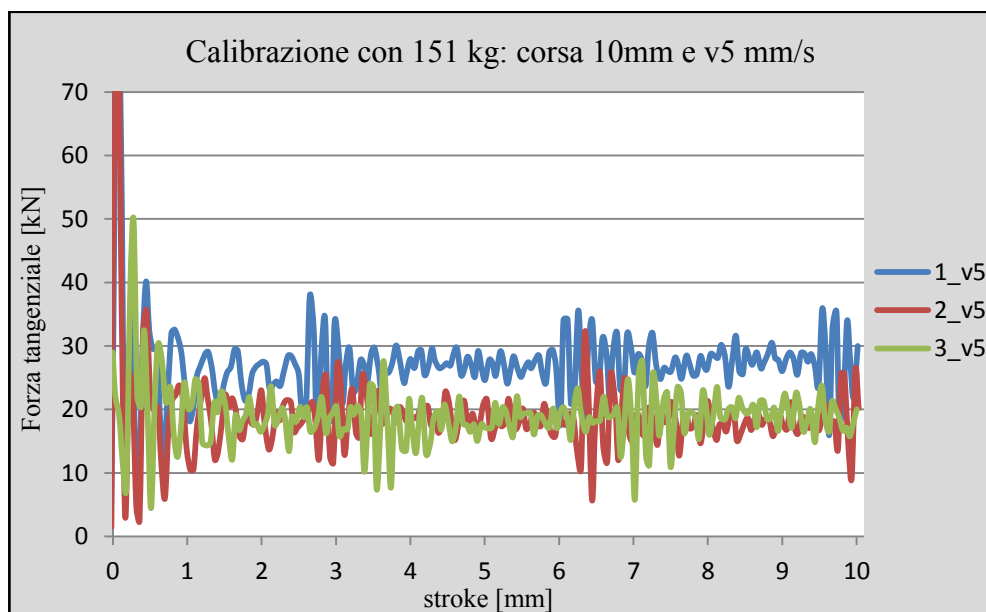


grafico 3.4 – Andamento della forza tangenziale con 151 kg posti sopra il pattino, il tutto in funzione della corsa, per una velocità costante pari a 5 mm/s

Tutte le prove di calibrazione, mostrano andamenti piatti, dunque più che compatibili con ciò che si doveva verificare. Essendo il coefficiente di attrito un rapporto tra forza tangenziale e normale, è opportuno che vi sia una costanza della tangenziale perché direttamente proporzionale a μ . Durante le strisciate quindi il valore di μ dovrà essere pressoché costante e le curve finora viste sono pressoché piatte lasciando così presagire un ottimo comportamento delle lamine lubrificate sotto la pressione dello stampo a diverse velocità.

3.4 PIANO SPERIMENTALE

3.4.1 Caratterizzazione del materiale

Il materiale usato per testare i lubrificanti è una lega di alluminio della serie 6xxx, in particolare la sua denominazione è AA6016.

I componenti che rientrano in tale lega sono esposti in tabella 3.3.

wt.%	Si	Cu	Fe	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	other	Al
	1,0-1,5	0,52	0,5	0,2	0,25-0,6	0,1	0,2	0,15	0,15	r

r = indica la restante parte

tabella 3.3 – Composizione lega AA6016

Le leghe di alluminio da lavorazione plastica vengono classificate in funzione della composizione chimica all'interno di otto famiglie (serie) che si distinguono fra loro per i principali costituenti di lega; dagli alliganti dipendono in ultima analisi le proprietà fondamentali che contraddistinguono le serie stesse.

Le proprietà base delle principali famiglie di leghe sono riassunte di seguito

- Serie 1xxx – alluminio puro

I vari tipi di alluminio si contraddistinguono in funzione della purezza o titolo, che non risulta mai inferiore al 99,0%.

- Principali caratteristiche: bassa resistenza meccanica, buona duttilità, elevata conducibilità elettrica, ottima resistenza alla corrosione, elevata attitudine alla finitura superficiale
- Principali settori applicativi: industria elettrica, chimica e petrolchimica, edilizia, decorazioni

- Serie 2xxx – leghe alluminio-rame

Il rame è il principale alligante; altri importanti elementi presenti in alcune leghe sono il magnesio e il silicio, in grado di influenzare il processo di invecchiamento, e il manganese e il cromo, per il controllo della ricristallizzazione e quindi della granulazione.

- Principali caratteristiche: elevata resistenza meccanica, anche a temperature medio-alte, modulo elastico superiore a tutte le altre leghe, difficile saldabilità, bassa resistenza alla corrosione.
- Principali settori applicativi: industria aerospaziale, armamenti, meccanica, sport.

- Serie 3xxx – leghe alluminio-manganese

Il manganese è il principale alligante, accompagnato dal magnesio, in alcuni tipi di leghe per incrementare la resistenza meccanica.

- Principali caratteristiche: elevata formabilità, ottima saldabilità, buona resistenza alla corrosione, medio-basse caratteristiche meccaniche.
- Principali settori applicativi: edilizia, imballaggio, tubi elettrosaldati, scambiatori di calore.

- Serie 4xxx – leghe alluminio-silicio

Leghe da fonderia.

- Serie 5xxx – leghe alluminio-magnesio

Il magnesio è il principale elemento di alligazione; altri importanti elementi spesso presenti sono il manganese e il cromo, in grado di controllare i processi di ricristallizzazione.

- Principali caratteristiche: resistenza meccanica crescente all'aumentare del tenore di magnesio, buona resistenza alla corrosione (specie in ambiente marino), buona formabilità, buona saldabilità.

- Principali settori applicativi: edilizia, costruzioni navali, industria chimica e alimentare, trasporti e meccanica.

- Serie 6xxx – leghe alluminio-magnesio-silicio

E' la famiglia di leghe più utilizzata in assoluto per le combinazioni di proprietà che queste leghe consentono. Il magnesio e il silicio sono i principali alliganti. Altri importanti elementi sono il rame, che interviene nel processo di invecchiamento, e il cromo e manganese, per il controllo della ricristallizzazione.

- Principali caratteristiche: elevata formabilità a caldo, tanto da essere considerate le leghe da estrusione per eccellenza, buona deformabilità a freddo negli stati ricotto e T4, buona resistenza alla corrosione, ottima saldabilità, caratteristiche meccaniche da medie a medio alte in funzione del tenore di alliganti.

- Principali settori applicativi: edilizia, strutture, meccanica, trasporti terrestri e navali, sport.

- Serie 7xxx – leghe alluminio-zinco

Lo zinco è considerato il principale elemento di alligazione, anche se magnesio e rame sono in genere presenti, singolarmente o abbinati, con notevole influenza sui processi di invecchiamento. Altri elementi presenti sono il cromo, il manganese e lo zirconio, per il loro effetto sui fenomeni di ricristallizzazione.

- Principali caratteristiche: elevata resistenza meccanica, specie in presenza di rame, buona saldabilità e resistenza alla corrosione in assenza di rame.

- Principali settori applicativi: industria aerospaziale, armamenti, bulloneria, meccanica.

- Serie 8xxx

A differenza delle altre, questa serie rappresenta più un contenitore che una famiglia, in quanto le composizioni di queste leghe risultano molto diverse tra loro, non catalogabili come i precedenti raggruppamenti. Infatti in questa categoria si possono trovare leghe per conduttori elettrici, per fogli sottili da

imballaggio nonché complesse leghe contenenti litio utilizzate in ambito aeronautico.

La tabella che segue illustra l'attuale utilizzo delle leghe da lavorazione plastica nel settore automotive.

Leghe	Principali Applicazioni
1050	Ripari calore, alette per scambiatori di calore
3003	Scambiatori di calore
5005	Ripari calore, parti strutturali
5052	Chassis, parti strutturali
5454	Ruote
5754	Chassis, assiali, pannellaria interna
5182	Parti strutturali, pannellaria interna
5083	Parti strutturali
6016	Scocca, pannellaria esterna
6181A	Scocca, pannellaria interna
6111	Scocca, pannellaria esterna

tabella 3.4 - Principali leghe per laminati impiegate nelle automobili

L'analisi delle diverse famiglie di leghe, appena effettuata illustra le ottime caratteristiche della serie 6xxx. In particolare la lega oggetto di studio del lavoro di tesi è la AA6016, che verrà proposta nelle seguenti immagini ricavate al microscopio SEM.

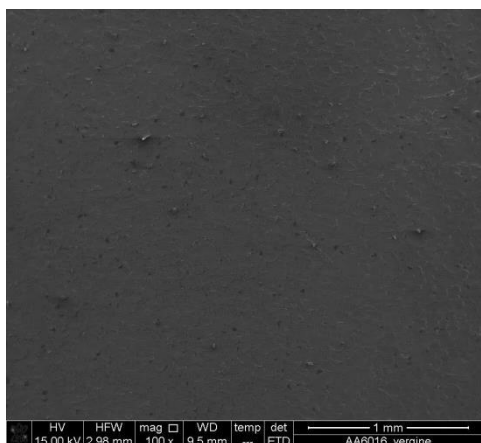


figura 3.104 – Superficie della lamina di AA6016 ricavata al SEM: 100x

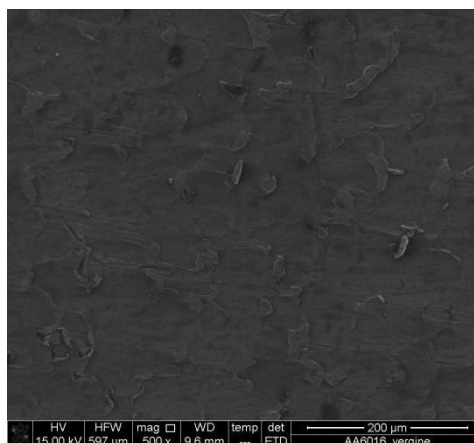


figura 3.105 – Superficie della lamina di AA6016 ricavata al SEM: 500x

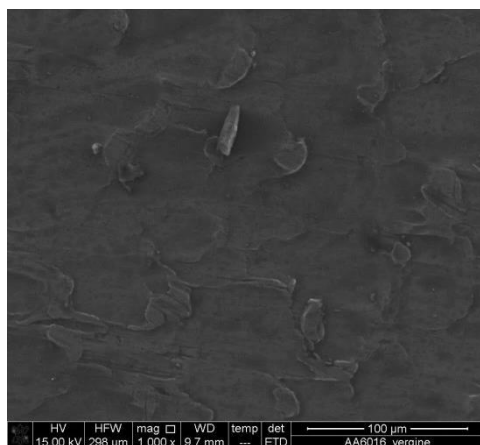


figura 3.106 – Superficie della lamina di AA6016 ricavata al SEM: 1000x

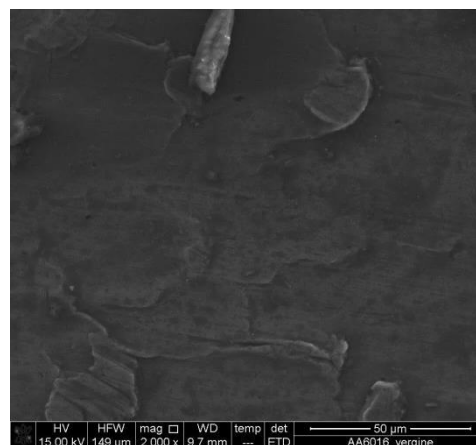


figura 3.107 – Superficie della lamina di AA6016 ricavata al SEM: 2000x

Si è deciso inoltre di analizzare anche la rugosità della lamina tramite profilometro.

3.4.2 Parametri di prova

I parametri che incidono nelle prove che verranno effettuate sono molteplici. Ricordiamo innanzitutto che le lamine verranno testate in modo pressoché uguale sia a caldo che a freddo, con relativa variazione della temperatura.

3.4.2.1 RUGOSITÀ

Tale parametro rimane uguale per tutti i test, non viene applicata nessuna finitura superficiale alla lamiera, se non quella legata ai rulli stessi del laminatoio. Si è così deciso di valutare il valore medio della rugosità della lamina, per avere poi un successivo riscontro, con i valori di μ ottenuti con altre tipologie di finitura superficiale.

Per misurare la rugosità si è utilizzato un profilometro ottico il quale ha dalla sua parte i seguenti vantaggi:

- velocità: non toccando la superficie, la velocità di scansione dipende solo dalla velocità di riflessione della luce sulla superficie e dalla velocità di acquisizione dell'elettronica dello strumento.
- affidabilità: i profilometri ottici non toccano le superfici e non possono danneggiarle, sono più sicuri

Il profilometro non produce l'immagine reale della superficie, ma virtuale: il raggio di luce che viene emesso va a colpire le imperfezioni della superficie mettendole in risalto tramite una scansione a piani. Dopo aver messo a fuoco i picchi e successivamente le valli della superficie, si decide il numero

di piani con il quale sezionare tale lunghezza; più piani introduco e maggiore è il tempo di acquisizione dell'immagine virtuale, ma allo stesso tempo si avrà una migliore precisione.

Il software in dotazione SensoSCAN© ha permesso l'analisi delle immagini e delle misurazioni ottenute.



figura 3.108 – Profilo della superficie dello stampo su una retta parallela a X

In figura 3.108 si vedono espressamente i valori dei picchi e valli della superficie dello stampo in AISI H11: essi non superano mai il valore di 0,8 μm .

Risalta immediatamente all'occhio come la conformazione della superficie vari molto con o senza lubrificante.

Avendo posto la medesima scala lungo tutti e tre gli assi X, Y e Z, il confronto è immediato. Nell'immagine 3.109 si vede una superficie vergine poco omogenea, con picchi e valli molto pronunciati: è la configurazione tipica di una superficie in uscita dal laminatoio.

Tra le due immagini ottenute con profilometro, quella dello stampo in AISI H11, che si userà per le strisciate, è quella che presenta una maggiore omogeneità, su di essa infatti è stata richiesta una migliore precisione nella lavorazione: rugosità non superiore a 0,8 μm . Presi i diversi campioni di materiale, sono state effettuate una decina di misurazioni random su ognuno di essi, ottenendo dei risultati in termini di Ra ed Sa, che vengono riportati in tabella 3.5.

È doveroso far notare quanto sia importante la lavorazione che si effettua su una superficie; basti confrontare le due immagini 3.109 e 3.110 ottenute con profilometro, che a parità di scala hanno picchi e valli molto diversi.

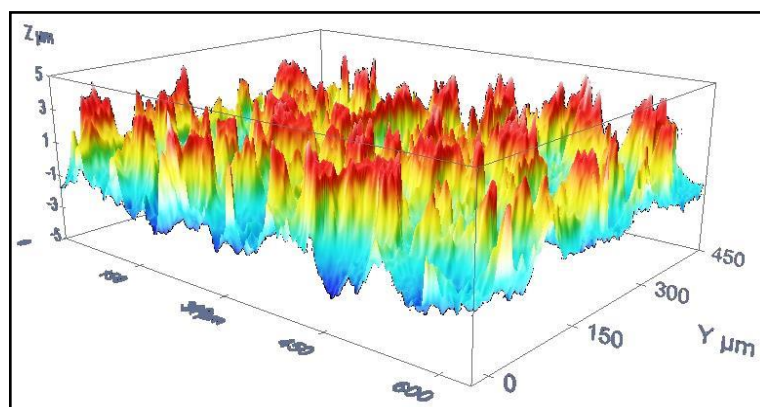


figura 3.109 – Superficie della lamina vergine di AA6016, analizzata con profilometro

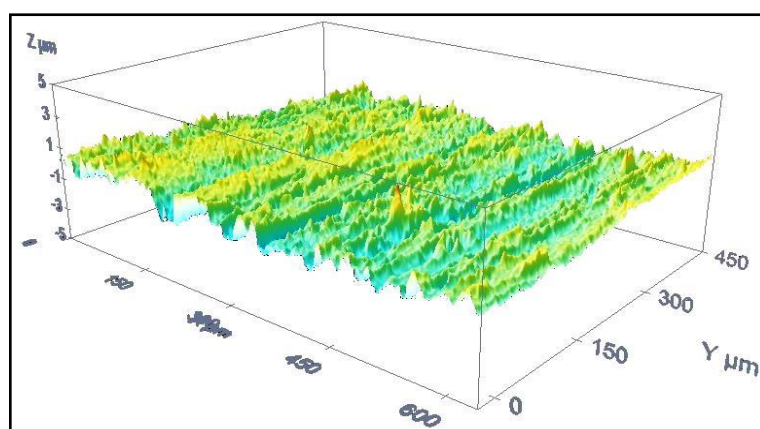


figura 3.110 – Superficie dello stampo vergine in AISI H11, analizzata con profilometro

n°	Lamina vergine AA6016			Stampo AISI H11		
	lungo X	lungo Y	Area X*Y	lungo X	lungo Y	Area X*Y
	Ra [nm]	Ra [nm]	Sa [nm]	Ra [nm]	Ra [nm]	Sa [nm]
1	1,184	1,339	1,079	0,444	0,328	0,430
2	0,933	1,037	1,088	0,479	0,366	0,435
3	1,014	1,048	1,186	0,392	0,176	0,416
4	1,206	0,982	1,152	0,455	0,262	0,499
5	1,160	0,970	1,095	0,396	0,314	0,425
6	1,092	1,348	1,122	0,498	0,250	0,493
7	0,793	1,183	1,155	0,454	0,281	0,519
8	0,990	0,860	1,058	0,443	0,289	0,444
9	1,030	0,818	0,988	0,526	0,269	0,569
10	1,029	0,833	0,928	0,466	0,182	0,486
Media	1,085	1,042	1,043	0,455	0,272	0,472
Dv.Std.	0,079	0,193	0,125	0,041	0,060	0,049

tabella 3.5 – Valori della rugosità a confronto tra lamina vergine e stampo

Dalle tabelle si possono vedere i valori medi di Ra (riferito ad una linea sia nella direzione X che Y) e di Sa (riferito invece ad una superficie). Il più veritiero dei due è sicuramente Sa sul quale per l'appunto si baseranno le nostre considerazioni.

Il valore medio di rugosità Ra per lo stampo, varia da $0,455\ \mu\text{m}$ a $0,270\ \mu\text{m}$ se si considera la direzione X o Y: tale differenza è data dalla finitura superficiale che come mostra figura 3.111, predilige striature in direzione parallela a Y.

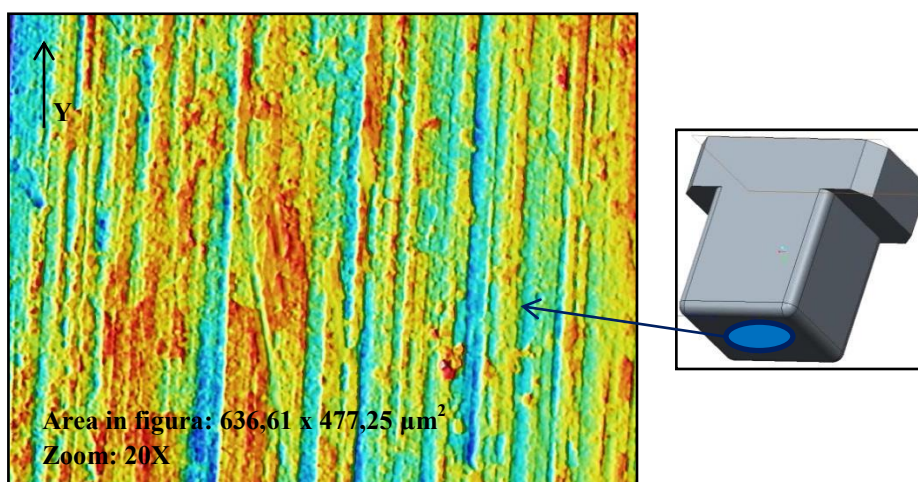


figura 3.111 – Superficie dello stampo

Come ultimo appunto sulla rugosità delle lamine che si utilizzeranno per i test di attrito, si vuole specificare quale sia il verso di laminazione rispetto a quello del test di strip: durante il test di attrito le striature della superficie saranno sempre perpendicolari alla direzione di strip (vedere figura 2.4 con striatura del laminatoio RD).

Cambiando la direzione della striatura del laminatoio da RD a TD varierà anche il risultato finale in termini di coefficiente di attrito: le nostre prove saranno tutte effettuate con RD.

3.4.2.2 STROKE

Le corsa è il secondo parametro che rimarrà fisso per tutti i test.

Va studiata con attenzione e l'obiettivo è quello di cercare di sfruttare più spazio possibile sulla lamina; sia per le prove a freddo che a caldo, si utilizzerà una corsa di 35mm.

La lunghezza della lamina è di 180mm, ma di questi solo 110mm sono utilizzabili a causa della lunghezza della cartuccia (vedere Appendice A), si

è deciso di fare 2 strisciate per faccia da 35mm l'una (verrebbe da pensare che nelle prove a freddo non servono le cartucce, ma si vuole avere confronto di μ a parità di corsa).

35mm sono la lunghezza nominale, ma con essa va considerata pure la larghezza dello stampo piano: l'area di contatto dello stampo sulla lamina è 21x16 mm, vedere figura seguente per capire meglio come sono state progettate le strisciate.



figura 3.112 – Lamina vergine prima dei test di attrito

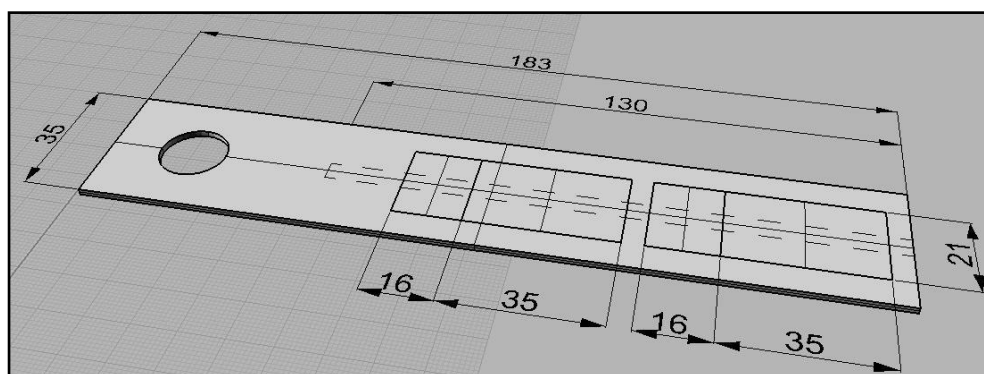


figura 3.113 – Realizzazione delle strisciate con software CAD

3.4.2.3 VELOCITÀ

Le prove vengono eseguite con tre diverse velocità: 10, 25 e 50 mm/s. Sono stati scelti tali valori perché definiti standard, e dunque confrontabili con test effettuati in precedenza su lamine di altro materiale con diversi lubrificanti.

Normalmente nei processi di stampaggio, difficilmente si vedranno velocità maggiori di 50 mm/s, infatti il comportamento dei lubrificanti non è ottimale maggiore è la velocità della prova: tale inconveniente si presenta come una maggiore dispersione delle curve di attrito.

3.4.2.4 FORZA E PRESSIONE DI CONTATTO

Con lo stampo piano si è deciso di lavorare con due diversi valori di forza: 1700 e 3400 N, che corrispondono rispettivamente a circa 5 e 10 MPa.

La forza non è altro che una superficie moltiplicata per una pressione, quindi quest'ultima si ricaverà come rapporto:

$$P_1 = \frac{1}{S} = \frac{1700}{(21 \times 1)} = \frac{1700}{33} = 5,0 \text{ MPa} \quad 5 \text{ MPa}$$

$$P_2 = \frac{2}{S} = \frac{3400}{(21 \times 1)} = \frac{3400}{33} = 10,12 \text{ MPa} \quad 10 \text{ MPa}$$

4 – RISULTATI

Il presente capitolo metterà in evidenza i risultati ottenuti sia per la deposizione dei lubrificanti, che per il valore del coefficiente di attrito.

4.1 RISULTATI: DEPOSIZIONE LUBRIFICANTI

Come già stato anticipato al capitolo 2, la deposizione dei lubrificanti avviene in maniera diversa a seconda dello stato in cui si trova, se liquido o aerosol. Viene così elencata in seguito una tabella riassuntiva sulle diverse combinazioni che si vengono ad effettuare nel campo della deposizione.

Si valuteranno infine la quantità di lubrificante depositato per vedere quale sia la tecnica migliore, che permetta sì, di avere un coefficiente di attrito basso, ma che allo stesso tempo comporti un utilizzo ragionevole del lubrificante impiegato.

Lubrificante	Stato	Tecnica di applicazione	Temperatura della lamina in spruzzata	par.
PulveD18A	aerosol	bomboletta	Ambiente	4.1.1
Pulve60A	aerosol	bomboletta	Ambiente	4.1.2 (4.1.2.1)
Bonderite L-FM 747	liquido viscoso	ruolo	Ambiente	4.1.3 (4.1.3.1)

tabella 4.1 – Schema riassuntivo dei metodi di applicazione dei lubrificanti

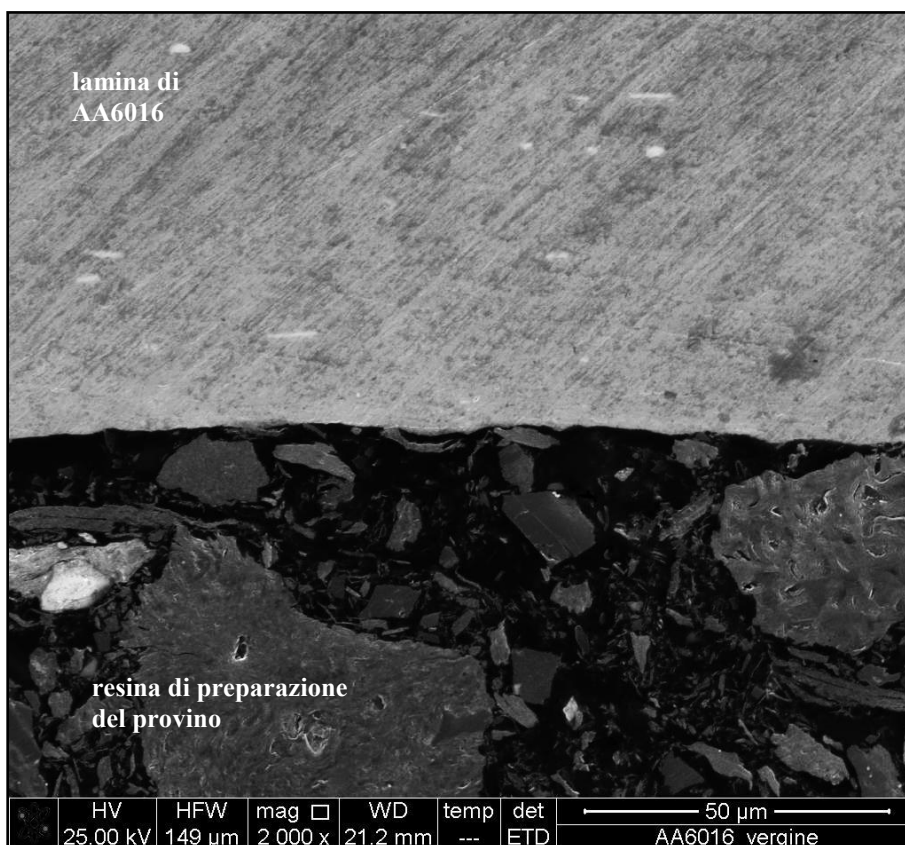


figura 4.1 – Sezione della lamina vergine

L'immagine proposta, che riporta la sezione della lamina vergine, aiuterà a capire come si deposita il lubrificante sulla superficie; essa infatti a parità di zoom viene confrontata con le figure Q e Q, le quali invece, hanno applicato il lubrificante a base di Molibdeno e Nitruro di Boro.

4.1.1 Deposizione PulveD18A (con bomboletta spray)

In questo sottoparagrafo si analizzerà la deposizione del lubrificante PulveD18A a base di bisolfuro di molibdeno (MoS₂).

Come si vede in tabella 4.2, esso viene applicato con una semplice bomboletta e solo a temperatura ambiente; per avere una superficie omogenea sulla quale successivamente basare i test si consiglia prima di tutto di pulire la lamina vergine con acqua calda e sapone, oppure anche con l'etere e posizionandosi ad una distanza di circa 20/25 cm spruzzare per 2 secondi sullo stesso punto.

Queste sono delle indicazioni guida cronometrate a mano dall'operatore, la precisione sarà maggiore nel momento in cui la spruzzata verrà temporizzata da una elettrovalvola comandata da un pc, come avverrà con il Dag5710 e la grafite.

Spruzzando sullo stesso punto però non si riesce a coprire tutta la zona da lubrificare, ecco che allora mantenendosi sempre a 20/25 cm dal provino bisogna spostarsi lungo la lamina.

Gli inconvenienti che insorgono in questa tecnica di spruzzaggio possono essere molteplici, il primo è legato alla distanza tra bomboletta e lamina: avvicinandosi involontariamente vi sarebbe un quantitativo di lubrificante maggiore, rispetto all'aria nella nube, il che causerebbe il cosiddetto effetto goccia, il quale ha come conseguenza un ispessimento locale dello strato di lubrificante, in poche parole disomogeneità in superficie; diversamente, se la distanza tra lamina e bomboletta fosse eccessiva 35/50 cm, l'effetto sarebbe contrario, con una conseguente rarefazione della nube e tale problema si nota subito in quanto lascerebbe intravedere la superficie ed il colore della lamina di alluminio AA6016: lubrificazione insufficiente.

Lamina AA6016 con PulveD18A applicato a freddo e con bomboletta spray				Lamina vergine AA6016
	lungo X	lungo Y	Area X*Y	Area X*Y
n°	Ra [μm]	Ra [μm]	Sa [μm]	Sa [μm]
1	0,698	0,787	0,697	1,079
2	0,840	0,743	0,754	1,088
3	0,709	0,545	0,733	1,186
4	0,575	0,725	0,758	1,152
5	0,645	0,860	0,720	1,095
6	0,854	0,808	0,728	1,122
7	0,555	0,522	0,744	1,155
8	0,775	0,703	0,770	1,058
9	0,893	0,771	0,740	0,988
10	0,819	0,734	0,790	0,928
Media	0,737	0,720	0,743	1,043
Dev. Std.	0,119	0,108	0,027	0,125

tabella 4.2 – Valori di rugosità con PulveD18A confrontabili con i valori della lamina vergine

Da tabella 4.2 si possono vedere i valori medi di Ra (riferito ad una linea sia nella direzione X che Y) e di Sa (riferito invece ad una superficie). Il più veritiero dei due è sicuramente Sa sul quale per l'appunto si baseranno le

nostre considerazioni. L'applicazione del PulveD18A porta il valore di Sa a non raggiungere ancora quello dello stampo vergine (vedi paragrafo 3.4.2); tale affermazione vuole mettere in luce quanto possa essere importante la una lavorazione accurata di una determinata superficie.

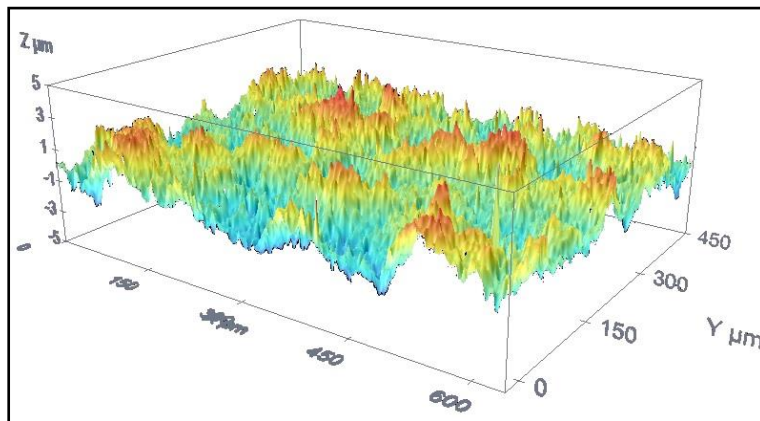


figura 4.2 – Superficie della lamina con lubrificante PulveD18A applicato a freddo e mediante bomboletta spray (immagine ottenuta con profilometro)

Nella seguente immagine si può apprezzare la superficie reale della lamina con applicato il bisolfuro di molibdeno: non si notano particolari difetti e ad occhio nudo, lo strato risulta essere omogeneo e liscio al tatto; una conferma viene data anche dai valori di rugosità Sa, che sono distribuiti in modo regolare sulla superficie e ciò viene confermato dal valore limitato della deviazione standard.



figura 4.3 – Lamina con PulveD18A

Il quantitativo di lubrificante deve essere anche misurato per avere dei valori numerici sui quali dare dei giudizi; si è quindi presa una lamina di una grandezza qualsiasi, e su di essa si è effettuata una spruzzata da 20/25 cm di distanza per 2 secondi.

Il prodotto applicato viene quantizzato in grammi per centimetro quadro, e ciò comporta sia la misurazione delle dimensioni della zona lubrificata che del peso della lamina vergine e con il prodotto applicativi.

Lamina vergine	Lamina con PulveD18A			
Massa [g]	Massa [g]	Δ Massa	Peso lubr. [g/cm ²]	Spessore strato [μ m]
42,2339	42,2606	0,0267	0,001907143	18,94
42,2329	42,2605	0,0276	0,001971429	18,50
42,2335	42,2607	0,0272	0,001942857	17,05
42,2327	42,2604	0,0277	0,001978571	16,32
			Media	Media
Area lubrificata			0,00195	17,70
27 mm	50 mm			
1400 mm ² = 14 cm ²				

tabella 4.3 – Quantità di lubrificante PulveD18A applicato con bomboletta spray e lamina a temperatura ambiente

Visto le quantità ridotte di prodotto che viene applicato alla lamina, si è deciso di tenere diverse cifre decimali, e si vede che nel caso del PulveD18A si ha un valore medio di 0,00195 g/cm², che verrà successivamente confrontato con gli altri lubrificanti.

Nell'ultima colonna di tabella 4.3, si veda anche una media dello spessore del PulveD18A, ottenuto posizionando il provino all'interno di un microscopio SEM (Microscopio elettronico a scansione), con relativa immagine dello strato visto in sezione a pagina seguente.

Per realizzare un'immagine nitida come figura 4.4, è stato preparato il provino in una inglobatrice, che permette un posizionamento perpendicolare della lamina rispetto alla lente del microscopio; come materiale inglobatore si è utilizzata la grafite cotta a 175 °C (vedere strato di resina di preparazione del provino in figura 4.4).

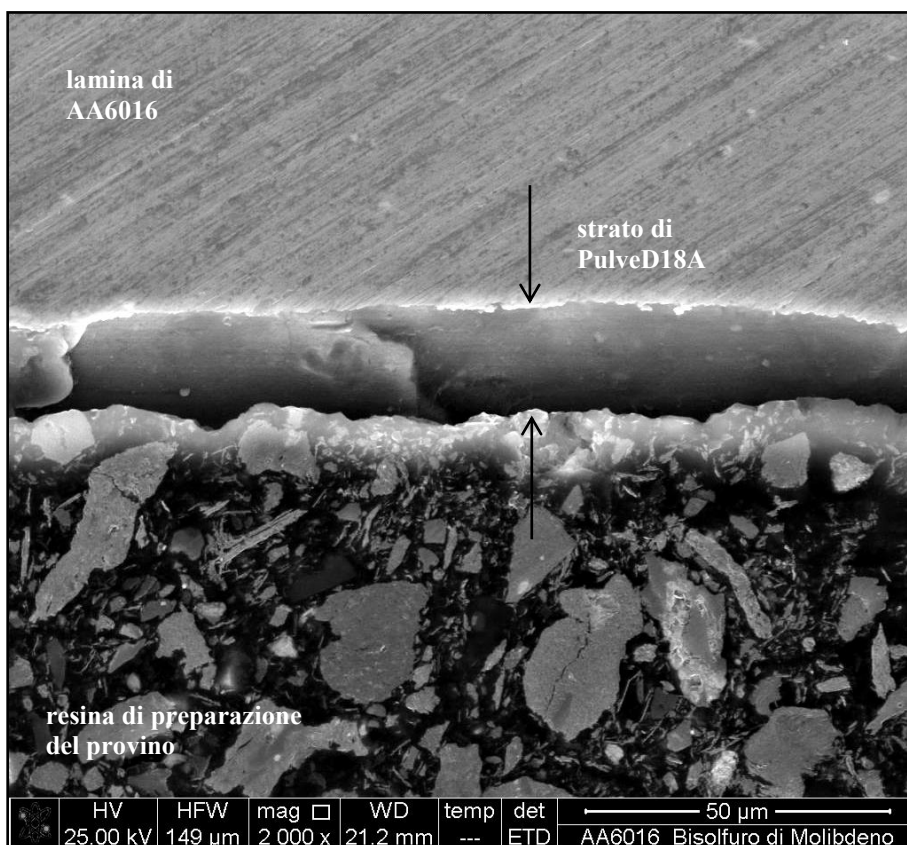


figura 4.4. – Strato del PulveD18A visto al microscopio SEM

4.1.2 Deposizione PulveBND60A (con bomboletta spray)

La deposizione del lubrificante PulveBND60A a base di nitrato di boro è simile al precedente, ma con una differenza legata alla temperatura della lamina: può essere applicato sia con lamina a temperatura ambiente, sia con lamina precedentemente riscaldata (si veda la scheda tecnica al sottoparagrafo 2.2.4).

Per avere una superficie vergine sulla quale successivamente basare i test si consiglia prima di tutto la pulizia della lamina vergine con acqua calda e sapone, oppure anche con l'etere e solo successivamente spruzzare.

4.1.2.1 DEPOSIZIONE A FREDDO

Attenzione che con tale lubrificante l'ampiezza della rosa è maggiore rispetto alla precedente, a parità di distanza lamina-bomboletta; si consiglia dunque di tenersi ad una distanza di 30/35 cm dal provino; per avere una superficie omogenea si spruzzi per un tempo di circa 1,5-2 secondi, leggermente inferiore al precedente.

Anche qui gli inconvenienti sono gli stessi del lubrificante a base di bisolfuro di molibdeno: effetto goccia se troppo vicini al provino e lubrificazione insufficiente se troppo lontani; la particolarità sta nella sua minore viscosità rispetto al PulveD18A con conseguente maggiore rischio, di avere l'effetto goccia.

Lamina AA6016 con PulveBND60A applicato a freddo e con bomboletta spray				Lamina vergine AA6016
	lungo X	lungo Y	Area X*Y	Area X*Y
n°	Ra [μm]	Ra [μm]	Sa [μm]	Sa [μm]
1	0,350	0,468	0,663	1,079
2	0,345	0,481	0,676	1,088
3	0,312	0,586	0,683	1,186
4	0,328	0,431	0,672	1,152
5	0,440	0,453	0,886	1,095
6	0,428	0,503	0,732	1,122
7	0,608	0,471	0,888	1,155
8	0,525	0,488	1,233	1,058
9	0,603	0,393	0,777	0,988
10	0,529	0,352	0,849	0,928
Media	0,438	0,460	0,758	1,043
Dev. Std.	0,116	0,067	0,094	0.125

tabella 4.4 – Valori di rugosità con PulveBND60A confrontabili con i valori della lamina vergine



figura 4.5 – Lamina con PulveBND60A

In figura 4.5 viene evidenziato il particolare della lamina dopo la deposizione: la superficie è liscia al tatto e senza imperfezioni, esso si distribuisce in modo omogeneo.

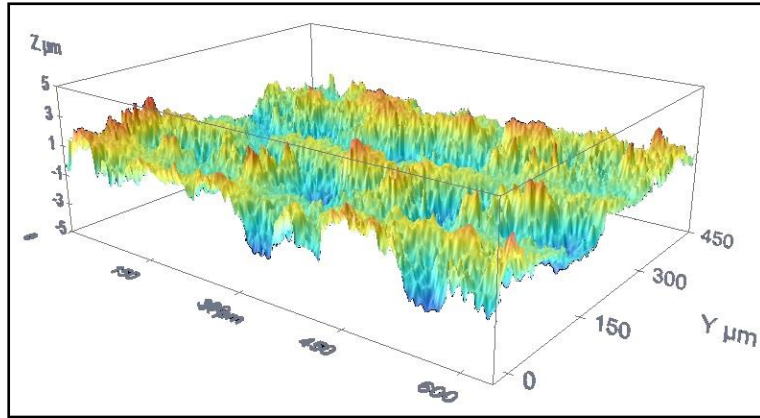


figura 4.6 – Superficie della lamina con lubrificante PulveD18A, applicato a freddo e mediante bomboletta spray (immagine ottenuta con il profilometro)

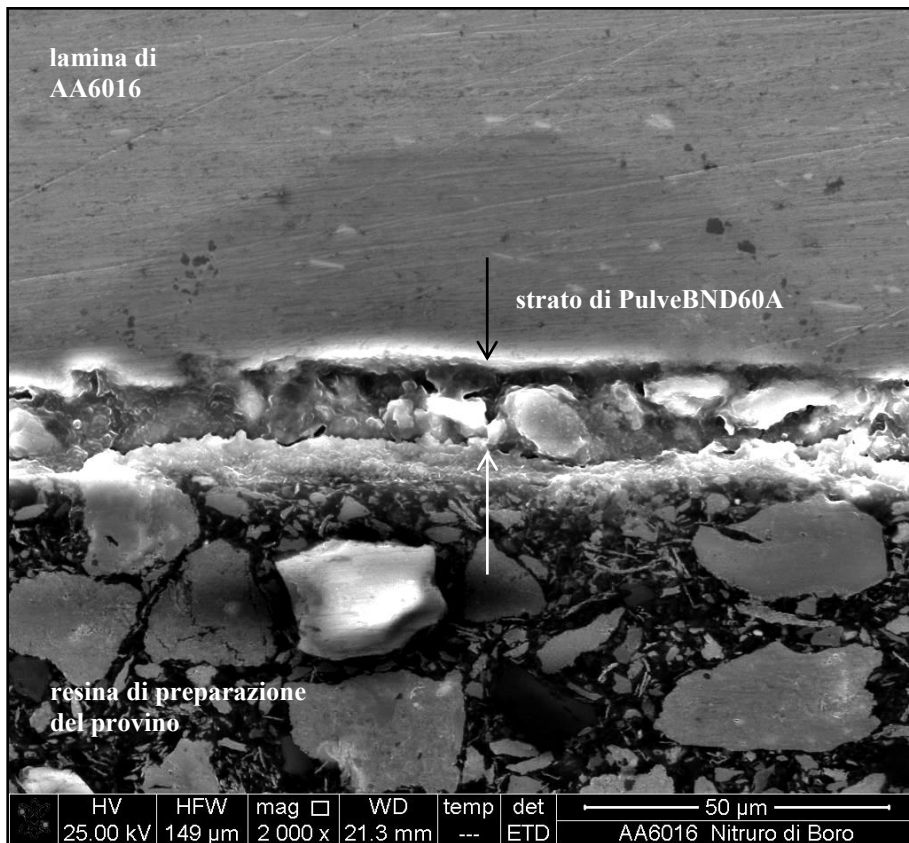


figura 4.7 – Strato del PulveBND60A visto al microscopio SEM

Anche per il PulveBND60A va quantificato il valore di lubrificante da applicare alla lamina e perciò sono stati eseguiti gli stessi calcoli visti per il precedente prodotto.

Lamina vergine	Lamina con PulveBND60A			
Massa [g]	Massa [g]	Δ Massa	Peso lubr. [g/cm ²]	Spessore strato [μ m]
26,3343	26,3596	0,0253	0,001874074	15,30
26,3346	26,3592	0,0246	0,001822222	14,72
26,3344	26,3594	0,0250	0,001851852	12,24
26,3344	26,3596	0,0252	0,001866667	16,61
			Media	Media
Area lubrificata			0,00185	14,72
27 mm	50 mm			
1350 mm ² = 13,5 cm ²				

tabella 4.5 – Quantità di lubrificante PulveBND60A applicato con bomboletta spray e lamina a temperatura ambiente

4.1.3 Deposizione BonderiteL-FM747

Il lubrificante in questione si presenta allo stato di liquido viscoso; si è deciso di applicarlo alla lamina con due differenti tecniche, ed entrambe con la lamina a temperatura ambiente: la prima mediante rullo, la seconda con un ugello a nebulizzazione esterna.

4.1.3.1 DEPOSIZIONE A FREDDO CON RULLO

Per tale tecnica si è impiegato un rullo come quello già annunciato al sottoparagrafo 2.2.3. Dopo aver pulito la superficie della lamina con l'etere, di imbeva il feltro del rullo nel contenitore del Bonderite e si effettuino 6/8 strisciate sulla zona da lubrificare.

C'è bisogno di aspettare almeno 1 ora prima che esso si sia distribuito omogeneamente sulla lamina, in quanto si vengono a formare delle piccole bolle d'aria che poi appunto, spariscono.

A questo punto si è pronti ad analizzare la rugosità con il profilometro ottico, per poi successivamente confrontarla sia con i valori della lamina vergine che con le altre tecniche di applicazione, sia con altri lubrificanti.

Lamina AA6016 con BonderiteL-FM747 applicato a freddo e con rullo				Lamina vergine AA6016
	lungo X	lungo Y	Area X*Y	Area X*Y
n°	Ra [μm]	Ra [μm]	Sa [μm]	Sa [μm]
1	0,722	0,735	0,803	1,079
2	0,737	0,545	0,821	1,088
3	0,554	0,560	0,821	1,186
4	0,547	0,657	0,714	1,152
5	0,721	0,807	0,801	1,095
6	0,689	0,719	0,795	1,122
7	0,568	0,669	0,781	1,155
8	0,694	0,631	0,785	1,058
9	0,569	0,658	0,792	0,988
10	0,604	0,726	0,816	0,928
Media	0,640	0,671	0,793	1,043
Dev. Std.	0,079	0,080	0,031	0.125

tabella 4.6 – Valori di rugosità con BonderiteL-FM747 confrontabili con i valori della lamina vergine

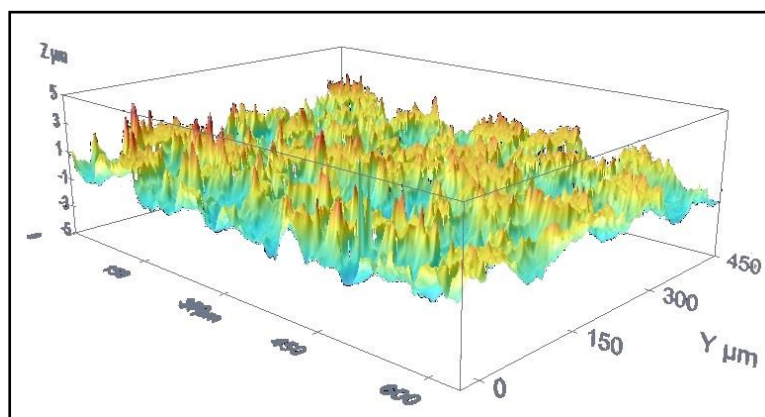


figura 4.8 – Superficie della lamina con sopra il lubrificante BonderiteL-FM747

In figura 4.8 si può apprezzare un'immagine 3D, ottenuta con il profilometro che mette in risalto i picchi e le valli dello strato di lubrificante.

Si è quantificato in g/cm^2 il prodotto applicato, e qui in seguito vengono riportati i valori ottenuti.

Lamina vergine	Lamina con Bonderite L-FM747		
Massa [g]	Massa [g]	Δ Massa	Peso lubr. [g/cm^2]
42,6512	42,7675	0,1163	0,002769048
42,6509	42,7679	0,1170	0,002785714
42,6516	42,7678	0,1162	0,002766667
42,6515	42,7675	0,1160	0,002761905
Media 0,00277			
Area lubrificata			
75 mm	56 mm		
$4200 \text{ mm}^2 = 42 \text{ cm}^2$			

tabella 4.7 – Quantità di lubrificante BonderiteL-FM747 applicato con rullo su lamina a temperatura ambiente

Se si confronta il valore ottenuto $0,0028 \text{ g/cm}^2$, con quello del PulveD18A pari a $0,00195 \text{ g/cm}^2$, si nota subito come venga sprecato più lubrificante con il Bonderite e ciò è sicuramente dovuto al feltro, che da imbevuto, non permette una gran precisione nell'applicarlo. Ora resta da vedere se lo spreco del Bonderite sia giustificato da un valore del coefficiente d'attrito più basso rispetto al PulveD18A, ma ciò lo si analizzerà al paragrafo successivo.

Si veda qui in seguito un'immagine relativa all'aspetto del Bonderite sulla lamina con rullo.



figura 4.9 – BonderiteL-FM747 depositato sulla lamina, con rullo

Si notino i particolari di figura 4.9, dove si evidenziano le imperfezioni legate alla bassa bagnabilità del liquido sulla superficie della lamina; appena si applica il Bonderite, si vengono a formare queste piccole fossette su tutta la superficie legate sia alla viscosità, che alle bolle d'aria che si intrappolano applicando il prodotto con il rullo di feltro, perciò è consigliabile un'attesa di 2/3 ore prima di raggiungere una sufficiente omogeneità dello strato di Bonderite.

4.2 RISULTATI: COEFFICIENTE D'ATTRITO

Dopo aver analizzato sperimentalmente la deposizione dei lubrificanti ed averli interfacciati con le diverse tecniche di applicazione, si possono portare i provini alla macchina di strip drawing test, che ne analizza il comportamento tribologico.

Alla tabella 4.8, viene così aggiunta una colonna per poter evidenziare le differenti combinazioni che si possono ottenere eseguendo le prove di strip con piastra e dunque lamina, riscaldata o meno.

Lubrificante	Stato	Tecnica di applicazione	Temperatura della lamina in spruzzata	Temperatura della lamina in strip
Pulve D18A	aerosol	bomboletta	Ambiente	Ambiente
Pulve BND60A	aerosol	bomboletta	Ambiente	Ambiente
Bonderite L-FM747	liquido viscoso	rullo	Ambiente	Ambiente

tabella 4.8 – Riepilogo delle diverse combinazioni tra temperatura di deposizione e temperatura nel test di strip

4.2.1 Campagna prove

Per poter essere più efficienti nella realizzazione dei test sia come risultati che come tempistiche è conveniente proporre una campagna prove con tutte le variabili attualmente in gioco, escluso solo il coefficiente di attrito, in quanto sarà oggetto di discussione del corrente paragrafo.

Lubr.	Stato	Tecnica di applicazione	Temperatura della lamina in spruzzata	Temperatura della lamina in strip	Velocità [mm/s]	Stroke [mm]	Pressione [MPa]	Rugosità [μm]	Peso lubr. [g/cm^2]	Strat. lubr. [μm]	par
Pulve D18A	aero-sol	bomboletta spray	ambiente	ambiente	10 – 25 50	35	5 – 10	0,743	0,00195	17,70	4.2.2
Pulve BND 60A	aero-sol	bomboletta spray	ambiente	ambiente	10 – 25 50	35	5 – 10	0,758	0,00185	14,72	4.2.3
Bonderite L-FM 747	liq. visc.	rullo	ambiente	ambiente	10	35	5	0,793	0,0028	-	4.2.4

tabella 4.9 – Riepilogo dei risultati ottenuti sino ad ora con l'esclusione del coefficiente d'attrito che verrà trattato nel corrente capitolo

Un solo test non può dare una certezza sul comportamento del lubrificante utilizzato, quindi serviranno più prove: nel nostro caso si è stabilito un numero di 5/6 prove, che si ritengono sufficienti per avere una buona ripetibilità del test.

La tabella 4.9 può essere d'aiuto per ciò che riguarda il riassunto dei risultati e delle variabili fin qui ottenute; si presenta in essa anche il riferimento al paragrafo nel quale verrà ricavato e poi discusso il coefficiente d'attrito per le diverse combinazioni proposte.

4.2.2 μ : PulveD18A depositato a freddo

Il PulveD18A è a base di bisolfuro di molibdeno e viene spruzzato a freddo mediante bomboletta spray. Si inizia col raffigurare le curve con pressione pari a 5 MPa.

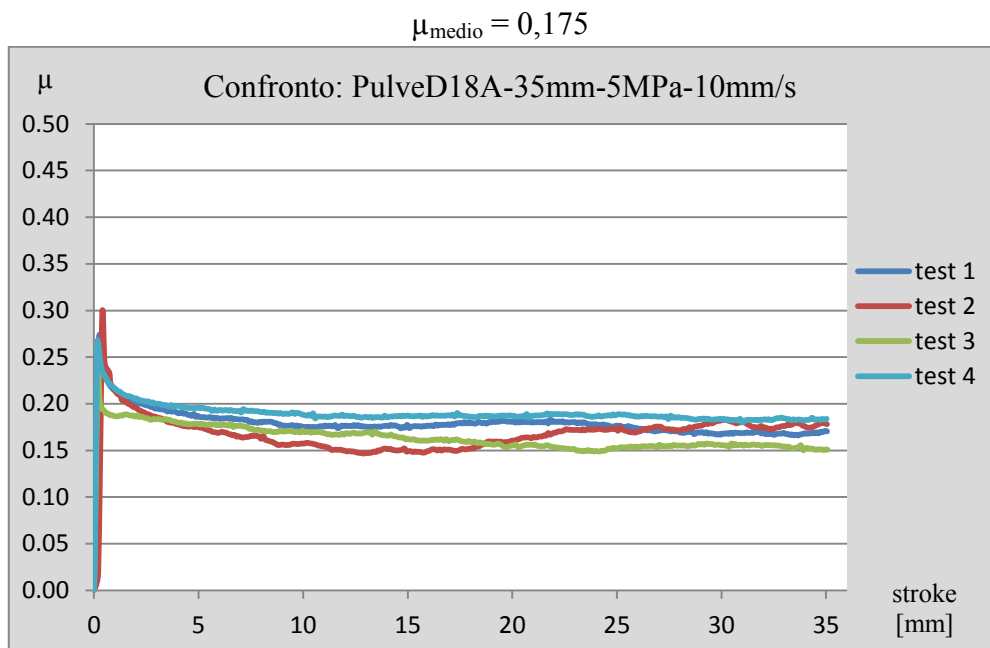


grafico 4.1 – Curve di attrito con PulveD18A depositato e testato a temperatura ambiente [PulveD18A-35mm-5MPa-10mm/s]

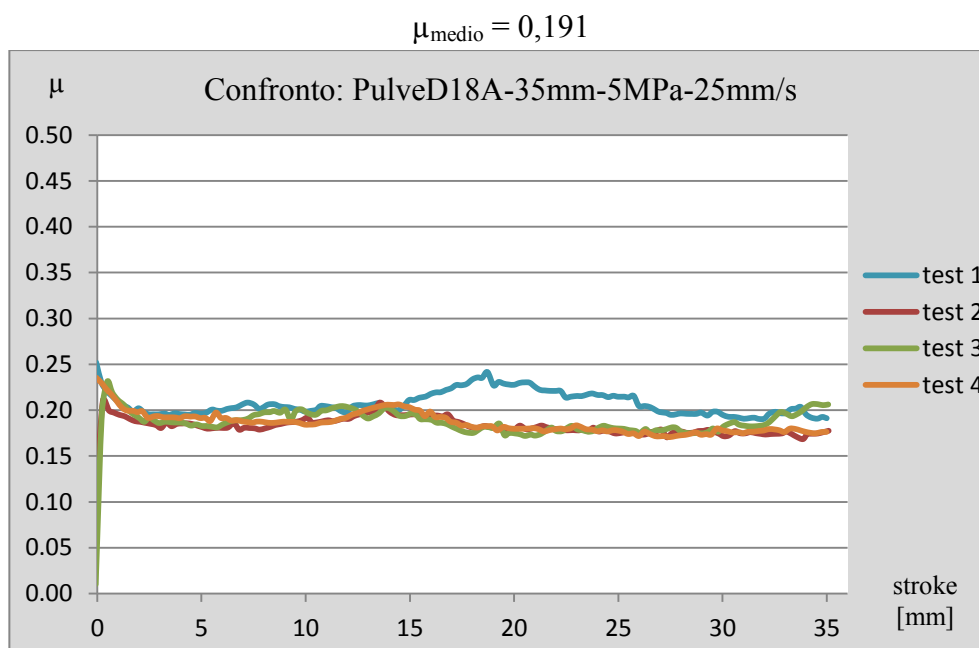


grafico 4.2 – Curve di attrito con PulveD18A depositato e testato a temperatura ambiente [PulveD18A-35mm-5MPa-25mm/s]

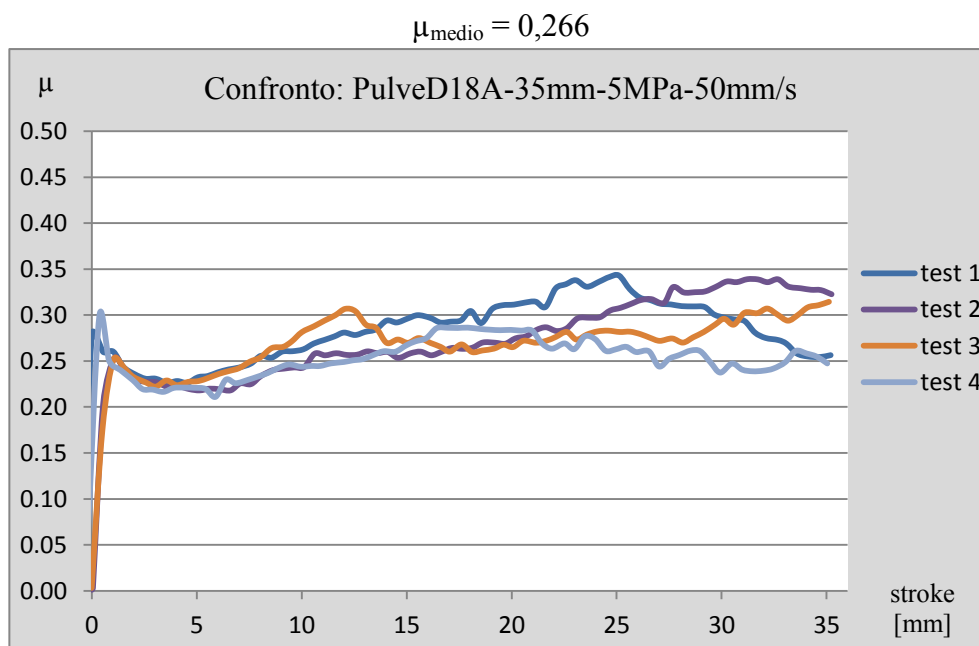


grafico 4.3 – Curve di attrito con PulveD18A depositato e testato a temperatura ambiente [PulveD18A-35mm-5MPa-50mm/s]

Passiamo ora alle curve con pressione pari a 10 MPa.

$$\mu_{\text{medio}} = 0,131$$

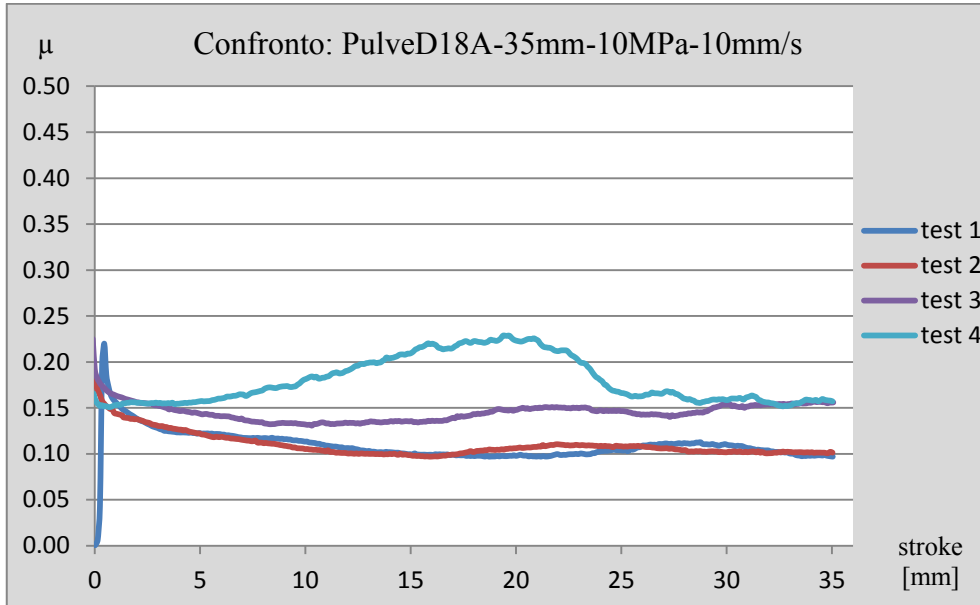


grafico 4.4 – Curve di attrito con PulveD18A depositato e testato a temperatura ambiente [PulveD18A-35mm-10MPa-10mm/s]

$$\mu_{\text{medio}} = 0,294$$

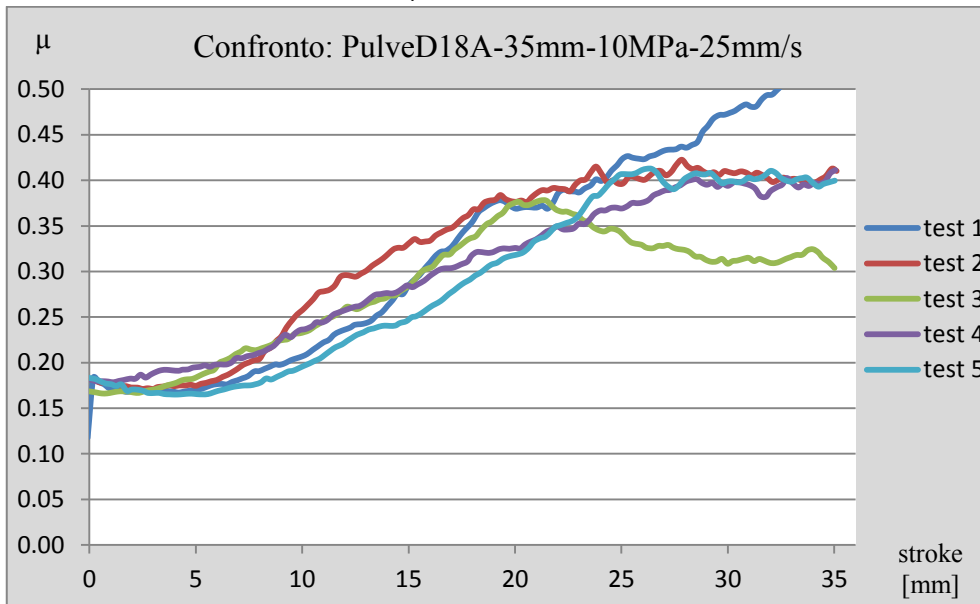


grafico 4.5 – Curve di attrito con PulveD18A depositato e testato a temperatura ambiente [PulveD18A-35mm-10MPa-25mm/s]

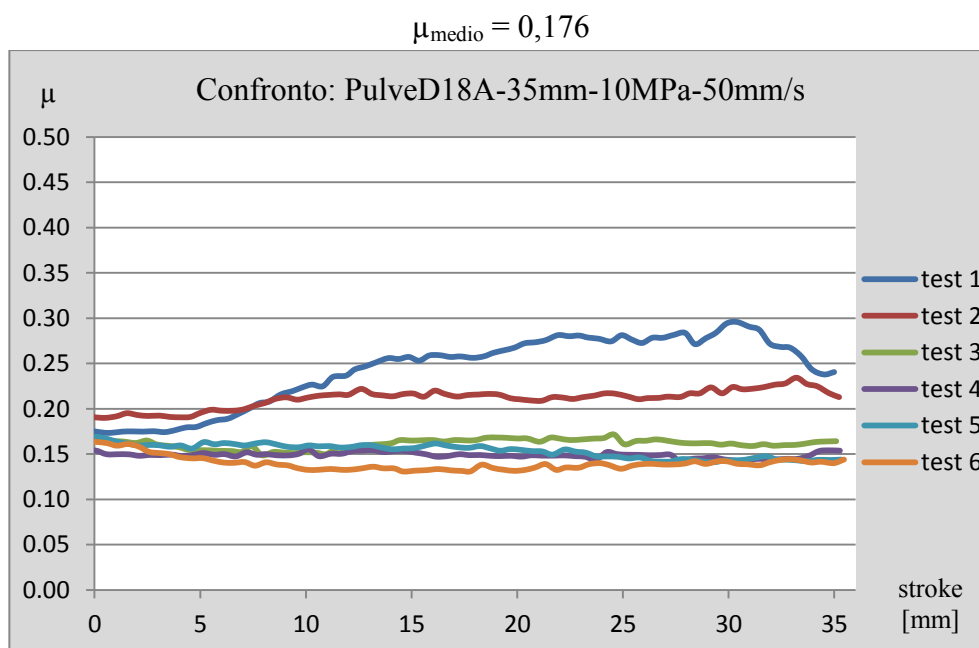


grafico 4.6 – Curve di attrito con PulveD18A depositato e testato a temperatura ambiente [PulveD18A-35mm-10MPa-50mm/s]

I risultati ottenuti non sono tutti soddisfacenti: una curva ideale deve avere un andamento il più possibile costante, perché la forza tangenziale con cui si muove la macchina è anch'essa costante e tra questi due valori ci deve essere proporzionalità diretta (vedi equazione a pagina 11). Il PulveD18A ha bisogno di 5/6 ore prima che si sia completamente attecchito all'alluminio, se non si rispettano tali tempistiche si riscontreranno i problemi ben visibili nel grafico 4.5, con 10 MPa e 25 mm/s, dove le curve hanno tutte un andamento crescente.

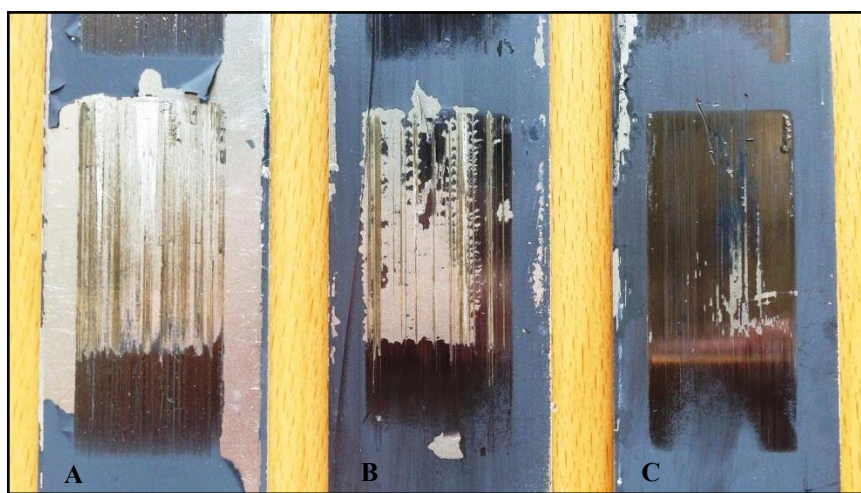


figura 4.10 – Test di attrito a temperatura ambiente con PulveD18A (variabili in gioco: 10 MPa, 50 mm/s e 35 mm di corsa)

In figura 4.10 si può vedere quando si sta cercando di giustificare a parole: sulle tre lamine il lubrificante ha attecchito in maniera diversa, e la principale variabile che entra in gioco è il tempo.

Partendo dalla A e spostandoci verso la C, il tempo di riposo, tra deposizione e test, aumenta; i test di figura 4.10, sono stati effettuati tutti con le medesime variabili: 10 MPa, 50 mm/s e 35 mm. Salta subito all'occhio come sulla lamina A, al passaggio dello stampo, lo strato di lubrificante si stacchi completamente, formando delle scaglie, il che porta ad alzare il coefficiente di attrito rendendo così la prova non propriamente soddisfacente. I tempi di riposo infatti sono stati i seguenti:

- lamina A: 1,5/2 ore
- lamina B: 5/6 ore
- lamina C: circa 1 giorno

Il fenomeno inoltre risulta ancor più evidente man mano che si va ad aumentare la pressione di contatto tra stampo e lamina, e la velocità relativa tra questi (ciò giustifica il perché siano state riportate proprio quelle strisciate: le più evidenti); per quanto riguarda la variabile stroke invece, è ininfluente sull'adesione dello strato di lubrificante.

Le tre corse riportate in figura 4.10, fanno riferimento al grafico 4.6, dove la lamina A corrisponde al *test 1*, la B al *test 3* e la C infine, al *test 4*; le curve di attrito 3 e 4 sono praticamente sovrapposte, e ciò significa che 5/6 ore di riposo, sono già sufficienti.

In seguito si può avere un dettaglio delle strisciate eseguite con gli stessi parametri di figura 4.10 (10 MPa, 50 mm/s e 35 mm).

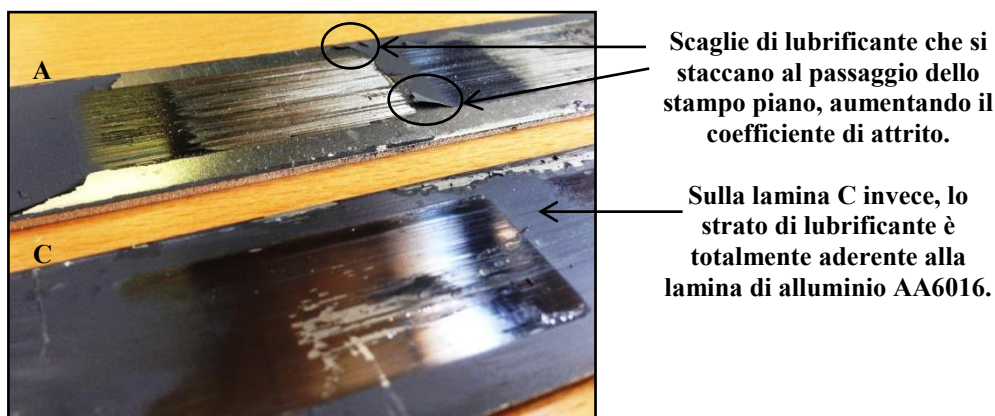


figura 4.11 – Dettaglio della lamina A e C già precedentemente presentate in figura 4.10

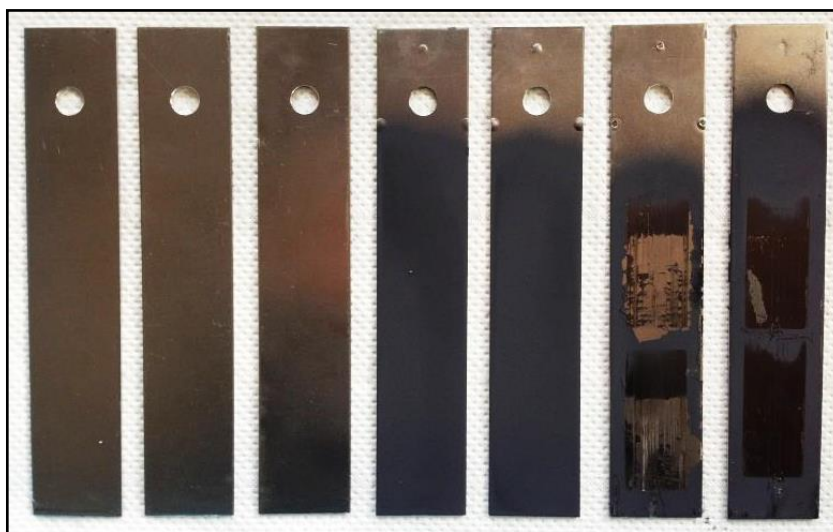


figura 4.12 – Lamine con PulveD18A: da sinistra a destra si può apprezzare l'evoluzione della lamina, da prima vergine, poi con lubrificante ed infine con i test già eseguiti

Dopo aver descritto alcune problematiche riscontrate con tale lubrificante si vengono a confrontare e quindi commentare i risultati ottenuti a livello di coefficiente di attrito.

Vengono così riassunte le prove con il PulveD18A nella seguente tabella.

	Variabili della prova con PulveD18A	μ_{medio}
grafico 4.1	5 MPa – 10 mm/s – 35 mm	0,175
grafico 4.2	5 MPa – 25 mm/s – 35 mm	0,191
grafico 4.3	5 MPa – 50 mm/s – 35 mm	0,266
grafico 4.4	10 MPa – 10 mm/s – 35 mm	0,131
grafico 4.5	10 MPa – 25 mm/s – 35 mm	<u>0,294</u>
grafico 4.6	10 MPa – 50 mm/s – 35 mm	0,176

tabella 4.10 – Confronto tra i coefficienti di attrito con PulveD18A testato a freddo

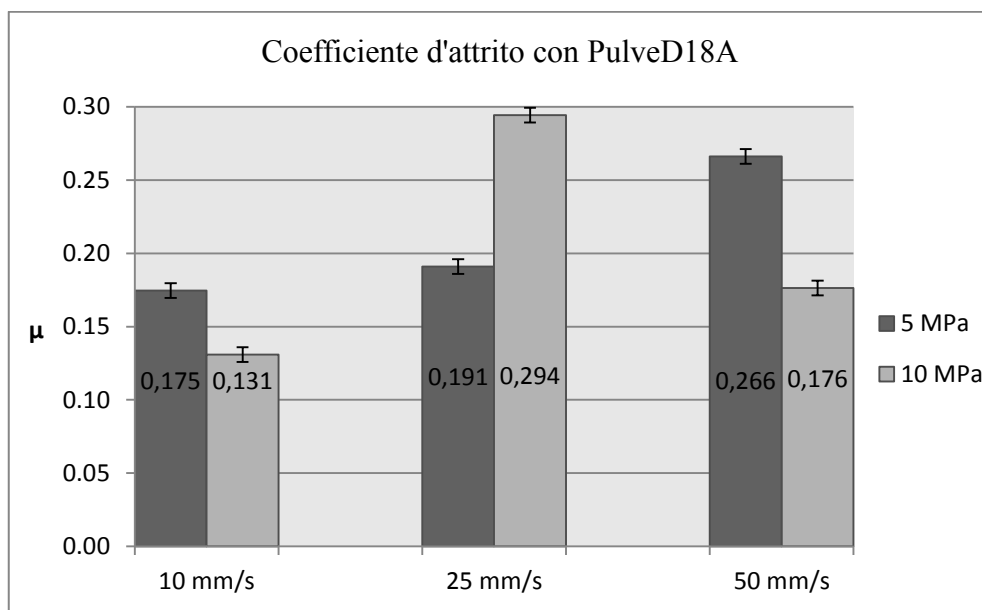


grafico 4.7 – Confronto tra coefficienti di attrito con il lubrificante a base di bisolfuro di molibdeno

È subito evidente il valore sottolineato in tabella 4.10, esso è causato da quanto già descritto in precedenza: al passaggio dello stampo, se lo strato di lubrificante non è ben attaccato alla lamina, si stacca generando delle scaglie; questo problema deve essere risolto e per farlo bisogna far riposare minimo 5 ore la lamina dopo la deposizione del lubrificante.

Dall’istogramma si osserva come, aumentando la pressione tra stampo e lamina, il valore del coefficiente di attrito risulti più basso a parità di velocità e corsa, il che potrebbe condurre ad una spiegazione semplice: la maggiore pressione schiaccia le asperità della lega AA6016, rendendo la superficie relativamente più liscia (riduzione della rugosità), al passaggio dello stampo e dunque riducendo il valore di μ .

Un’altra peculiarità che si può rilevare dai dati di tabella 4.10, è l’aumento del coefficiente di attrito con la velocità di strisciamento.

4.2.3 μ : PulveBND60A depositato e testato a freddo

Il lubrificante in questione a base di nitrato di boro, viene spruzzato a freddo mediante bomboletta spray. Qui in seguito vengono così proposte le curve di attrito per le diverse combinazioni di variabili in gioco.

Si inizia con la pressione pari a 5 MPa.

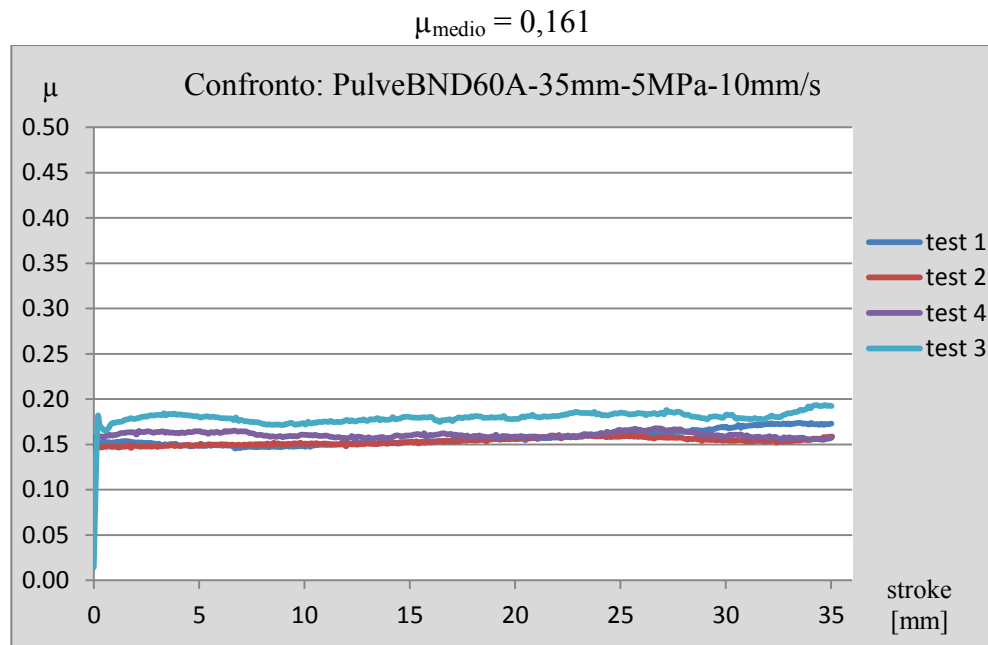


grafico 4.8 – Curve di attrito con PulveBND60A depositato e testato a temperatura ambiente [PulveBND60A-35mm-5MPa-10mm/s]

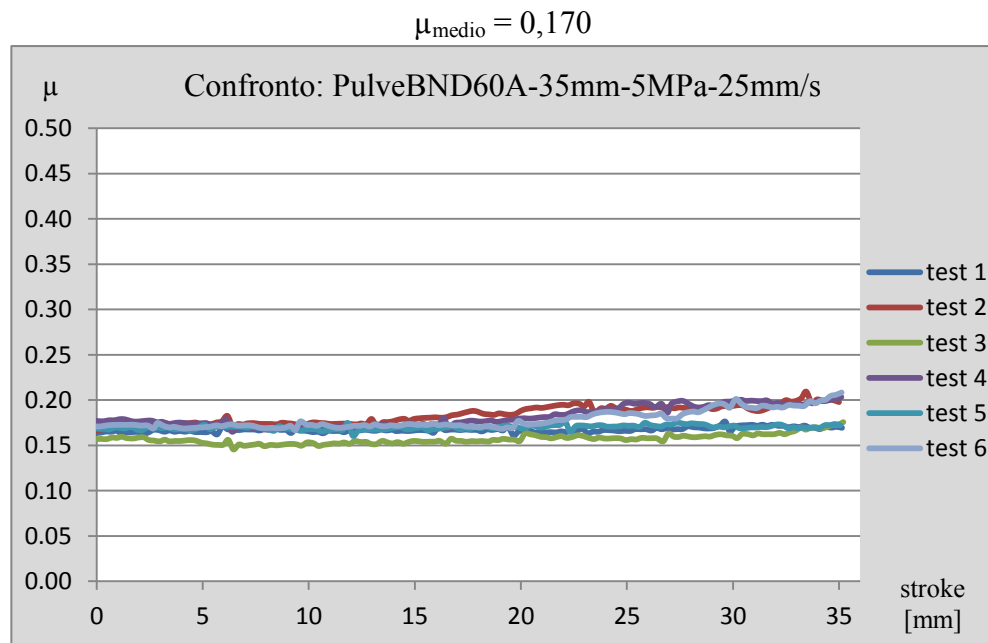


grafico 4.9 – Curve di attrito con PulveBND60A depositato e testato a temperatura ambiente [PulveBND60A-35mm-5MPa-25mm/s]

$$\mu_{\text{medio}} = 0,167$$

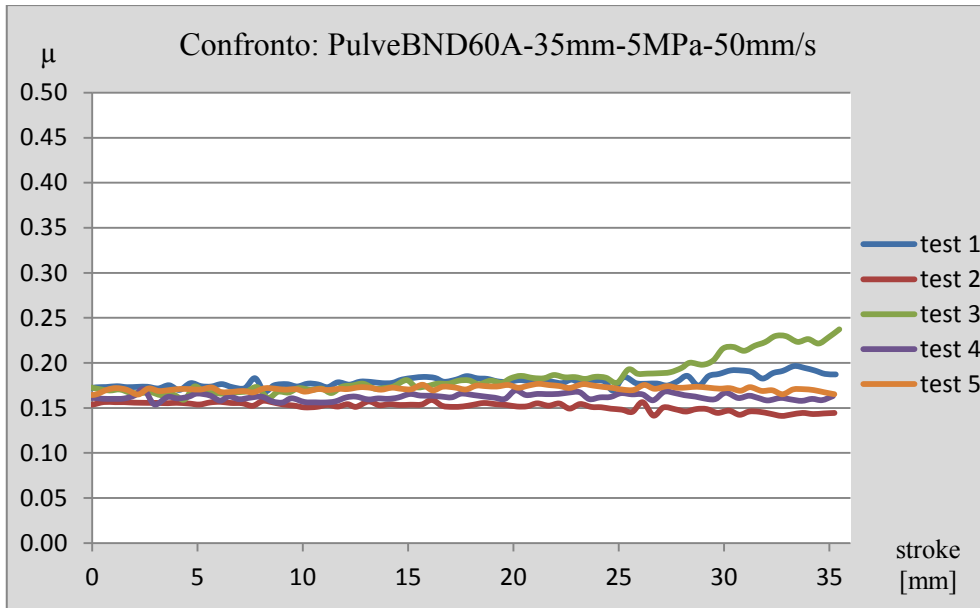


grafico 4.10 – Curve di attrito con PulveBND60A depositato e testato a temperatura ambiente [PulveBND60A-35mm-5MPa-50mm/s]

Passiamo ora alle curve con pressione pari a 10 MPa.

$$\mu_{\text{medio}} = 0,201$$

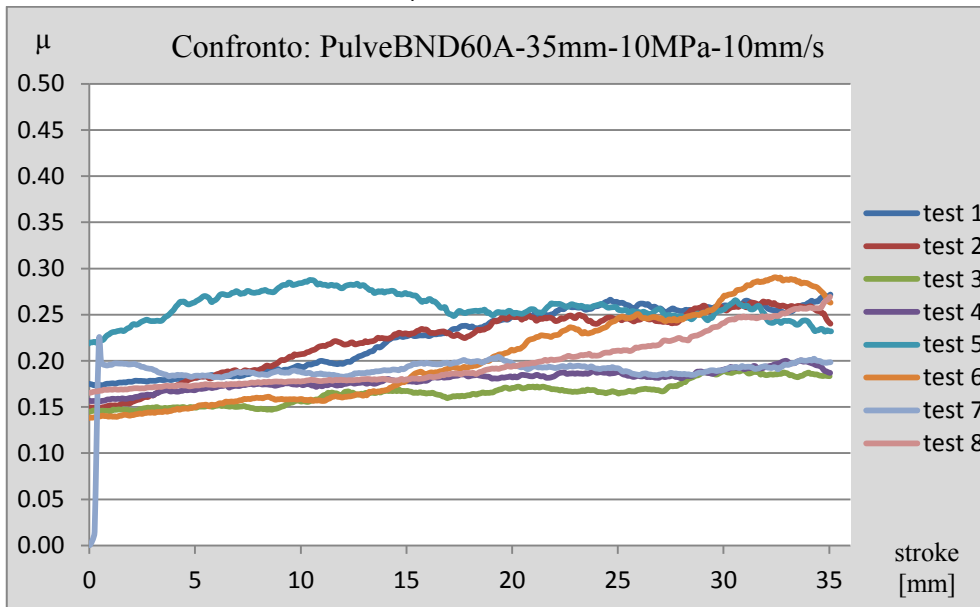


grafico 4.11 – Curve di attrito con PulveBND60A depositato e testato a temperatura ambiente [PulveBND60A-35mm-10MPa-10mm/s]

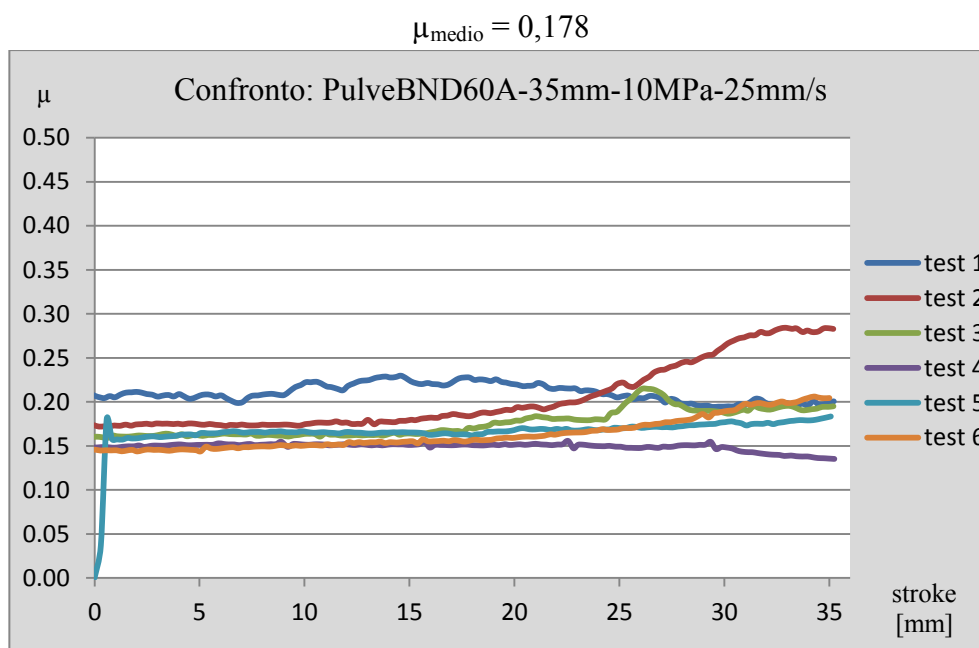


grafico 4.12 – Curve di attrito con PulveBND60A depositato e testato a temperatura ambiente [PulveBND60A-35mm-10MPa-25mm/s]

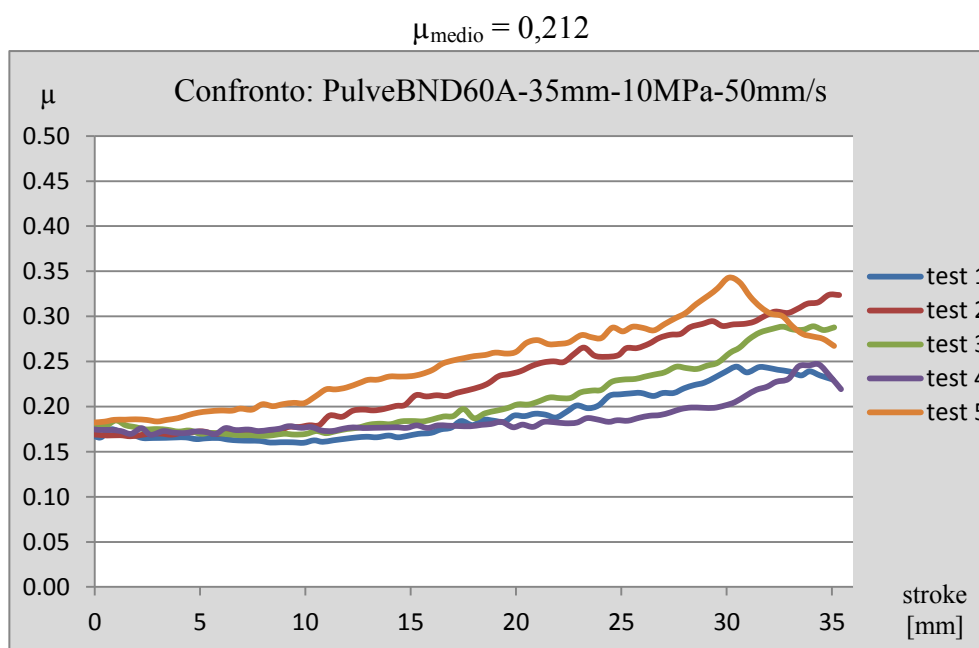


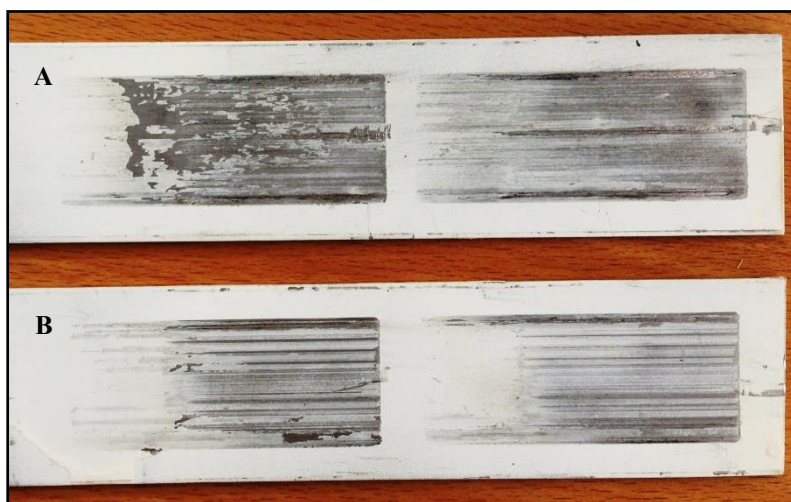
grafico 4.13 – Curve di attrito con PulveBND60A depositato e testato a temperatura ambiente [PulveBND60A-35mm-10MPa-50mm/s]

Diversamente dal lubrificante a base di bisolfuro di molibdeno, il PulveBND60A, si comporta in modo migliore sia all'aumentare della velocità di strisciamento che all'aumentare della pressione e ciò si vede dall'andamento pressoché piano delle curve di attrito. I test sono stati

effettuati con velocità, che arrivano sino a 50 mm/s, fin troppo elevate per i processi di stampaggio a caldo; ciò infatti giustifica la maggiore dispersione delle curve nel grafico 4.13. Ad incidere sulla dispersione delle curve è anche la pressione, la quale aumentando, accentua ancor di più tale difetto (si veda come nel grafico 4.10 rispetto al 4.13, la dispersione sia molto più ridotta).

Con il PulveBND60A, a base di nitruro di boro, non si presenta il problema legato al tempo di deposizione, seppur comunque sia d'obbligo dover aspettare 3/4 ore per avere sicurezza che lo strato si sia completamente attaccato. In seguito si vedono i risultati delle strisciate sulle lamine di alluminio dove i tempi di riposo sono i seguenti:

- lamina A: 1,5/2 ore
- lamina B: 5/6 ore



*figura 4.13 – Lamine confronto dopo tempi di riposo differenti
(10 MPa, 50 mm/s e 35 mm di corsa)*

La lamina A, contiene due strisciate che corrispondono quindi ai *test 1* e *4* del grafico 4.13, dove appunto le variabili in gioco sono le stesse usate per il PulveD18A per avere un riscontro diretto a livello di risultato; la lamina B invece fa riferimento al *test 2* e *5* sempre dello stesso grafico.

In figura 4.14 inoltre si può apprezzare il dettaglio dei test appena commentati, e nei quali si nota come non vi siano particolari distacchi tra lubrificante e lamina.



figura 4.14 – Dettaglio delle strisciate con PulveBND60A



figura 4.15 – Lamine con PulveBND60A: da destra a sinistra si può apprezzare l'evoluzione della lamina, da prima vergine, poi con lubrificante ed infine con i test già eseguiti

Si viene ora a descrivere il valore di μ trovato durante le strisciate; un istogramma può rendere più semplice ed immediata la comprensione dei valori di coefficiente d'attrito riscontrati sperimentalmente.

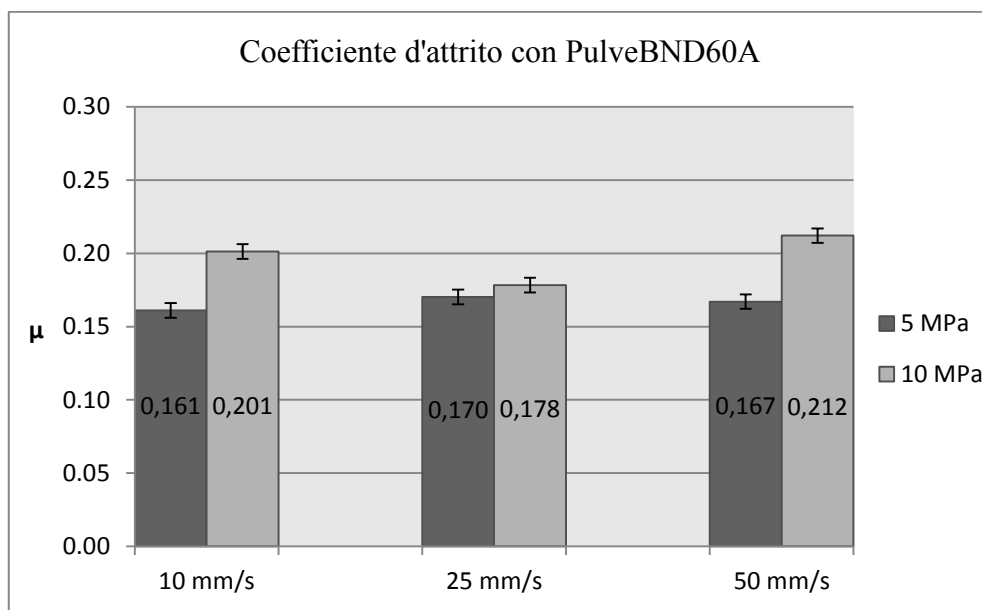


grafico 4.14 – Confronto tra coefficienti di attrito con PulveBND60A

Variabili della prova con PulveBND60A		μ _{medio}
Grafico 4.8	5 MPa – 10 mm/s – 35 mm	0,161
Grafico 4.9	5 MPa – 25 mm/s – 35 mm	0,170
Grafico 4.10	5 MPa – 50 mm/s – 35 mm	0,167
Grafico 4.11	10 MPa – 10 mm/s – 35 mm	0,201
Grafico 4.12	10 MPa – 25 mm/s – 35 mm	0,178
Grafico 4.13	10 MPa – 50 mm/s – 35 mm	0,212

tabella 4.11 – Confronto tra i coefficienti di attrito con PulveBND60A testato a freddo

I risultati ottenuti con il PulveBND60A, sono mediamente migliori in termini di coefficiente d’attrito rispetto al PulveD18A; tale affermazione trova giustificazione dal fatto che un minore valore di μ abbassa l’usura degli stampi, rende il processo di stampaggio a caldo meno ostico, e tutto ciò ha come risultato un abbassamento dei costi di processo.

Si pensi alla sostituzione degli stampi qualora di usasse il lubrificante a base di bisolfuro di molibdeno o nitrato di boro, con il secondo dai risultati ottenuti, vi sarebbe un’usura minore e dunque una sostituzione meno frequente rispetto al primo.

Con questo prodotto si riscontra una proporzionalità diretta tra μ e pressione di contatto, l’esatto contrario di quanto invece accadeva con il PulveD18A; variando velocità invece, il coefficiente di attrito non evidenzia un

andamento crescente/decescente, ma oscillatorio: per entrambe le pressioni infatti in corrispondenza del valore di 25mm/s, si ha un abbassamento del coefficiente d'attrito.

4.2.4 μ : BonderiteL-FM747 depositato e testato a freddo, con rullo

Come è già stato descritto nel relativo paragrafo trattante le caratteristiche dei lubrificanti, il prodotto in questione viene depositato e testato solo a freddo, può cambiare la tecnica di deposizione che potrà essere con rullo, come descritto nel corrente paragrafo, o con ugello nebulizzatore (paragrafo successivo).

Per problematiche legate alla macchina di strip, si riportano solo i risultati con 35mm-5MPa-10mm/s.

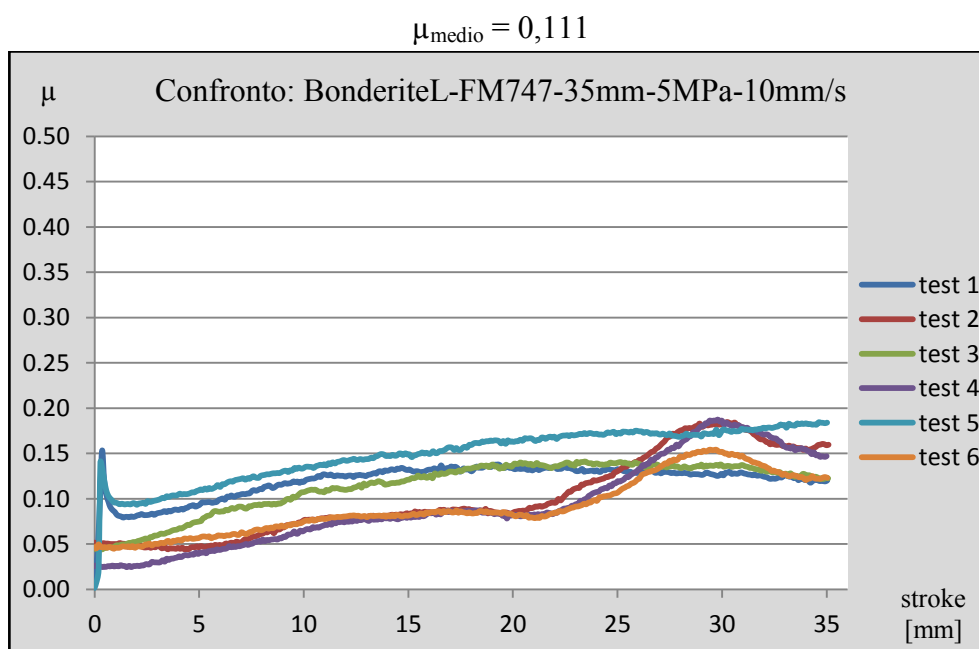


grafico 4.15 – Curve di attrito con BonderiteL-FM747 depositato e testato a temperatura ambiente [BonderiteL-FM747-35mm-5MPa-10mm/s]

È subito evidente come il coefficiente d'attrito risulti essere più basso rispetto ai lubrificanti visti in precedenza e la spiegazione potrebbe essere interpretata in due modi:

- la differenza di stato dei prodotti fin qui analizzati: il prodotto in questione è un liquido viscoso che potrebbe rendere meno ostiche le condizioni di contatto tra stampo e lamina, interponendosi tra i due corpi in questione in modo più efficace rispetto allo strato depositato con bomboletta spray;

- un'altra motivazione potrebbe essere la quantità di prodotto depositato sulla lamina mediante rullo: si vede subito da tabella 4.7, al paragrafo relativo alla deposizione, che la quantità deposta è maggiore rispetto ai prodotti che si presentano in forma di aerosol; la problematica difficile da risolvere è quantificare con esattezza quanto prodotto si depone con il rullo i feltro, sarà sicuramente d'aiuto la deposizione del BonderiteL-FM747 con l'ugello nebulizzatore, per avere un confronto diretto;

I valori numerici di μ vengono riassunti in tabella seguente:

Variabili della prova con BonderiteL-FM747		μ_{medio}
Grafico 4.15	5 MPa – 10 mm/s – 35 mm	0,111

*tabella 4.12 – Valore medio del coefficiente di attrito con
BonderiteL-FM747 testato a freddo*

5 – CONCLUSIONI

Arrivati a questo punto si è in grado di tirare le somme riguardo all'esperienza vissuta sia in termini di risultati, che di giudizi riguardo a fatti accaduti e all'organizzazione dei compiti durante il periodo di tesi.

I risultati del coefficiente di attrito sono stati elencati nel capitolo precedente e vengono qui in seguito comparati.

Variabili della prova	μ_{medio} Pulve D18A	μ_{medio} Pulve BND60A	μ_{medio} Bonderite L-FM747
	dep. e testato a freddo (spray)	dep. e testato a freddo (spray)	dep. e testato a freddo (rullo)
5 MPa – 10 mm/s – 35 mm	0,175	0,161	0,111
5 MPa – 25 mm/s – 35 mm	0,191	0,170	-
5 MPa – 50 mm/s – 35 mm	0,266	0,167	-
10 MPa – 10 mm/s – 35 mm	0,131	0,201	-
10 MPa – 25 mm/s – 35 mm	<u>0,294</u>	0,178	-
10 MPa – 50 mm/s – 35 mm	0,176	0,212	-

tabella 5.1 – Valori dei coefficienti di attrito con test realizzati a temperatura ambiente

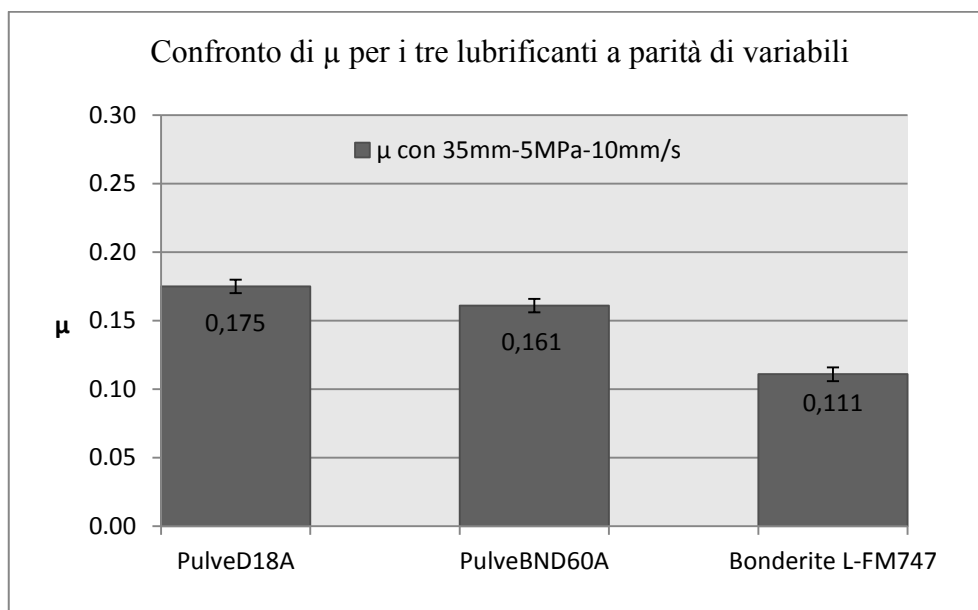


grafico 5.1 – Confronto tra i coefficienti di attrito ottenuti, a parità di variabili (35mm-5MPa-10mm/s), per i tre diversi lubrificanti considerati

Le tre barre, nell'istogramma, mostrano valori ben differenti tra un lubrificante e un altro: tale differenza è marcata sia a causa del diverso stato in cui si presenta il lubrificante nel test di attrito, sia per la tecnica con cui viene depositato.

La deposizione mediante rullo comporta dei valori più bassi rispetto alla normale bomboletta spray; è pur vero però, che se si va a confrontare il quantitativo di prodotto applicato, con la bomboletta si ha uno spreco minore. La domanda che ci si pone è la seguente: vale la pena utilizzare un lubrificante che abbassi il coefficiente di attrito, ma che allo stesso tempo causi un maggior spreco di prodotto durante la deposizione? Non converrebbe forse, usarne uno che tuteli meno l'usura degli stampi, ma che ci permetta un suo utilizzo più prolungato?

Le questioni poste hanno sicuramente la loro fondatezza, che però arriva alla classica scelta di compromesso come nella maggior parte dei casi: bisogna vedere l'obiettivo dei test. Premettendo che il prezzo dei lubrificanti non è stato dato si ragionerà a parità di prezzo, valutando solo lo spreco e l'usura tra i componenti.

Si supponga di essere in un periodo di crisi economica, l'ingegnere cercherà sicuramente di preservare l'azienda dal punto di vista economico evitandone gli sprechi, quindi preferirà utilizzare un lubrificante che prometta migliori prestazioni in termini di coefficiente di attrito, come il Bonderite, sebbene ne venga utilizzato di più sulla stessa superficie, ma che allo stesso tempo

permetta una durata maggiore degli stampi e degli utensili utilizzati nelle prove, in quanto il costo di uno stampo è solitamente elevato e non trascurabile rispetto al prezzo del lubrificante.

Quando si imposta una campagna prove, bisogna considerare anche eventuali problematiche ed imprevisti in corso d'opera: si è partiti con il voler avere una ripetibilità di 4/5 prove, ma in certi casi si è arrivati anche ad 8 per avere una maggior sicurezza nel presentare il coefficiente di attrito medio; è facile infatti cadere in errori sistematici che possono essere sì, corretti a posteriori, ma che nel caso nostro non avrebbe senso fare, in quanto è più sensato ripetere la prova.

Si sta introducendo quindi la problematica riscontrata con il PulveD18A, nella quale si è introdotta un'altra variabile importante e cioè il tempo di riposo tra la deposizione e il test di attrito: se il tempo di riposo non era minimo di 5 ore il lubrificante al passaggio dello stampo, si staccava a scaglie, rendendo la superficie vergine e innalzando il valore di μ . I test fatti in questo modo, non possono essere considerati, vanno ripetuti.

Si viene ora a confrontare la deposizione in termini di quantità:

Lamina con PulveD18A		Lamina con PulveBND60A		Lamina con BonderiteL-FM747	
Peso lubr. [g/cm ²]	Spessore strato [μm]	Peso lubr. [g/cm ²]	Spessore strato [μm]	Peso lubr. [g/cm ²]	Spessore strato [μm]
0,001907	18,94	0,001874	15,30	0,002769	-
0,001971	18,50	0,001822	14,72	0,002785	-
0,001942	17,05	0,001851	12,24	0,002766	-
0,001978	16,32	0,001866	16,61	0,002761	-
Media					
0,00195	17,70	0,00185	14,72	0,00277	-

tabella 5.2 – Confronto tra le quantità di lubrificante applicato e lo spessore

La quantità di Bonderite depositato a parità di superficie, rispetto agli altri due, è maggiore di circa un 40%; sul singolo provino tali valori sono impercettibili, ma se considerato il volume di produzione di un'intera azienda automotive posso comportare uno spreco non da poco.

Ecco dunque giustificato quanto detto finora, relativamente al minore valore di coefficiente di attrito del Bonderite, compensato da un maggior spreco di prodotto.

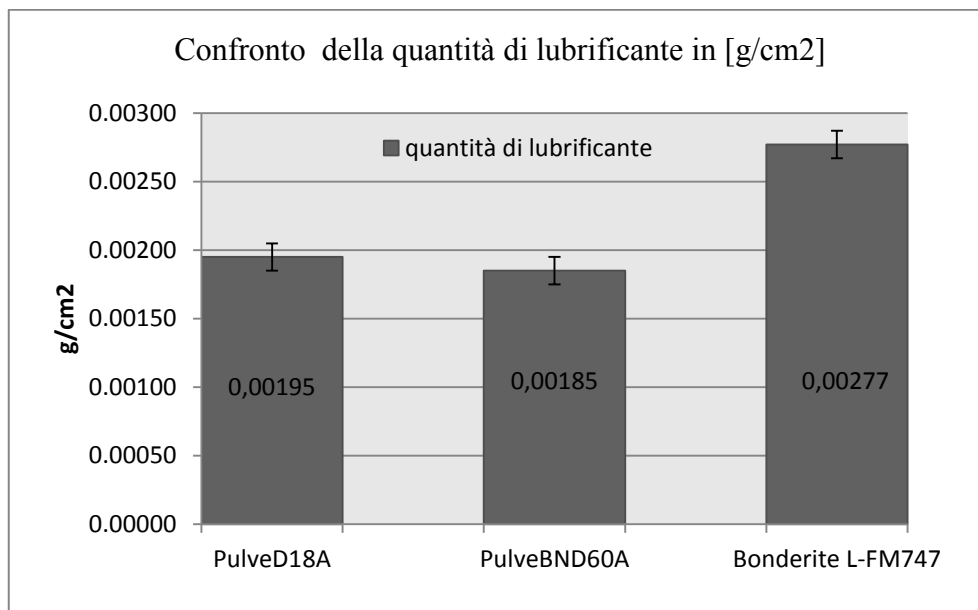


grafico 5.2 – Confronto del quantitativo di prodotto applicato in [g/cm²] per i tre diversi lubrificanti considerati

Meno evidente è invece la differenza tra i due prodotti spray: il primo ha approssimativamente lo stesso quantitativo per cm², cambia lo spessore dello strato di lubrificante; in tal caso stiamo parlando di ordini di grandezza che variano di qualche micron: da 17,7 del PulveD18A a 14,72 µm del PulveBND60A.

Viene proposta qui in seguito anche un paragone tra i diversi valori di rugosità ottenuti, con e senza il lubrificante applicato:

Rugosità				
	Lamina con Pulve D18A	Lamina con Pulve BND60A	Lamina con Bonderite L-FM747	Lamina vergine AA6016
n°	Sa [µm]	Sa [µm]	Sa [µm]	Sa [µm]
1	0,697	0,663	0,803	1,079
2	0,754	0,676	0,821	1,088
3	0,733	0,683	0,821	1,186
4	0,758	0,672	0,714	1,152
5	0,720	0,886	0,801	1,095
6	0,728	0,732	0,795	1,122
7	0,744	0,888	0,781	1,155

8	0,770	1,233	0,785	1,058
9	0,740	0,777	0,792	0,988
10	0,790	0,849	0,816	0,928
Media	0,743	0,758	0,793	1,043
Dev. Std.	0,027	0,094	0,031	0.125

tabella 5.3 – Valori di rugosità a confronto

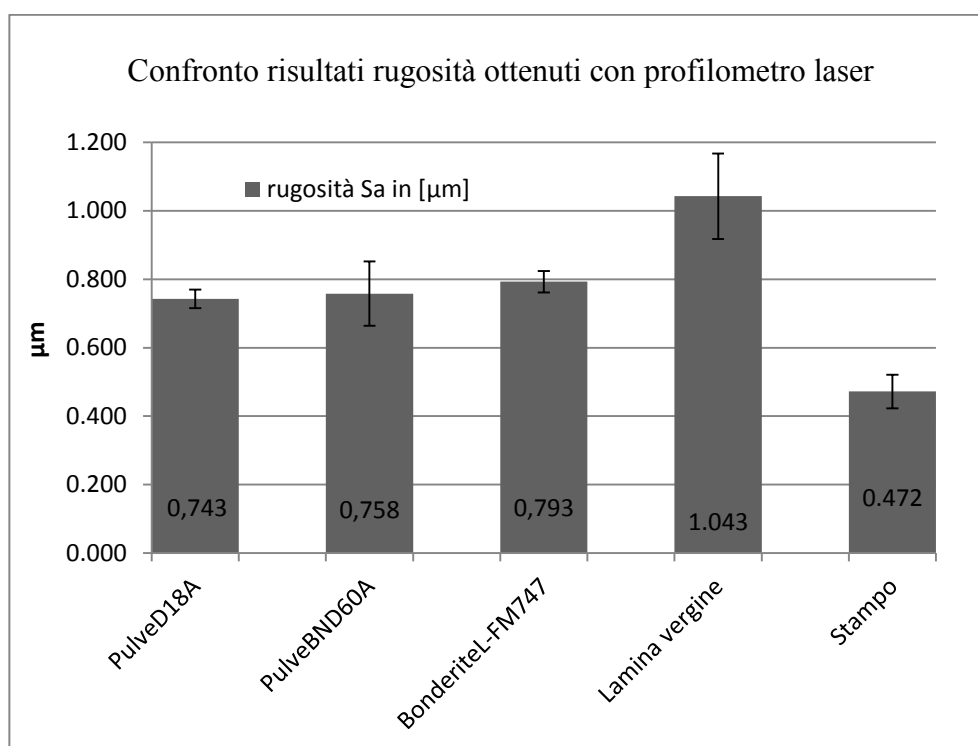


grafico 5.3 – Confronto tra i valori di rugosità ottenuti con profilometro laser

In termini di pagine nell'elaborato, il peso dato al modello 3D è ridotto, in realtà è stata una delle fasi più complesse e lunghe dell'intero percorso di tesi: non è semplice partire da zero e creare una macchina con gli obiettivi e i vincoli già riportati al capitolo 3, tale fase ha portato via 3 mesi degli 8 totali, il riportare e numerare i modelli e concept realizzati, non può dare al lettore l'idea delle variabili che siano state introdotte nel realizzare la macchina. Anche la fase relativa alla realizzazione delle tavole 2D ha comportato un dispendio di tempo da non trascurare e sebbene sia stata menzionata solo nell'ultima appendice con un semplice elenco dei componenti, è stata frutto di un lavoro assai impegnativo, metodico e ripetitivo (sono una cinquantina i componenti messi in tavola, con relative viste, quote, tolleranze, materiali, lavorazioni e finiture superficiali).

A – TARATURA DELLA PIASTRA SULLA MACCHINA DI STRIP DRAWING TEST

A.1 POSIZIONAMENTO DELLA LAMINA E SALDATURA DELLE TERMOCOPPIE

Prima di passare effettivamente alla prova di strip drawing test, dopo che si avrà lubrificato a dovere la lamina di alluminio, è doveroso verificare che quest'ultima raggiunga la temperatura obiettivo e che la mantenga; ecco perciò, che si procederà con delle prove di taratura.

Per monitorare la temperatura si è utilizzata una lamina di alluminio 6016, lo stesso che poi verrà utilizzato nelle prove vere e proprie, e su di essa, si sono installate delle termocoppie.

L'apparato sperimentale è quello di figura A.1, dove per l'appunto vengono collegate 4 termocoppie sulla lamina ed 1 sulla piastra riscaldante.

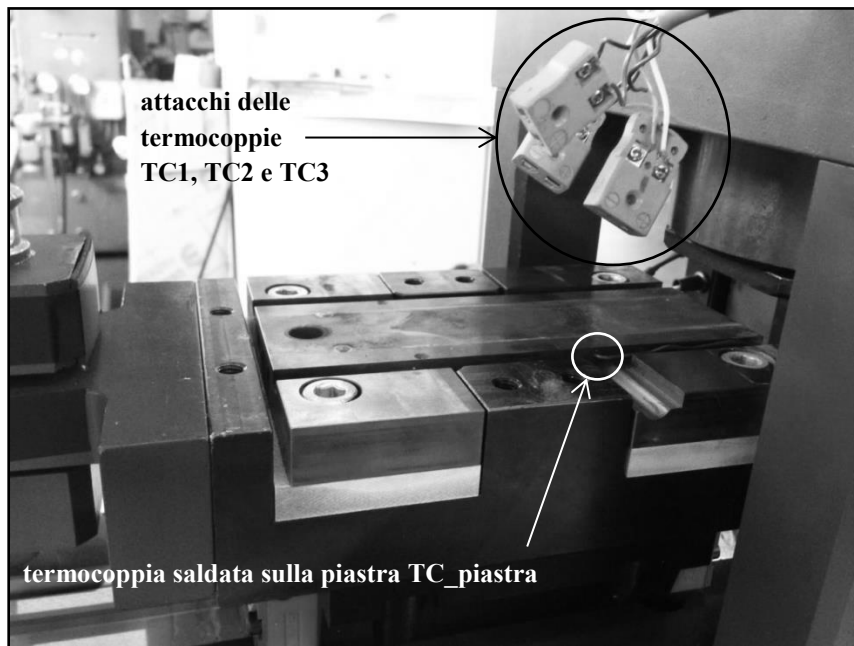


figura A.1 – Configurazione della piastra senza la lamina, cosicché si possa apprezzare la posizione della termocoppia sulla piastra

A questo punto bisogna fare qualche considerazione sulla posizione delle termocoppie: si è deciso utilizzare solo la zona tratteggiata di figura A.3, la quale per l'appunto coincide proprio con la sezione della cartuccia centrale. Per riscaldare la piastra infatti si sono posizionate 3 cartucce come quella di figura A.2.

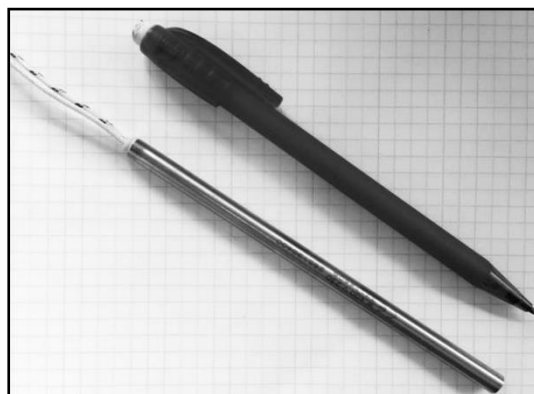


figura A.2 – Cartuccia scaldante

Le termocoppie vengono posizionate in modo regolare lungo la lunghezza della cartuccia che è di 130 mm (è bene che i due punti di saldatura siano massimo a 1 mm di distanza l'uno dall'altro).

La lamina ha le seguenti dimensioni: 183x35x1,5 mm.

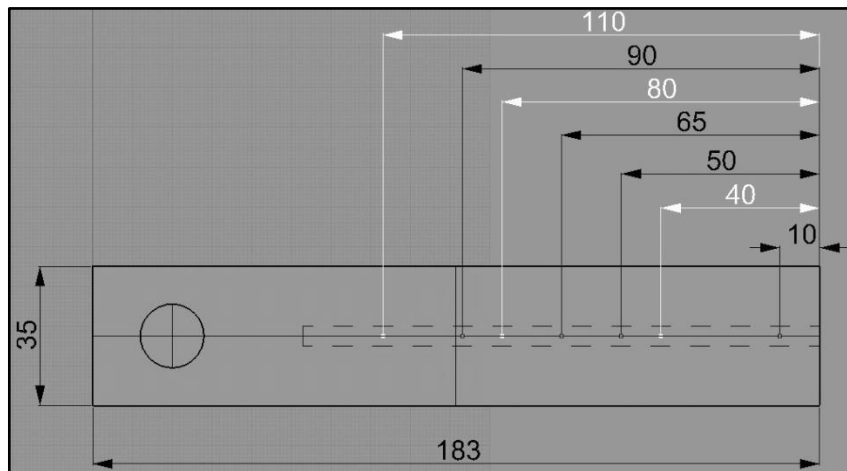


figura A.3 – Piastra quotata in mm (spessore piastra 1,5 mm)

Qual è l'obiettivo della prova? Trovare l'andamento della temperatura sulla lamina in diversi punti. È stata fatta così una prima prova e una seconda correttiva. Nella prima taratura sono state posizionate le termocoppie come mostra la seguente tabella A.1, dove ci si riferisce alle quotature bianche di figura A.3.

Termocoppia	TC1	TC2	TC3	TC4
x [mm]	110	80	40	10

tabella A.1 – Posizionamento delle termocoppie sulla lamina di alluminio

La misura dello “0” corrisponde con il bordo destro della lamina e da esso vengono posizionate tutte le termocoppie.

Se i due punti di saldatura (rappresentanti uno il polo + e l'altro il polo -), fossero sovrapposti il sistema non segnerebbe la temperatura obiettivo, ma una temperatura che tende a infinito, dunque bisognerebbe rivedere la posizione dei due punti di saldatura.

Nella seconda prova si sono modificate la posizione delle termocoppie in quanto la TC1 aveva un andamento di temperatura ben diverso dalle altre e perciò è stata avvicinata al centro della cartuccia.

Termocoppia	TC1	TC2	TC3	TC4
x [mm]	90	65	50	10

tabella A.2 – Riposizionamento delle termocoppie sulla lamina di alluminio

Le posizioni sono leggermente diverse, l'unica invariata è la TC4; tale disposizione si può apprezzare ancor meglio per via grafica da figura A.3, dove le termocoppie di questa seconda prova corrispondono alle quote in nero.

Prima di passare ai risultati e al confronto tra le due prove, vediamo ora il procedimento che ci ha permesso di acquisire i dati.

La lamina di alluminio a questo punto è pronta per la prova e va posizionata sulla piastra facendo attenzione alla fragilità dei punti di saldatura. In figura A.4 si può vederne il posizionamento corretto.

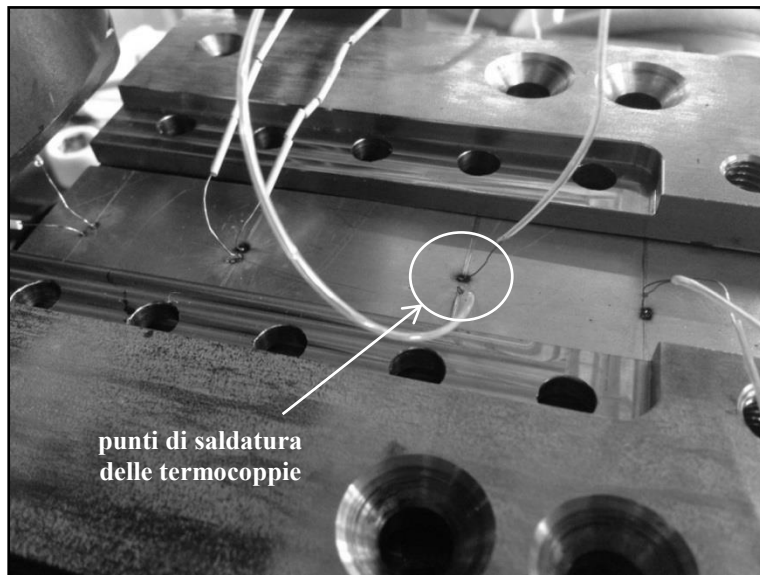


figura A.4 – Posizionamento della lamina di alluminio con i punti di saldatura, collegati alle termocoppie

A questo punto prima di fissare con le viti, la placca di bloccaggio della lamina sulla piastra, verificiamo che i collegamenti, positivo-negativo delle termocoppie, siano corretti: è sufficiente collegare le termocoppie al sistema di acquisizione e successivamente toccare con un dito i punti di saldatura. Se a monitor la temperatura sale significa che i poli positivo-negativo, sono stati collegati in modo corretto, altrimenti bisogna invertire i due poli sul morsetto della termocoppia.

Prima di passare ai risultati della prova è doveroso dare qualche informazione riguardo il sistema di acquisizione: qui in seguito viene proposto uno screenshot del software LABVIEW© creato ad hoc per tali prove.

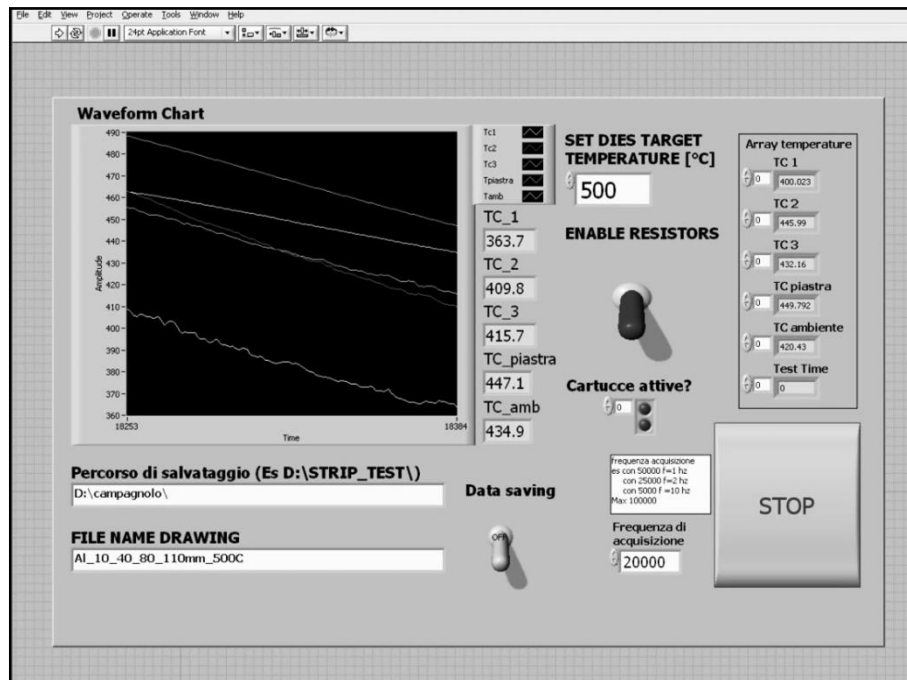


figura A.5 – Finestra del software LABVIEW© utilizzata per l’acquisizione dei dati

La finestra permette:

- di attivare/disattivare i resistori che innalzano la temperatura della piastra (“Enable resistors”)
- di settare la temperatura obiettivo della piastra (“Set dies target temperature [°C]”)
- di verificare quando le cartucce siano attive o meno (“Cartucce attive?”)
- di iniziare/stoppare l’acquisizione dei dati

Affianco al riquadro che consente di vedere l’andamento della temperatura in funzione del tempo, sono monitorate le temperature delle 4 termocoppie sulla lamina (TC1, TC2, TC3 e TC4 = TC_amb) e dell’unica termocoppia sulla piastra (TC_piastra).

L’obiettivo è, oltre a capire se la piastra raggiunga la temperatura obiettivo, quello di vedere se essa riesca a mantenerla per un determinato periodo di tempo tale che possa essere eseguita la prova di strip drawing test.

Si è deciso di fare 5 prove, a 5 temperature differenti ed inoltre tali temperature sono state mantenute per circa 12 minuti.

1. Prova a 300°C per 12 minuti
2. Prova a 350°C per 12 minuti

3. Prova a 400°C per 12 minuti
4. Prova a 450°C per 12 minuti
5. Prova a 500°C per 12 minuti

Prima di iniziare con la taratura, fissare la piastra di bloccaggio sulla lamina ponendo particolare attenzione alle viti da inserire, le quali dovranno sopportare temperature intorno ai 500°C.

A.2 ACQUISIZIONE DATI

L'acquisizione fa riferimento alla seguente procedura:

1. Impostare la temperatura obiettivo (300°C - 350°C – 400°C - 450°C – 500°C)
2. Indicare la cartella di destinazione dei dati (D:\...)
3. Scegliere la frequenza di acquisizione (nel nostro caso si convenuto che 3 dati al secondo fossero sufficienti, dunque 3 Hz, che per 12 minuti danno circa 2000 dati per prova)
4. Confermare i settaggi imposti nei punti precedenti
5. Attivare i resistori (cliccare su “Enable resistors”)
6. Iniziare l'acquisizione dati a 50°C sotto la temperatura obiettivo indicata dalla piastra, per avere delle curve più complete (se la temperatura obiettivo è 500°C, iniziare l'acquisizione a 450°C)
7. Far partire il cronometro per 12 minuti, quando le cartucce si attivano (vedere le luci sotto la voce “Cartucce attive?”)
8. Staccare i resistori dopo che sono trascorsi i 12 minuti
9. Bloccare l'acquisizione dati, quando la temperatura della piastra è scesa di circa 50°C sotto quella obiettivo (per avere delle curve più complete)
10. Cliccare su “Stop” per terminare la sessione

Seguendo tale procedura si avrà così alla fine, un file in formato EXCEL, con la temperatura in funzione del tempo dal quale estrapolare i dati per crearne l'andamento.

A.3 CONFRONTO DEI RISULTATI OTTENUTI

Vengono proposti i grafici per le 2 sessioni di prove a 5 differenti temperature.

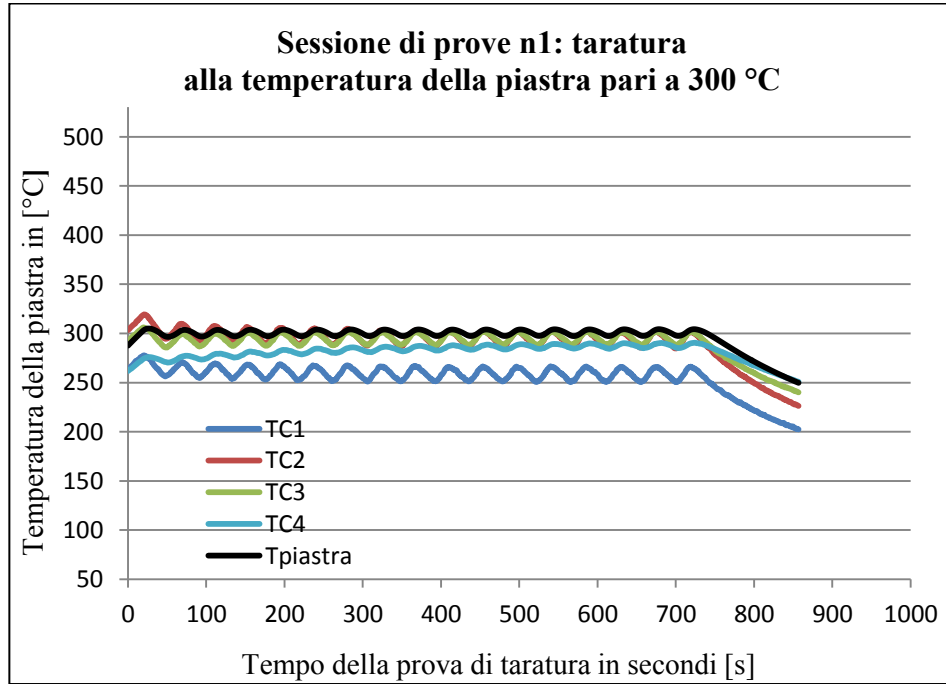


grafico A.1 – Andamento della temperatura nel tempo, a 300 °C

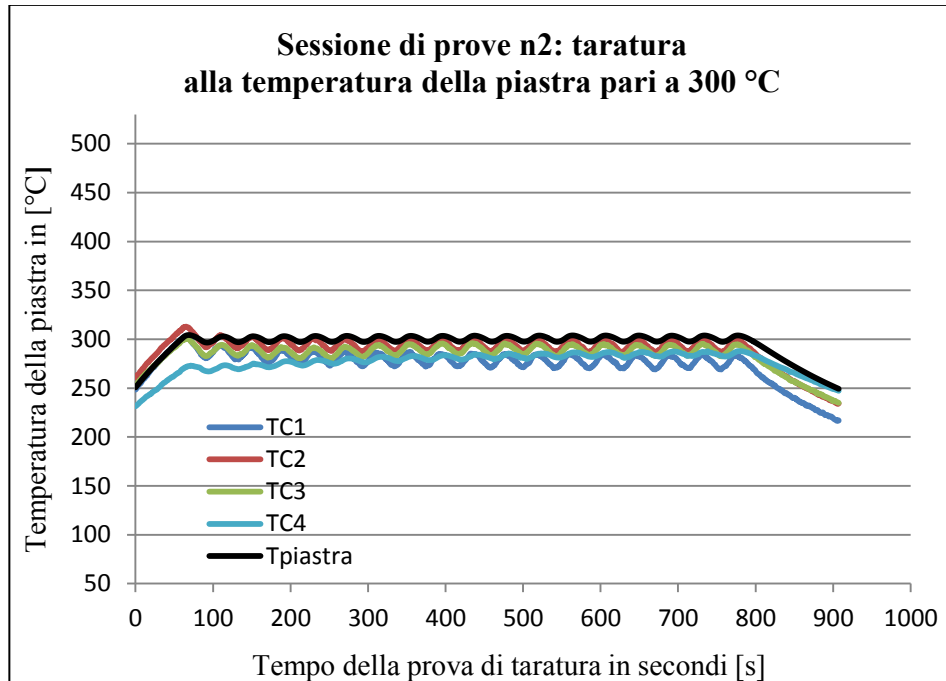


grafico A.2 – Andamento della temperatura nel tempo, a 300 °C

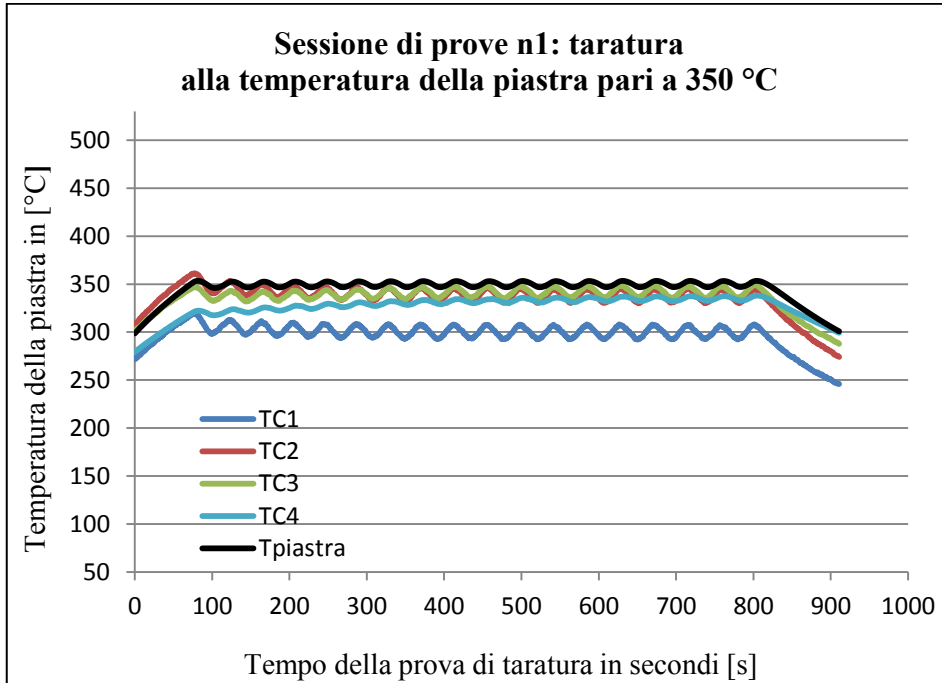


grafico A.3 – Andamento della temperatura nel tempo, a 350 °C

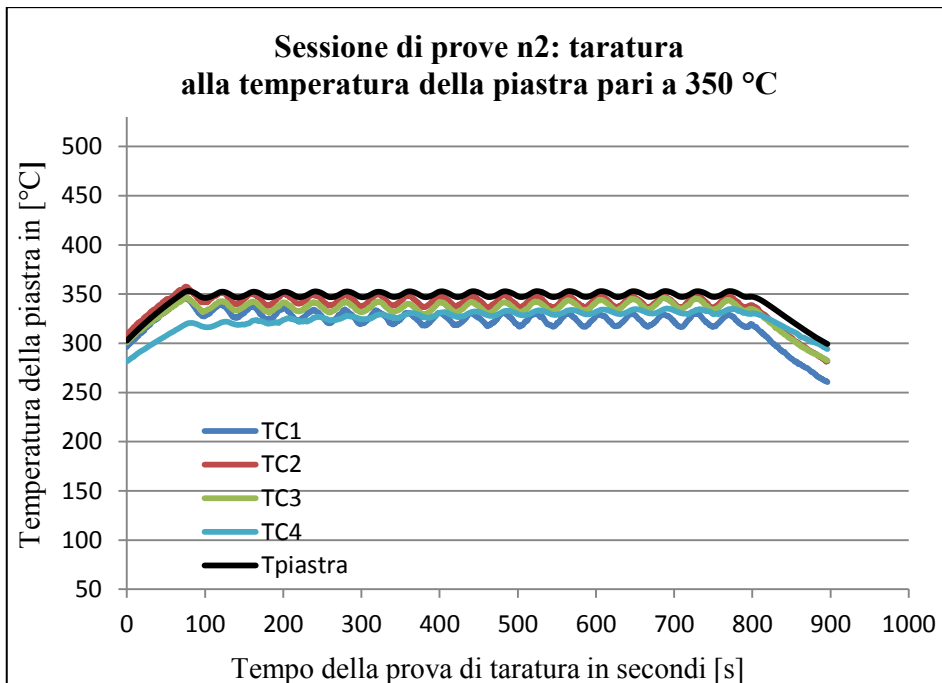


grafico A.4 – Andamento della temperatura nel tempo, a 350 °C

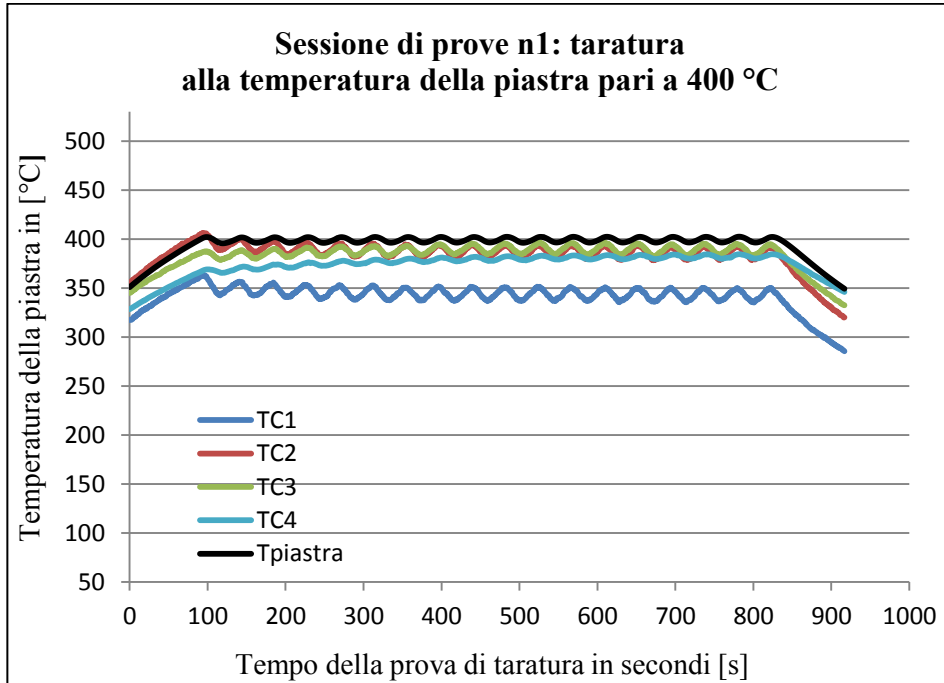


grafico A.5 – Andamento della temperatura nel tempo, a 400 °C

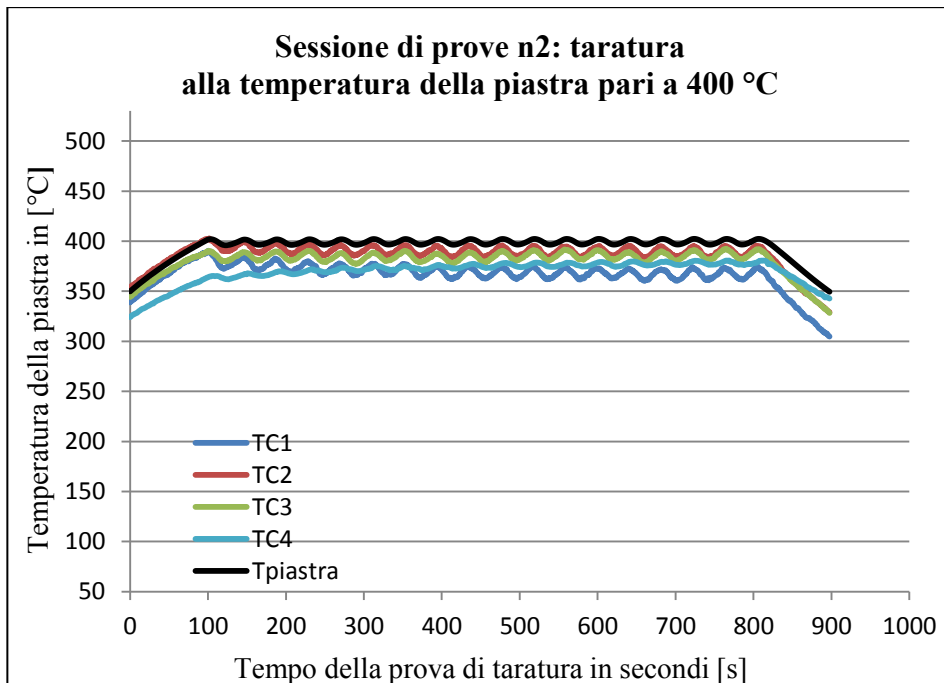


grafico A.6 – Andamento della temperatura nel tempo, a 400 °C

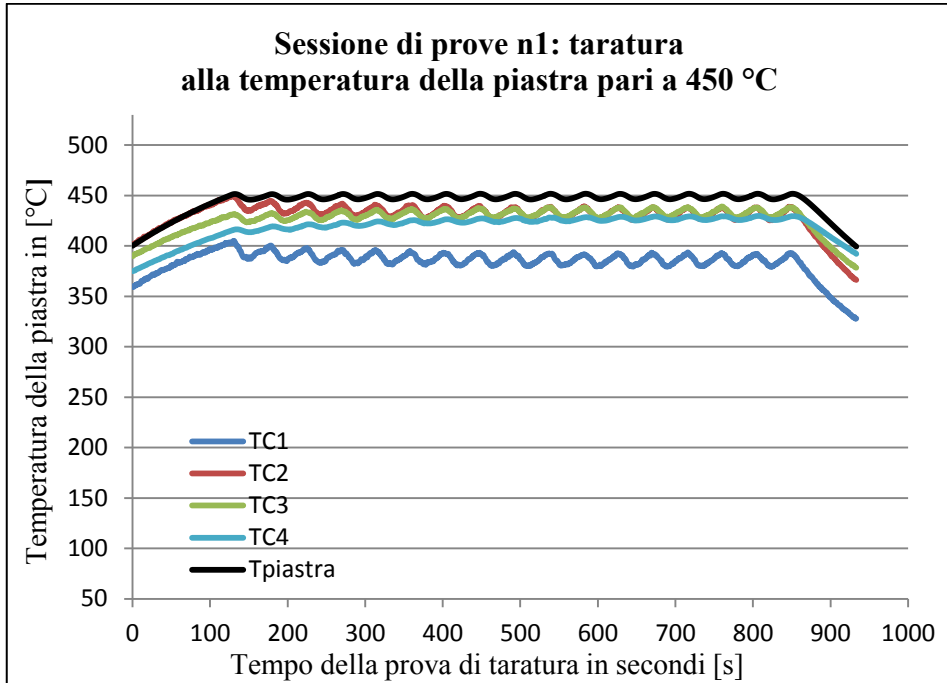


grafico A.7 – Andamento della temperatura nel tempo, a 450 °C

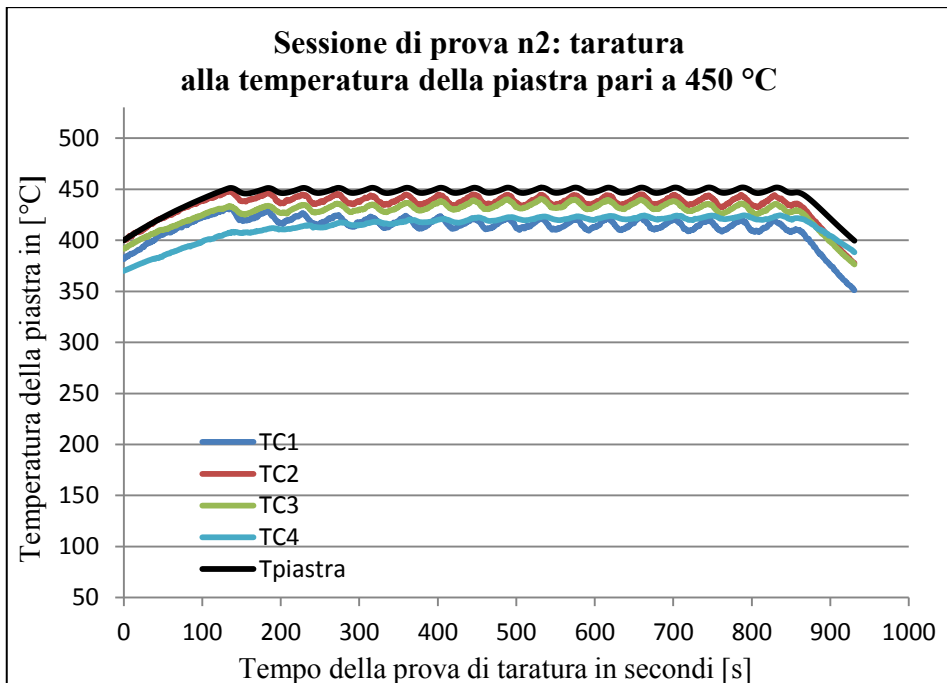


grafico A.8 – Andamento della temperatura nel tempo, a 450 °C

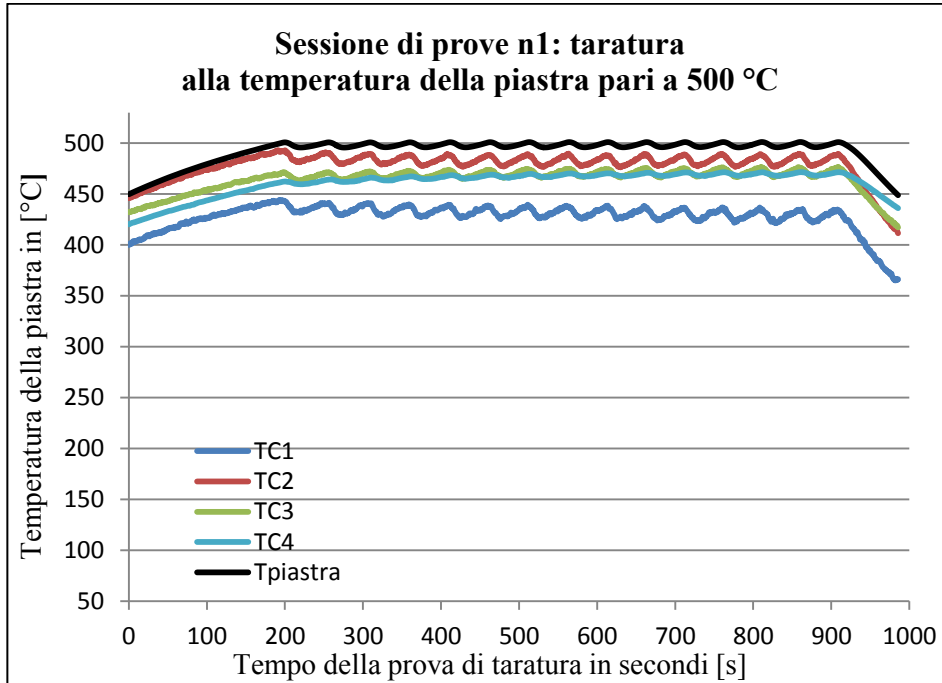


grafico A.9 – Andamento della temperatura nel tempo, a 500 °C

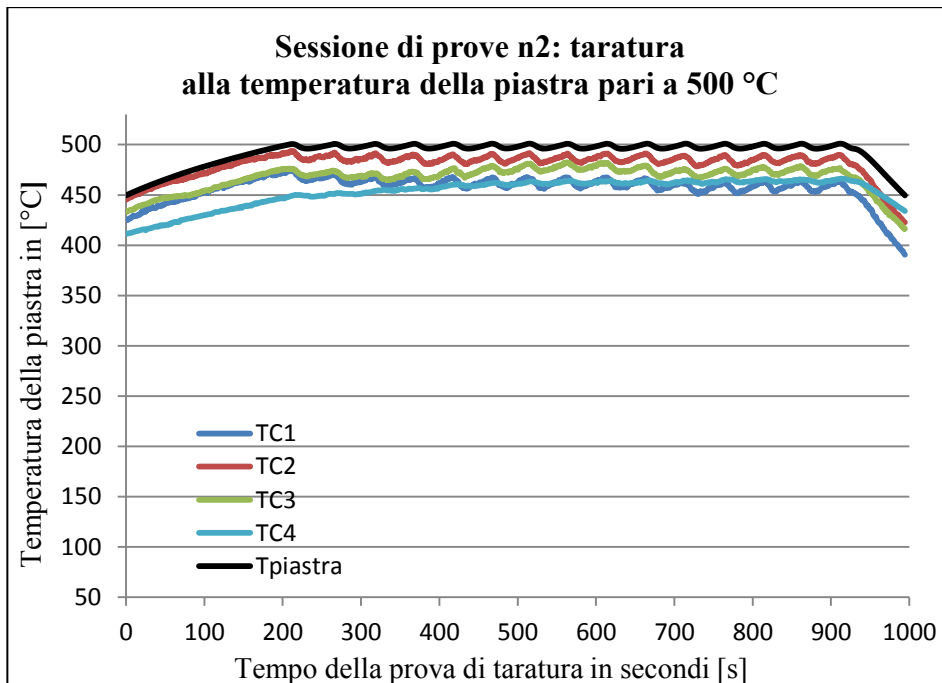


grafico A.10 – Andamento della temperatura nel tempo, a 500 °C

A.4 COMMENTI E RISULTATI OTTENUTI

In tutti i grafici si vede come la temperatura si innalza all'accensione dei resistori fino a raggiungere la temperatura stabilita per l'esperimento.

Arrivati alla temperatura obiettivo, le cartucce che sono inserite nella piastra staccano, per poi riaccendersi, solo dopo che la temperatura sarà scesa di 4-5 °C sotto quella obiettivo.

Ecco chiarito l'andamento oscillante tutte le prove effettuate: questo sistema on/off è il più semplice tra i sistemi di regolazione conosciuti (tra i più evoluti vi è per esempio, il sistema di regolazione PID, il quale segue il segnale di input in modo molto migliore, realizzando così oscillazioni meno pronunciate).

La lamina, come si può apprezzare dai grafici, ha valori di temperatura più bassi rispetto alla piastra, il tutto dovuto al fatto che entrano in gioco dispersioni termiche.

Un dato interessante può essere riferito alla temperatura in corrispondenza della TC2, esattamente a metà cartuccia, ovvero 65 mm, dove per l'appunto viene posizionata anche la TC_piastra; tra la TC2 della seconda sessione di prove e la TC_piastra vi è una differenza di circa 11 °C che è data dalle dispersioni verso l'ambiente.

Qui in seguito vengono riportati dei dati raccolti nella seconda sessione di prove con temperatura della piastra a 500 °C cosicché si possa verificare questo ΔT (in particolare è stato scelto uno degli ultimi cicli on/off per evitare di cadere nel transitorio).

$$\Delta T = TC_piastra - TC2_{\text{Seconda sessione di prove}}$$

Anche sulla lamina stessa varia la temperatura: questo giustifica il fatto per il quale siano state poste più termocoppie per vedere se su tutta la lamina, si viene a raggiungere la temperatura obiettivo o per lo meno capire a che temperatura possano arrivare le diverse zone di questa. Quest'ultimo punto è di notevole importanza, e sfruttando questa idea potremo poi eseguire le prove di strip drawing test in modo più intelligente: invece di proporre una prova di strip lungo tutta la lamina di alluminio se ne possono per esempio due, sulla stessa lamina.

Tempo [s]	TC1 [°C]	TC2 [°C]	TC3 [°C]	TC4 [°C]	TC_piastra [°C]	ΔT [°C]
852.81	462.12	487.70	475.81	464.73	499.15	11.46
853.22	462.47	487.57	476.16	464.75	499.23	11.67
853.61	462.45	487.99	476.54	464.63	499.32	11.33
854.02	462.68	488.34	476.59	464.76	499.41	11.07
854.42	462.82	488.40	476.80	464.85	499.49	11.09
854.81	462.38	488.42	477.02	464.91	499.58	11.16
855.22	462.79	488.35	477.21	464.92	499.67	11.32
855.61	462.60	488.48	477.40	464.69	499.76	11.28
856.02	462.78	488.45	477.70	464.28	499.86	11.41
856.42	462.45	488.59	477.73	464.15	499.93	11.34
856.81	462.14	488.92	476.76	464.29	500.00	11.08
857.22	461.74	488.73	477.46	464.46	500.09	11.36
857.61	461.70	488.14	477.81	464.60	500.17	12.03
858.02	462.58	488.16	477.87	464.58	500.28	12.12
858.42	463.41	488.15	478.17	464.65	500.38	12.23
858.81	463.02	488.74	477.39	464.89	500.46	11.72
859.22	462.50	489.64	477.19	465.16	500.56	10.92
859.61	462.58	489.71	476.96	465.43	500.64	10.93
860.02	463.29	489.05	477.39	465.57	500.70	11.65
860.42	462.76	488.65	478.15	465.57	500.77	12.12
860.81	462.94	488.52	478.67	465.30	500.83	12.31
861.22	463.46	488.41	478.88	465.20	500.88	12.47
861.61	464.14	488.56	478.62	465.19	500.91	12.35
862.02	464.34	489.37	478.47	465.10	500.91	11.54
862.42	464.22	489.58	477.80	465.09	500.92	11.34
862.81	464.31	489.26	477.44	465.12	500.91	11.65
863.22	463.80	488.67	477.44	465.18	500.90	12.23
863.61	463.00	488.87	477.26	465.25	500.85	11.99
864.02	462.46	488.95	477.59	465.24	500.82	11.86
864.42	461.77	489.01	477.44	465.22	500.76	11.75
864.81	461.72	488.41	476.90	465.21	500.69	12.28
MEDIA						11.65

tabella A.3 – Dati acquisiti dalla seconda sessione di prove ed in particolare con la temperatura della piastra a 500 °C. In basso a destra in grassetto, viene rappresentata anche la media dei valori ΔT ottenuta dai dati selezionati.

Bastano 4 termocoppie per avere una distribuzione chiara della temperatura? La risposta dipende sempre dall'obiettivo che si vuole raggiungere. Il gradiente di temperatura agente sulla lamina può avere due direzioni, come viene rappresentato in figura A.6, uno lungo x (già presa in considerazione) ed uno lungo y (che non verrà considerato).

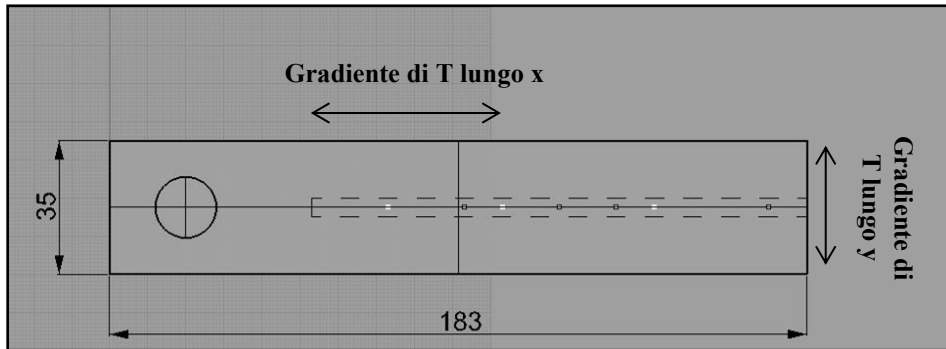


figura A.6 – Lamina con direzioni dei due gradienti di temperature: il primo lungo x, il secondo lungo y

Il gradiente di T lungo y non viene considerato perché è maggiore la probabilità che la temperatura vari lungo x che non lungo y. Le cartucce stesse influenzano il modo di riscaldare la lamina; come precedentemente detto la temperatura varia già all'interno di queste, dove si ha un valore massimo esattamente in corrispondenza della termocoppia TC2 (più o meno al centro della cartuccia), che viene oltretutto evidenziata in figura X.

A questo punto si giustifica il perché si sono svolte due sessioni di prove per la taratura: se si osserva, in ognuna delle prove della “Sessione n1”, l'andamento della temperatura TC1 è staccata rispetto alle altre TC. Tale dunque, potrebbe essere una problematica nel caso in cui si volessero fare due prove sulla stessa lamina alla stessa temperatura; in poche parole la TC1 è stata posizionata troppo vicina alla punta della cartuccia, dove si ha un calo di temperatura. Ecco giustificata la seconda sessione di prove, “Sessione n2” nella quale si è ovviato il problema posizionando la TC1 più vicina al centro della cartuccia (se si vede in figura A.3, la TC1 passa da 110mm a 90mm).

Per comprendere ancor meglio tale discorso viene proposto il confronto qui in seguito per la temperatura obiettivo di 500 °C.

Il confronto mette in luce la differenza di temperatura tra la termocoppia della piastra e la TC1: nella Sessione n1 il ΔT è circa 90÷100 °C, nella Sessione n2 cala a 50 °C (spostando di appena 20 mm la TC1 verso il centro della cartuccia). Gli ellissi tratteggiate evidenziano lo spostamento della curva relativa alla TC1.

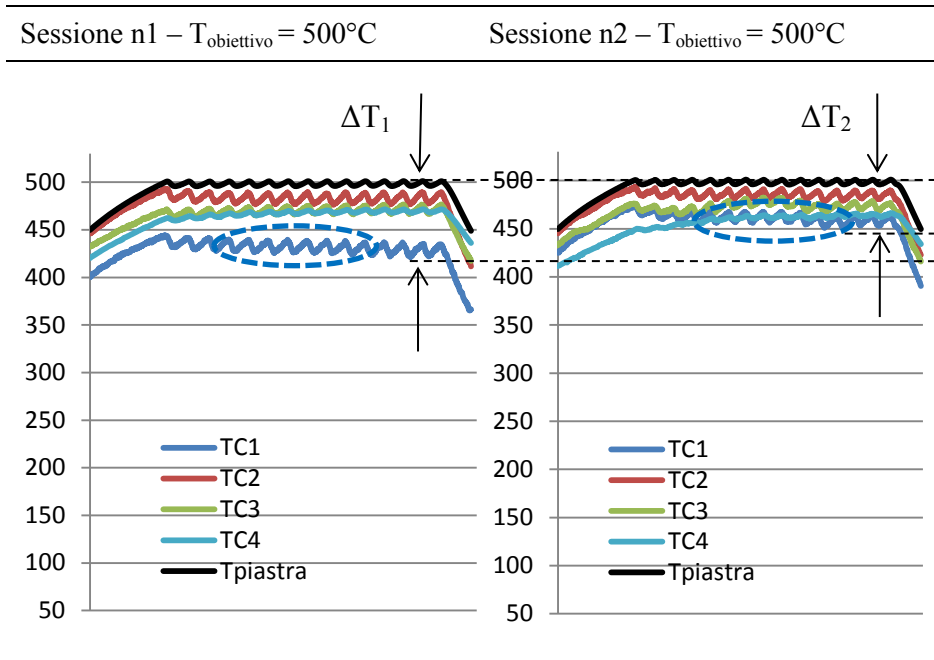


tabella A.4 – Confronto a 500°C tra “Sessione n1” e “Sessione n2”

Quest’appendice quindi ha permesso di individuare la zona di lavorazione della lamina per i test di attrito a caldo, sulla quale verranno in seguito decise le temperature e il numero di prove da eseguire; all’interno di essa la temperatura ha una variazione massima di 50°C .



figura A.7 – Zona di lavorazione della lamina: $90 \times 35 \text{ mm}$

B - GUIDA ALL'UTILIZZO DELLA MACCHINA DI STRIP DRAWING TEST PER LE PROVE A CALDO E FREDDO

Dopo che le lamine sono state lubrificate, si procede con i test di attrito sulla macchina di strip drawing test; tale macchinario è già stato nominato al paragrafo 3.3.

B.1 TUTORIAL PROVE A CALDO

Si seguano le indicazioni espresse qui in seguito:

1. collegare le spine e relative ciabatte posizionate dietro la macchina
2. abbassare la leva del generale
3. accendere la precarica, dopo che sono passati almeno tre minuti dall'accensione del generale
4. accendere i moduli, posti sul ripiano sotto la macchina
5. accendere il computer
6. controllare che il fungo di sicurezza della macchina sia scollegato (non schiacciato quindi), è posizionato sul davanti della macchina
7. collegare l'acqua di raffreddamento ai condotti dello stampo inferiore della macchina
8. aprire il programma sul desktop "Definitivi" → cartella "Die Heating strip" → applicazione "Strip definitivo"

- alzare l'interruttore relativo ai resistori posto sul lato della macchina (solo per prove a caldo)

Il software di controllo è stato realizzato con Labview©, e si suddivide in tre parti principali:

- Settaggio della movimentazione: "Drawing setting"
- Settaggio della temperatura: "Heating setting" (vale solo per le prove a caldo; per quelle a freddo si lascia la temperatura 0 °C)
- Zona di lavoro: "Test"

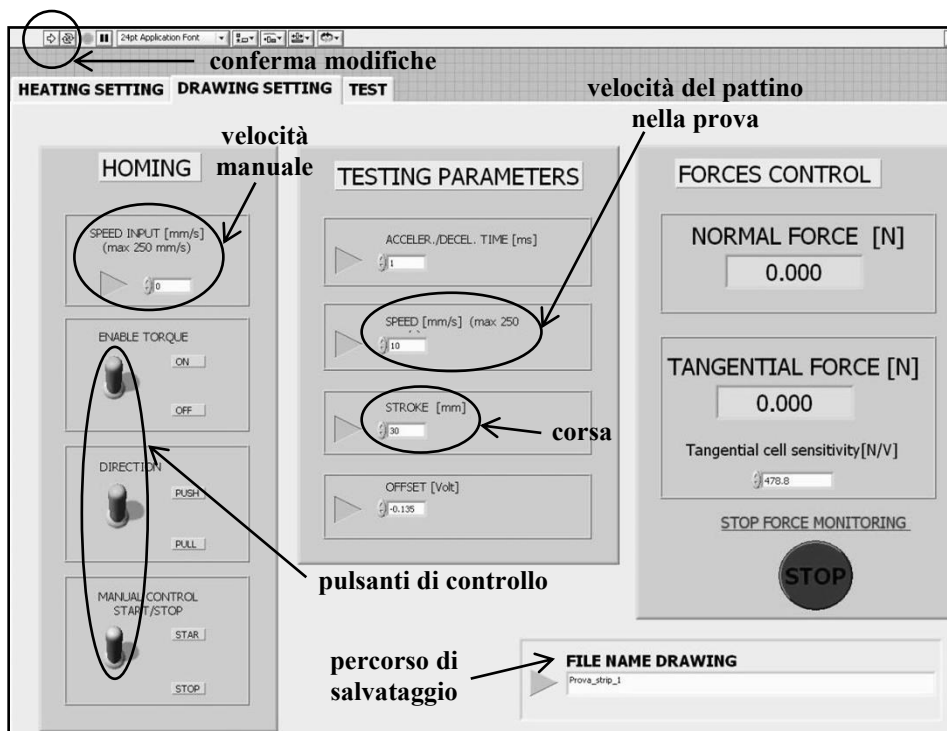


figura B.1 – Interfaccia di controllo realizzata in Labview©, sezione "Drawing setting"

La prima cosa da fare è posizionare lo stampo sul punto in cui si vuole iniziare a strisciare, dunque si tratta di un posizionamento manuale.

Avviare il programma con la freccia posta in alto a sinistra: "Run".

Si procede con il settaggio della movimentazione: nella sezione "Drawing setting". Per prima cosa si indichi il percorso di salvataggio del file di risultati.

Sul sottomenù "Homing", si inserisca la velocità di spostamento del pattino "speed input" (di solito posta intorno ai 10 mm/s).

Attivare le leve virtuali:

- *Enable torque* → ON
- *Direction* → Pull or push
- *Manual control* → ON

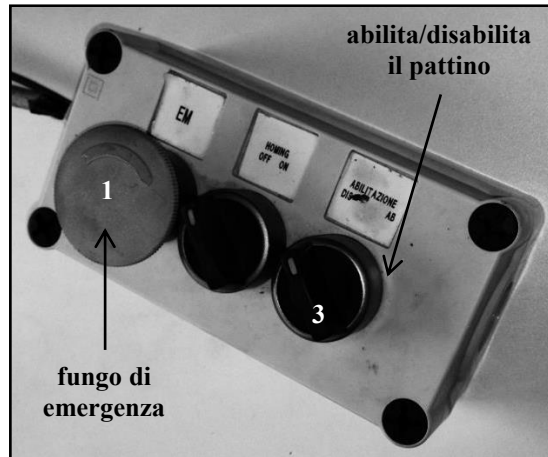


figura B.2 – Telecomando di controllo manuale del pattino

Girare il pulsante “3” finché il pattino non raggiunge il punto esatto prestabilito: se si legge l'appendice A, si può intuire, anche dall'immagine A.7, come vi sia solamente una parte lavorabile della lamina.

Dopo il posizionamento manuale si disattivino tutte e tre le leve precedentemente elencate; qualora vi fossero dei comportamenti anomali della macchina premere il pulsante 1 del telecomando di controllo di figura B.2 (fungo di emergenza).

Sempre sotto la sezione “Drawing setting”, cambiare menu selezionando “Testing parameters”, ed assicurarsi che:

- $acc/dec = 1$
- speed dipende da prova a prova: sarà una delle variabili da cambiare per avere dei confronti tra risultati (unità di misura mm/s)
- stroke (corsa del pattino sotto l'azione premente dello stampo superiore), espresso in mm ed anch'esso dipenderà da come vorremmo suddividere le prove: su ogni lamina si possono fare anche due strisciate per lato, non necessariamente una.
- $offset = - 0,135 V$

Alla fine di ogni modifica cliccare in alto a sinistra sulla freccia che compare per confermarne le modifiche appena fatte.

Fin qui, sono stati quindi eseguiti tutti i settaggi relativi alla movimentazione sotto la sezione “Drawing setting”, si può dunque passare alla sezione “Heating setting”, relativa alle cartucce scaldanti e alla temperatura obiettivo che dovrà raggiungere la piastra.

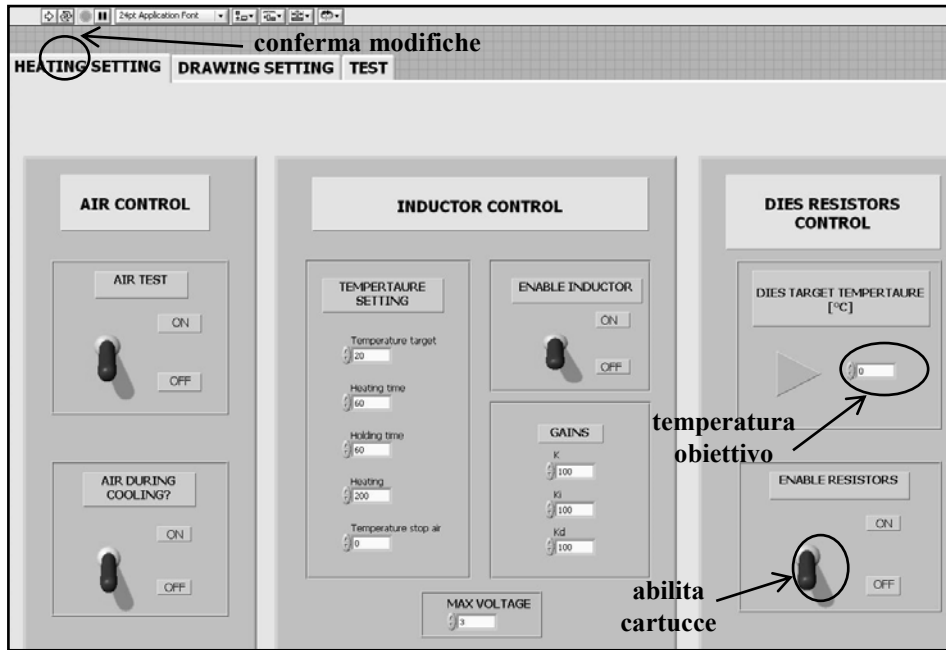


figura B.3 – Interfaccia grafica relativa alla sezione “Heating setting”

Il target di temperatura da inserire, dipende da prova a prova: sarà una delle variabili da modificare per avere risultati differenti e confrontabili; bisogna tener conto della potenza massima che possono esprimere le cartucce. Nel nostro caso si sono utilizzate delle cartucce che arrivano fino a 700 °C, a 230 V e con una potenza di 1000W; in appendice A, a figura A.2 si può vedere la cartuccia rapportata ad una matita per avere un confronto sulle dimensioni (è lunga 130 mm).

Come ultimo step prima di concludere la sezione relativa al riscaldamento si abilitino i resistori:

- Enable resistors → ON

Conclusa questa sezione (relativa alle sole prove a caldo), si ritorni su “Drawing setting” e sul sottomenù “Force control” si premea STOP.

Si può passare alla sezione della vera e propria prova: “Test”:

- cliccare su “Start test”: da questo momento in poi i resistori iniziano a scaldare fino a raggiungere la temperatura target impostata prima

- quando si raggiunge la temperatura obiettivo, si abbassi lo stampo superiore o tastatore
- cliccare su OK, relativo al force control: tale passaggio consente di iniziare ad attivare le celle di carico che monitorano la forza normale e tangenziale
- resettare le due scatole poste nel cassetto: una è relativa al controllo del PLC della macchina, l'altra relativa al controllo delle celle di carico
- assegno il carico a piacere, con cui effettuare la prova, girando la vite manualmente, collegata alla cella di carico normale
- clicco su STOP, force control per bloccare il valore del carico appena assegnato
- a questo punto sotto il riquadro "Dies" sempre nella corrente schermata, premere Stop Heating
- abilita la corsa dal telecomando di controllo

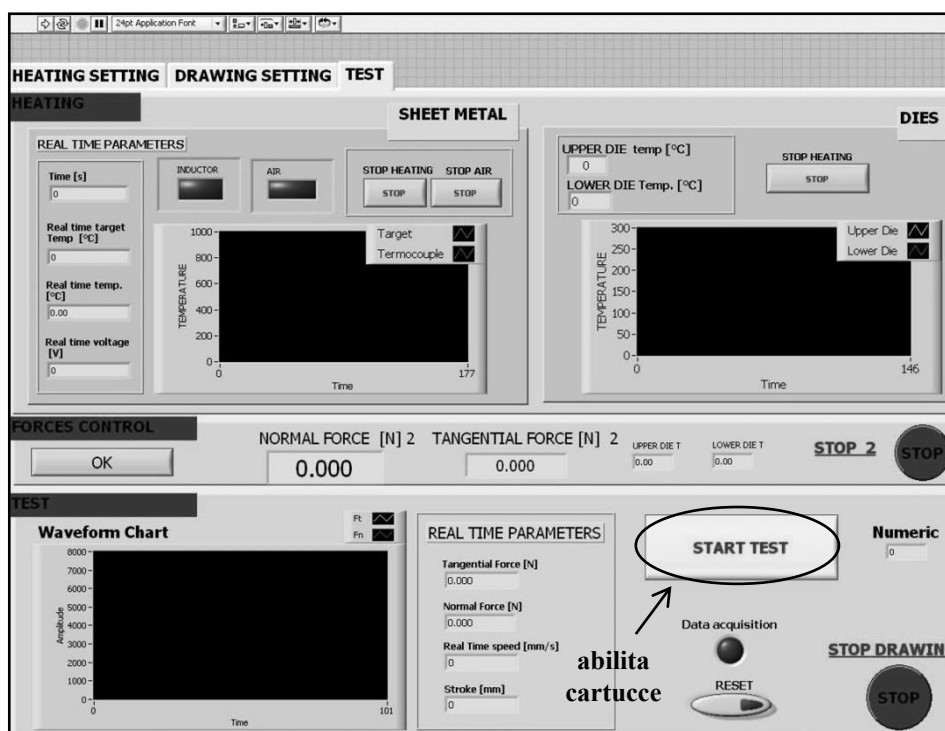


figura B.4 – Interfaccia grafica relativa alla sezione "Test"

Se si sono eseguite le operazioni passo passo, di deve vedere il pattino con lamina posizionatavi sopra, che si muove alla velocità, con la corsa e forza normale stabilite in precedenza. Una volta finita la corsa esso si fermerà da solo e così sarà possibile disabilitare la corsa, sempre dal telecomando di controllo.

La procedura di spegnimento della macchina è identica a quella di accensione.

B.2 TUTORIAL PROVE A FREDDO

Nelle prove a freddo si saltano alcuni passaggi riportati qui in seguito:

- evitare di arrivare i resistori dalla leva posta sul lato della macchina
- si evita di settare la temperatura obiettivo da raggiungere durante il test
- non c'è dunque bisogno di collegare i tubi di raffreddamento ad acqua presenti nella piastra, perché il tutto sarà a temperatura ambiente

C – LINGUAGGI DI PROGRAMMAZIONE

C.1 PROGRAMMAZIONE CON ARDUINO

Viene in seguito trascritto il linguaggio di programmazione che permette l'attivazione ad intermittenza del passaggio dell'aria attraverso la valvola.

```
/*  
 * StringToNumber  
 * Creates a number from a string  
 */  
  
const int ledPin = 12;           // pin the LED is connected to  
  
int  blinkDelay;                // blink rate determined by this variable  
char strValue[6];               // must be big enough to hold all the digits and the  
                                // 0 that terminates the string  
  
int tempi[10];                  // the index into the array storing the received digits  
int index = 0;  
  
int i = 0;  
  
void setup()  
{  
  Serial.begin(9600);  
  pinMode(ledPin, OUTPUT);      // enable LED pin as output  
  blinkDelay = 0;  
  tempi[0] = 0;
```

```

}

void loop()
{
  if( Serial.available()
  {
    char ch = Serial.read();
    if(index < 5 && isDigit(ch) ){
      strValue[index++] = ch;          // add the ASCII character to the string;
    }
    else
    {
      // here when buffer full or on the first non digit
      strValue[index] = 0;             // terminate the string with a 0
      blinkDelay = atoi(strValue);    // use atoi to convert the string to an int
      index = 0;
      tempi[i++] = blinkDelay;
    }
    if (blinkDelay == 0) blink();
  }
}

void blink()
{
  for (int iter = 0; iter < i-1; iter=iter+2) {
    digitalWrite(ledPin, HIGH);
    delay(tempi[iter]);
    digitalWrite(ledPin, LOW);
    delay(tempi[iter+1]);
  }
  i = 0;
}

```

Il programma va prima verificato e successivamente caricato su Arduino.

C.2 PROGRAMMAZIONE CON PYTHON 2.7

In seguito viene proposto anche il programma scritto con il linguaggio di programmazione Python 2.7.

```

from Tkinter import *
import Image, ImageTk
import tkMessageBox
import serial

# open serial port (external package)

```

```

ser = serial.Serial(2)

# double window;the second is a confirm window
def spruzza():
    if tkMessageBox.askokcancel("Conferma", "Procedere con il test?"):
        command = entry_sp1.get() + " " + entry_p1.get() + " " + entry_sp2.get() + " " +
entry_p2.get() + " " + entry_sp3.get()
        ser.write(command + "\r\n")

# title and icon of main window
root = Tk()
root.title("Gestione tempi di spruzzo")
root.wm_iconbitmap('icon.ico')

# labels
label_mis = Label(root, text="Unita' di misura: [ms]")
label_sp1 = Label(root, text="Spruzzata 1")
label_sp2 = Label(root, text="Spruzzata 2")
label_sp3 = Label(root, text="Spruzzata 3")
label_p1 = Label(root, text="Pausa")
label_p2 = Label(root, text="Pausa")

# entries
entry_sp1 = Entry(root)
entry_p1 = Entry(root)
entry_sp2 = Entry(root)
entry_p2 = Entry(root)
entry_sp3 = Entry(root)

# button
button_spruzza = Button(root, text="Spruzza", command = spruzza)

# align labels
label_mis.grid(column=1, row=0, padx=20, pady=10, sticky=W)
label_sp1.grid(column=0, row=1, padx=20, pady=10, sticky=W)
label_p1.grid( column=0, row=2, padx=20, pady=10, sticky=W)
label_sp2.grid(column=0, row=3, padx=20, pady=10, sticky=W)
label_p2.grid( column=0, row=4, padx=20, pady=10, sticky=W)
label_sp3.grid(column=0, row=5, padx=20, pady=10, sticky=W)
# align entries
entry_sp1.grid(column=1, row=1, padx=20, pady=10)
entry_p1.grid( column=1, row=2, padx=20, pady=10)
entry_sp2.grid(column=1, row=3, padx=20, pady=10)
entry_p2.grid( column=1, row=4, padx=20, pady=10)
entry_sp3.grid(column=1, row=5, padx=20, pady=10)

# align button
button_spruzza.grid(column=1, row=6, padx=20, pady=10)

```

Appendice C

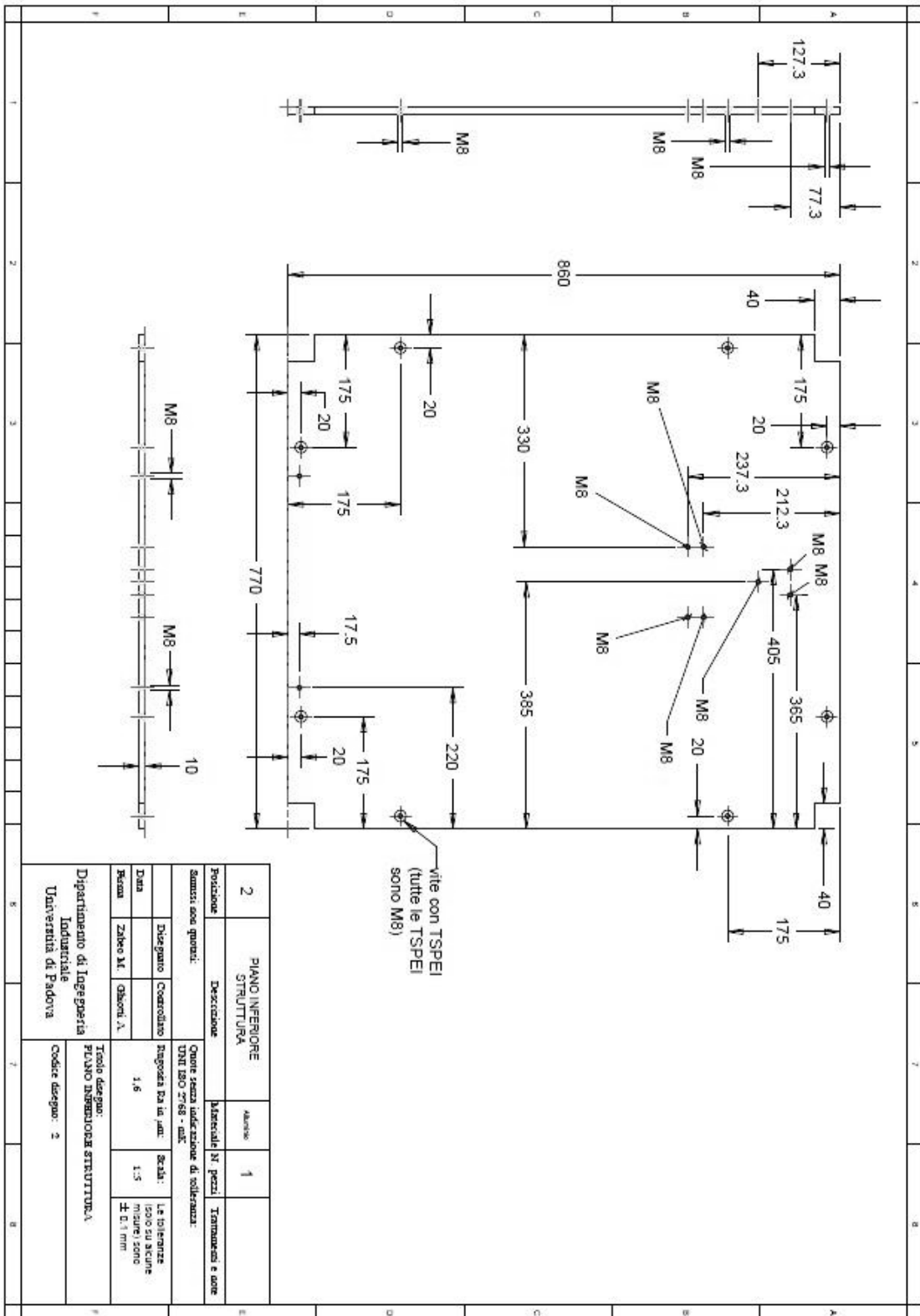
```
# image (external package)  
img = ImageTk.PhotoImage(Image.open("logo.gif"))  
label_logo = Label(image=img)  
label_logo.grid(column=2, row=1, rowspan=5)  
  
root.mainloop()
```

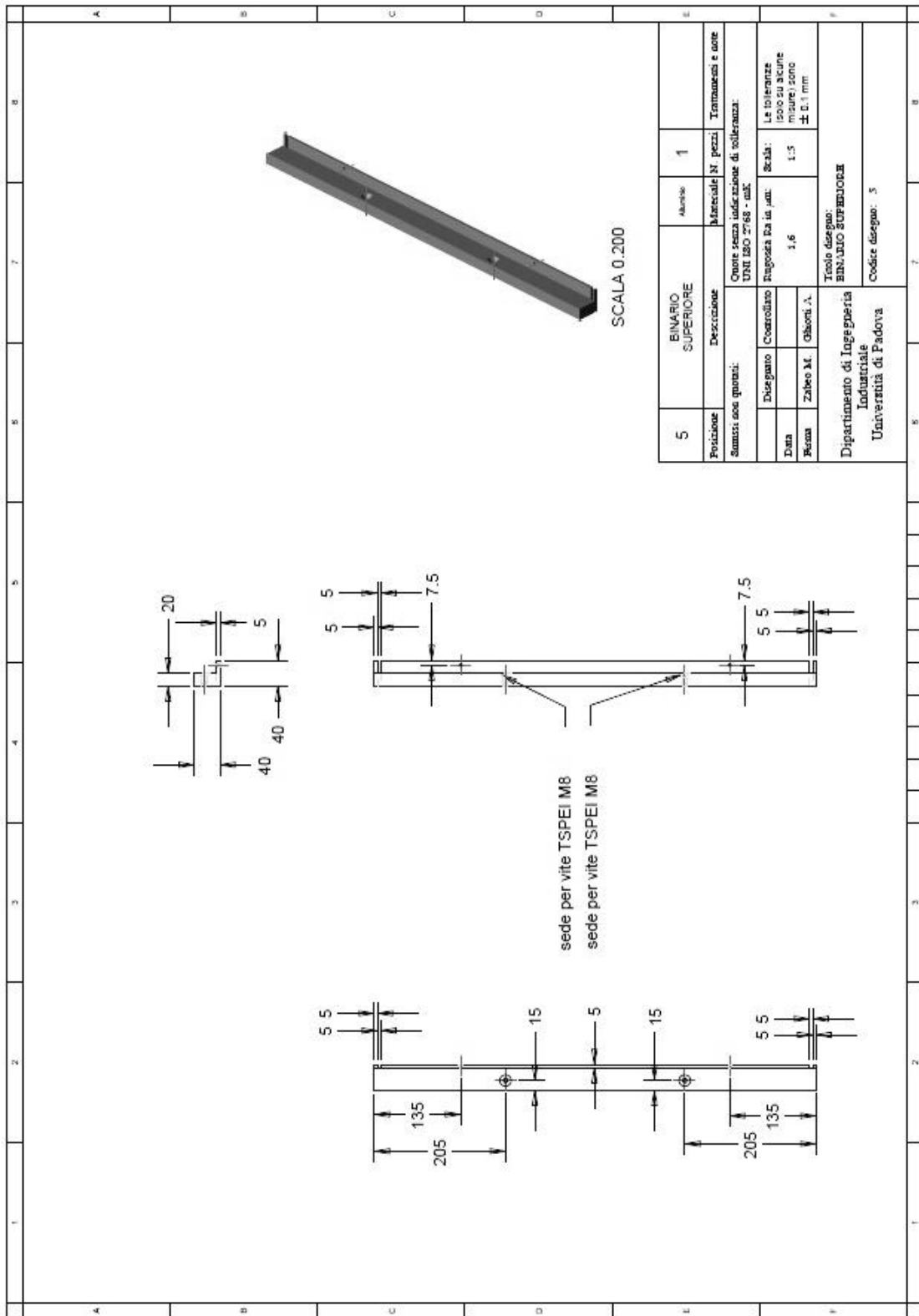
D – TAVOLE 2D

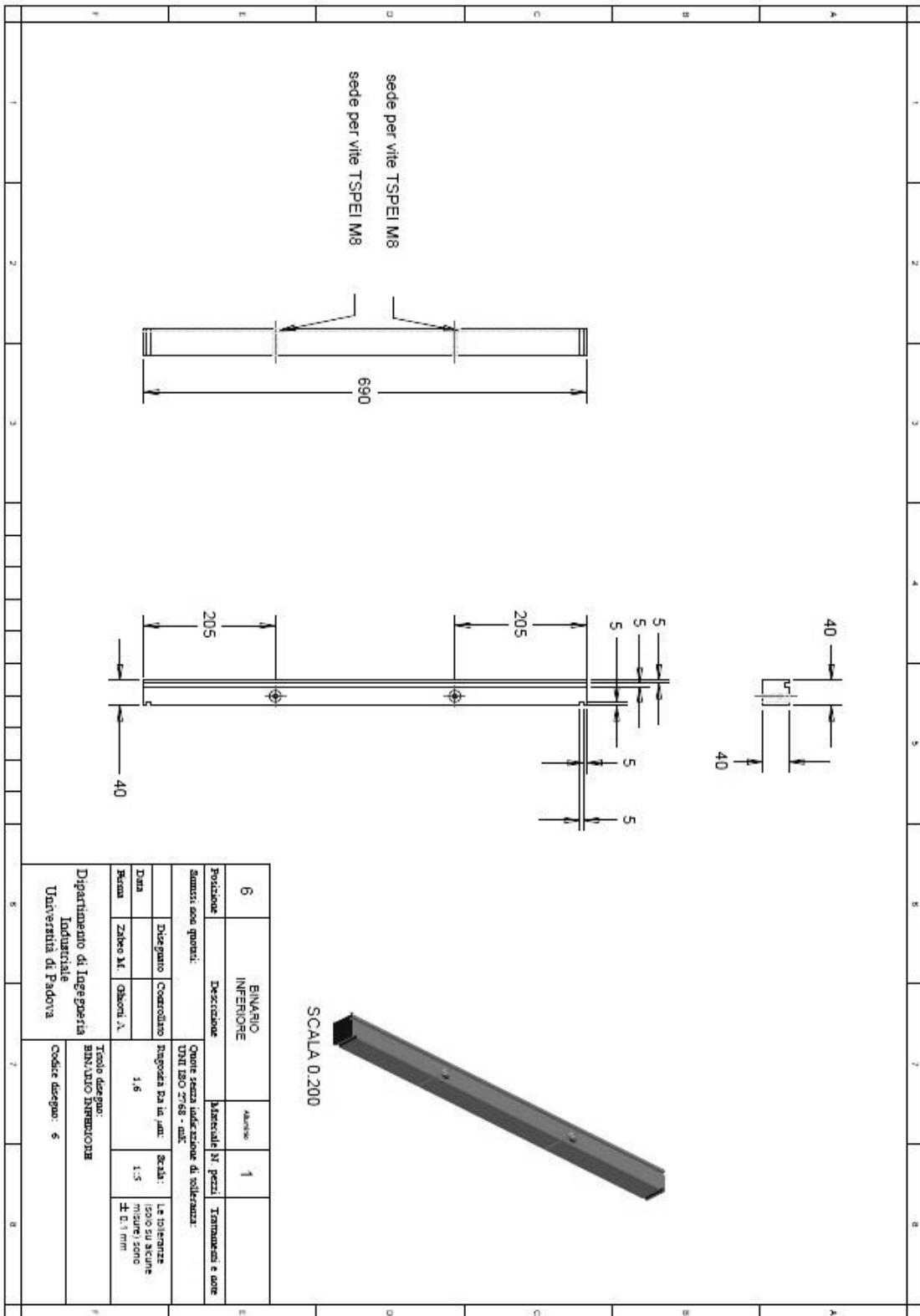
Verranno presentati nella corrente appendice, i risultati finali delle tavole 2D realizzate con Creo© 1.0; passare attraverso il drawing vero e proprio, nel caso si debba realizzare un nuovo macchinario è obbligatorio, in quanto sono il solo materiale che permette il passaggio dalla progettazione dal modello 3D alla produzione dei componenti reali.

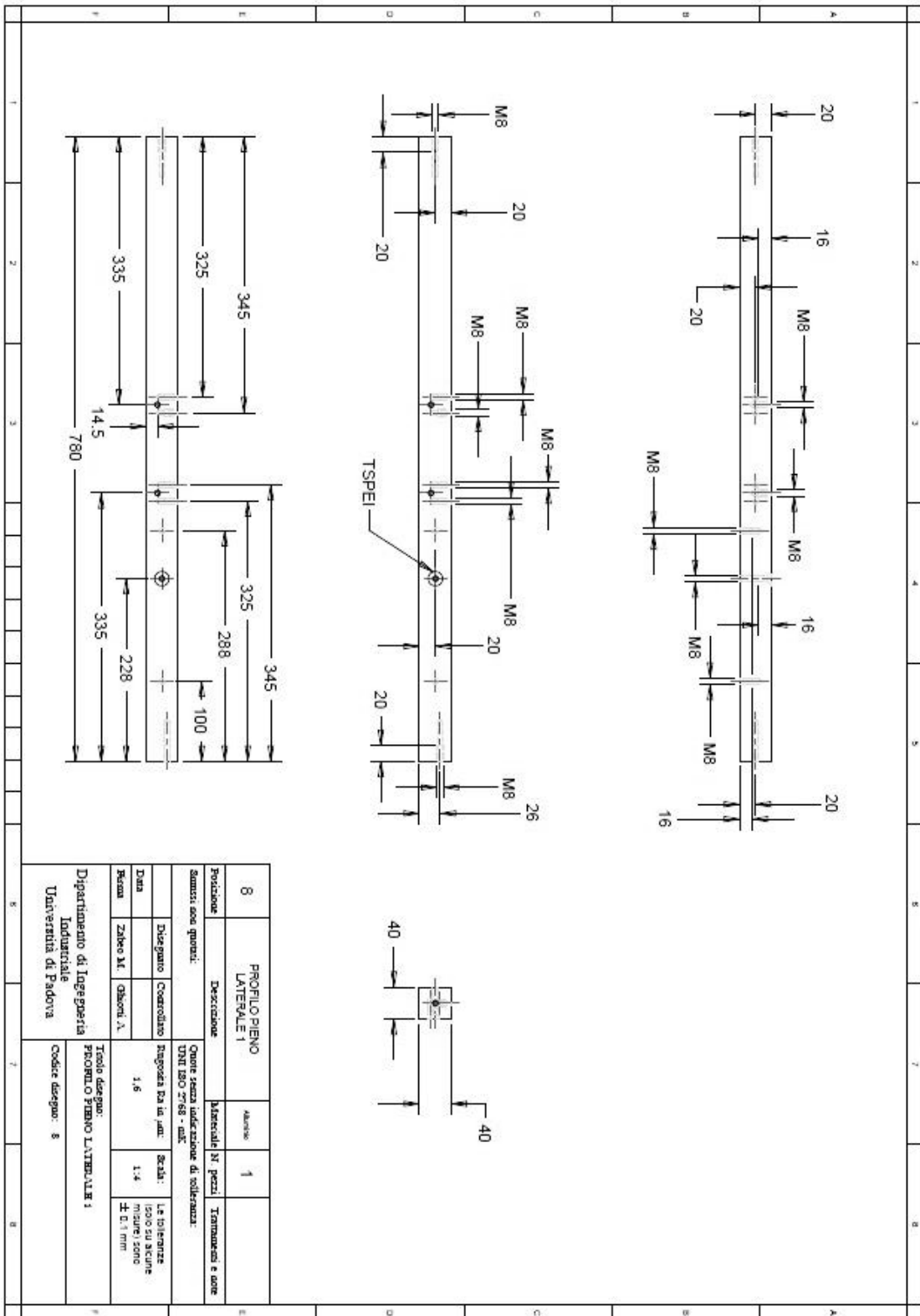
Le tavole includono:

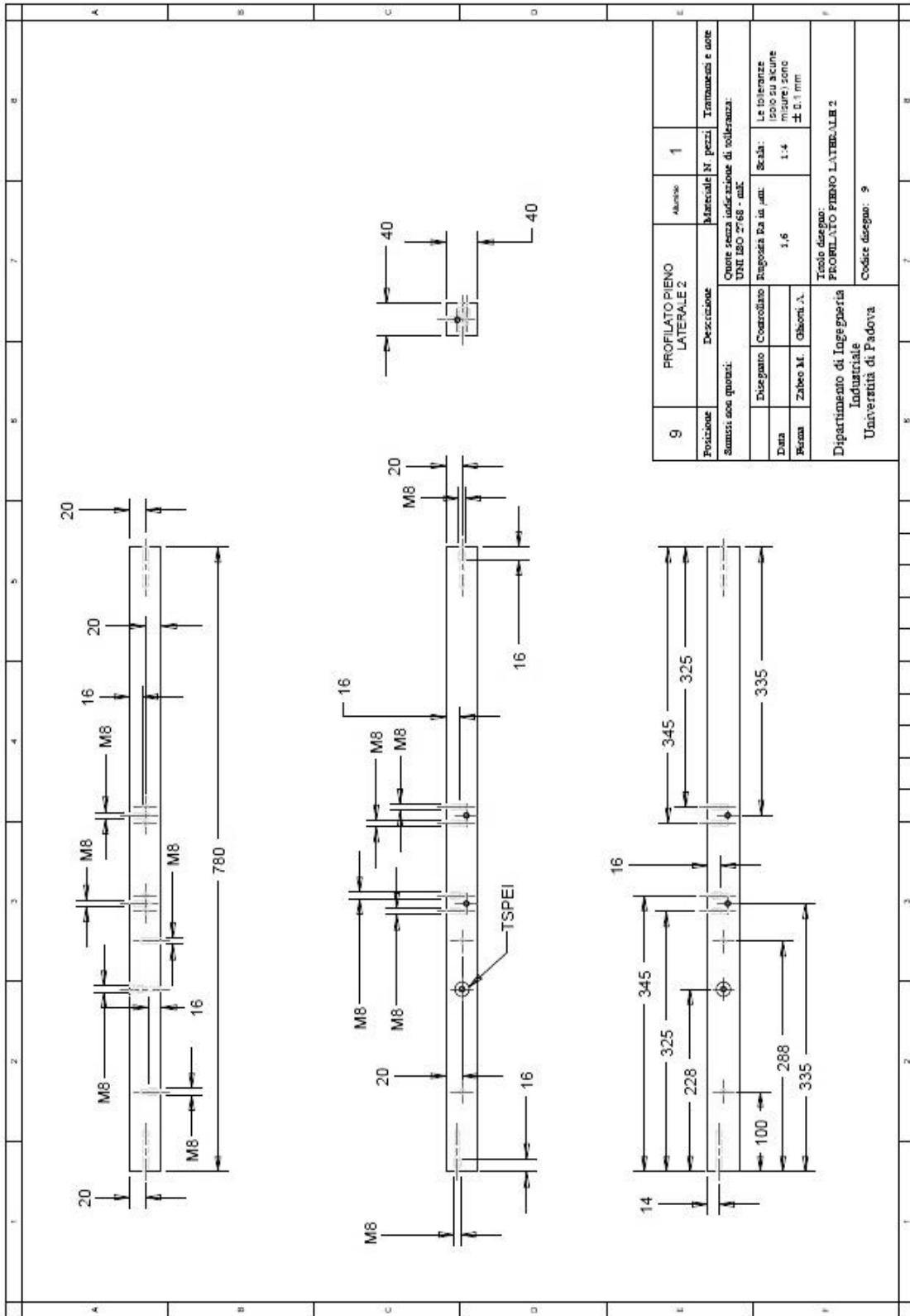
- 3 viste per ogni componente, con eventuale quarta vista per rendere chiaro all'operatore il suo profilo;
- le quote con eventuali tolleranze applicate (solo dove necessario, per esempio in determinati accoppiamenti);
- il materiale del componente;
- eventuali finiture superficiali
- rugosità
- intestatario dei disegni
- quantità in numero, dei componenti da realizzare

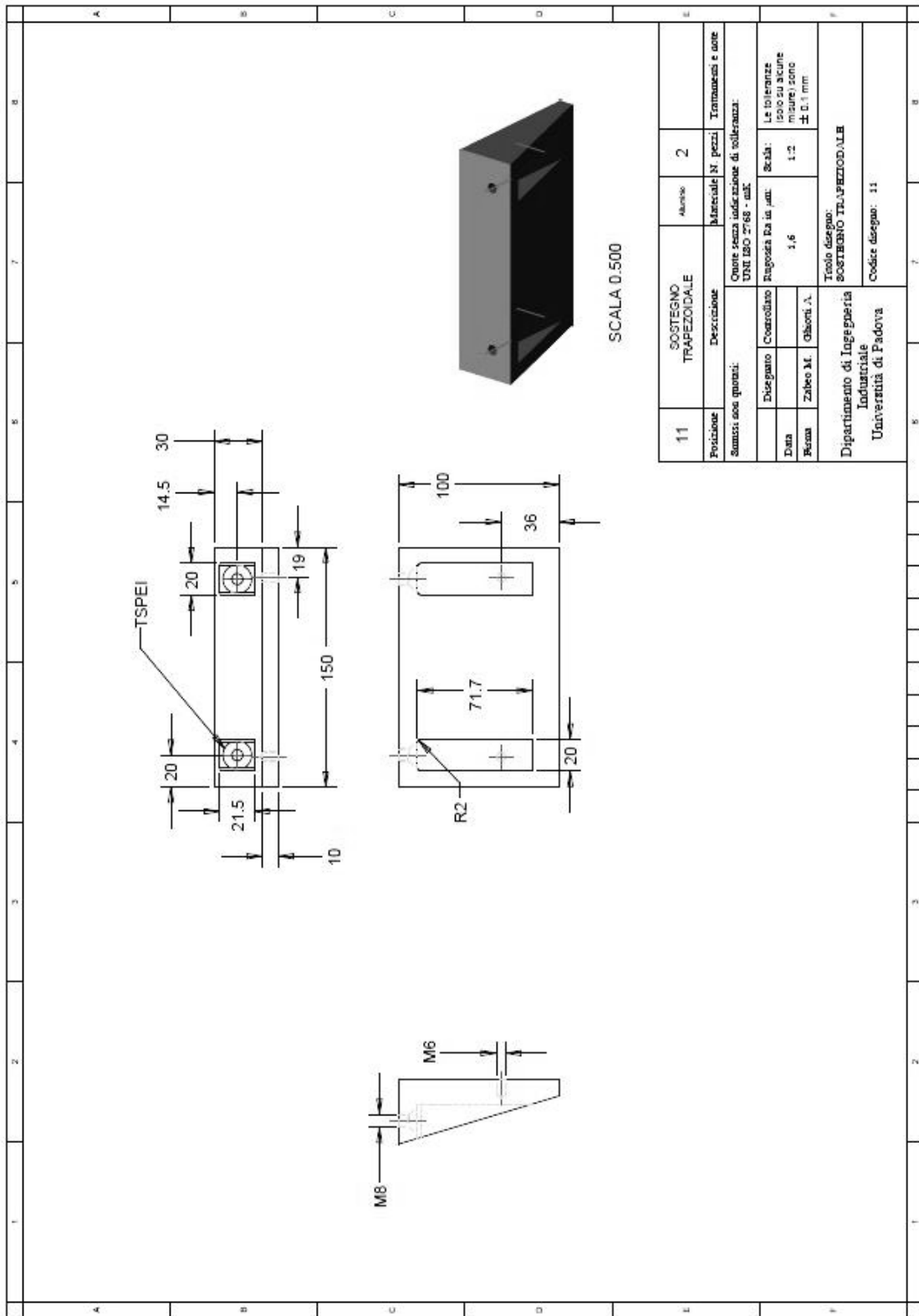






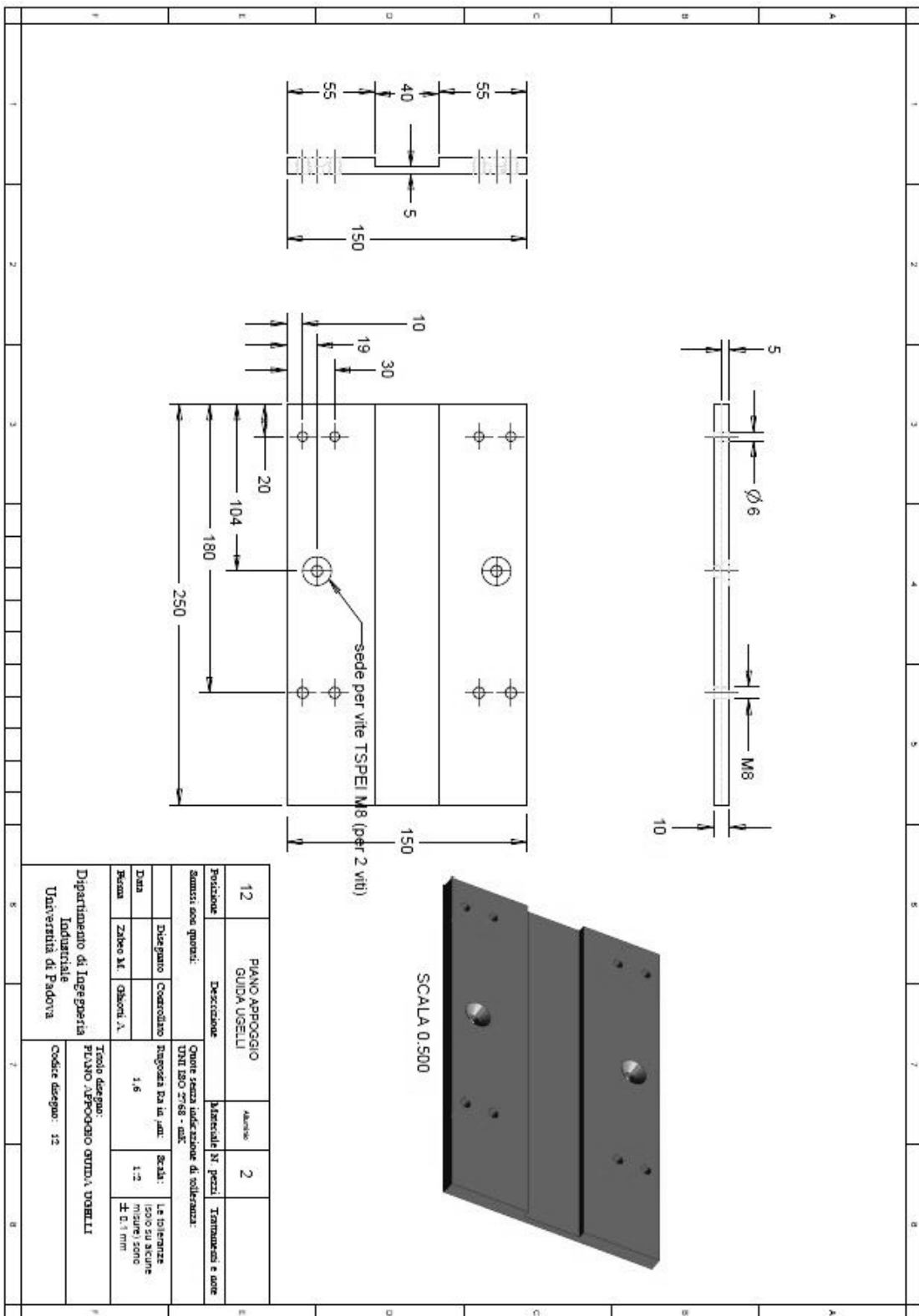


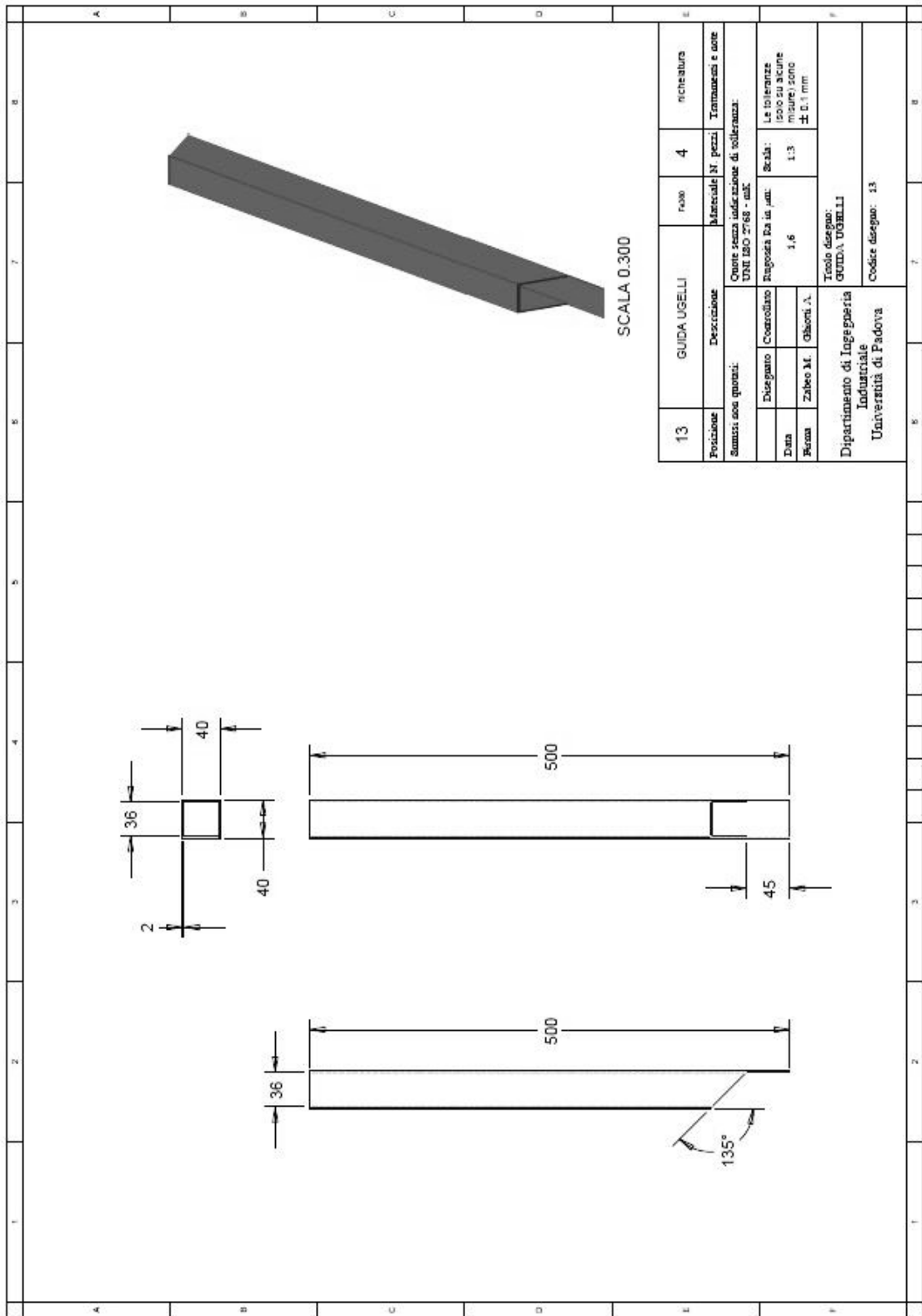


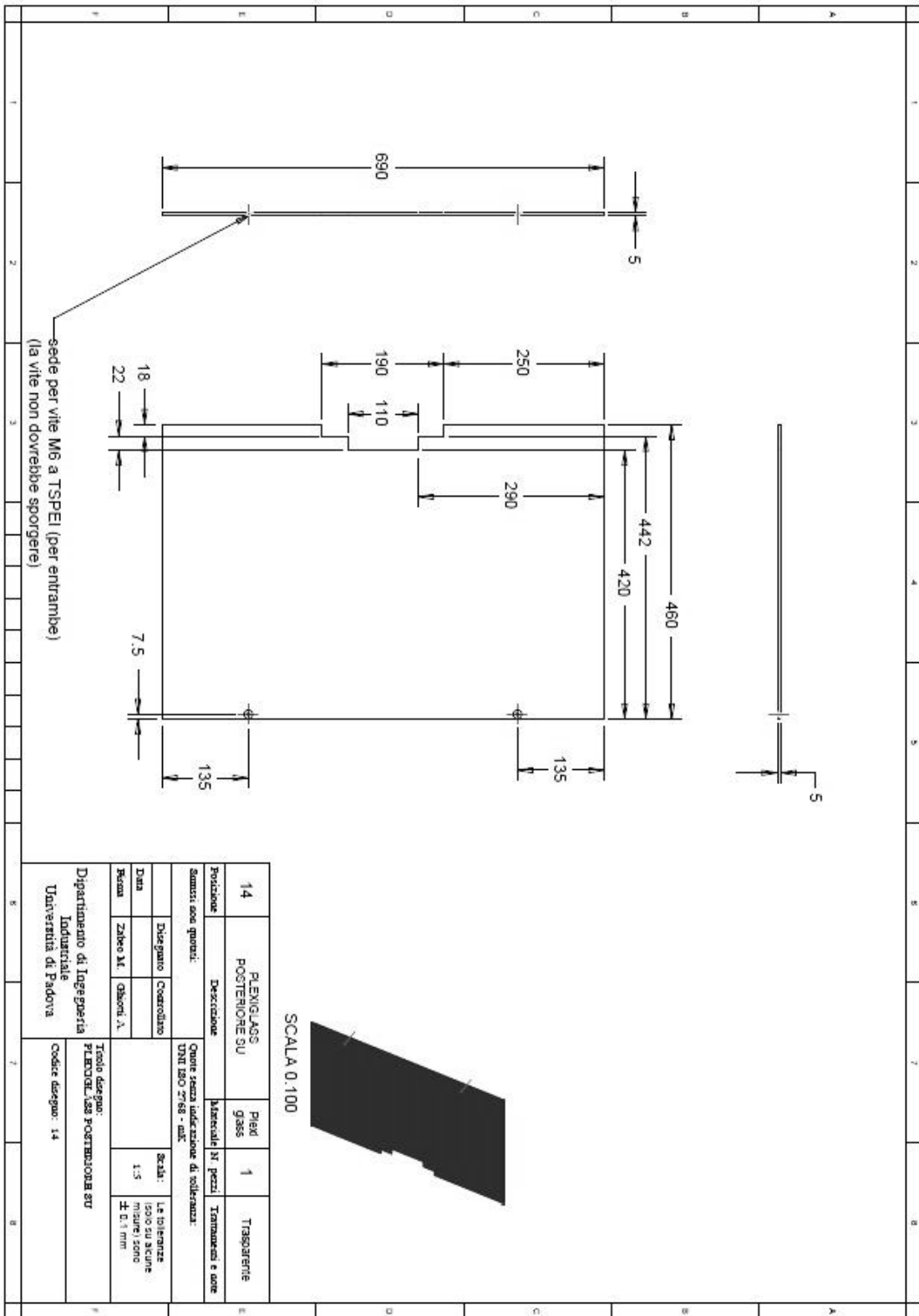


SCALA 0.500

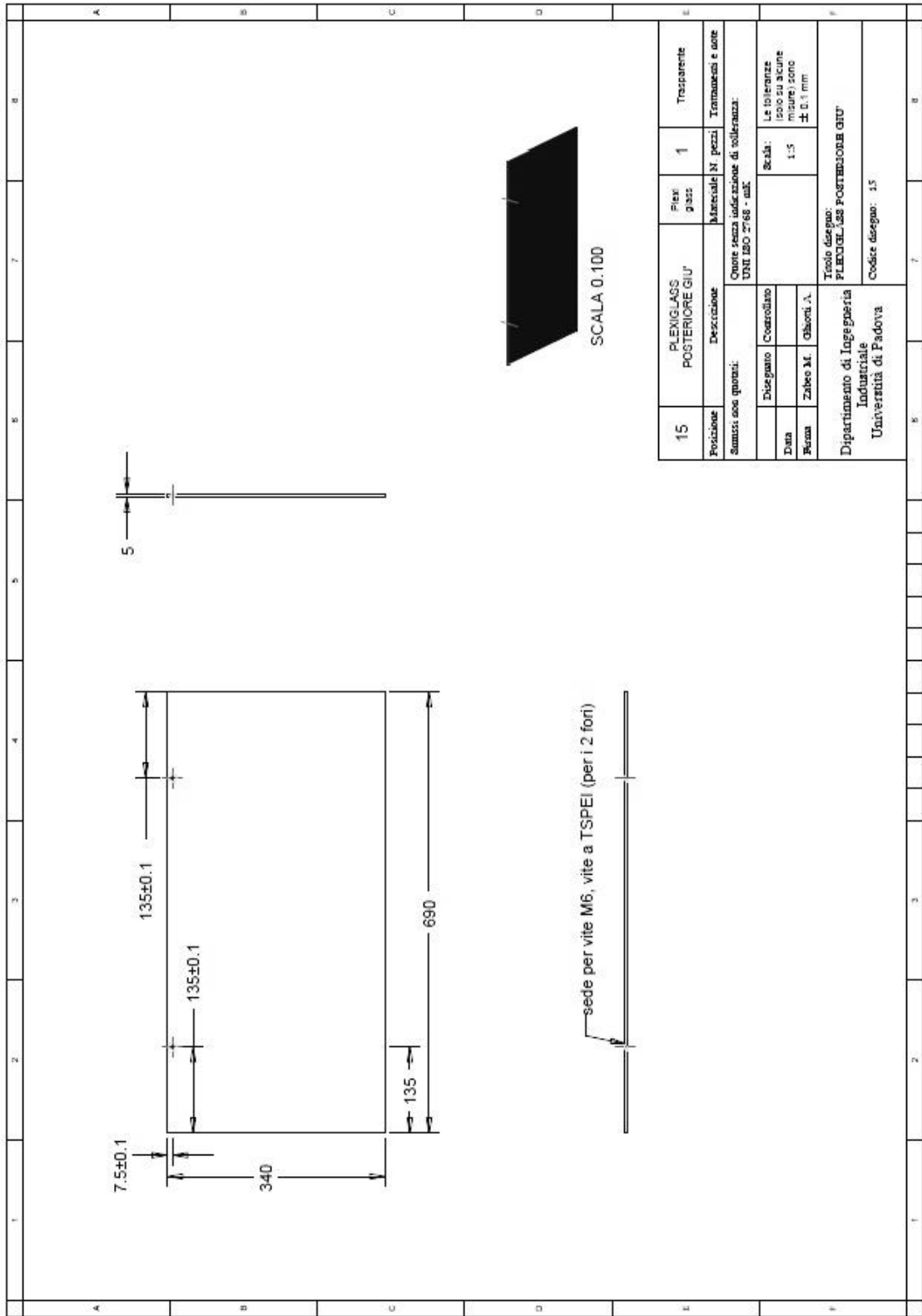
11	SOSTEGNO TRAPEZOIDALE	Quantità	2	
Descrizione		Materiale N. pezzi. Trattamenti e note		
Somma con quote:		Quota senza indicazione di tolleranza: UNI ISO 2768 - mK.		
Disegno	Controllo	Rugosità Ra in µm:	Scala:	Le tolleranze sono indicate sulle quotazioni ± 0.1 mm
Data	Zabeo M.	1,6	1:2	
Firma	Giamori A.			
Dipartimento di Ingegneria Industriale Università di Padova		Titolo disegno: SOSTEGNO TRAPEZOIDALE		
		Codice disegno: 11		



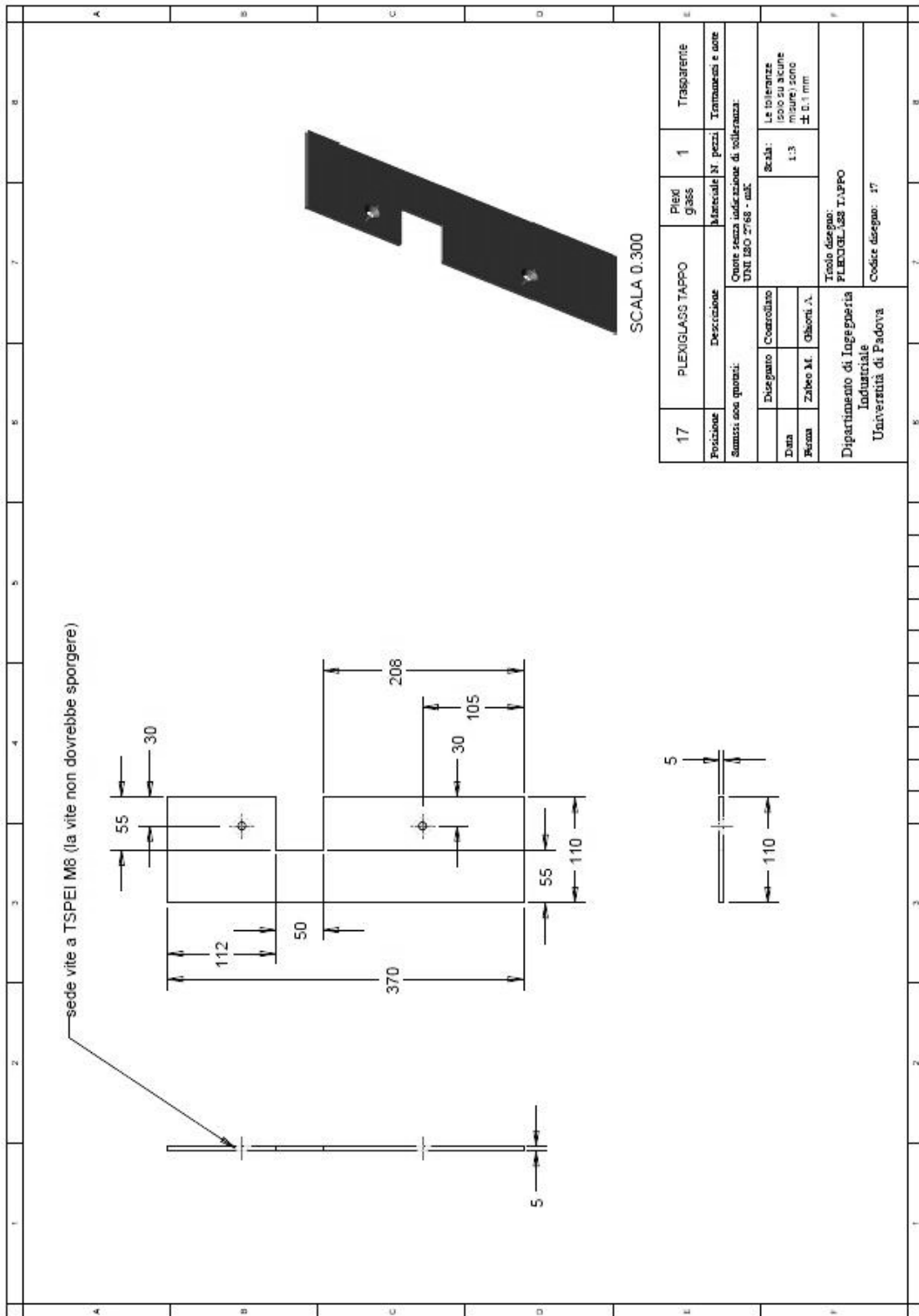




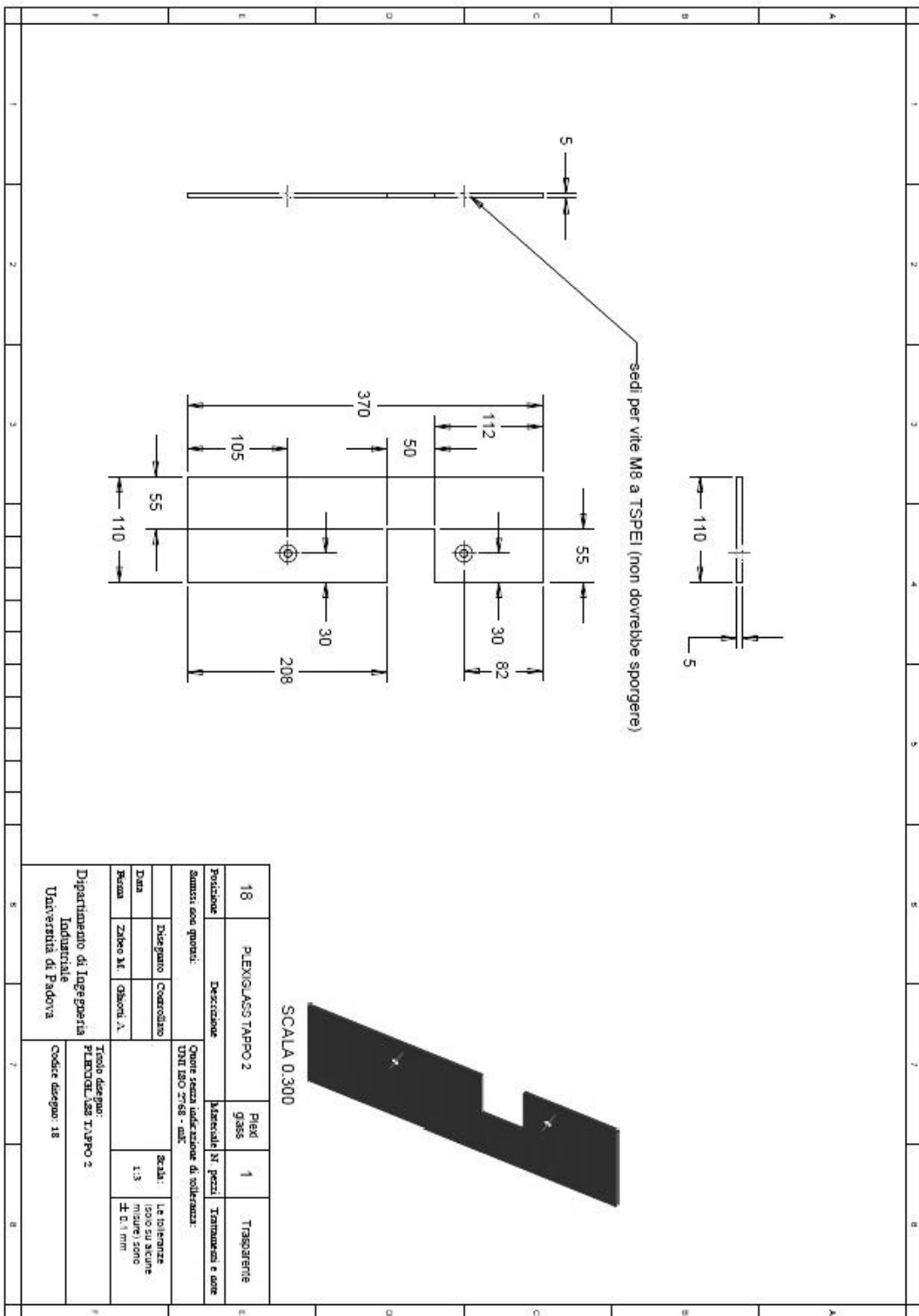
14	PIEMIGLASS POSTERIORE SU	Piatti glass	1	TRASPARENTE
Posizione: Summi: see quote:		Descrizione: Materiali: <u>31 pezzi</u> <u>Tramandati e sono</u>		
Disegno: Data: Resma: Zaker M1: Gbioni: A		UNI ISO 2768 - M3K Onore senza indicazione di tolleranza: Le tolleranze sono su scale 1:5 ± 0,1 mm		
Dipartimento di Ingegneria Industriale Università di Padova		Titolo disegno: PIEMIGLASS POSTERIORE SU Codice disegno: 14		

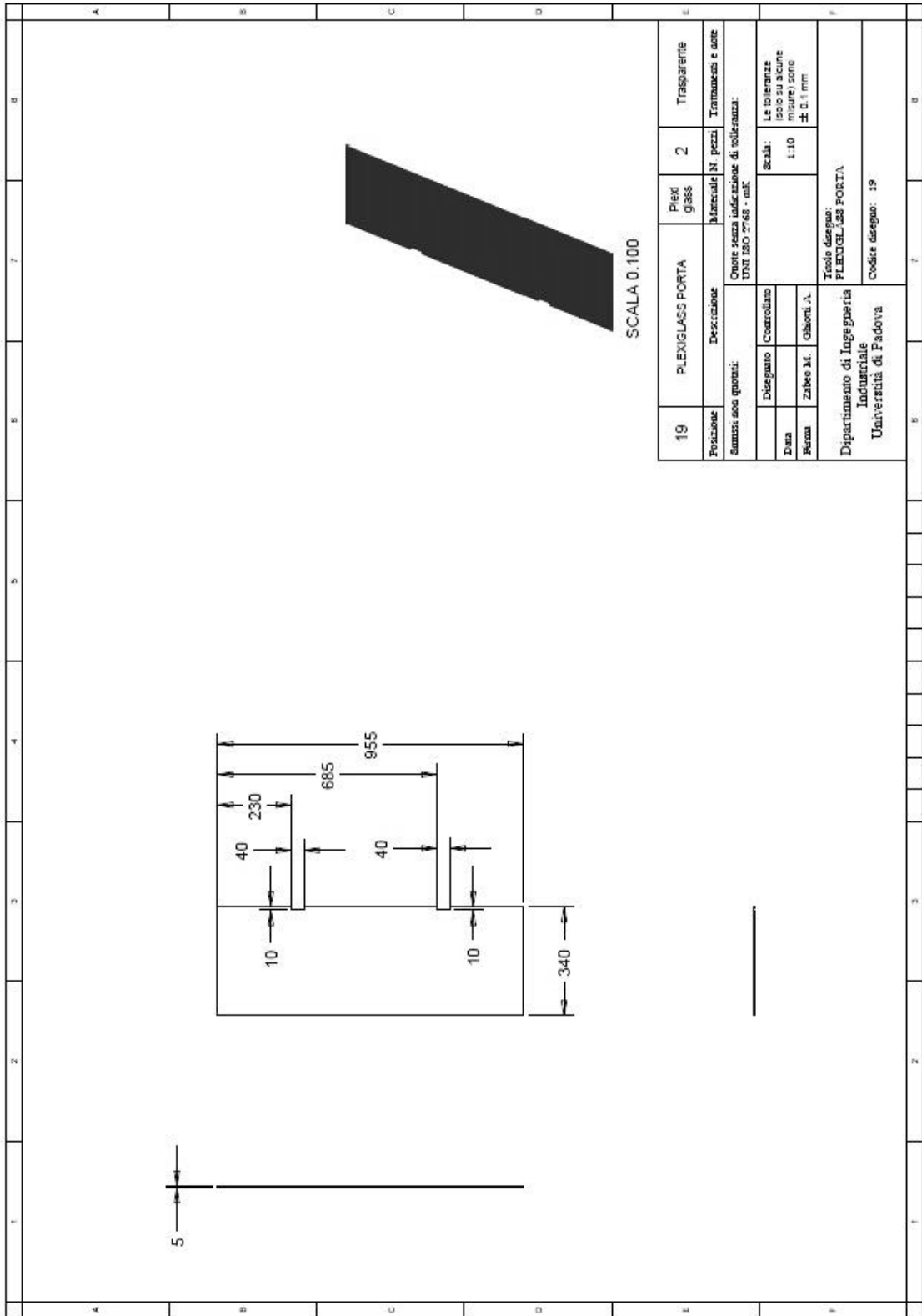


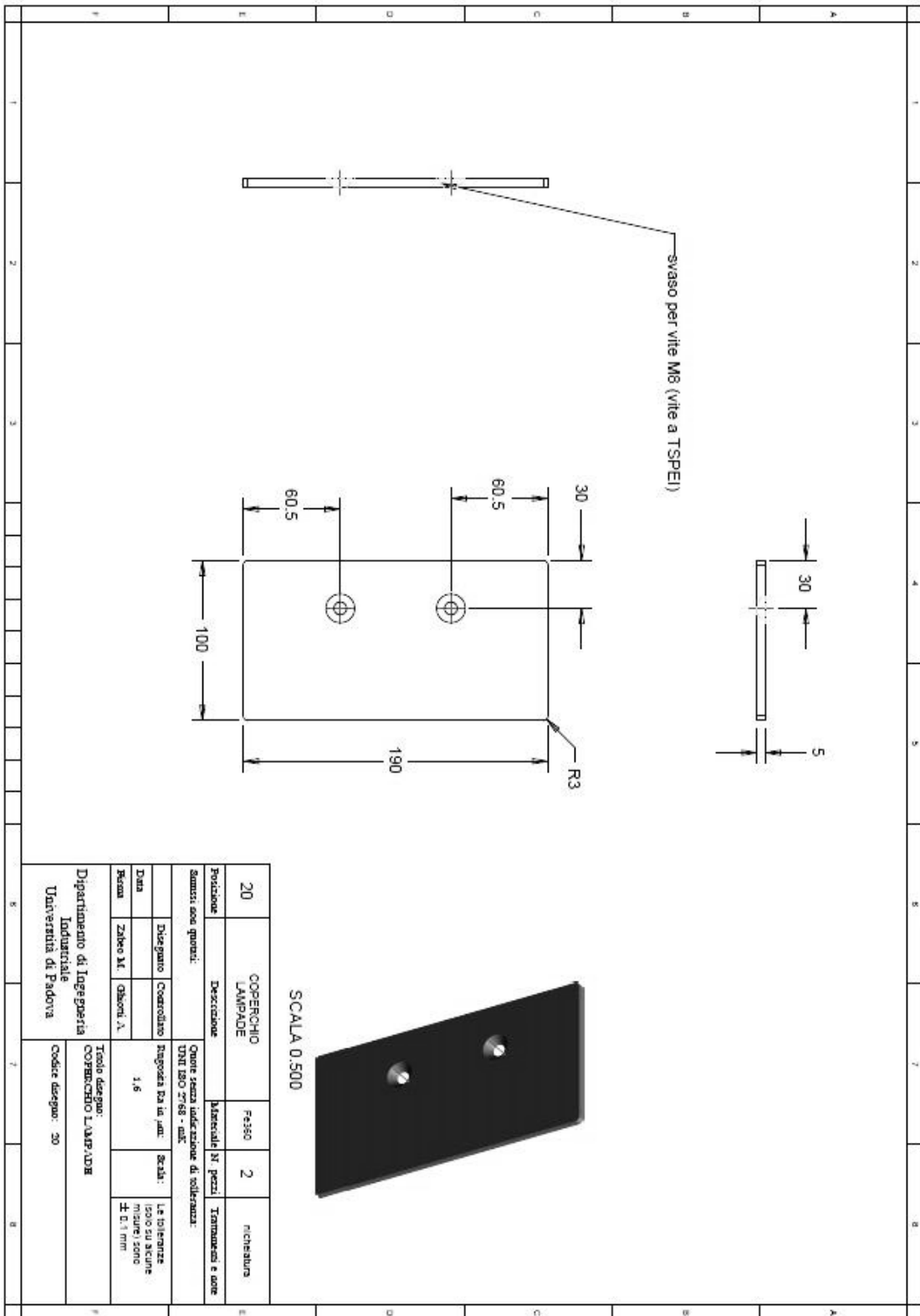
15	PLEXIGLASS POSTERIORE GIU'	Pezzi: glass	1	Trasparente
Posizione		Materiale N° pezzi		
summa: see quozzi:		Omone senza indicazione di tolleranza: UNI ISO 2768 - mK.		
Descrizione		Scala:		
Disegnato	Controllo	Le tolleranze sono come indicate ± 0.1 mm		
Data		1:5		
Scena	Zabec M. Glaboni, A.	Tavolo disegno: PLEXIGLASS POSTERIORE GIU'		
Dipartimento di Ingegneria Industriale Università di Padova		Codice disegno: 15		

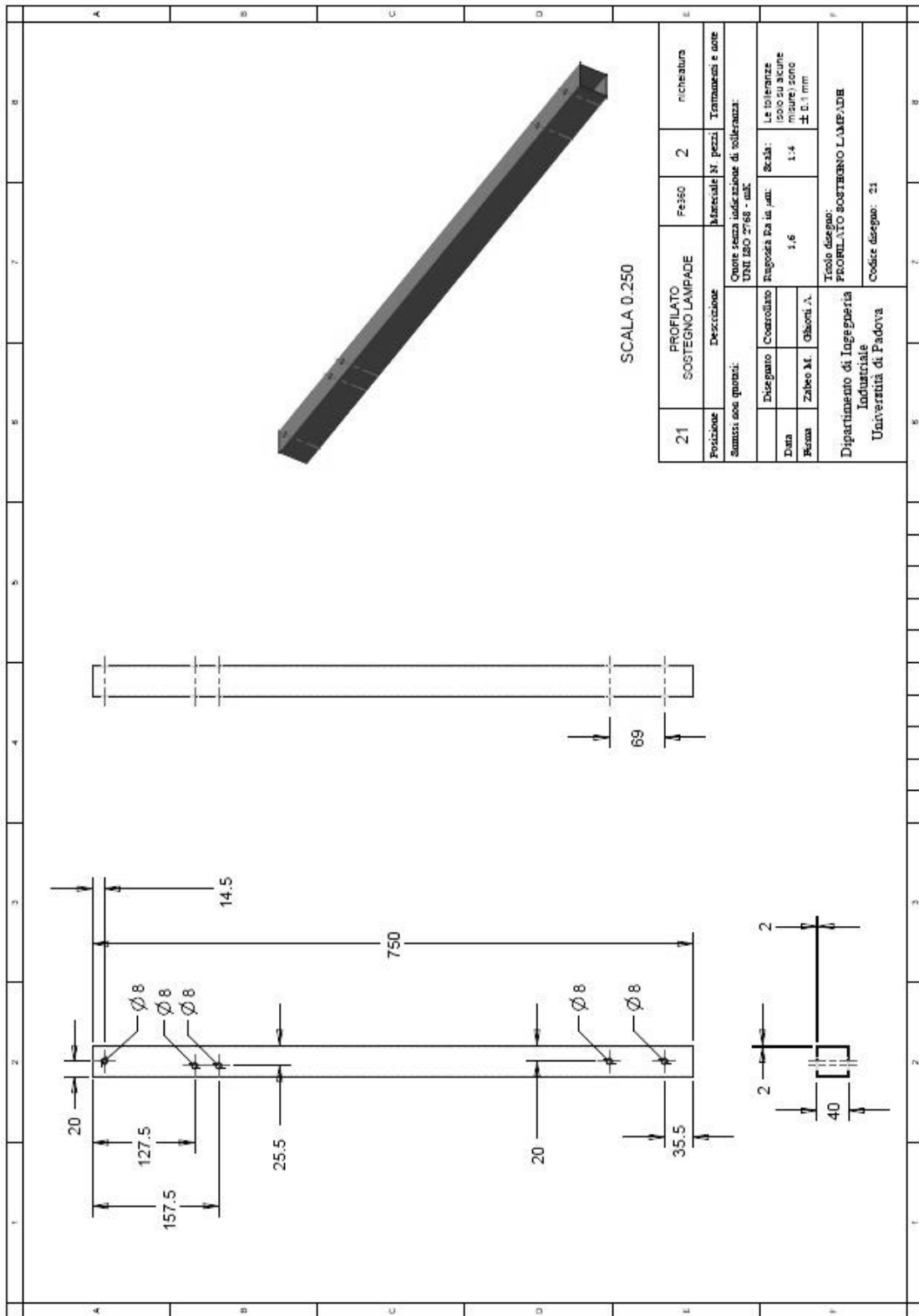


17	PLEXIGLASS TAPPO	Piedi grass	1	Trasparente
Posizione		Materiali N. pezzi		
Sumiss. con spozzi:		Omote senza indicazione di tolleranza: UNI ISO 2768 - mK.		
Descrizione		Scale: Le tolleranze sono su alcune dimensioni ± 0.1 mm.		
Disegno	Controllo	Scala: 1:3		
Data				
Firma	Zabeo M. Glaioni A.			
Dipartimento di Ingegneria Industriale Università di Padova		Tavolo disegno: PLEXIGLASS TAPPO Codice disegno: 17		

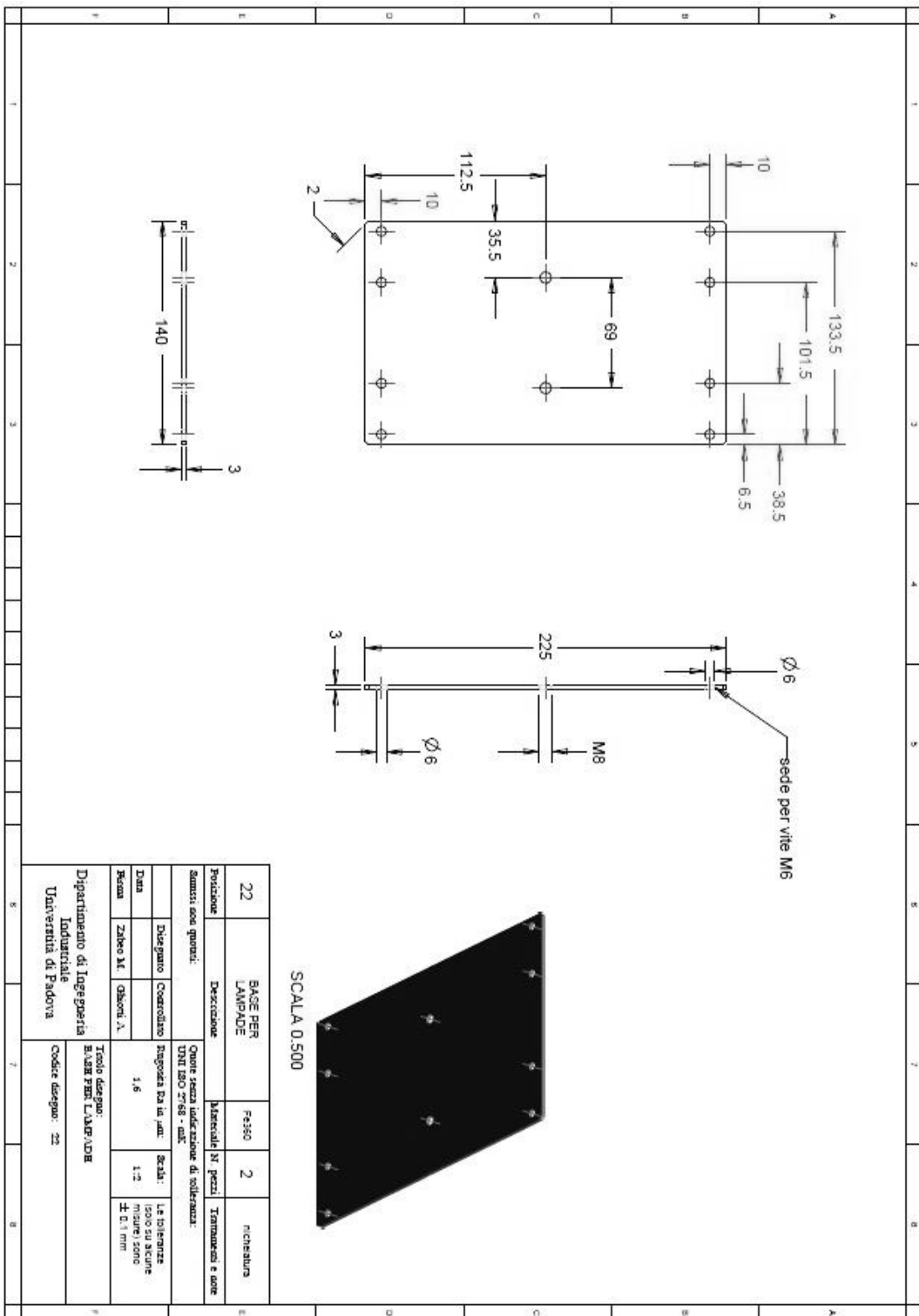




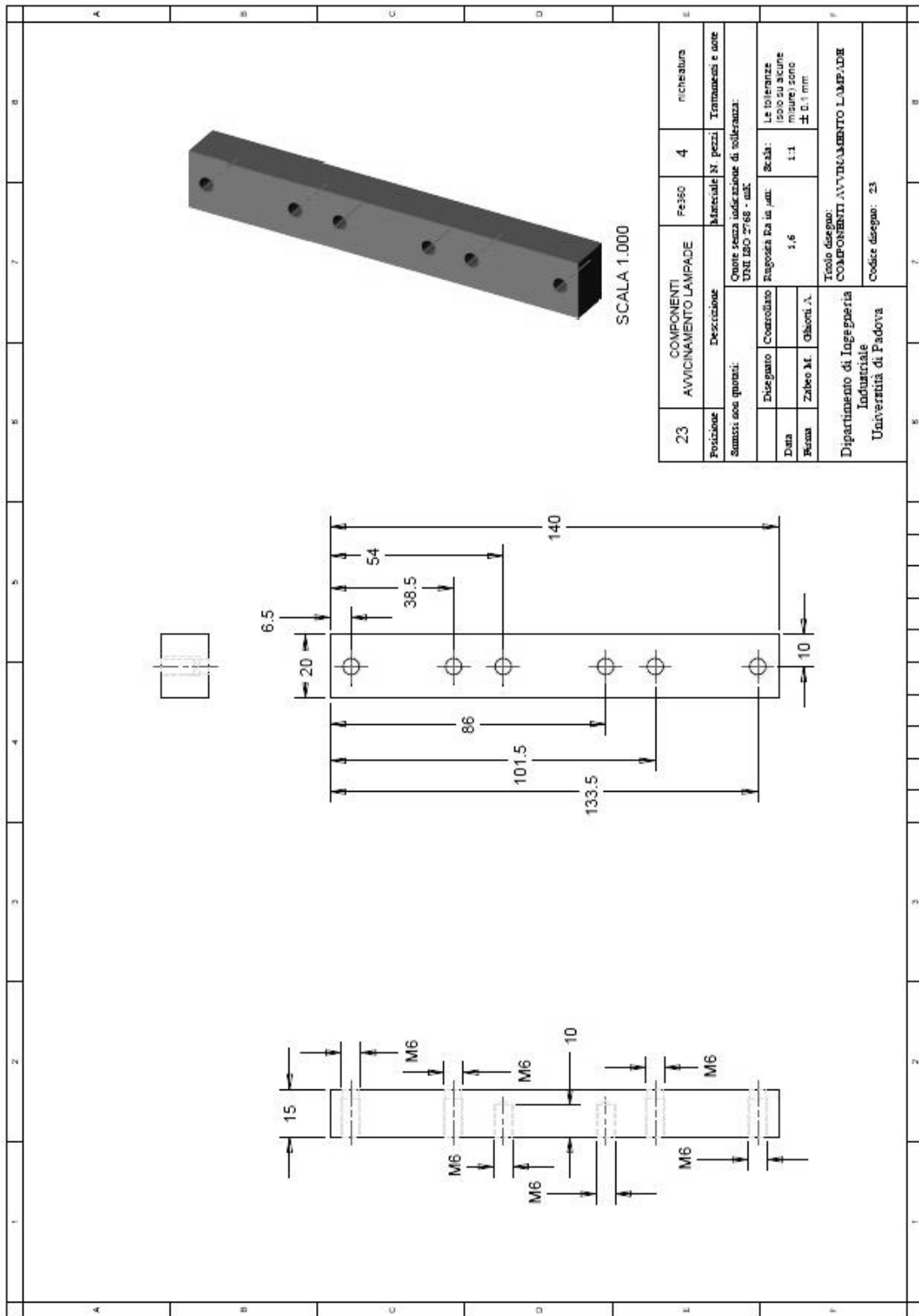


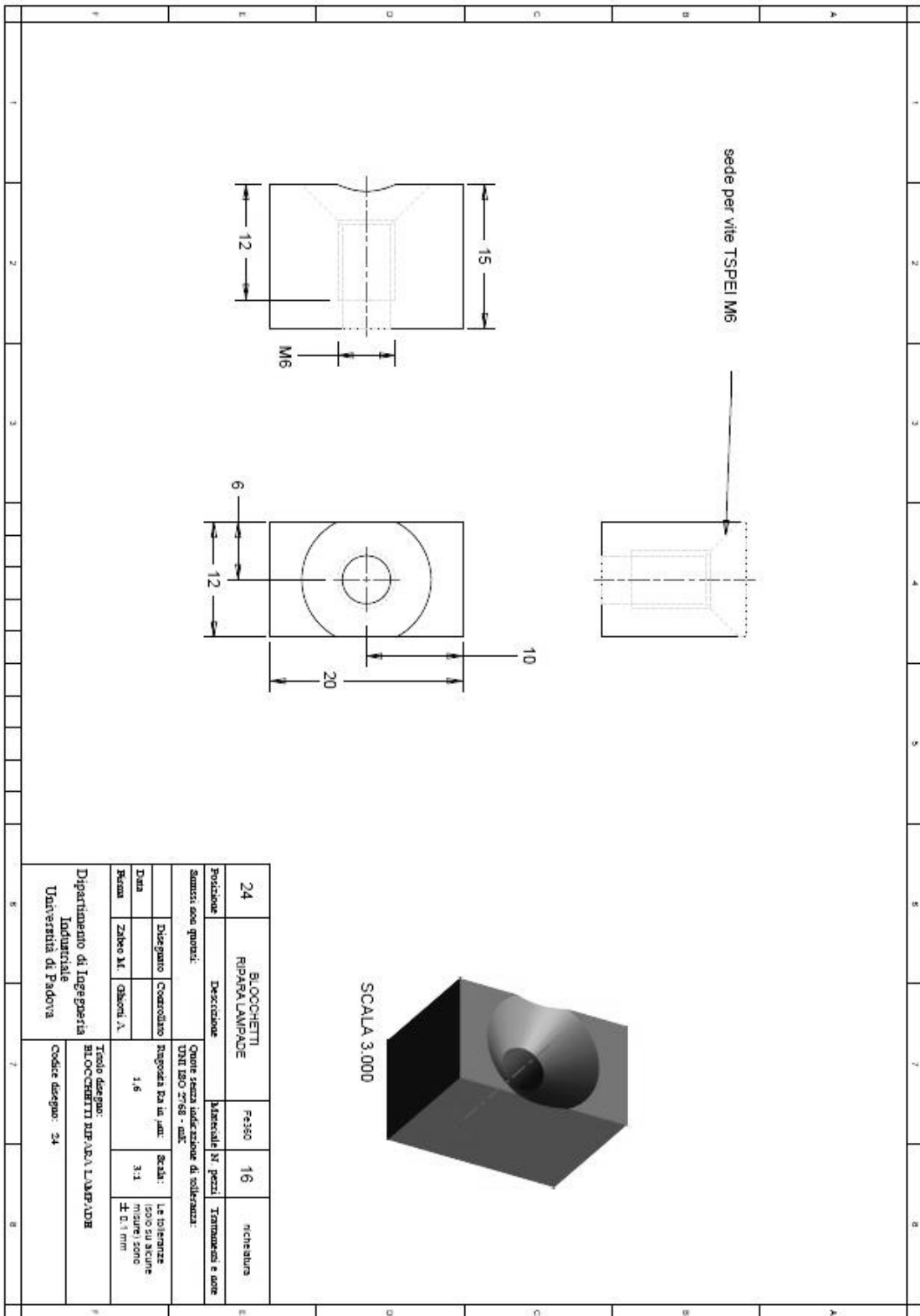


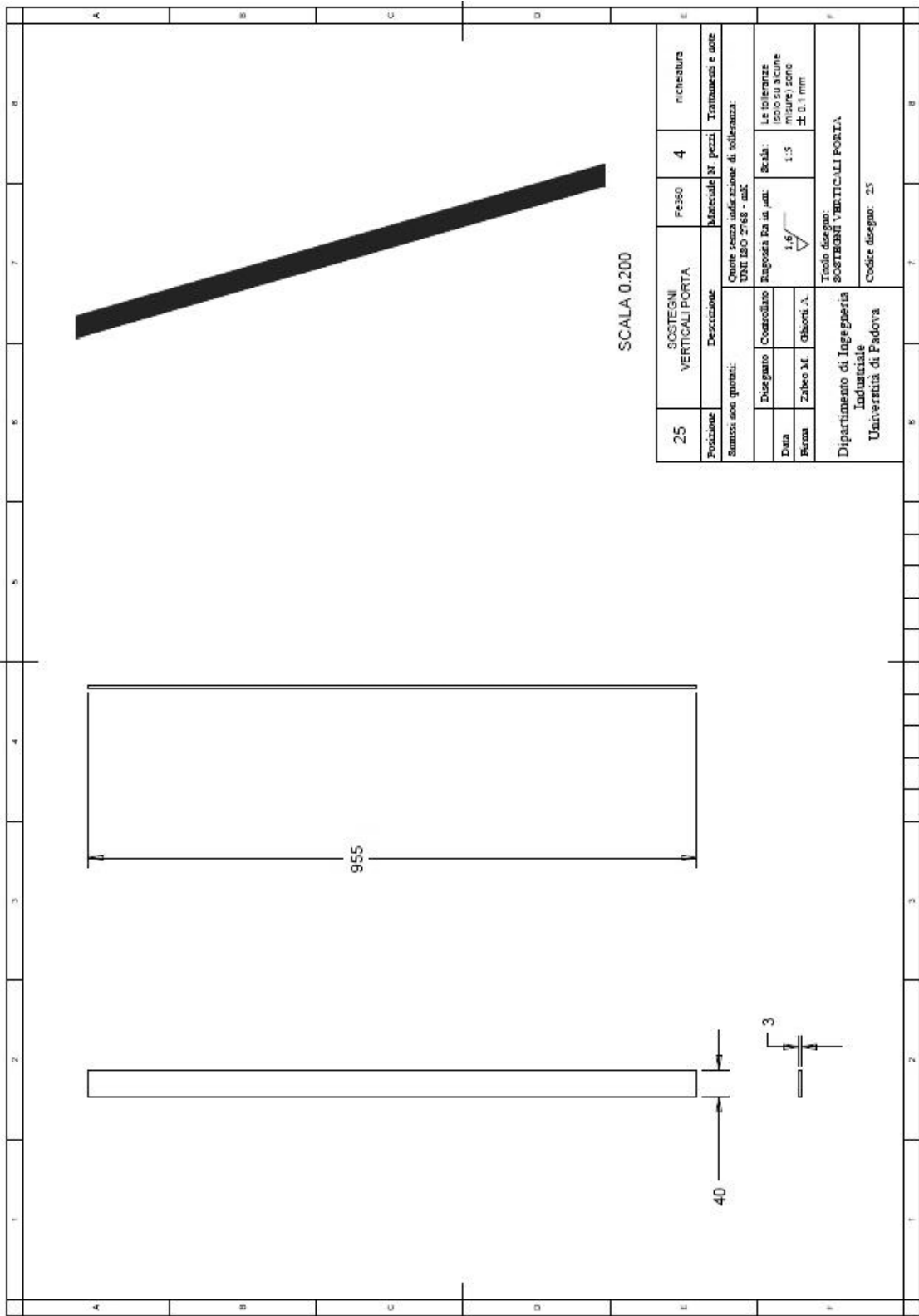
21	PROFILATO SOSTEGNO LAMPADARE	Fe360	2	richiatura
Descrizione		Materiali N. pezzi Trattamenti e note		
Somma: con quozzi:				
Oltre senza indicazione di tolleranza:				
Disegno	Controllo	Spogata Ra in µm	Scala:	Le tolleranze
		1,6	1:4	possessione
Data	Zaboo M.			incisione
	Gliozzi A.			± 0,1 mm
Dipartimento di Ingegneria Industriale				
Università di Padova				
Codice disegno: 21				



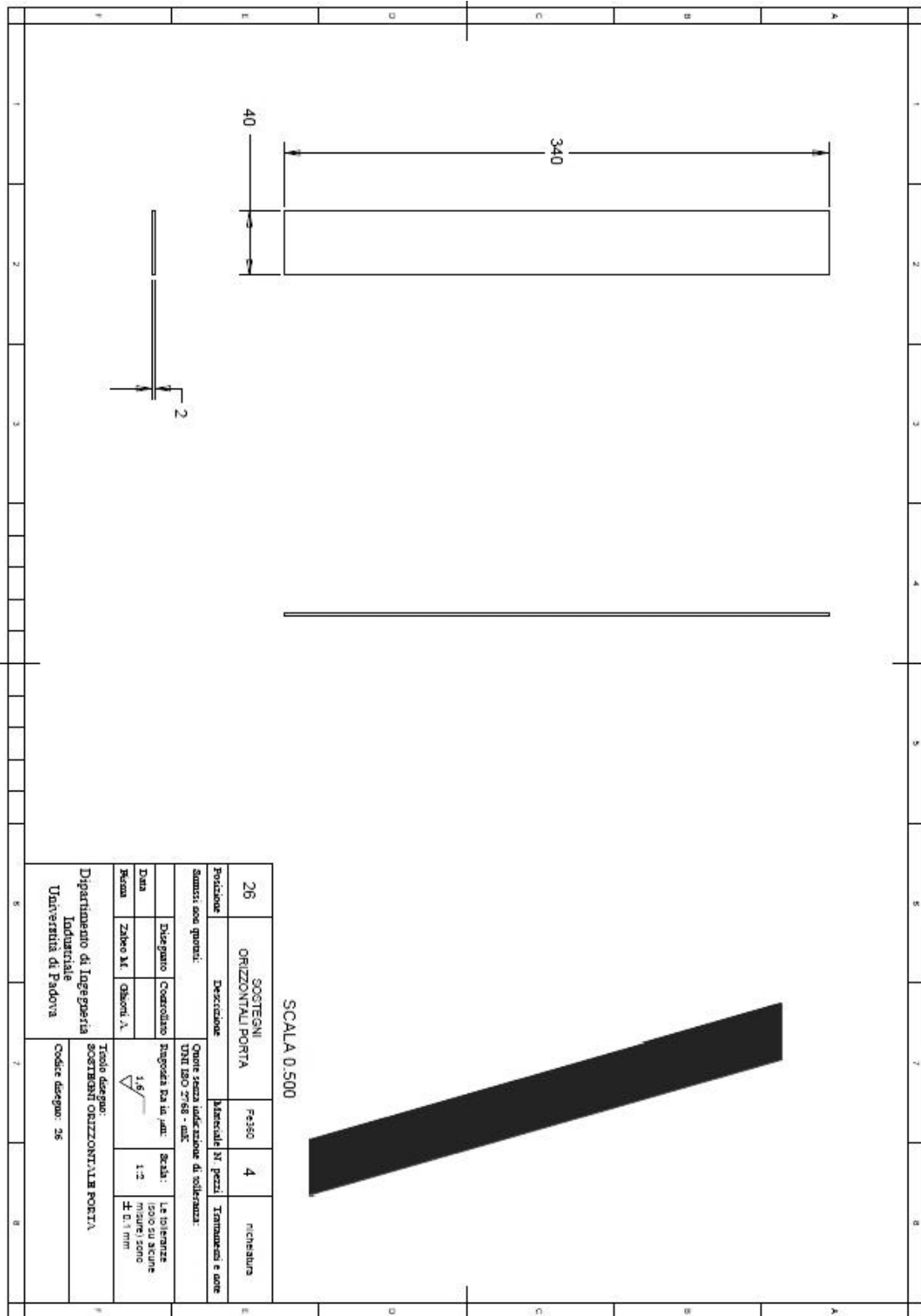
22	BASE PER LAMPADINE	Falco	2	richiesta
Descrizione Omne senza indicazione di tolleranza.		Materiali e pezzi UNI ISO 2768 - M3		
Summi: see above:				
Posizione	Disegno	Controllo	Revisione	Scala:
	Zabro M1	Osborni A	1.6	1:2
Data				Le tolleranze sono su scale ± 0.1 mm
Titolio disegno: BASE PER LAMPADINE				
Dipartimento di Ingegneria Industriale Università di Padova				
Codice disegno: 22				

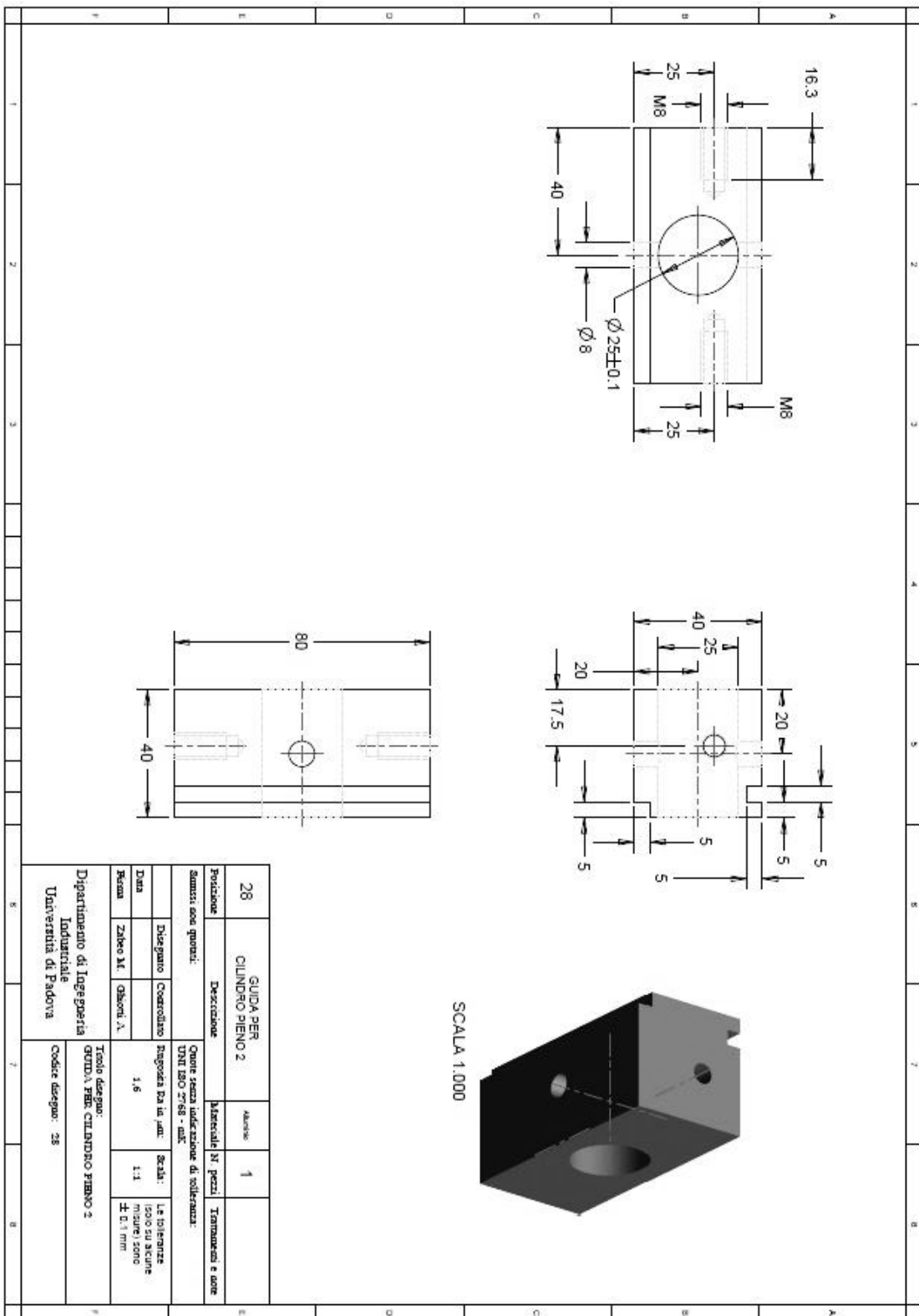


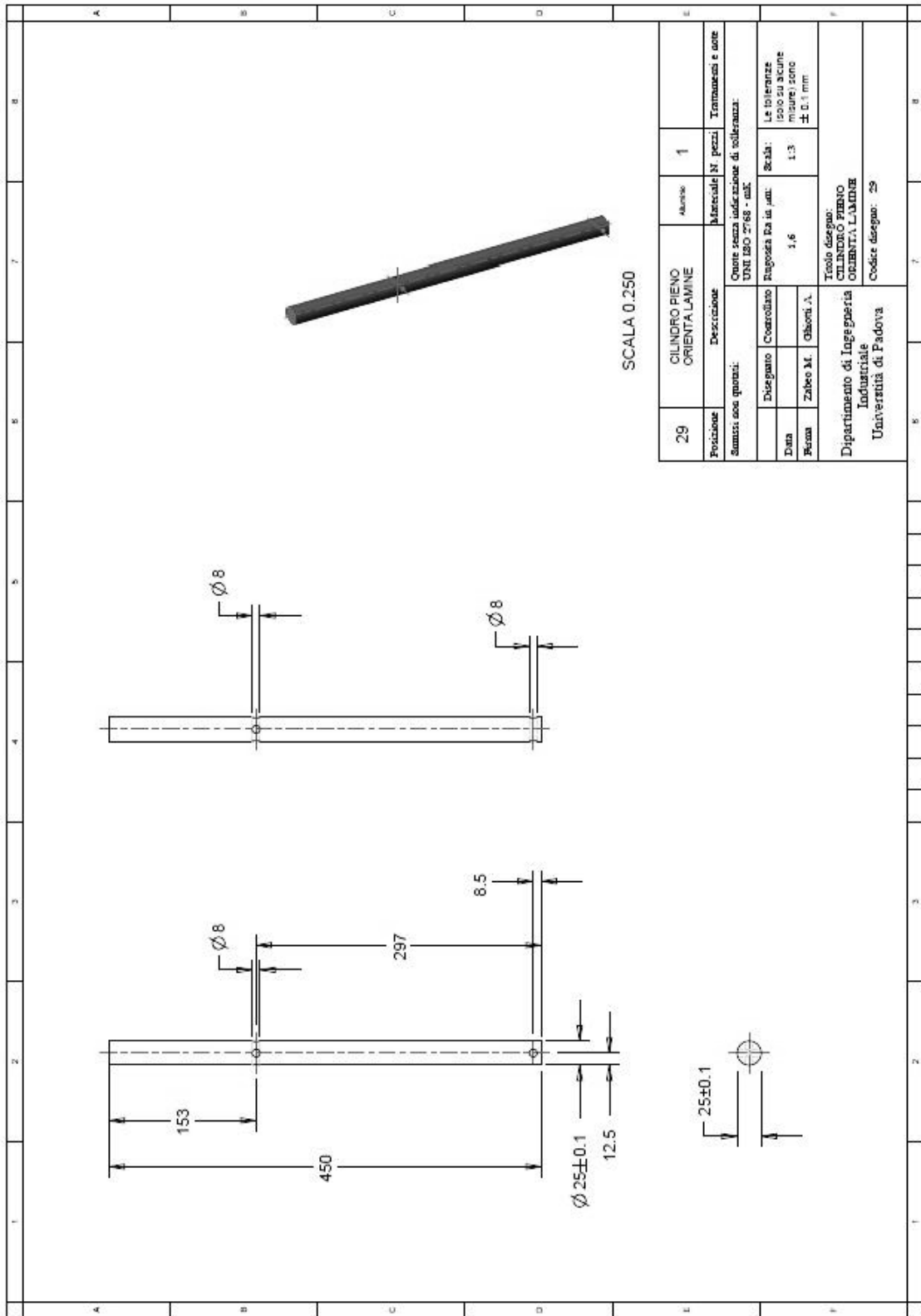


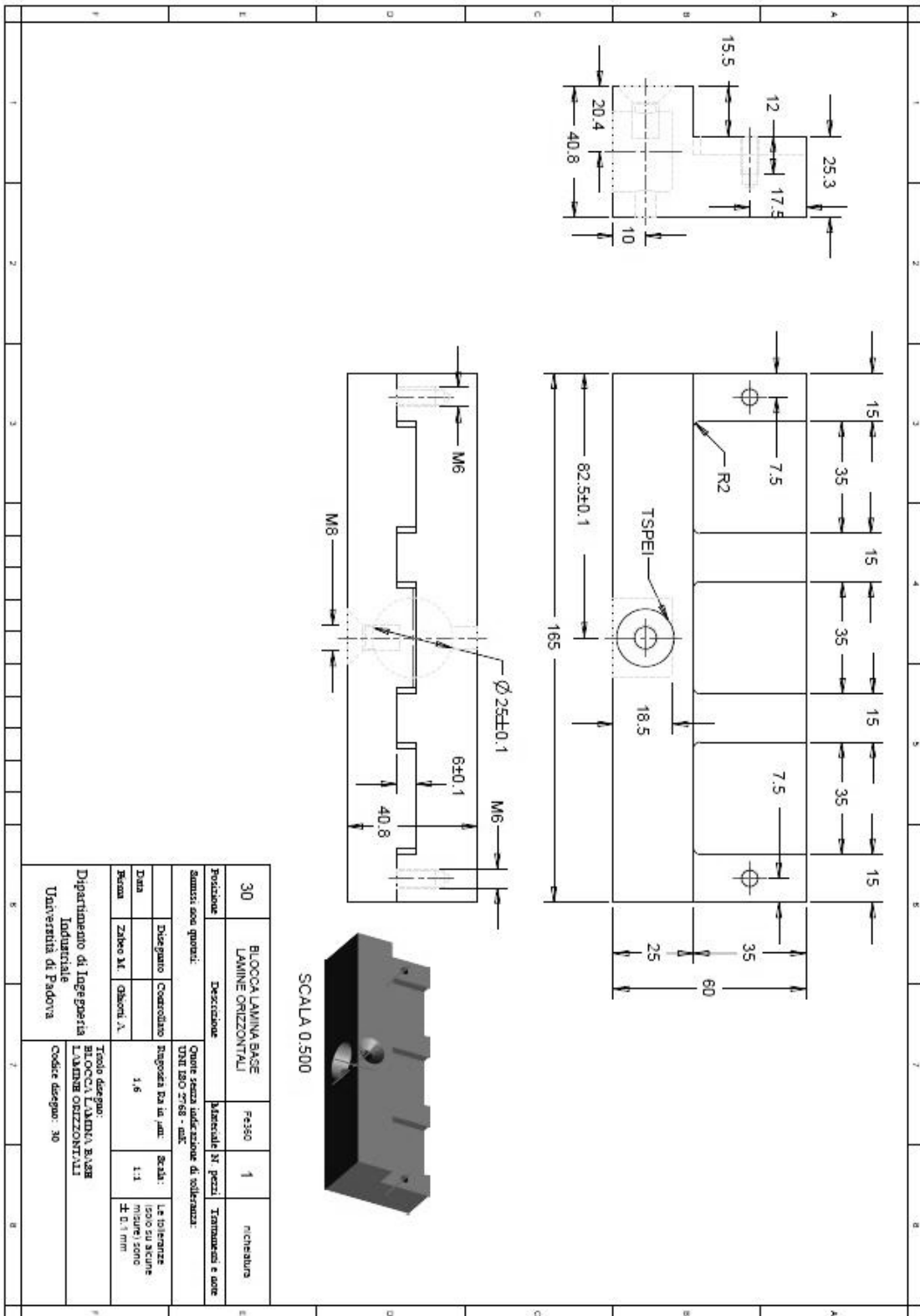


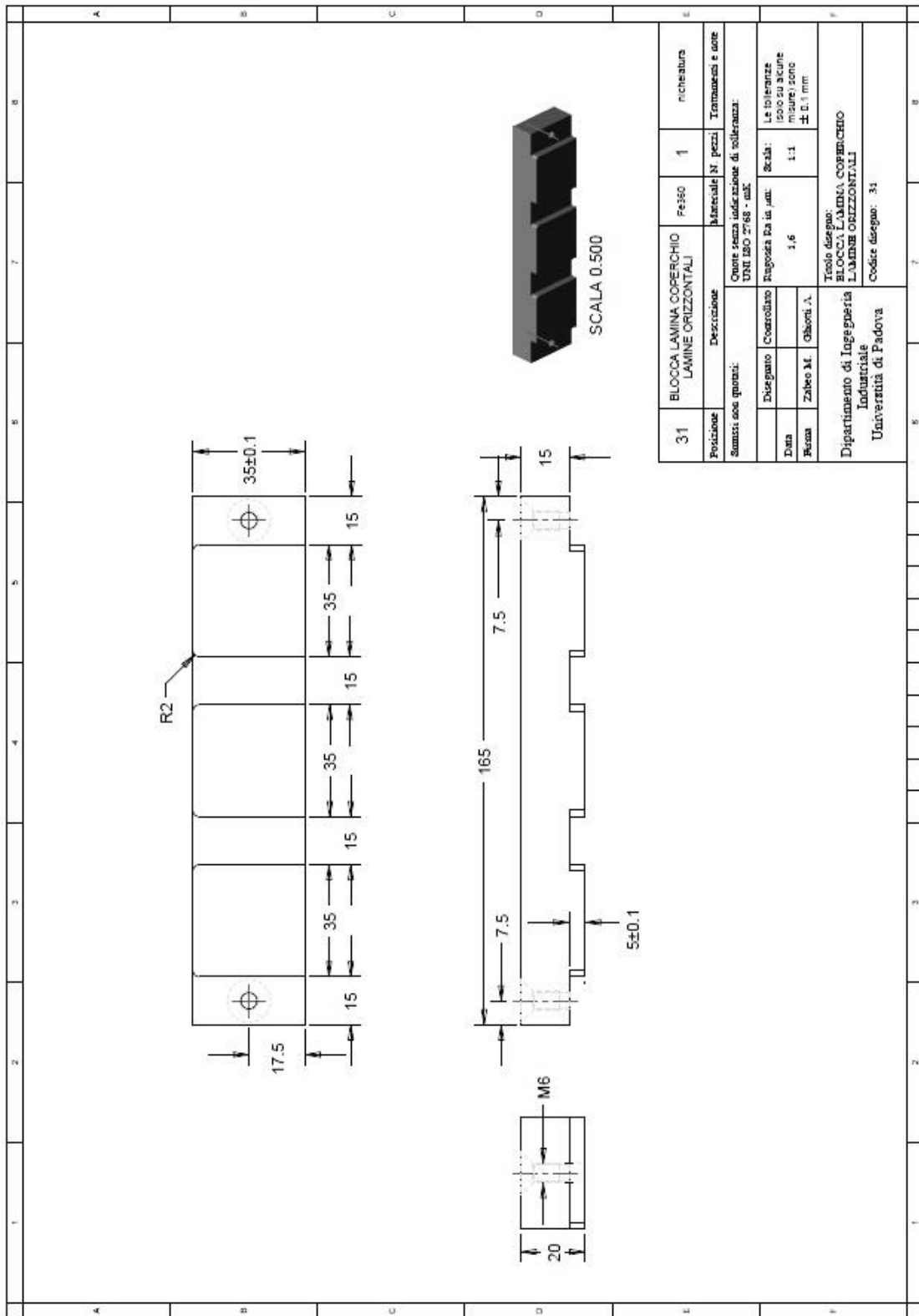
25	SOSTEGNI VERTICALI PORTA	Fe350	4	richiatura
Posizione 25 Sostegni senza indicazione di tolleranza: UNI ISO 2768 - mK		Materiali N. pezzi Fe350 4 richiatura		
Descrizione Sostegni senza indicazione di tolleranza: UNI ISO 2768 - mK		Materiali N. pezzi Fe350 4 richiatura		
Disegnato Zabeo M.		Controllato Gibboni A.		Note Le tolleranze sono su alcune misure sono ± 0.1 mm
Data 1.6		Revisione 1.5		Scala: 1:5
Firma Dipartimento di Ingegneria Industriale Università di Padova		Titolo disegno: SOSTEGNI VERTICALI PORTA Codice disegno: 25		



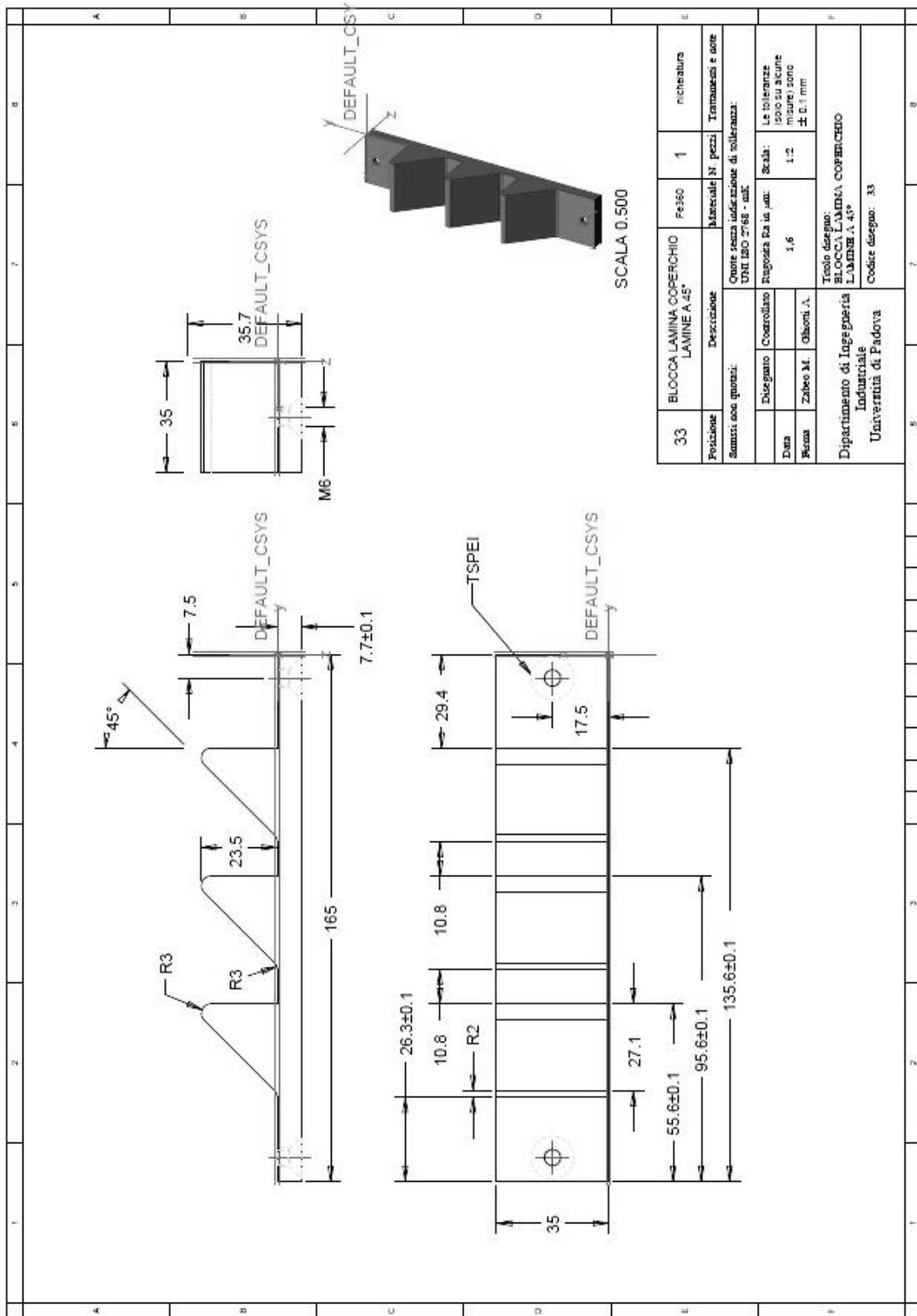


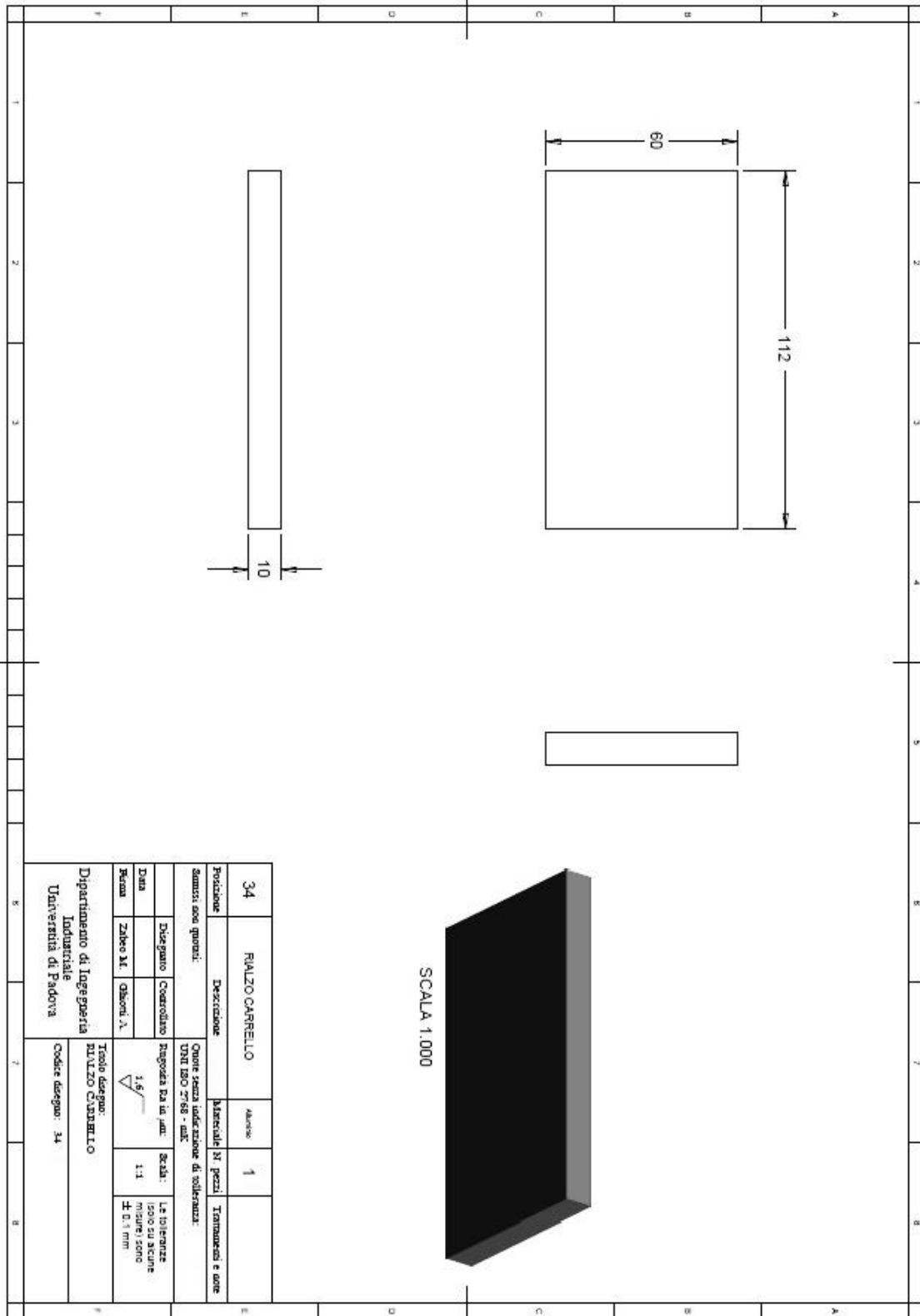


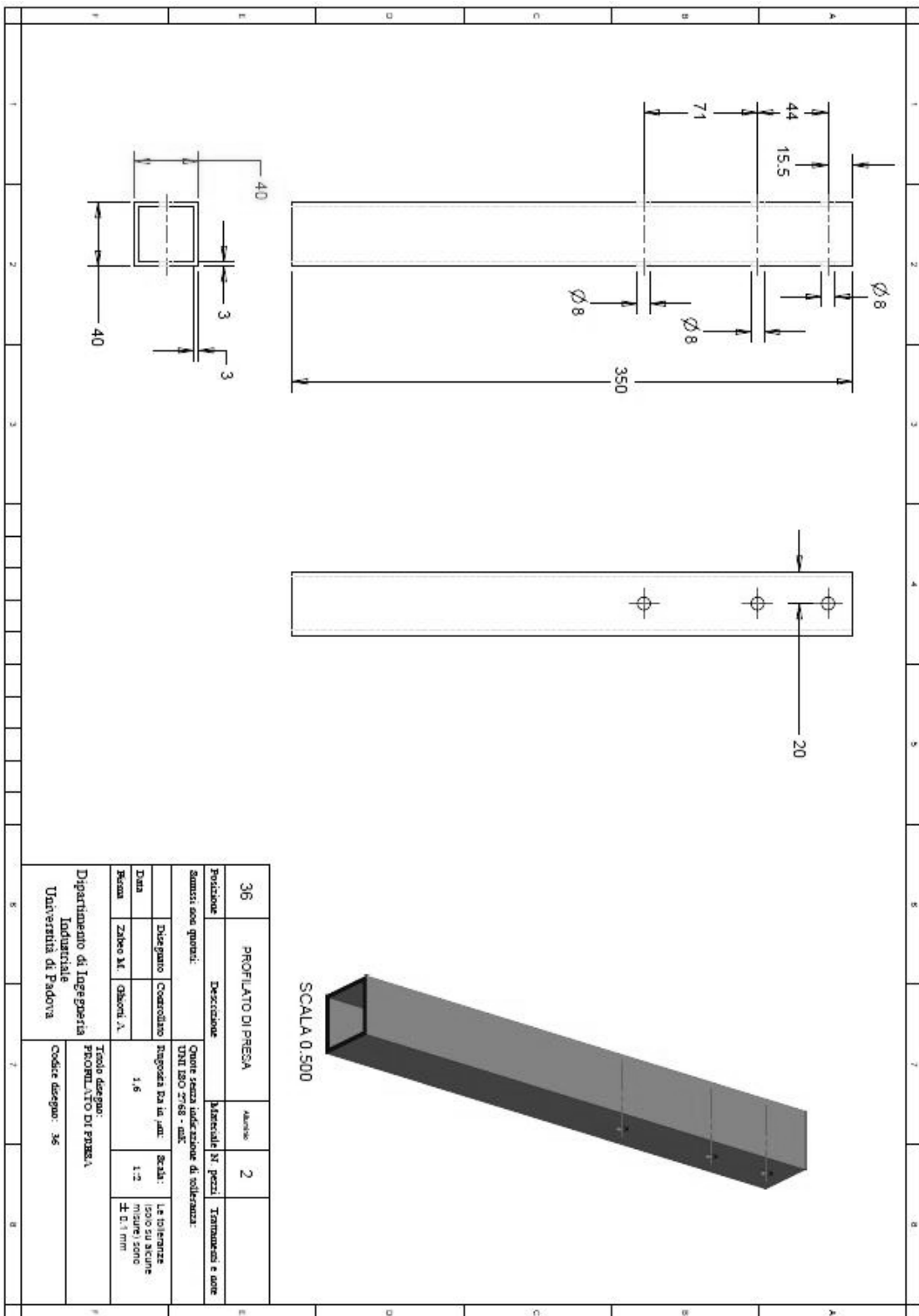


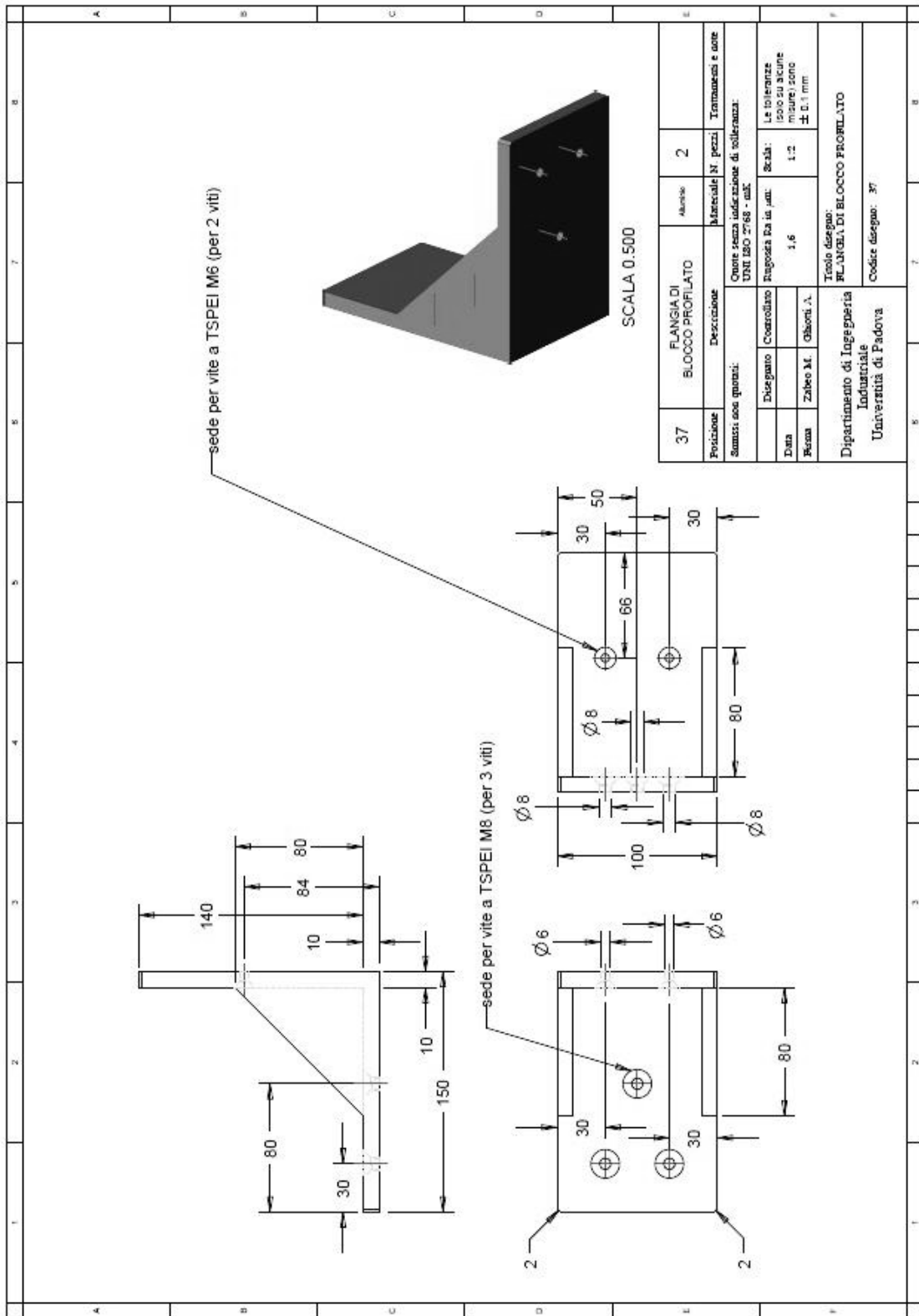


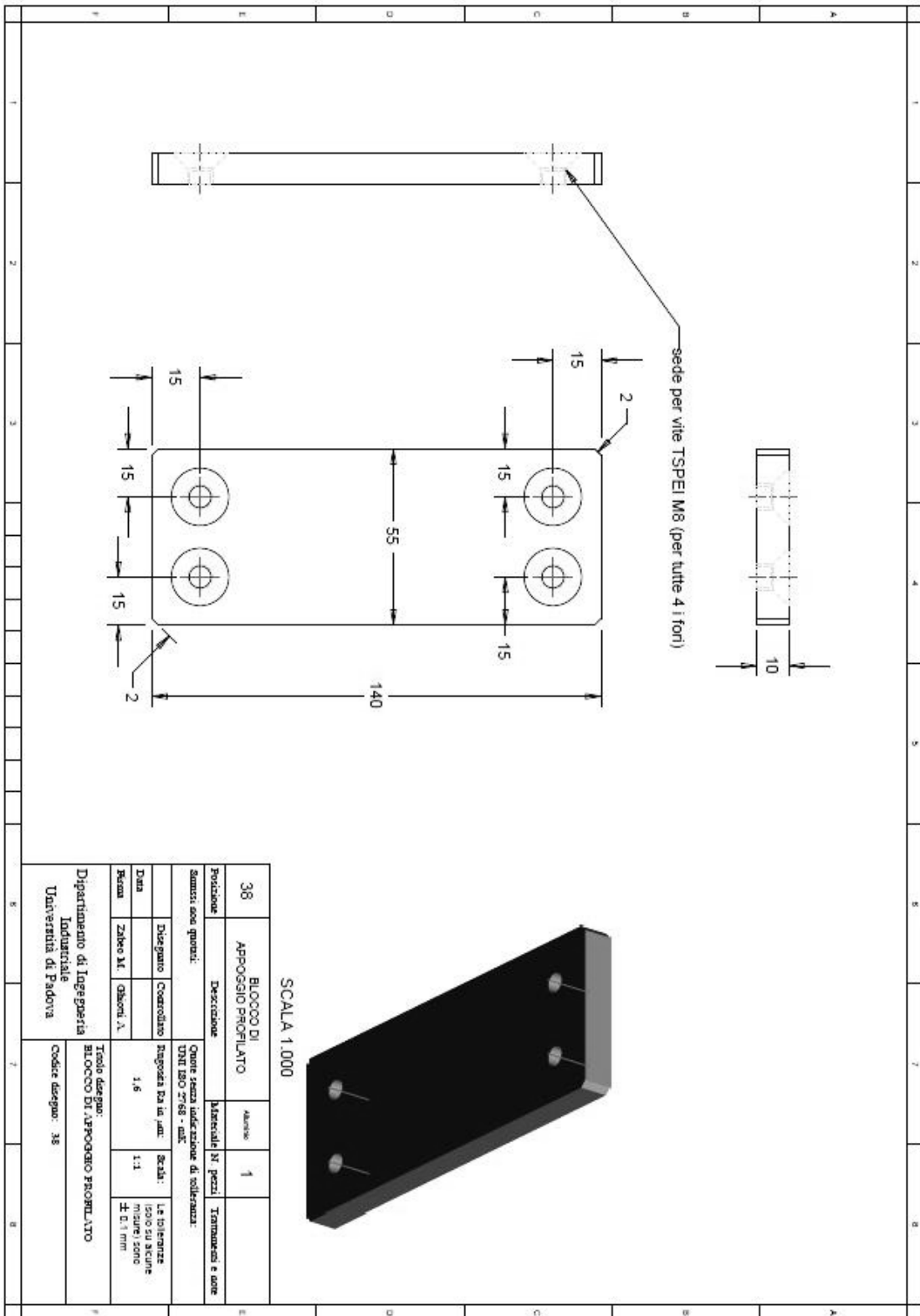
31	BLOCCA LAMINA COPERCHIO LAMINE ORIZZONTALI	Fe360	1	richiatura
Posizione: Summa: non quotati.		Descrizione: Materiale: N. pezzi: Trattamenti e note: Omne senza indicazione di tolleranza: UNI ISO 2768 - mK.		
Data	Disegnato	Controllato	Spagosa Pa in .am	Scala: Le tolleranze sono indicate in base a: ± 0.1 mm
Forma	Zaboo M.	Ghisoni A.	1,6	1:1
Dipartimento di Ingegneria Industriale Università di Padova		Titolo disegno: BLOCCA LAMINA COPERCHIO LAMINE ORIZZONTALI Codice disegno: 31		

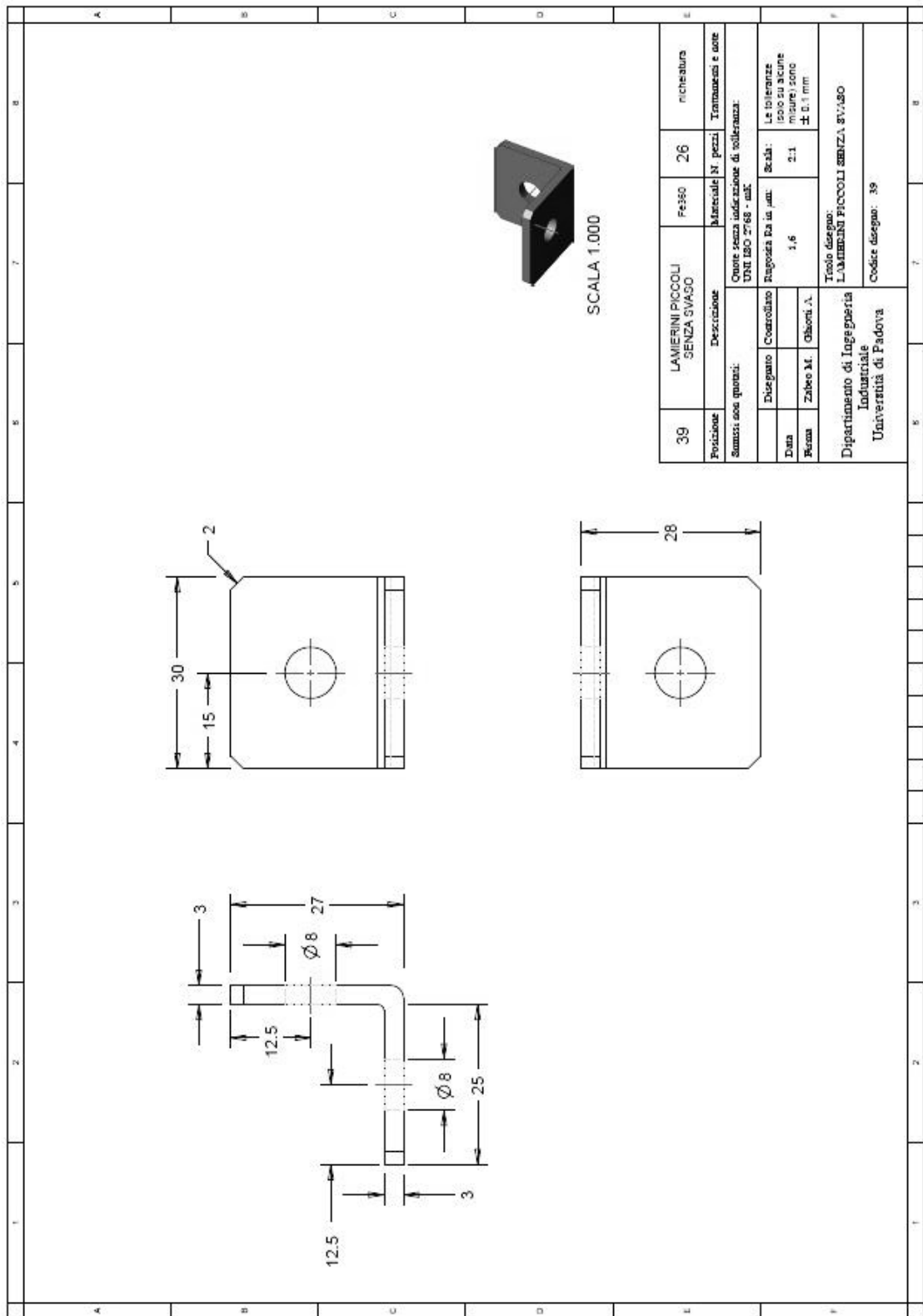


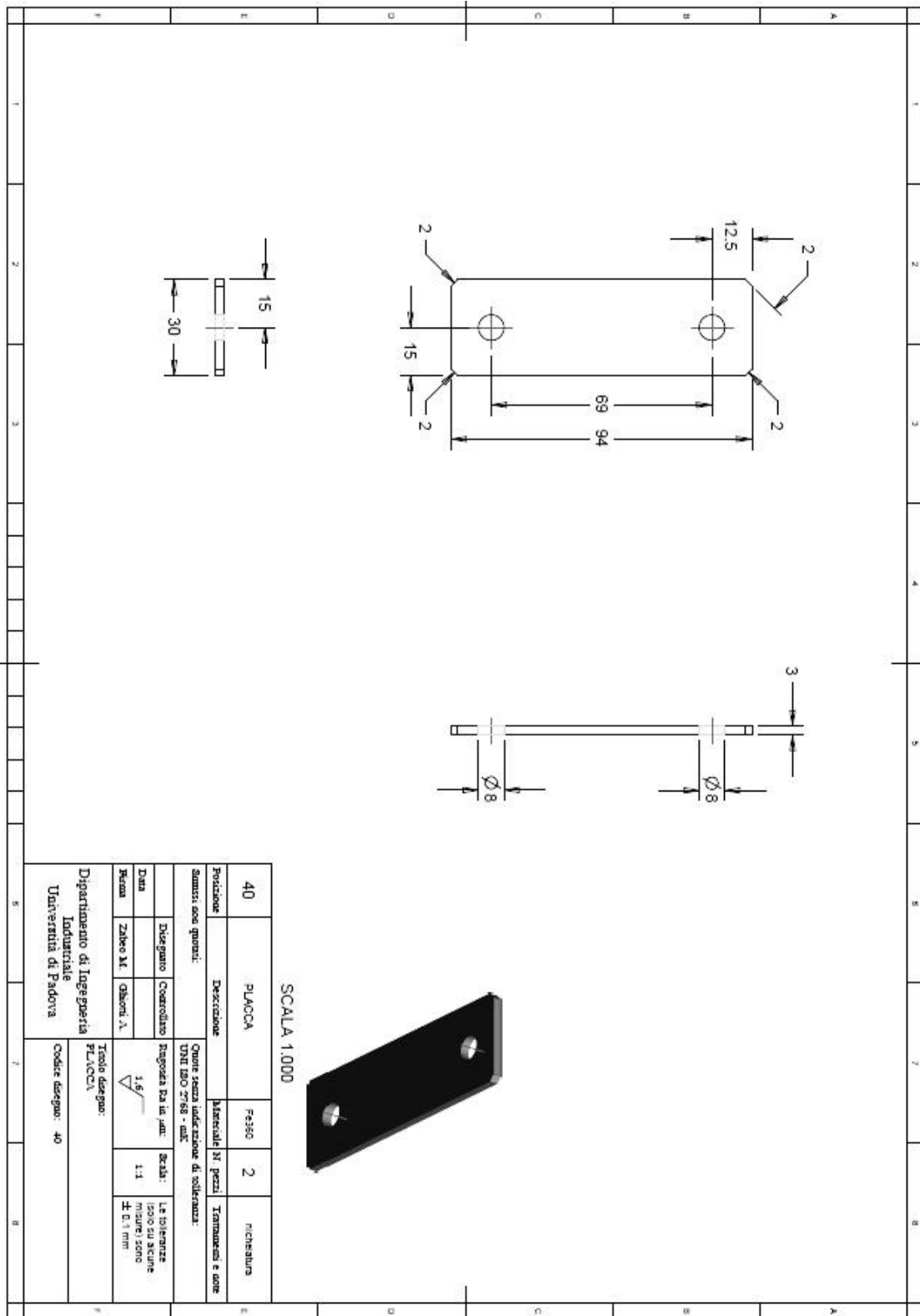


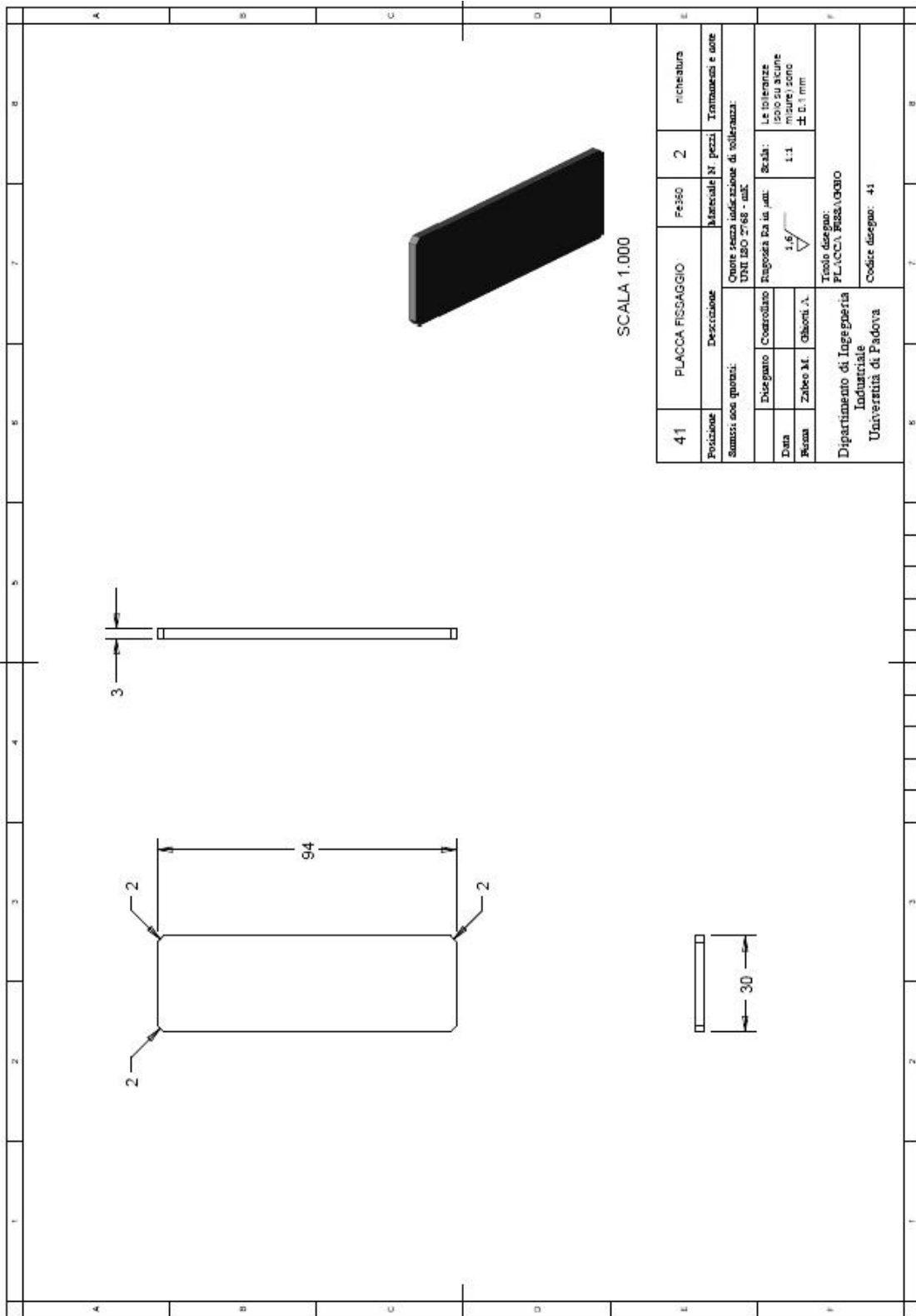


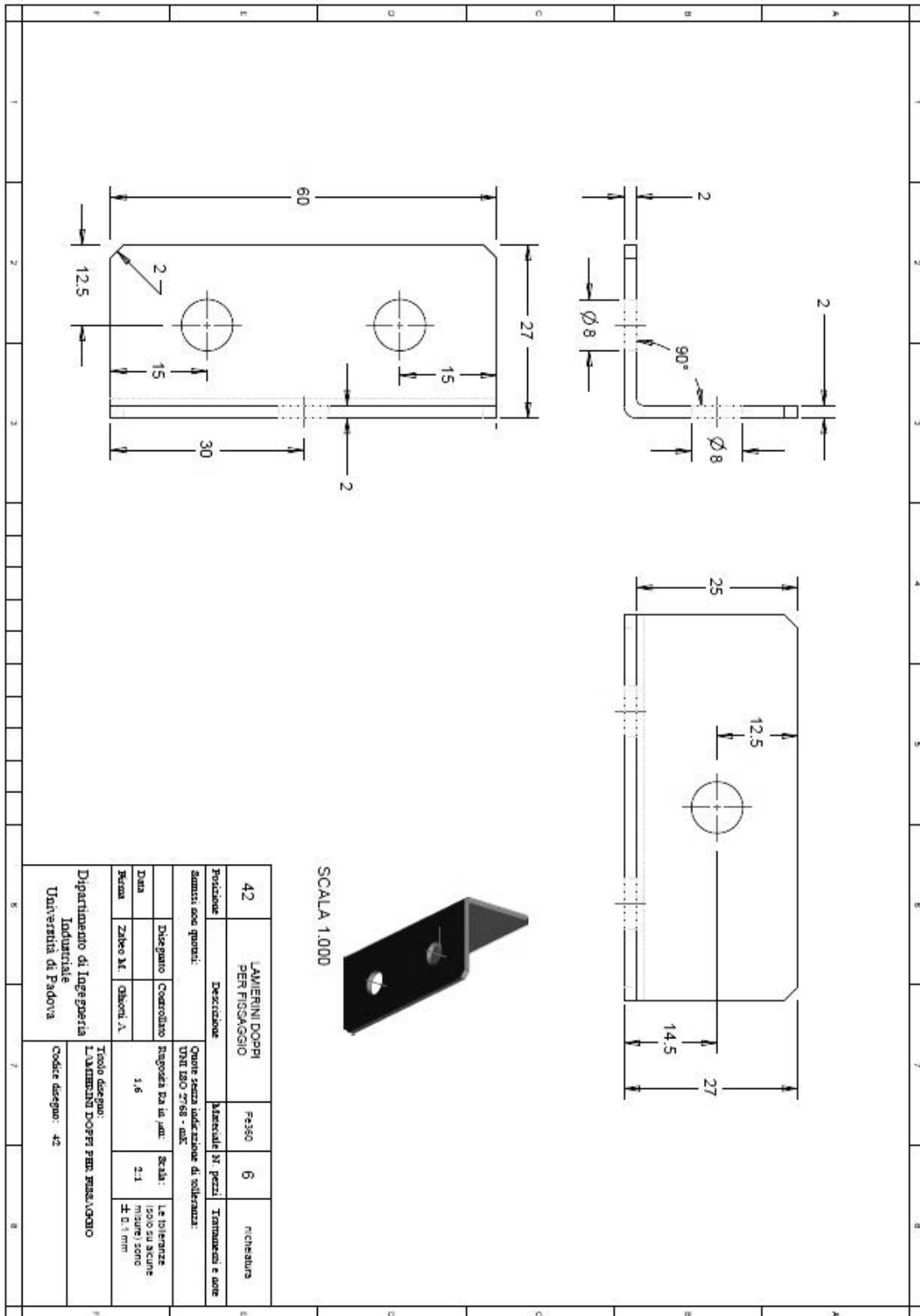


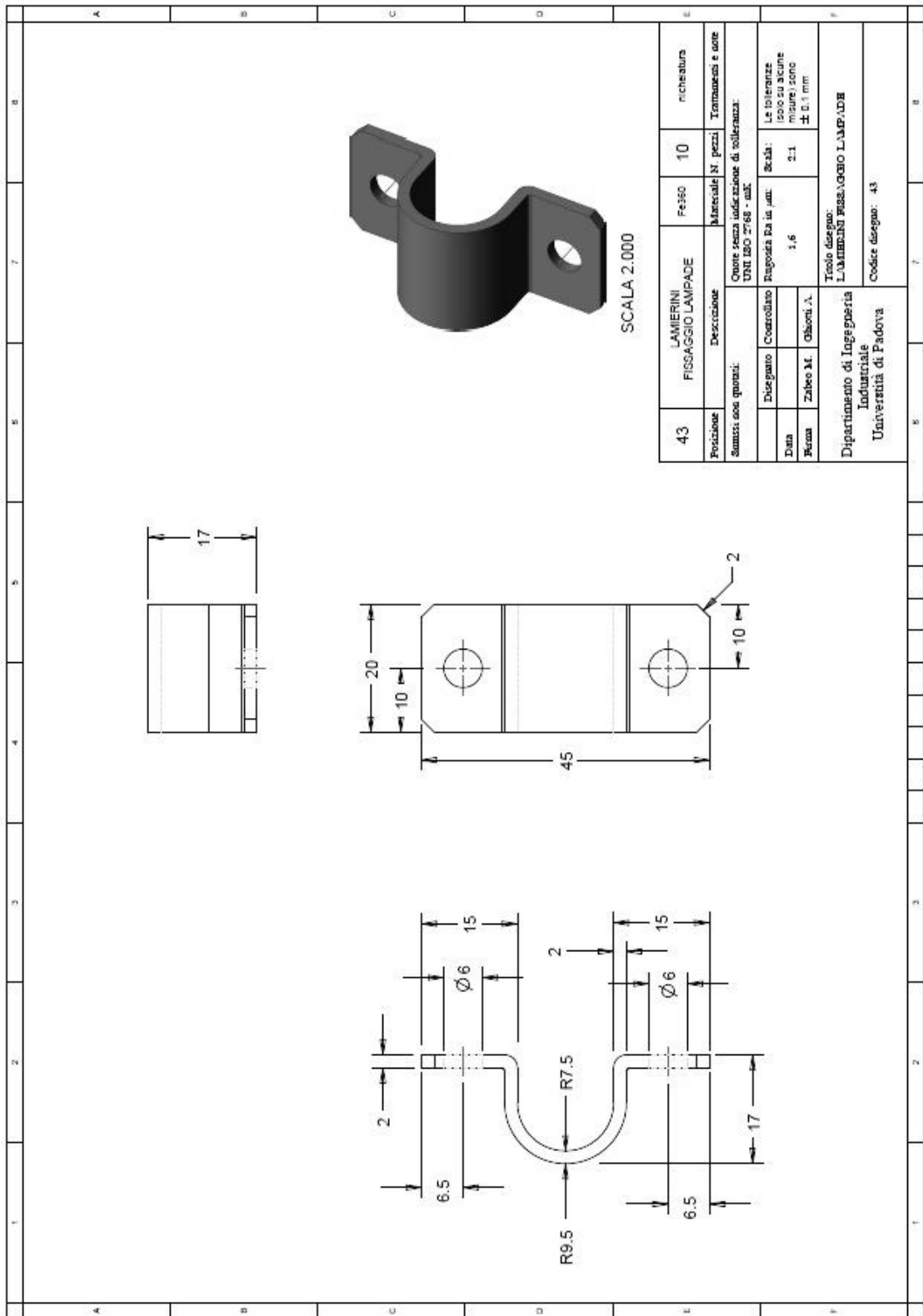


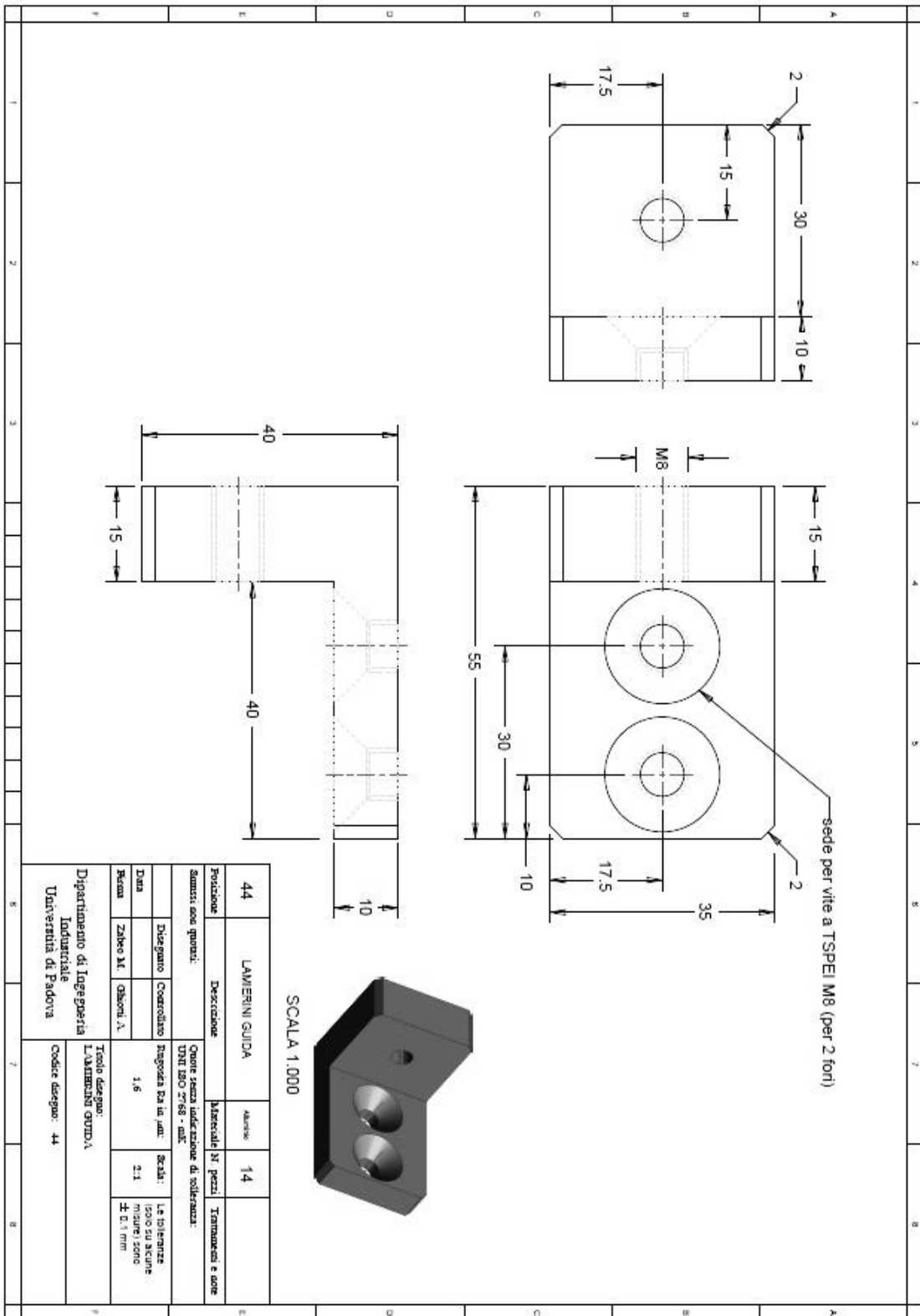


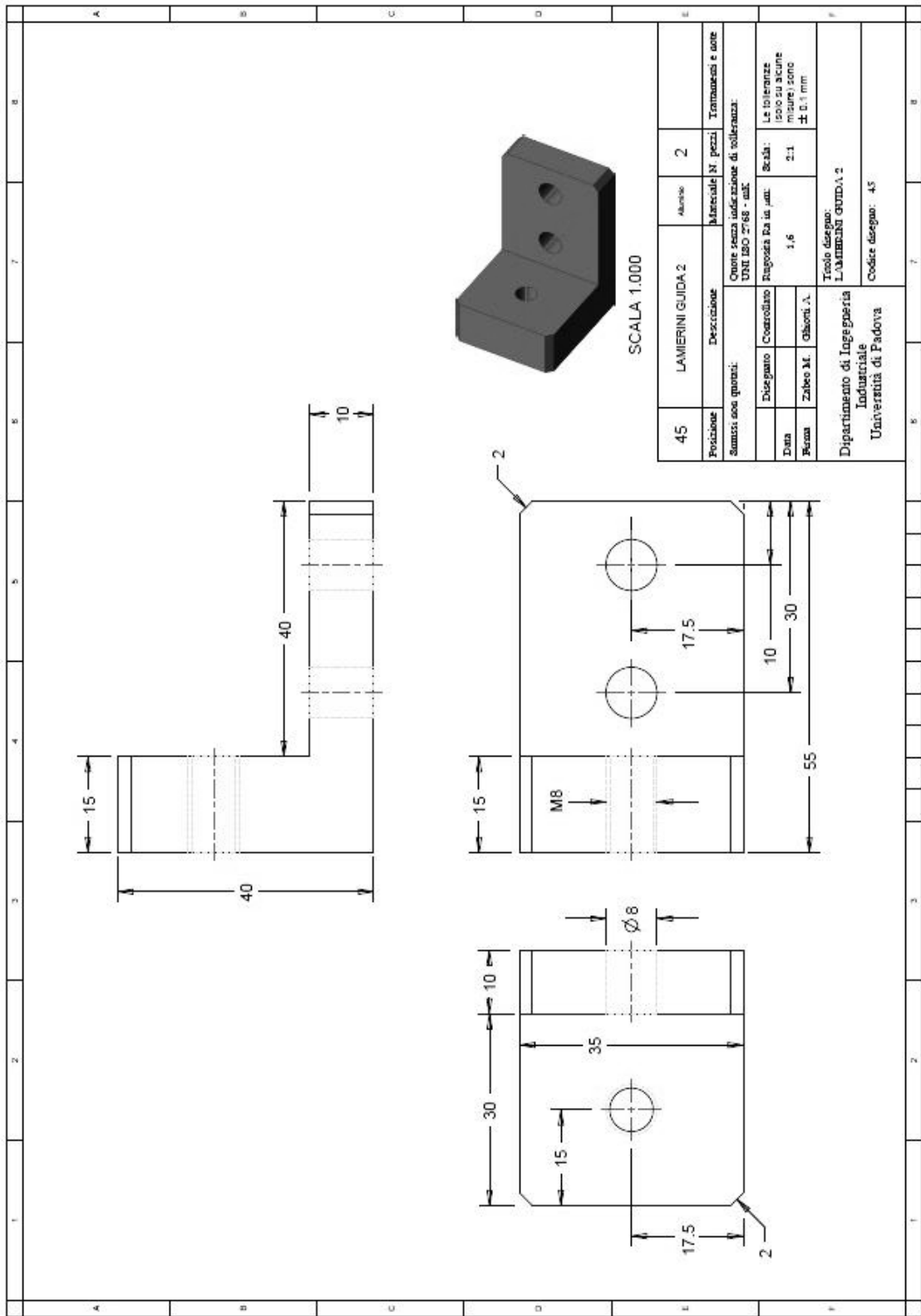


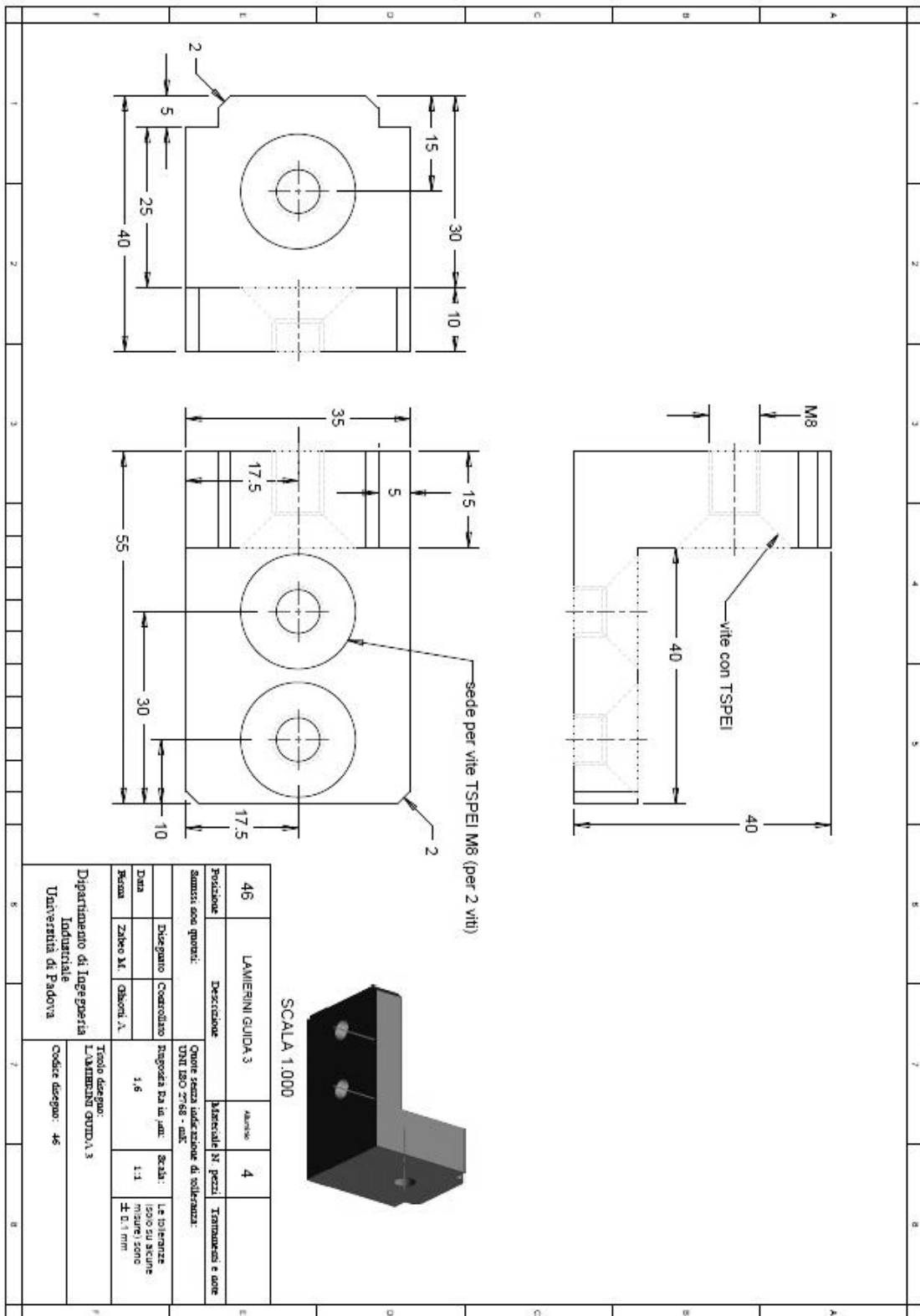


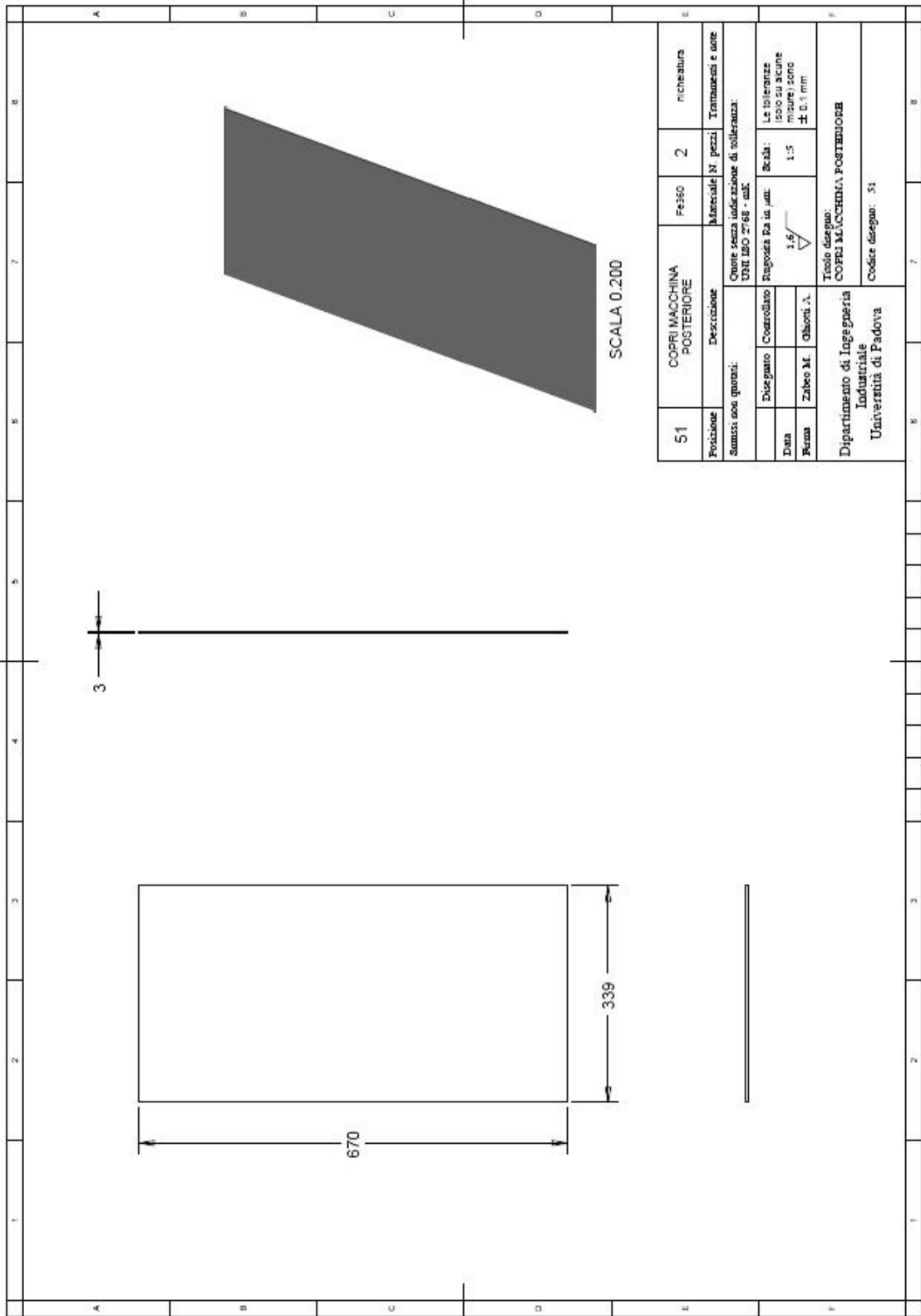


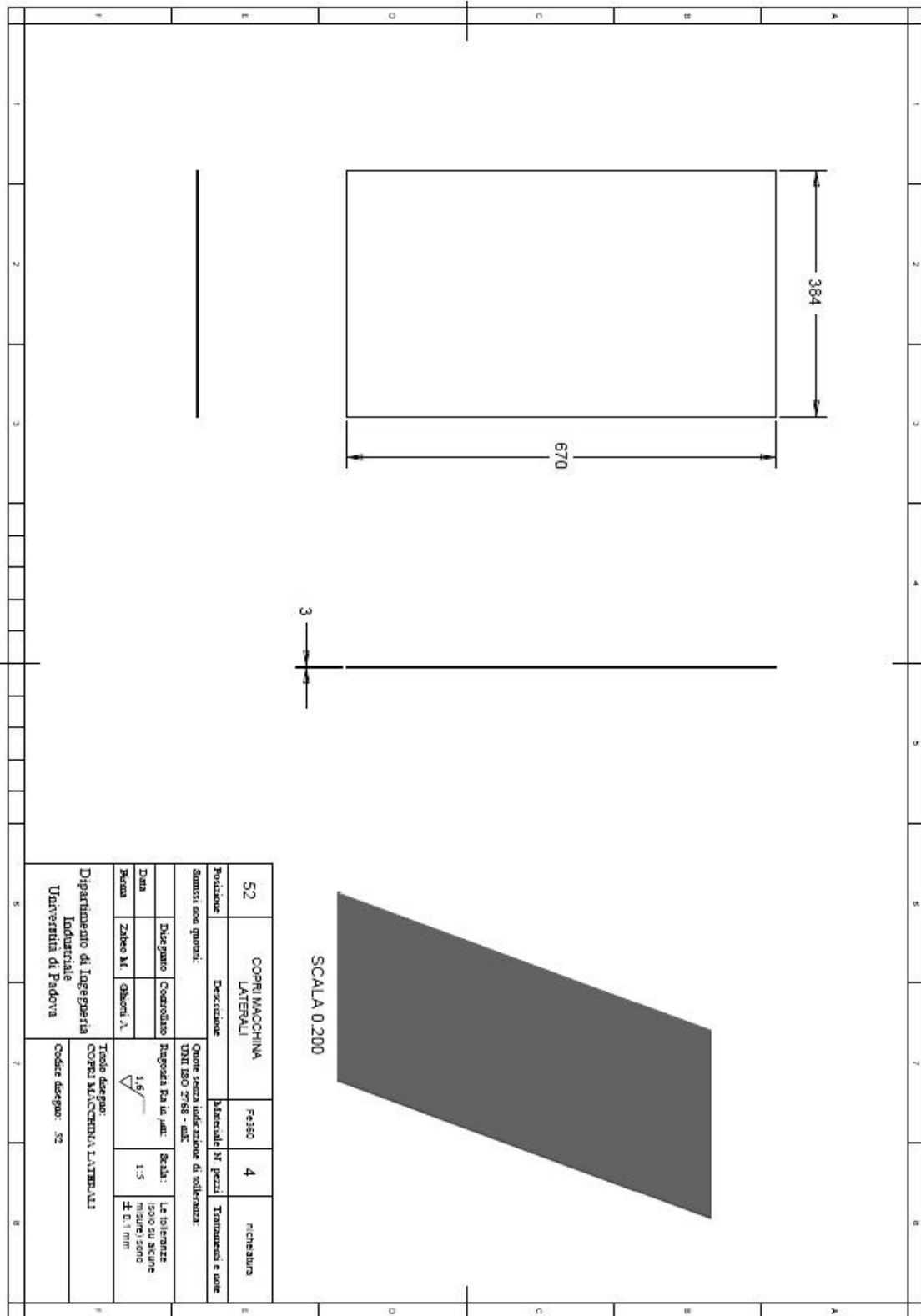






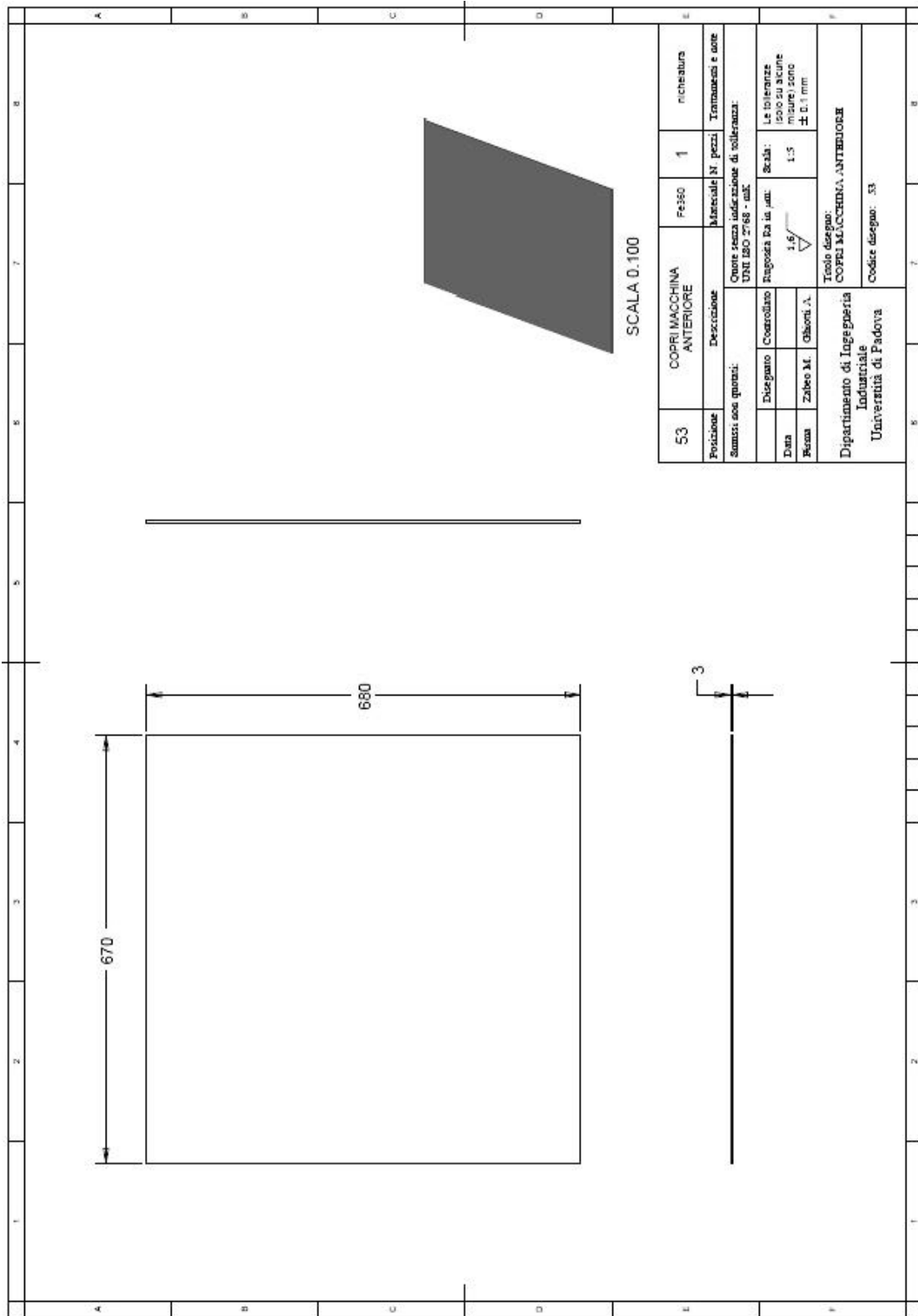


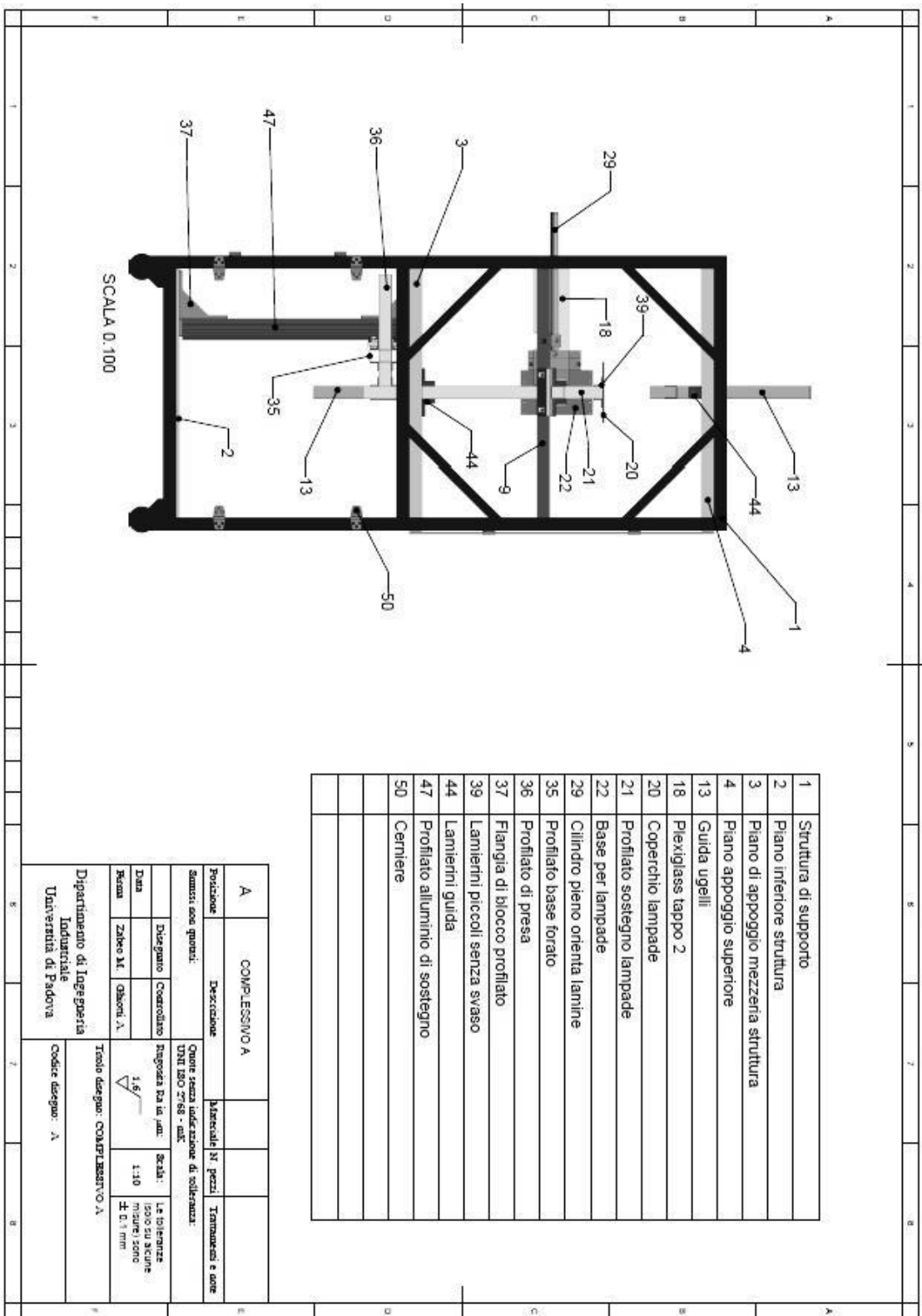


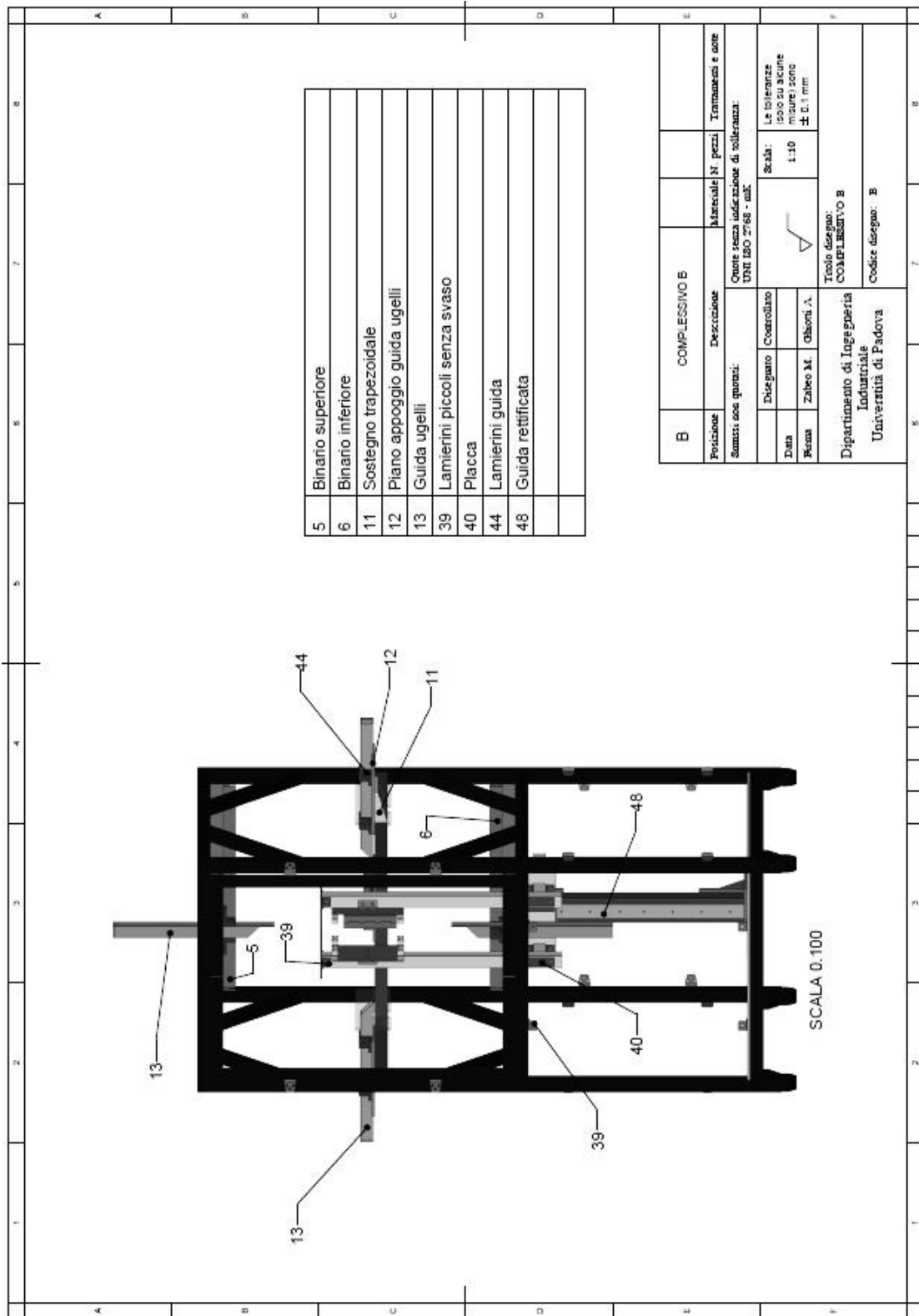


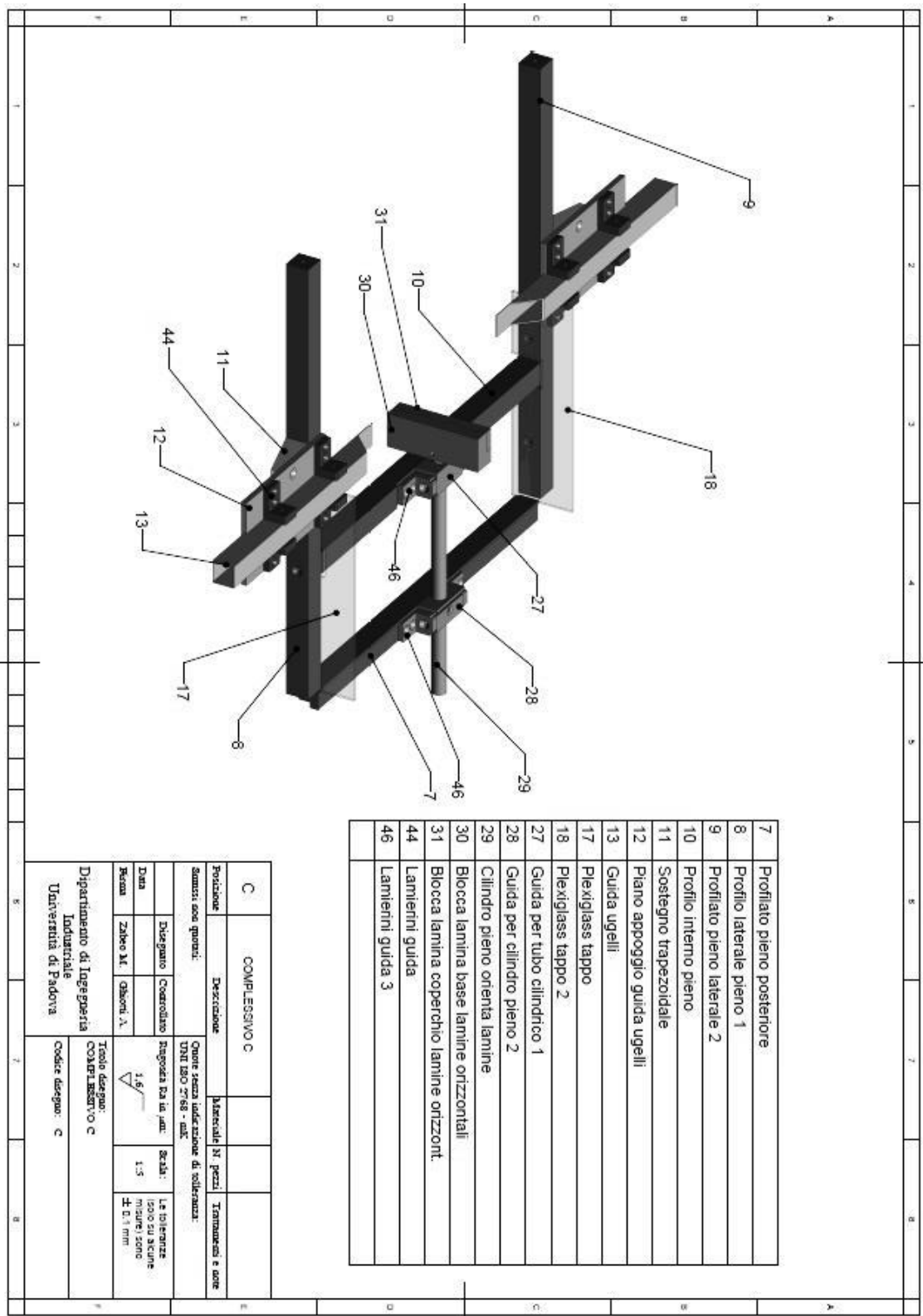
SCALA 0,200

52	COPRI MACCHINA LATERALI	F4350	4	richiamata
Posizione:		Materiali: N° pezzi: Terminazioni e note:		
Summi: see quote:		Omote senza indicazione di tolleranza:		
Disegno:		UNI ISO 2768 - MS		
Controllo:		Rappres. da in. jdm.		
Data:		Scala: 1:5		
Resma:		Le tolleranze sono su linee ± 0,1 mm		
Zabro M1		1:5		
Gisconi A		± 0,1 mm		
Titolo disegno: COPRI MACCHINA LATERALI				
Dipartimento di Ingegneria Industriale				
Università di Padova				
Codice disegno: 52				



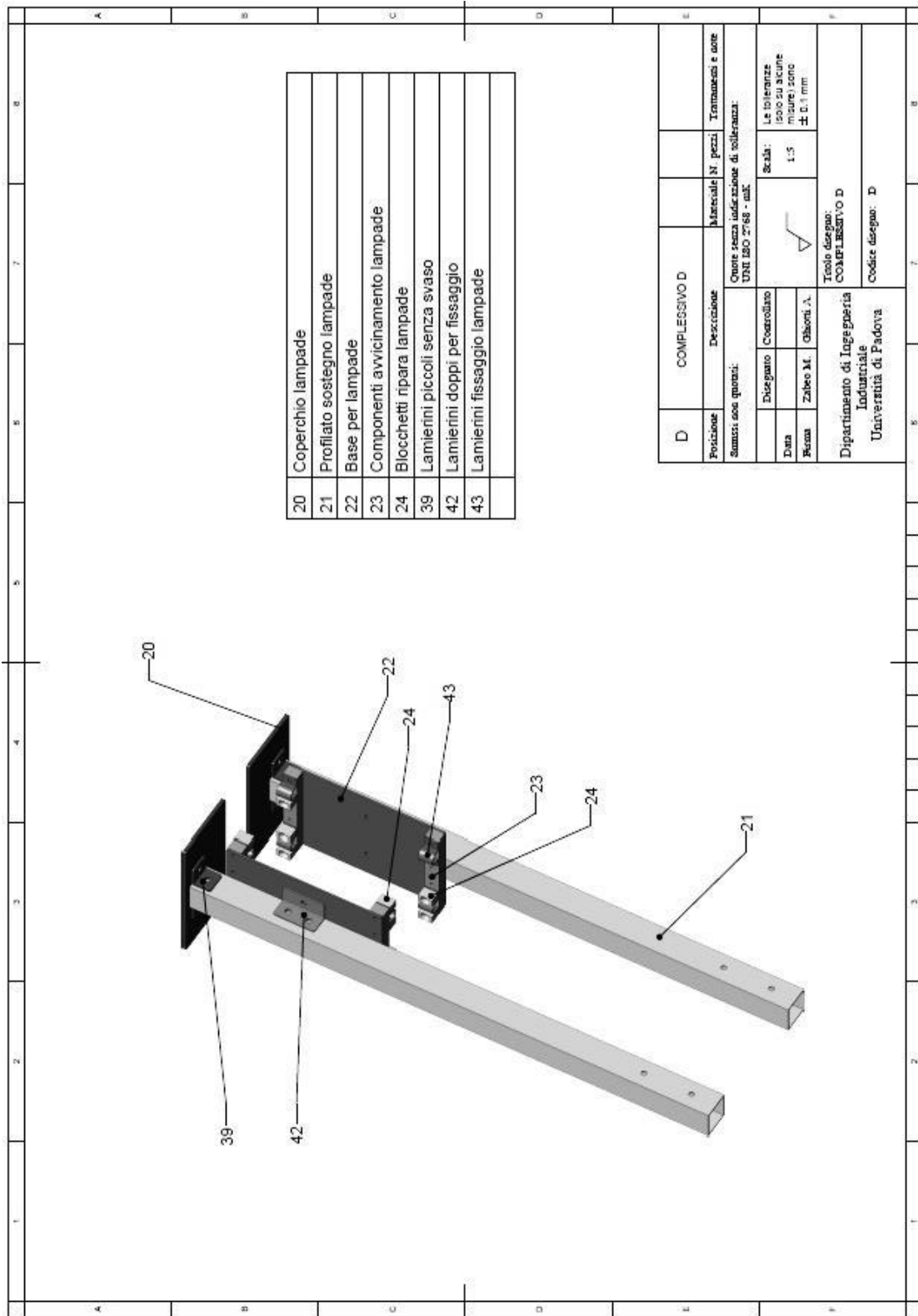






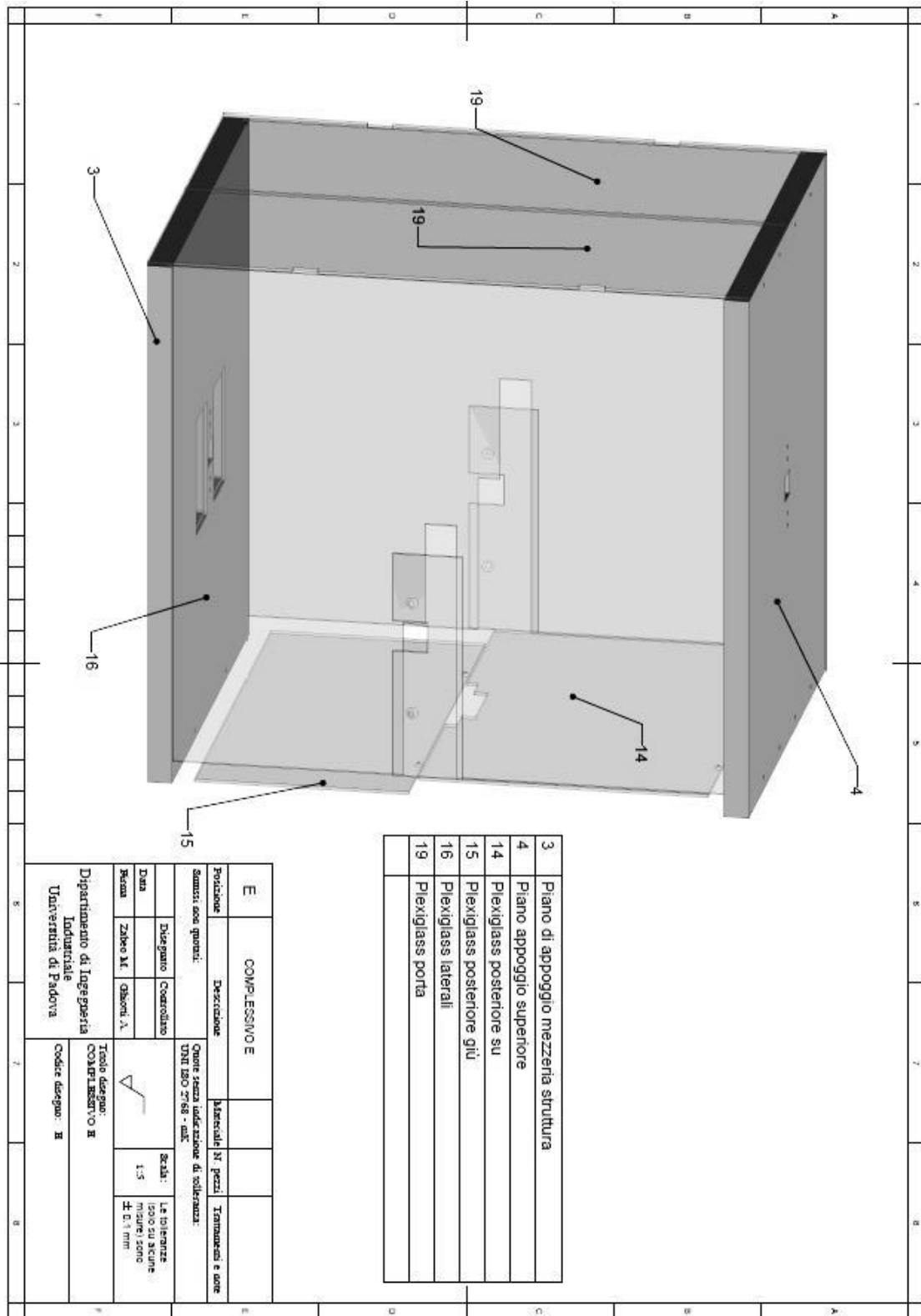
7	Profilato pieno posteriore
8	Profilo laterale pieno 1
9	Profilo pieno laterale 2
10	Profilo interno pieno
11	Sostegno trapezoidale
12	Piano appoggio guida ugelli
13	Guida ugelli
17	Plexiglass tappo
18	Plexiglass tappo 2
27	Guida per tubo cilindrico 1
28	Guida per cilindro pieno 2
29	Cilindro pieno orienta lamine
30	Blocca lamina base lamine orizzontali
31	Blocca lamina coperchio lamine orizzont.
44	Lamierini guida
46	Lamierini guida 3

C		COMPLESSIVO C				
Posizione		Descrizione		Materiali N° pezzi		
Somma, sono nuovi:		Oltre senza indicazione di tolleranza:		Trattamenti e note		
Disegno		Controllo		Rappres. Da in. unit.		
Data		Zabro M. Osborni A.		1:6		
Scala		1:5		Le tolleranze sono su scale		
Codice disegno:		COARL. BRSTV.0 C		± 0,1 mm		
Dipartimento di Ingegneria Industriale		Università di Padova		Codice disegno: C		



20	Coperchio lampade
21	Profilato sostegno lampade
22	Base per lampade
23	Componenti avvicinamento lampade
24	Blocchetti ripara lampade
39	Lamierini piccoli senza svasso
42	Lamierini doppi per fissaggio
43	Lamierini fissaggio lampade

D		COMPLESSIVO D		Materiale N. pezzi		Trattamenti e note	
Posizione		Descrizione		Oltre senza indicazione di tolleranza:		UNI ISO 2768 - mK.	
Summ. con quozzi:							
Disegnato		Controllo		Scala:		Le tolleranze sono indicate in tutto il disegno	
Data		Zaboo M.		Gibioni A.		1:5	
Firma						± 0,1 mm	
Dipartimento di Ingegneria Industriale		Università di Padova		Titolo disegno:		COMPLESSIVO D	
				Codice disegno:		D	



3	Piano di appoggio mezzera struttura
4	Piano appoggio superiore
14	Plexiglass posteriore su
15	Plexiglass posteriore giù
16	Plexiglass laterali
19	Plexiglass porta

E		COMPLESSIVO E				
Posizione:		Descrizione:		Materiali e pezzi		
Summi, sora novu:		Onore senza indicazione di tolleranza:		Trattamenti e sora		
Disegno		Controllo		UNI ISO 9758 - 04X		
Data		Zabro M1		Oskoni A		
Resma		Titollo disegno:		COARTEL BREVETTO B		
Dipartimento di Ingegneria Industriale		Codice disegno: B				
Università di Padova						

BIBLIOGRAFIA

Articoli:

Hyunok Kim, Nimet Kardes, T. Altan and A.E. Tekkaya – *Friction and Lubrication* – ASM International (2012) – chapter 7

I.G. Masters, D.K. Williams, R. Roy – *Friction behaviour in strip draw test of pre-stretched high strength automotive aluminium alloys* – International Journal of Machine Tools & Manufacture (2013)

W.S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A.J. Wittebrood, P. De Smet, A. Haszler, A. Vieregge – *Recent development in aluminium alloys for the automotive industry* – Materials Science and Engineering (2000)

B.H. Lee, Y.T. Keum, R.H. Wagoner – *Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming* – Journal of Materials Processing Technology (2002)

Rui Zhou, Jian Cao, Q. Jane Wang, Fanming Meng, Krystian Zimowski, Z. Cedric Xia – *Effect of EDT surface texturing on tribological behavior of aluminum sheet* – Journal of Materials Processing Technology (2011)

J Scharnweber, L Hollang, K Reuther, SR Dey, C-G Oertel and W Skrotzki – *Tensile properties of UFG aluminum alloy AA6016 at low temperatures* – Journal of Physics: Conference Series, Institut für Strukturphysik, Technische Universität Dresden (2010)

Bibliografia

Hideo Kijima, Niels Bay – *Skin-pass rolling II: Studies of roughness transfer under combined normal and tangential loading* – International Journal of Machine Tools & Manufacture (2008)

H.T. Son, T.S. Kim, C. Suryanarayana, B.S. Chun – *Homogeneous dispersion of graphite in a 6061 aluminum alloy by ball milling* – Materials Science and Engineering (2003)

Tesi e libri:

Francesco Medea (rel: Andrea Ghiotti) – *Analisi del comportamento tribologico di materiali per stampi in operazioni di stampaggio a caldo di lamiera in 22MnB5* – Padova 2013

Francesco Sgarabotto (rel: Andrea Ghiotti) – *Analisi del comportamento tribologico di rivestimenti per utensili in operazioni di stampaggio di lamiera metalliche* – Padova 2010

Francesca Borsetto (rel: Paolo F. Bariani) – *Tribological performance of environmentally friendly solid lubricant coatings for sheet metal forming* – Padova

Albrizio Chiara (rel: Stefania Bruschi) – *Caratterizzazione della lega AA6016 per impiego nello stampaggio a caldo di componenti automotive* – Padova 2013

Jens Hardell – *Tribology of hot forming tool and high strength steels* – Luleå University of Technology (2009), paragraph 1.1 – 3.4 – 3.5 – 4.1 – 4.5

Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid – *Tecnologia meccanica* – Pearson Prentice Hall (quinta edizione 2008)

Giovanni Straffelini – *Attrito e usura: metodologie di progettazione e controllo* – Tecniche nuove (2007) – capitoli 2 e 3

Andrea Ghiotti, Stefania Bruschi – Progetto e prototipazione del processo produttivo (slides) – Materiale didattico: <http://www.im.dii.unipd.it/> e <https://elearning.unipd.it/dii/>

Pagine Web:

Excellent in spraying solutions – AED AUTOMATION (Interactive Brochure) – www.aed-automation.com

L'aerografo ed i suoi segreti (seconda parte) – <http://perso.modulonet.fr/~nnovello/statico/aerografo/pt2/aerografopt2.htm>

PNR (Società del gruppo Flowtech) – www.pnr.it – Sezione cataloghi

COMETOX – Your global partners for Metals and Chemicals – Boro Nitruro PT – http://www.cometox.it/ITA/boro_nitruro_PT.html

LASER – Produzione lampadine alogene – <http://www.laserlamps.it/default.asp?Docid=326&Tpl=1Template3.asp> – info@laserlamps.it

ROTFIL – Irradiatori ad infrarossi – <http://www.rotfil.com/it/prodotti/irradiatori-infrarossi/irradiatori-infrarossi.asp>

PANAR automazioni – Lubrificazione – <http://www.panar.com/>

OFFICINE Carraretto Loris – http://carrarettoloris.it/index_ita.htm

HEPCO – Sistemi di guida circolare e combinato – <http://www.rmsnc.com/catalogo/contenuti/catalogo/famiglie/pdf/20420.pdf>

TECSI – Nozzle division – http://tecsi.com.au/Tecsi_catalog_revision_5.pdf

DROPSA – Impianto centralizzato di lubrificazione minimale – <http://pdf.directindustry.it/pdf/dropsa-spa/impianto-centralizzato-lubrificazione-minimale-aria-olio-comando-pneumatico/7013-477809.html>

HIWIN – Guide lineari – <http://www.rmsnc.com/catalogo/contenuti/catalogo/famiglie/pdf/20200.pdf>

AZETA – Impianti di lubrificazione – <http://www.azetalub.com/>

ILC – Lubrication systems – Minimale lubrication – <http://www.ilclube.com/minimal-lubrication-ilc/>

Bibliografia

Note:

