

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

TESI DI LAUREA
in
Costruzione di macchine

**Progettazione di un'applicazione laser per la
lavorazione di materiali per il packaging**

CANDIDATO
Quintino Marrone

RELATORE
Chiar.mo Prof. Pier Gabriele Molari

CO-RELATORI
Chiar.mo Prof. Alberto Maggiore
Chiar.mo Prof. Piero Pelloni
Dott. Ing. Gilberto Spirito

Anno Accademico 2008/09

Sessione I

Indice

Introduzione

1. Incisione dei materiali da incarto G.D	1
1.1 Descrizione problematiche.....	1
1.2 Come si può fare	3
1.3 Comparazione tra le tecnologie	4
1.3.1 Vincoli funzionali.....	4
1.3.2 Aspetti realizzativi e costruttivi.....	5
1.3.3 Aspetti gestionali.....	6
2 Definizione e scelta componenti	9
2.1 Suddivisione in sottoproblemi	9
2.2 Determinazione dei parametri di produttività.....	10
2.3 Determinazione della sorgente laser	10
2.3.1 Che cos'è il laser	11
2.3.2 Tipi di laser	22
2.3.3 Interazione laser materia.....	24
2.3.4 Prove interazione laser materiali.....	30
2.3.5 Determinazione tipo di laser	39
2.3.6 Definizione specifiche sorgente laser	41
2.3.7 Scelta sorgente laser	50

2.4 Determinazione della gestione del fascio	52
2.4.1 Determinazione del dispositivo di movimentazione del fascio.....	52
2.4.2 Determinazione dell'area di lavoro	54
2.4.3 Determinazione dei componenti ottici e del sistema di scansione	56
2.4.4 Definizione dei componenti commerciali di controllo	61
2.4.5 Definizione beam combiner	64
2.5 Costi componenti e tempi di consegna	67
3 Dimensionamento della stazione di lavoro	63
3.1 Raccolta informazioni per il dimensionamento	63
3.1.1 Definizione dello schema generale della stazione.....	63
3.2 Definizione gruppi	74
3.2.1 Vincoli imposti dalla normativa di sicurezza	74
3.2.2 Dimensionamento delle protezioni e del percorso materiale.....	77
3.2.3 Definizione del cammino ottico e dei dispositivi di allineamento.....	85
3.2.4 Definizione simulatore.....	94
4 Risultati e conclusioni	97

Bibliografia

Introduzione

Questa tesi ha come obiettivo la realizzazione di una stazione di lavoro che sia in grado di realizzare un'asportazione di materiale, anche non completa, sullo spessore di un tipico materiale da incarto (film multi layer) usato nel settore del packaging. In questo settore si richiede sempre più spesso un livello qualitativo molto alto, una personalizzazione molto spinta dei materiali e delle confezioni, tutto ciò ha come conseguenza una gestione delle differenze tra le macchine molto impegnativa. Si cerca perciò, di affrontare questa problematica implementando, all'interno delle macchine per l'impacchettamento, stazioni di lavoro il più flessibili possibile. Si è costruito un sistema che riesca a realizzare delle incisioni sia passanti che parziali come su materiali di ridotto spessore, con l'alta ripetibilità tipica delle macchine per il packaging, garantendo un livello qualitativo elevato e la flessibilità necessaria per facilitare la gestione di macchina.

Conoscendo le specifiche iniziali e le esigenze gestionali da soddisfare, si è innanzitutto definita la tecnologia da utilizzare per la realizzazione della lavorazione richiesta confrontando le caratteristiche attitudinali di una possibile soluzione meccanica con una basata sul laser. Si è scelto così, di approfondire lo studio di una possibile applicazione laser, che si è subito dimostrata concretizzabile in quanto, sfruttando un marcatore laser commerciale a disposizione dell'azienda, si è verificata la possibilità di realizzazione di un'incisione parziale su un materiale multistrato. La prova ha però evidenziato come, con il sistema a disposizione, non si riesca a garantire una velocità di lavorazione sul materiale tale da realizzare tutta la forma richiesta, nel tempo a disposizione.

Si sono perciò studiati, aumentando così il "know how" aziendale, i parametri relativi al laser per cercare di capire come fosse possibile ottenere i risultati voluti sui tipici materiali da incarto.

Definita la tecnologia che sta alla base della stazione di lavoro, ci si è interrogati sulle problematiche che si dovevano affrontare e di conseguenza la specifiche di dettaglio che si dovevano definire per poter avere tutti i dati necessari a procedere con la fase di progettazione e acquisto componenti commerciali. Da un'prima osservazione puramente intuitiva si è osservato

come alcune specifiche dipendano dalla definizione di più parametri, che si condizionano a vicenda.

Si è affrontata questa difficoltà suddividendo la definizione delle specifiche di progetto in sotto problemi, al fine di determinare prima quelli più condizionanti e poi risolvere gli altri in cascata.

Prima di tutto si è cercato di avere più elementi possibili su cui basare la scelta della sorgente, approfondendo la conoscenza teorica sull'argomento laser. In particolare si sono studiati i principi fisici che stanno alla base della generazione del fascio laser per capire le differenze tra i diversi tipi di sorgenti e la fisica dell'interazione tra la materia e il fascio laser per avere una conoscenza approfondita su quello che avviene durante la lavorazione che si doveva realizzare.

Dalle conoscenze acquisite sulla generazione del fascio laser si sono selezionate una serie di sorgenti che garantiscono l'affidabilità, l'efficienza e la modularità richieste in un'applicazione industriale.

Dalle conoscenze conseguite a livello teorico sull'interazione tra fascio laser e materia, si è stabilito che l'ablazione di materiali che assorbono molta radiazione laser è ottenibile facendo incidere su di essi fasci di minor energia, generati di conseguenza da sorgenti di potenze non elevate. Da questa considerazione ci si aspetta quindi che, materiali che hanno una composizione interna di tipo molecolare, assorbendo maggiormente radiazioni con lunghezze d'onda nel lontano infrarosso, siano più facilmente lavorabili (utilizzando potenze minori) con sorgenti tipo quelle a CO_2 e che, i materiali come i metalli, assorbendo maggiormente radiazioni a lunghezze d'onda nel visibile e nel vicino infrarosso, siano più facilmente lavorabili con laser tipo YAG e a semiconduttori. Inoltre, ci si può attendere che tutti i tipi di materiale, assorbendo bene le lunghezze d'onda nel visibile e nel UV, siano facilmente lavorabili da questo tipo di laser.

Si è dedotto però, che la scelta della sorgente laser da utilizzare nell'applicazione in studio, data la complessità dei fenomeni in gioco, non era determinabile basandosi solo su considerazioni di livello teorico. Ancora di più se, come nel nostro caso, i materiali da lavorare sono multi layer, cioè ottenuti accoppiando film di materiali diversi. Pertanto, sono state fatte delle prove

sperimentali, usando sia il marcatore a disposizione dell'azienda sia gli altri tipi di sorgenti che si è precedentemente deciso di analizzare.

Tra quest'ultime si è notato che quella che produce un fascio che viene assorbito meglio da tutti i materiali è quella che produce un fascio laser con lunghezza d'onda nel visibile. Quindi ci si può aspettare che, con questo tipo di sorgente, per ottenere le prestazioni richieste, sia necessario ricorrere ad una potenza più bassa rispetto alle altre,. Questo tipo di sorgente però, può arrivare a produrre un fascio con una potenza massima non superiore ai 10W perché i cristalli non lineari usati in esso hanno un'efficienza molto bassa, quindi si scaldano molto e si degradano velocemente anche con potenze di pochi Watt e non possono essere utilizzate nella applicazione in studio.

Le altre sorgenti, ovvero quella CO₂ e quella in fibra FAYb, anche potendo generare facilmente potenze più alte, non riescono a processare tutti i materiali allo stesso modo. In particolare si osserva che i laser a CO₂ riescono ad ablatare con potenze basse materiali senza componenti metalliche mentre, quelle in fibra riescono a lavorare più facilmente (in termini di potenza necessaria) materiali in cui è presente una componente metallica.

Una volta fatto questo, le informazioni a disposizione sono state sufficienti per decidere, in base anche alle priorità e alle esigenze della G.D, quale tipo di sorgente utilizzare. Essendo i materiali di tipo cartaceo, quelli maggiormente utilizzati nel confezionamento ed essendo in particolar modo richiesta, da esigenze produttive, un'incisione parziale su questo tipo di materiale, si è deciso di focalizzare l'attenzione sulle sorgenti a CO₂, e di determinare così, una serie di specifiche per questo tipo di laser che garantiscano le prestazioni richieste.

Una volta delineato il tipo di sorgente da utilizzare, si sono definite, sulla base delle specifiche date, le caratteristiche di dettaglio di questa. Per prima la potenza della sorgente perché, dalle prove preliminari fatte, si è osservato che con le potenze messe a disposizione (tipiche dei marcatori laser i.e. di codici a barre) nessuno dei laser provati è in grado di ottenere un'incisione, anche parziale, alle velocità di passata richieste. Quindi, si è concluso che, per ottenere quanto ci si è prefissato, si deve aumentare la potenza delle sorgenti. Infatti, così facendo, ci si aspetta che aumentando la densità di potenza agente

sul materiale, si riesca ad ottenere il processo di ablazione in meno tempo e conseguentemente ad andare più veloce.

Per definire la potenza, si sono realizzate una serie di prove empiriche utilizzando il marcatore laser CO₂ a disposizione che ha permesso di estrapolare la relazione esistente tra velocità e potenza e ricavare il valore della potenza necessaria per ottenere l'asportazione di materiale voluto alla velocità richiesta.

Si è poi stabilito, sulla base di considerazioni analitiche e di un test fatto presso un produttore di sorgenti, il tipo di regime di generazione del fascio laser da richiedere alla sorgente CO₂. Infine, si è definito il tipo di sistema di raffreddamento.

Sulla base di questi parametri si è scelto, tra quelle disponibili sul mercato, la sorgente laser che è stata utilizzata.

Definita la sorgente laser ci si è concentrati sull'aspetto che garantisce ai sistemi laser la flessibilità che li caratterizza, ovvero si sono individuati, sulla base delle esigenze richieste dall'applicazione in esame, i dispositivi e i componenti che permettono di gestire il fascio. Pertanto, si sono definiti in dettaglio i parametri da rispettare e sulla base di questi, si è provveduto a scegliere i componenti commerciali da acquistare e quelli da realizzare internamente.

Si è determinato il sistema di movimentazione del fascio che, per garantire le velocità di passata e la flessibilità richieste, deve essere un sistema galvanometrico 2D.

Si è definito che l'area di lavoro deve essere 300x300 mm così che, coprendo tutto lo spessore del materiale, si riesca ad avere la massima flessibilità di lavorazioni possibili.

Si sono determinate le proprietà dell'ottica di focalizzazione, dell'ottica di trattamento del fascio e le caratteristiche della testa di scansione.

Si sono stabilite le peculiarità dei componenti elettronici di controllo attraverso una simulazione fatta con una testa di scansione in conto visione.

Infine, si è caratterizzato un dispositivo che permette di vedere, in completa sicurezza, un'anteprima della lavorazione che si deve fare sul materiale.

Definiti tutti i componenti commerciali che fanno parte della stazione di lavoro progettazione, si sono riassunti in una tabella tutti i componenti con i relativi

costi e date di consegna così da avere contemporaneamente un valore della somma dei costi che una stima dei tempi entro cui dovranno essere disponibili anche i particolari realizzati internamente, per poter, nel più breve tempo possibile, cominciare le prove di valutazione finale.

La parte finale del lavoro consiste nel dimensionamento della stazione di lavoro. Questo è stato fatto definendo prima un nuovo schema generale del gruppo che rispondesse alle esigenze di ingombro e funzionali dei componenti e poi, risolvendo in dettaglio le problematiche che sono venute alla luce analizzando i vincoli imposti dalle specifiche di progetto, quelli imposti dalle caratteristiche dei componenti scelti e quelli imposte dalle normative vigenti.

In particolare si sono adottate una serie di soluzioni tecniche per: garantire l'isolamento del fascio laser così come imposto dalla normativa; garantire il flusso di materiale sul area di lavoro; consentire l'allineamento del fascio laser; garantire la corretta implementazione in macchina della stazione di lavoro.

Tutto ciò ha portato alla realizzazione di un dispositivo laser per la lavorazione di materiali per l'incarto e ha permesso come ci si era preposto di aumentare il know how aziendale in merito all'utilizzo della tecnologia laser in questo tipo di applicazioni.

Per quanto riguarda la funzionalità della stazione di lavoro progettata, purtroppo non si è riuscito ad inserire i risultati ottenuti e le caratteristiche operative riscontrabili durante la fase di prova e collaudo del dispositivo. Questo perché ci sono stati notevoli ritardi nella consegna di alcune ottiche che non hanno permesso, la messa in funzione della stazione di lavoro nei tempi imposti per la stampa della tesi.

Capitolo 1

Incisione dei materiali da incarto G.D

1.1. Descrizione problematiche

Questa tesi ha come obiettivo quello di progettare una stazione di lavoro che sia in grado di realizzare un'asportazione di materiale, anche non completa, sullo spessore di un tipico materiale da incarto (film multi layer) usato nel settore del packaging.

In questo settore si richiede sempre più spesso un livello qualitativo molto alto, una personalizzazione molto spinta dei materiali e delle caratteristiche funzionali del pacchetto di sigarette, tutto ciò ha come conseguenza una gestione dei formati e delle personalizzazioni di macchina. Si cerca perciò, di affrontare questa problematica implementando, all'interno delle macchine per il confezionamento, stazioni di lavoro il più flessibili possibile. Si dovrà quindi costruire un sistema che riesca a realizzare delle incisioni sia passanti che parziali come quelle rappresentate in (fig.1) su materiali di ridotto spessore, con l'alta ripetibilità tipica delle macchine per il packaging, garantendo un livello qualitativo elevato e la flessibilità necessaria per facilitare la gestione di formato.



Fig.1 tipo di incisioni parziali

Le specifiche note, da cui si avvierà la progettazione della stazione di lavoro, sono riportati nella seguente tabella.

Velocità	600 ppm
Passo della lavorazione	100 mm
Lunghezza incisione tipica	130 mm
Materiale da lavorare	Multi layer
Sezione della lavorazione	Non passante
Ingombri	Tavola alleg.
Restrizioni	Norm. Sicur.
Larghezza materiale	max 300mm

Tab.1 specifiche di partenza

Inoltre, dovendo garantire un livello qualitativo elevato, il sistema che si deve realizzare dovrà essere una stazione interna alla macchina non potendo essere stand alone perché il ribobinamento del materiale, dopo la lavorazione, comporta generalmente un forte decadimento qualitativo.

Da queste si definiranno poi le specifiche di progetto definitive.

1.2. Come si può fare

Attualmente il sistema usato per realizzare una incisione su materiali sottili è un incisore meccanico composto da due rulli contrapposti tra i quali scorre il materiale che viene inciso da un rilievo presente su uno dei rulli.

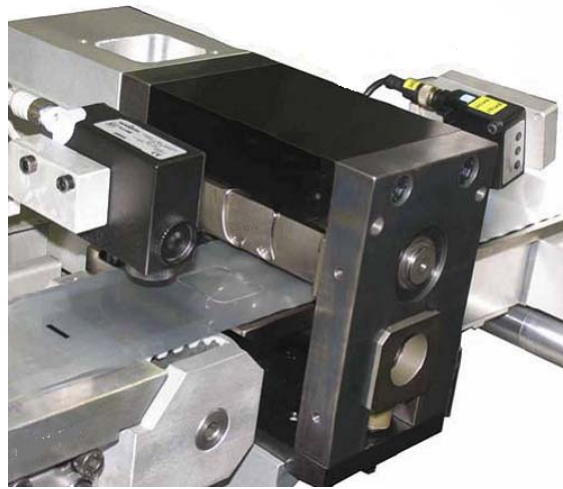


Fig. 2 incisore meccanico

Il sistema meccanico è composto nelle sue parti principali da un supporto sul quale è montato un rullo di riferimento rettificato. Questo presenta una rotazione folle e un montaggio assiale rigido che gli garantisce il parallelismo con il secondo rullo che, montato sullo stesso supporto del primo, è azionato da una motorizzazione che lo fa ruotare nel senso di avanzamento del materiale. Il secondo rullo presenta, sulla superficie, un rilievo di sezione trapezoidale che sviluppa sulla superficie cilindrica la forma da realizzare su materiale. Alle due estremità di questo rullo sono presenti, in genere, due anelli rettificati che andando a contatto con la superficie del primo rullo fanno da riferimento per l'altezza della sezione trapezoidale del rilievo. La semi incisione, con questo sistema, è ottenuta calibrando accuratamente la differenza d'altezza tra gli anelli esterni, l'altezza del rilievo e montando il rullo incisore su un elastomero. Questa calibrazione permette di ottenere una pressione

localizzata su materiale che genera uno stato tensionale tipico delle azioni hertziane con una rottura dei soli strati superficiali di materiale.

Si ottiene così un' incisione con la tipica sezione riportata in figura.

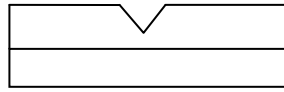


Fig.3 incisione meccanica

Una tecnologia alternativa a quella dell'incisione meccanica può essere rappresentata da un sistema laser. Si è visto infatti che, utilizzando un marcatore laser a disposizione dell'azienda, si riesce a ottenere un'incisione parziale del materiale che si vuole trattare. Questo sistema costituito da una sorgente laser, un cammino ottico, e una focalizzazione permette di ottenere un'asportazione parziale del materiale senza avere il contatto diretto con un utensile. Questo tipo di tecnologia sfrutta le proprietà d'interazione della materia con le onde elettromagnetiche, infatti, ogni materiale assorbendo a seconda della lunghezza d'onda più o meno energia elettromagnetica sotto forma di energia termica, si può riscaldare tanto da originare transizioni di fase (liquefazione, evaporazione, sublimazione), con conseguente asportazione di materiale.

1.3. Comparazione tra le tecnologie

Avendo come scopo quello di realizzare una stazione di lavoro da inserire in una macchina che presenta le problematiche esposte in precedenza e che soddisfi le specifiche richieste, si è dovuto fare una scelta di tipo tecnologico.

Si sono analizzate, le caratteristiche delle due tecnologie e, in base a queste, si è determinata quella che sarà utilizzata nel sistema in progettazione.

La scelta è stata fatta confrontando i vincoli funzionali, le caratteristiche realizzative e gli aspetti gestionali.

1.3.1. Vincoli funzionali

Si sono presi in considerazione come vincoli funzionali delle diverse tecnologie:

- la produttività, cioè il numero di lavorazioni che si riescono a fare per unità di tempo;
- la superficie lavorabile.

Per il sistema meccanico si osserva che la produttività, essendo il passo della lavorazione definito in base al diametro del rullo, può raggiungere valori elevati andando ad agire semplicemente sulla velocità di rotazione stando però attenti a possibili vibrazioni dovute alla non perfetta simmetria del “rullo coltello” quando si sale molto con la velocità. Per quando riguarda l’area lavorabile, invece, si osserva che per poter compiere la lavorazione il sistema meccanico richiede una pressione costante su tutta l’area di lavoro, questa per le dimensioni richieste in genere, può essere facilmente garantita anche con ingombri ridotti, se invece le aree di lavoro diventano grandi occorrono particolari accorgimenti costruttivi. In un sistema laser in genere la produttività dipende fortemente dalla velocità massima alla quale muovendo il fascio focalizzato si riesce ad ottenere la lavorazione richiesta. Questa a sua volta dipende da molti fattori che devono essere valutati attentamente quindi, sistemi di questo tipo hanno bisogno di una fase preliminare di studio indirizzata al raggiungimento della produttività richiesta. Per quando riguarda invece le superfici lavorabili, queste dipendono dai sistemi di guida e focalizzazione del fascio che possono essere di più tipi con caratteristiche anche molto diverse tra di loro (cartesiani, scanner galvanometrici 2D e 3D, articolazioni spaziali...) che assicurano la copertura di tutte le area di lavoro richieste.

1.3.2. Aspetti realizzativi e produttivi

Le caratteristiche realizzative prese in esame per le due tecnologie alternative sono:

- la difficoltà realizzativa;
- i costi (sempre uno degli aspetti più rilevanti);
- la complessità impiantistica (macchine complesse con ingombri dei singoli gruppi sempre ristretti);
- tempi di messa a punto (risorse da impiegare per l’operazione).

Per quanto riguarda la difficoltà realizzativa si osserva che l’incisione meccanica ha un numero di componenti che, considerando i generici gruppi meccanici presenti nelle macchine per il confezionamento del tabacco, non è molto elevato, quindi, le poche difficoltà realizzative sono dovute oltre che alla necessità di garantire un carico costante sul “rullo coltello”, che come già detto deve essere calibrato molto precisamente, anche dalle necessità di garantire

incisioni parallele all'asse dei rulli che richiedono un contatto con la lama non puntiforme e quindi poco efficace. Un sistema laser, per contro, può avere un numero di componenti che, considerando anche le protezioni imposte dalla normativa, è dell'ordine di grandezza dei tipici gruppi delle macchine per il packaging, perciò è lecito quindi, aspettarsi le stesse problematiche che si affrontano nella progettazione di queste ultime (definizione percorso materiale, rispetto degli ingombri disponibili, progettazione supporti e struttura, rispetto normative di sicurezza...) con l'aggiunta della definizione del cammino ottico del laser. In definitiva la progettazione di un sistema laser si presenta da queste considerazioni preliminari più complesso di quello di un incisore meccanico.

Per quanto riguarda la complessità impiantistica, si osserva che il sistema meccanico presenta, come impiantistica ausiliaria, una motorizzazione elettrica di potenza non elevata e una serie di sensori interfacciati con una centralina che fasa la rotazione con il passo del materiale. In un sistema laser in genere la complessità impiantistica dipende molto dalla potenza e dal tipo di sorgente che si adopera perché può essere necessario prevedere un sistema di raffreddamento ad acqua, che può presentare ingombri anche rilevanti.

Inoltre è sempre richiesto un sistema di aspirazione fumi, specialmente se i materiali che si lavorano possono generare fumi nocivi, e un sistema di gestione elettronico, composto da una scheda hardware e un software.

In conclusione, quindi, un sistema meccanico è meno problematico dal punto di vista della complessità impiantistica.

La complessità impiantistica minima e il numero di componenti ridotto del sistema meccanico comportano un costo realizzativo sicuramente inferiore a quello necessario a costruire un sistema laser.

Infine considerando la messa a punto, si osserva che si riesce ad ottimizzare più facilmente per un sistema laser, potendo gestire tramite software i parametri di taglio, rispetto ad un sistema meccanico che richiede un'ottimizzazione tramite lavorazioni meccaniche di rettifica oltre alle regolazioni manuali presenti in entrambi i casi.

1.3.3. Aspetti gestionali

Altri aspetti molto importanti nella scelta della tecnologia da utilizzare sono quelli relativi alla gestione del sistema funzionante in macchina come:

- la flessibilità, sia dal punto di vista del cambio forma da realizzare che da quello del cambio materiale da lavorare;
- l'affidabilità;
- la manutentibilità.

Per quanto riguarda la flessibilità, si osserva subito che il sistema laser presenta indubbi vantaggi, poiché, potendo gestire via software, sia la forma da lavorare che molti parametri relativi al fascio laser, si riesce in pochissimo tempo a riconfigurare il sistema adattandolo a nuove specifiche di forma e di materiale. Il sistema meccanico, per contro, richiede tempi di cambio forma molto lunghi, dovuti alla realizzazione fisica del rullo coltello e alla messa a punto di quest'ultimo che, dipende anche dal tipo di materiale. Perciò la minima variazione di materiale può richiedere la costruzione di un rullo nuovo.

Per quanto riguarda la manutenzione, mentre il sistema meccanico è soggetto ad usura e richiede una affilatura a intervalli di tempo che dipendono dal carico di lavoro al quale è sottoposto. Un sistema laser richiede in genere, garantendo una adeguata pulizia delle ottiche, una manutenzione meno frequente avendo come unico elemento di usura la sorgente laser che tende ad esaurirsi nel tempo. La vita di una sorgente è stimata sul tempo di dimezzamento della potenza erogata che, per molti tipi di sorgenti, arriva a più anni di impiego continuativo ed è più facilmente prevedibile in termini di ore di funzionamento. Concludendo, se si considera l'affidabilità richiesta, si osserva che i due sistemi sono quasi equivalenti, infatti, le due tecnologie, per quanto riguarda di taglio materiale sono affermate da tempo e non presentano particolari problemi.

Le considerazioni fatte sono state riassunte nella seguente tabella dove ad ogni caratteristica è stato attribuito un punteggio da 1 a 4. In relazione al parametro in esame si è dato punteggio 1, alla tecnologia ritenuta insufficiente, 2 a quella ritenuta sufficiente, 3 a quella buona e 4 a quella ritenuta ottima. In ultimo si è attribuito un peso ad ognuna delle voci in relazione alla loro rilevanza nel settore del packaging per tabacco.

Parametri	peso	incisore meccanico	incisore laser
velocità di lavorazione	3	4	3
superficie lavorabile	2	3	4
complessità realizzativa	2	3	2
costi realizzativi	3	4	2
complessità impiantistica	4	3	1
messa a punto	3	2	3
flessibilità cambio formato	4	1	4
Affidabilità	3	4	4
flessibilità cambio materiale	4	1	4
Manutenzione	4	4	3
media pesata		2,81	3,00

Tab 2 confronto tecnologie

Calcolando, infine, la media pesata delle valutazioni date, si è riscontrato che la tecnologia che presenta un valore più alto e quindi una attitudine più elevata all'applicazione in esame, è quella laser.

Attualmente però, la tecnologia laser non è comunemente usata per effettuare lavorazioni sui materiali da incarto nelle macchine prodotte dalla G.D, si ha per questa ragione poco "know how" interno per procedere velocemente con la progettazione di una stazione di lavoro che utilizzi questa tecnologia. In particolare mancano le conoscenze necessarie per definire le caratteristiche dei vari componenti.

Alla luce di tali considerazioni, si è deciso di aggiungere agli obiettivi inizialmente predefiniti anche l'aumento delle conoscenze che riguardano le applicazioni della tecnologia laser per le lavorazioni sui materiali da incarto.

Quindi durante la fase di progettazione dell'applicazione laser si è dato molto peso alla definizione delle caratteristiche dei componenti commerciali e alla definizione delle caratteristiche dei particolari che si è andati a dimensionare.

Capitolo 2

Definizione e scelta componenti

2.1. Suddivisione in sotto problemi

Definita la tecnologia che sta alla base della stazione di lavoro, ci si è interrogati sulle problematiche che si dovevano affrontare e di conseguenza la specifiche di dettaglio che si dovevano definire per poter avere tutti i dati necessari a procedere con la fase di progettazione e acquisto componenti commerciali.

Da una prima osservazione puramente intuitiva si è potuto osservare come alcune specifiche dipendano dalla definizione di più parametri, che, si condizionano a vicenda. Infatti si può sicuramente dire che dalla capacità produttiva dipendono sia le caratteristiche della sorgente laser, che le specifiche dei componenti e dei dispositivi della gestione del fascio, che sono sicuramente condizionati dalle caratteristiche della sorgente.

Si è affrontata questa difficoltà suddividendo la definizione delle specifiche di progetto in sotto problemi, al fine di definire prima quelli più condizionanti e poi risolvere gli altri in cascata.

Considerando più attentamente le problematiche da affrontare si sono estratti i seguenti sottoproblemi:

- a) caratterizzazione e definizione della sorgente laser;
- b) definizione e caratterizzazione dei componenti e dei dispositivi di gestione e guida del fascio laser;
- c) definizione specifiche relative a problematiche di macchina;

Si è definita, poi, anche la sequenza di risoluzione in base ai rapporti tra relative specifiche.

Il parametro relativo alla capacità produttiva è sicuramente il primo che dovrà essere definito perché da esso dipendono, come detto in precedenza sia le specifiche della sorgente laser che quelle della parte di gestione e guida del fascio, questo parametri è il tempo massimo di lavorazione per singola lavorazione. In seguito si definiranno le specifiche del laser :

- a) Tipo (lunghezza d'onda, regime di generazione...)

b) Potenza

dai quali dipendo i componenti e i dispositivi di guida del fascio.

Infine si definiranno le specifiche di progetto che saranno:

- a) definizione componenti commerciali
- b) definizione assemblaggio parti fondamentali
- c) definizione delle specifiche ricavate da normative
- d) definizione specifiche di passaggio carta

2.2. Determinazione dei parametri di produttività

Considerando che la lavorazione dovrà essere fatta in una zona macchina dove il materiale scorre ad una velocità costante, si è osservato che si avrà a disposizione un determinato intervallo di tempo, dato dal susseguirsi di due lavorazioni successive, entro il quale si dovrà realizzare l'incisione richiesta. Questo intervallo è di fondamentale importanza, perché è un vincolo fisso, imposto dalle specifiche di macchina e non può essere cambiato.

Dai dati di partenza, riportati in precedenza, si riesce a calcolare questo intervallo dividendo il passo di lavorazione in metri $p=0,100\text{mm}$ per la velocità del materiale $v=1\text{m/sec}$ e ottenendo come ovvio $0,1\text{ sec}$.

In questo intervallo di tempo si deve essere in grado di effettuare almeno una passata della lunghezza della lavorazione pari a 130 mm , quindi la minima velocità di passata dovrà essere

$$v_{\text{min}} = \frac{130\text{ mm}}{0,1\text{ sec}} = 1300\text{ mm/sec}$$

2.3. Determinazione della sorgente laser

Le prove preliminari fatte con il sistema laser commerciale di piccola taglia e disposizione dell'azienda, hanno dimostrato che la realizzazione di un'incisione parziale su un materiale multistrato è fattibile.

La prova ha però evidenziato come, con il sistema a disposizione, non si riesca a garantire una velocità di lavorazione sul materiale tale da realizzare tutta la forma richiesta, nel tempo a disposizione. Si è perciò deciso di approfondire l'argomento per cercare di capire se cambiando dei parametri relativi al laser (potenza, tipo di laser) fosse possibile ottenere il risultato voluto.

Prima di tutto si è cercato di avere più elementi possibili su cui basare le

considerazioni da fare, approfondendo la conoscenza teorica sull'argomento laser, in particolare:

- i principi fisici che stanno alla base della generazione del fascio laser per capire le differenze tra i diversi tipi di sorgenti;
- la fisica dell'interazione tra la materia e il fascio laser per avere una conoscenza approfondita su quello che avviene durante la lavorazione che si dovrà a realizzare.

Si sono poi fatte delle prove sperimentali con diversi tipi di laser e diversi materiali che hanno consentito di determinare le specifiche cercate.

Infine si è fatta una scelta tra le sorgenti disponibili sul mercato, che rispondessero alle specifiche appena definite.

2.3.1. Che cos'è il laser

La parola LASER è l'acronimo di Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation ovvero amplificazione di luce per mezzo di emissione stimolata di radiazione.

Parliamo di luce perché il laser ha frequenze nel visibile ($f=4*10^{14} \div 8*10^{14} \text{Hz}$, e lunghezza d'onda $\lambda=0.38 \div 0.78 \mu\text{m}$) o a cavallo di queste, tra l'infrarosso e l'ultravioletto.

Si tratta quindi di luce che, essendo un'onda elettromagnetica, è descritta come una oscillazione di un campo elettrico e di un campo magnetico perpendicolari tra loro lungo la direzione di propagazione (fig.4) ed è caratterizzata da determinate lunghezze d'onda λ e frequenze f , legate dalla seguente relazione

$$\lambda \times f = v$$

dove v è la velocità di propagazione nel mezzo.

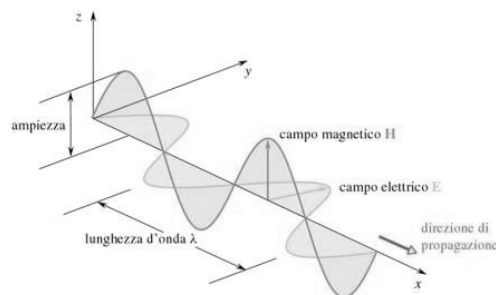


Fig. 4 onda elettromagnetica

La figura 5 mostra lo spettro elettromagnetico, dove sono evidenziate le

regioni spettrali più note, con una scala di frequenza ed una in lunghezza d'onda

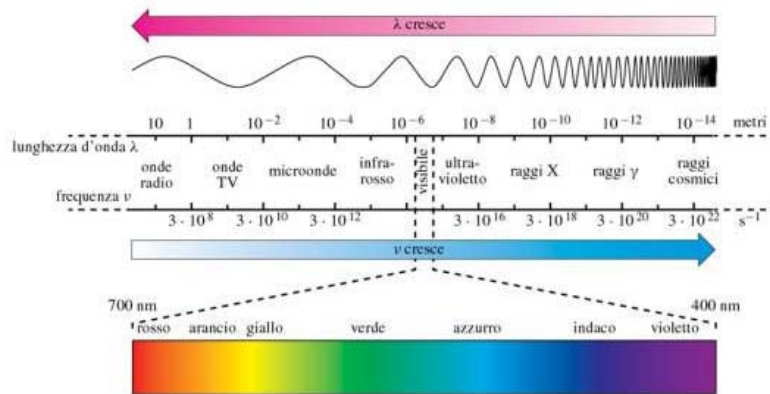


Fig. 5 spettro elettromagnetico

Altra caratteristica dell'onda e.m. è che viene emessa, viene assorbita e si propaga nello spazio sotto forma di pacchetti di energia chiamati quanti o fotoni. Questi sono determinati dalla variazione del contenuto energetico del sistema atomico, ossia da una transizione fra due livelli di energia.

Un dispositivo laser è quindi un amplificatore coerente di fotoni, ovvero un dispositivo che, quando al suo ingresso si presenta un fotone con una determinata frequenza e fase, ha la capacità di generare altri fotoni con la stessa frequenza ed in fase del fotone in ingresso, di fatto amplificando la radiazione entrante. Ciò è reso possibile dal fenomeno fisico chiamato emissione stimolata che è una delle tre possibili interazioni tra radiazione elettromagnetica e un sistema fisico semplice (atomo o molecola) con due livelli di energia (stato fondamentale E_1 e stato eccitato E_2). (fig. 6)

La radiazione infatti può essere:

- assorbita, con una certa probabilità (coefficiente di assorbimento α), se il sistema trovandosi nello stato fondamentale E_1 viene “investito” da un fotone con energia $\Delta E = h\nu = E_2 - E_1$, passando allo stato eccitato E_2 ;
- emessa spontaneamente quando, trovandosi nel livello di energia E_2 , il sistema ha una probabilità di emettere un fotone di energia $\Delta E = h\nu = E_2 - E_1$, passando dallo stato eccitato allo stato fondamentale; tale probabilità è funzione del tempo e determina la vita media dello stato eccitato;
- emessa in modo stimolato quando, il sistema atomico trovandosi nel

livello di energia E_2 e viene “investito” da un fotone di energia $h\nu = E_2 - E_1$ ed è così “stimolato” a passare dallo stato eccitato a quello fondamentale emettendo un fotone identico a quello che ha stimolato l'emissione ed in fase con esso; si hanno pertanto in uscita dal sistema due fotoni identici, ovvero il fotone entrante è stato “amplificato” di un fattore due. La probabilità che il fotone causi emissione stimolata è uguale alla probabilità di assorbimento α .

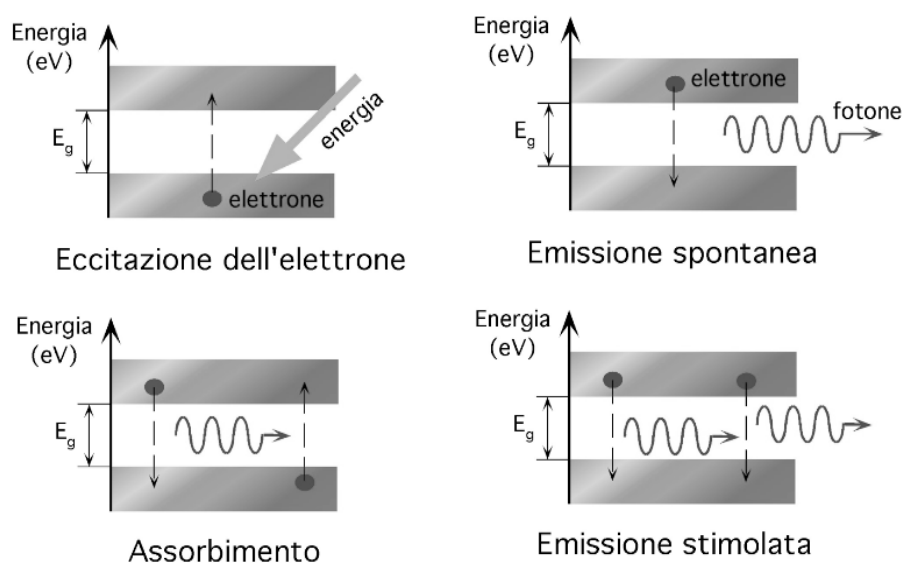


Fig. 6 interazione sistema fisico semplice-radiazione e.m.

In un sistema fisico in condizioni normali il numero di atomi o molecole che si trovano nello stato fondamentale N_1 , è sempre maggiore al numero di atomi o molecole che si trovano nello stato eccitato N_2 , perciò un fotone che attraversa il sistema ha più probabilità di venire assorbito che di stimolare una emissione. Se il sistema viene posto in condizioni da causare una *inversione di popolazione* ($N_2 > N_1$), per quanto detto sopra, la probabilità che il fotone causi una emissione stimolata è maggiore della probabilità di venire assorbito, difatti il sistema si comporta da amplificatore di radiazione e si dice *attivo*.

Il metodo più semplice per avere un'inversione di popolazione e quindi anche lo schema più semplice di laser è il cosiddetto laser a tre livelli (fig.7) che implica un sistema con tre livelli energetici: E_1 ed E_2 (livelli tra i quali avviene la transizione laser) ed un livello “ausiliario” $E_3 > E_2$.

Mediante un trasferimento di energia detto *pompaggio* gli atomi vengono

portati dallo stato fondamentale a quello eccitato $E3$. Da qui si diseccitano spontaneamente e velocemente al livello $E2$ che è in genere un livello *metastabile* cioè con una probabilità di diseccitazione spontanea molto bassa. Se quindi il meccanismo di pompaggio è rapido rispetto alla diseccitazione spontanea di $E2$, si verifica la condizione di inversione di popolazione ed il mezzo diventa attivo.

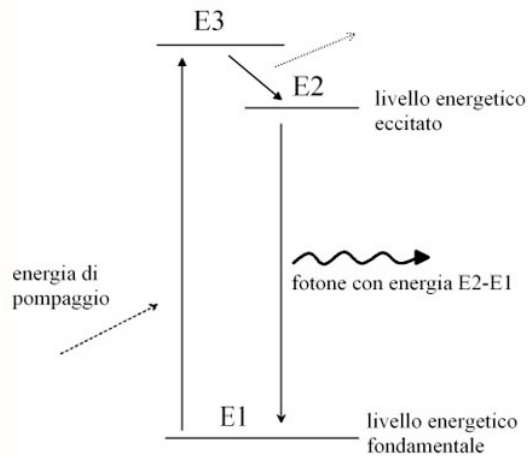


Fig. 7 sistema a tre livelli

A questo punto occorre precisare che sebbene “laser” voglia dire amplificatore di luce, il termine viene utilizzato per indicare delle sorgenti autonome di luce coerente, ovvero dei *risuonatori ottici*.(fig.8)

Per realizzare un risuonatore si pone il mezzo, reso attivo da un sistema di pompaggio, tra due specchi (cavità risonante) in modo che i fotoni uscenti dal mezzo attivo vengono riflessi dallo specchio, rientrano nel mezzo attivo ove vengono ulteriormente amplificati, per poi uscire dal lato opposto dove il secondo specchio li riflette nuovamente nel mezzo attivo e così via.



Fig. 8 risuonatore ottico

Perché l'effetto delle successive riflessioni e amplificazioni sia costruttivo, è

necessario che i fotoni amplificati nelle successive riflessioni siano in fase tra loro, condizione che si verifica se la distanza fra gli specchi è pari a un multiplo intero di $\lambda/2$ (essendo λ la lunghezza d'onda dei fotoni amplificati). Così facendo abbiamo ora una gran quantità di fotoni che rimbalzano tra i due specchi della cavità. Per utilizzarli è necessario estrarne una parte sostituendo uno dei due specchi con uno specchio semiriflettente PF che rifletta indietro la maggior parte della luce e ne lasci passare una piccola parte (p. es. 1%).(fig.9) Si raggiunge così un equilibrio tra il guadagno di fotoni dovuto al mezzo attivo e i fotoni persi attraverso lo specchio semiriflettente che a loro volta sono la potenza utile di radiazione laser.

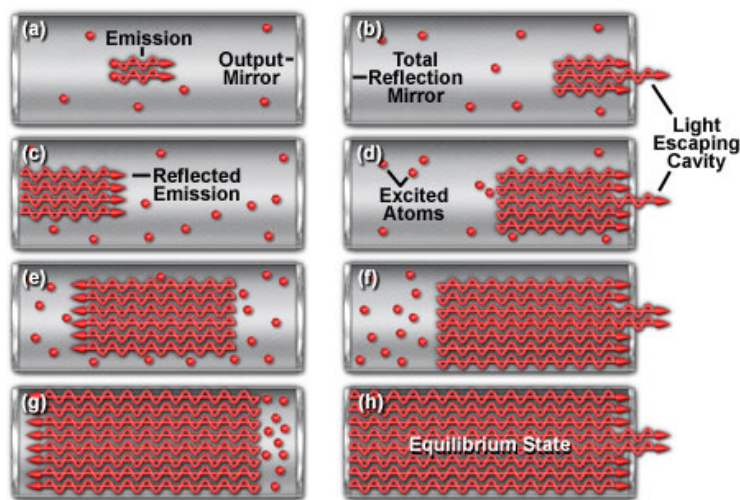


Fig. 9 emissione stimolata nella cavità ottica

Da come la radiazione LASER viene generata dipendono le sue particolari caratteristiche che lo rendono lo strumento ideale per molte applicazioni in ambito industriale (es: taglio, foratura, marcatura, ecc), medico (es: applicazioni chirurgiche e terapeutiche), scientifico (es: spettroscopia molecolare), ma anche di uso comune come stampanti e supporti ottici(dvd, compact disk).

Le caratteristiche del fascio laser sono:

- la monocromaticità cioè tutti i raggi che compongono il fascio sono della stessa lunghezza d'onda;
- la coerenza temporale e spaziale, i raggi laser, infatti, essendo generati per emissione stimolata si mantengono in fase tra di loro e quando più un'onda è monocromatica tanto più essa è coerente temporalmente;
- l'elevata collimazione del fascio, a seguito dell'effetto di selezione tra le

direzioni di propagazione dell'onda risonante operato dagli specchi;

- la brillantezza elevata cioè l'intensità luminosa del fascio è molto forte perché, essendo collegata alla direzionalità, fa sì che l'energia non si disperde in tutte le direzioni, come in una sorgente convenzionale, ma rimane concentrata in una direzione.

Nella figura sotto (fig.10) si può vedere la differenza tra un'emissione da una sorgente convenzionale e quella di una sorgente laser.

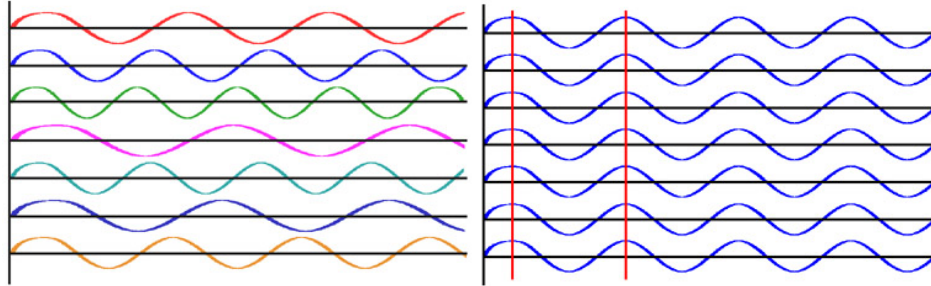


Fig. 10 differenza tra emissione laser e emissione convenzionale

Quindi, per avere un fascio laser, è necessaria un'emissione stimolata di fotoni che può avvenire solo se si genera, tramite il pompaggio, un'inversione di popolazione nel mezzo laser. I metodi usati per generare queste particolari condizioni sono molteplici e determinano le caratteristiche del fascio laser (lunghezza d'onda, potenza, regime di operazione, qualità del fascio, ecc) e si possono dividere in base al materiale che costituisce il mezzo attivo:

- laser a gas (He-Ne; CO₂; eccimeri; Ar;....)
- laser a stato solido o cristalli ionici (Nd:YAG; Nd:YLF; Yb:YAG;...)
- laser chimici (fluoruro di idrogeno; COIL; ecc..)
- Laser a semiconduttori

Possono anche dividersi in base alla lunghezza d'onda prodotta:

- laser nel ultravioletto (380-10 nm)
- laser nel visibile (780-380 nm)
- laser nel infrarosso (780nm- 350μm)

Il mezzo attivo, (sistema atomico e non solo) usato per generare una sorgente laser viene scelto in base all'efficienza con la quale si riesce a ottenere l'inversione di popolazione e all'efficienza quantica atomica (rapporto energia fotone emesso energia fotone entrante) quindi, in base alla quantità di energia che si riesce a convertire in energia luminosa. Questa efficienza varia in un campo piuttosto ampio: dell'ordine dell'1% per i laser a cristalli ionici, del 30%

per i laser ad anidride carbonica, prossimo al 100% per i laser a semiconduttore a giunzione[1].

In generale i mezzi attivi migliori sono quelli che presentano quattro livelli energetici,(fig.11). Infatti questi mezzi hanno il livello energetico 2 più alto possibile e 1 più basso possibile, inoltre, presentano un decadimento rapido tra i livelli 3 e 2 e tra 1 e 0 e una transazione laser più lenta tra 2 e 1, ciò permette di avere un'inversione di popolazione automatica tra i livelli 2 e 1 portandoli semplicemente, tramite il pompaggio, al livello 3. Per i mezzi a tre livelli invece, si deve sottrarre, tramite pompaggio, il più possibile atomi al livello più basso per avere un'inversione di popolazione tra 2 e 1, diminuendo così l'efficienza di pompaggio[2].

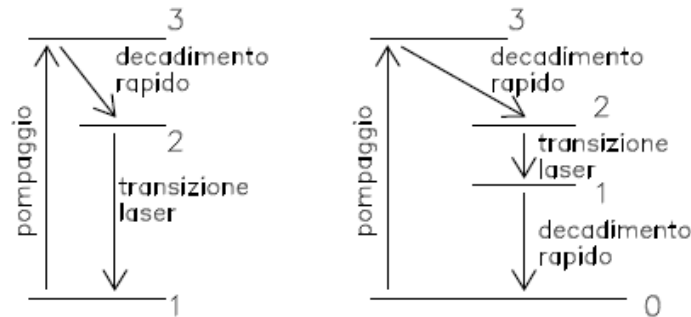


Fig. 12 laser a tre e a quattro livelli energetici

Questi livelli energetici sono garantiti:

- Per i laser a cristalli, da particolari ioni droganti dispersi nel cristallo principale, ad esempio per il laser Nd:YAG lo ione Nd^{3+} sostituisce lo ione Y^{3+} in alcuni punti del reticolo $Y_3Al_2O_5$ (Yttrium Aluminum Garnet);
- Per i laser a gas, da collisioni o trasferimento risonante della eccitazione tra atomi(laser He-Ne) tra molecole (laser CO_2) con livelli energetici simili; da ionizzazione degli atomi (laser Ar); da molecole eccitate composte da gas nobili(laser ad eccimer);
- Per i laser a semiconduttori, dai livelli energetici dell'intero semiconduttore (banda di valenza, banda di conducibilità) e non degli atomi che lo costituiscono;
- Per i laser chimici, da reazioni chimiche che generano molecole eccitate[2].

Ogni mezzo laser quindi necessita di un determinato sistema di pompaggio per poter sfruttare i livelli energetici che garantiscono la generazione del fascio.

Il pompaggio è generalmente, ottico (diodi) per i laser allo stato solido,

elettrico per i laser a gas e a semiconduttore (scarica elettrica continua, alternata, radiofrequenza), reazione chimica di combustione o esplosione per i laser chimici[3].

Altro caratteristica che condiziona la scelta di una sorgente laser e la qualità del fascio laser che viene prodotto, questa dipende fortemente sia dal mezzo attivo che dalla cavità risonante. La qualità di un fascio laser è identificata da due parametri distribuzione di intensità (gussiana, M^2) e i modi vibrazionali (TEM) La distribuzione d'intensità di un fascio laser è, tipicamente con simmetria cilindrica che si propaga in una direzione (Per i laser asimmetrici e astigmatici, come i laser a diodo non è lo stesso) e può essere approssimata ad una distribuzione gaussiana, infatti, dall'equazione delle onde considerando un'approssimazione parassiale, si possono estrapolare con buona approssimazione le caratteristiche di propagazione di un fascio laser[4]:

- diametro del fascio w
- angolo di divergenza

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0}$$

distribuzione intensità

$$I(r) = I_0 e^{-\frac{2r^2}{w_0^2}}$$

[La potenza contenuta dentro un raggio r , $P(r)$, è facilmente ottenibile

integrando la distribuzione di intensità da 0 a r : $P(r) = P(\infty)(1 - e^{-\frac{2r^2}{w_0^2}})$]

modi vibrazionali

$$\psi = g\left(\frac{r}{w}\right) e^{-j\left(P + \frac{k}{2q}r^2 + l\phi\right)}$$

Questi ultimi rappresentano i modi base di oscillazione che un cavità laser può sopportare

$$\Delta n = \frac{2 \cdot L}{\lambda^2} \Delta \lambda$$

Dove λ sono le lunghezze d'onda che risuonano

$$\lambda = \frac{2 \cdot L}{n} \quad \text{con } n=1,2,3,\dots$$

Di queste, quella a cui si fa riferimento per determinare le caratteristiche del fascio, è quella principale chiamato TEM00 (fig.13) che presenta le minori

perdite per diffrazione ed è, quindi, favorito nell'oscillazione laser.

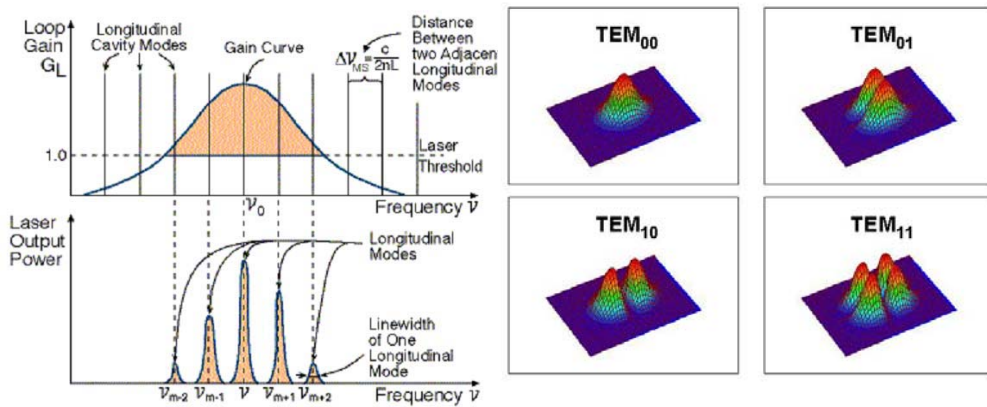


Fig. 13 modi vibrazionali della radiazione laser

Per selezionare un singolo modo longitudinale sul quale far operare la cavità laser, con una ben precisa lunghezza d'onda della radiazione laser, possono essere utilizzati diversi dispositivi basati o sulla dispersione operata su una radiazione non monocromatica da parte di un prisma, o di un reticolo di diffrazione, per i dispositivi meno raffinati, oppure sull'interferenza, nel caso dei dispositivi più precisi. [5] (fig.14)

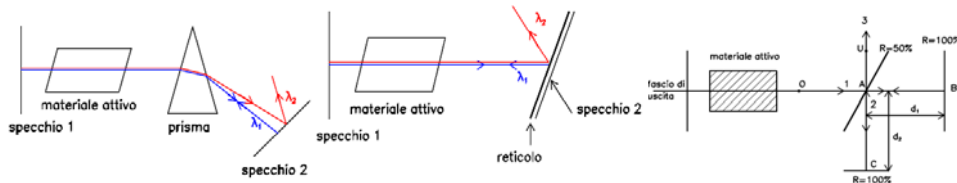


Fig. 14 dispersione con prisma con reticolo selezione modo per interferenza

In realtà i fasci laser hanno caratteristiche che si scostano da quelle di un fascio gaussiano, infatti, nel caso di sorgenti laser a semiconduttori, il fascio si presenta asimmetrico e astigmatico perché basandosi sull'accoppiamento di semiconduttori (diodo) di tipo p e n l'effetto laser è ottenuto dall'energia generata dallo spostamento forzato degli elettroni della zona n e delle lacune della zona p verso la giunzione. Questo genera un fascio di una sezione rettangolare che può essere variato adottando lenti opportune.

Pertanto, quando si fa riferimento a fasci reali le equazioni relative a fasci gaussiani devono essere modificate tenendo conto di fattore M^2 .

La conoscenza del valore di M^2 per un fascio laser è un metodo per misurare la qualità di un fascio. Il valore di M^2 è ottenuto comparando il fascio in esame con un fascio puramente gaussiano.

Un fascio puramente gaussiano TEM_{00} ha un M^2 pari ad 1, mentre tutti gli altri

fasci, prodotto di modi differenti, hanno un valore di M^2 maggiore di 1.

Il valore di tale parametro per un fascio laser è derivato dalla teoria di propagazione ed è indicato anche come Times-Diffraction-Limit-Factor. Una pratica conseguenza della definizione di M^2 è che un fascio con M^2 uguale ad 1 può essere focalizzato al minimo diametro possibile perché presenta angoli di diffrazione bassi[6].

La conoscenza di tale valore, quindi, fornisce notevoli informazioni sul fascio laser ed è di particolare utilità soprattutto se tale fascio è usato in applicazioni nelle quali è necessaria una focalizzazione a piccoli diametri[4].

Altro aspetto importante, che riguarda le sorgenti laser, è il regime temporale d'emissione del fascio laser. Questo può essere emesso:

- in continuo con una potenza costante nel tempo, fornendo costantemente energia al mezzo attivo con il sistema di pompaggio;
- in modo impulsato, generando un impulso laser con potenza di picco molto più alta rispetto alla potenza media, infatti, considerando un impulso laser con energia E frequenza f e durata ΔT si ha che la potenza media vale

$$P_m = E \times f$$

Mentre quella di picco

$$P_p = E / \Delta T$$

I sistemi usati per generare laser pulsati sono:

- il FREE RUNNING, in cui il sistema di pompaggio erogando impulsi di energia (0.1-100 millisecondi) al mezzo attivo lo eccita periodicamente. Questo avendo nel transitorio iniziale un andamento oscillatorio sia di inversione di popolazione che di potenza laser, genera una serie di picchi (oscillazioni di rilassamento), che possono durare anche per tutta la durata dell'impulso, con potenze molto più alte rispetto al livello medio (fig.15)
- Il Q-SWITCH, in cui nel risuonatore laser è presente un dispositivo ("otturatore") in grado di inibire temporaneamente l'azione laser, sopprimendo il feedback degli specchi e permettendo così al mezzo attivo di immagazzinare l'energia fornita dal sistema di pompaggio, all'apertura dell'"otturatore", l'azione del laser si innesca e l'energia accumulata viene rilasciata in un unico impulso molto breve (10-100 nanosecondi) con potenze di picco molto alte[7][8](fig.16).

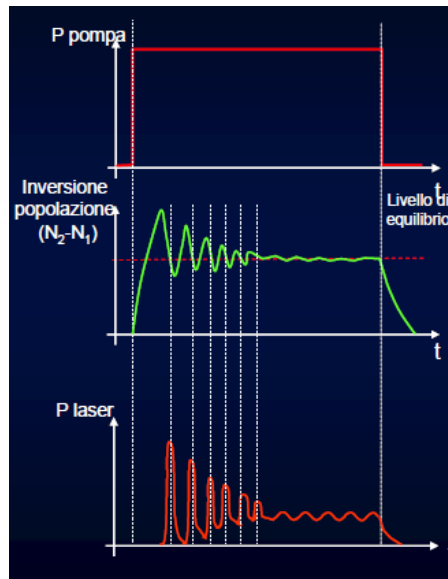


Fig. 15 impulso free-running

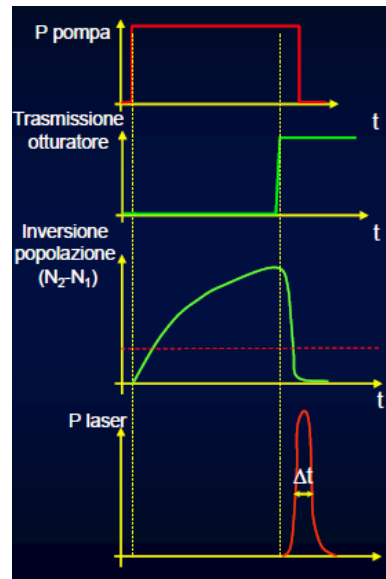


Fig. 16 impulso Q-switch

- Il MODE-LOCKING, in cui forzando un laser ad oscillare in regime di agganciamento di fase, si riescono ad ottenere con laser a gas impulsi di circa 10^{-9} s^{-9} , mentre con laser a stato solido (rubino, YAG) impulsi di circa 10^{-12} s^{-10} o anche più brevi, con potenze di picco molto elevate[8].

Un ultimo aspetto da tenere in considerazione quando si sceglie una sorgente laser è la polarizzazione del fascio, cioè la modalità con cui i campi elettrico e magnetico, si propagano nello spazio. Se i due vettori, che definiscono i campi, giacciono in due piani paralleli alla direzione di propagazione dell'onda si dice che l'onda ha una polarizzazione lineare. Se invece i due vettori, durante la propagazione in direzione z , ruotano attorno all'asse (descrivendo quindi una spirale) la polarizzazione è di tipo circolare. Infine, se ogni raggio costituente il fascio ha i vettori orientati in maniera casuale la polarizzazione è di tipo casuale. La polarizzazione lineare è generalmente da evitare in campo tecnologico, infatti alcuni materiali presentano una grande differenza di assorbimento di energia tra il campo elettrico e quello magnetico e, di conseguenza, la larghezza del solco ottenuta durante il taglio dipende dalla direzione dei vettori E ed B rispetto alla direzione di propagazione del taglio. Nel caso di taglio di uno spigolo la larghezza del solco varia tra i due lati, fatto questo che può creare problemi nel caso di tagli di elevata precisione in cui siano richieste strette tolleranze dimensionali [6].

In generale per le lavorazioni meccaniche si preferisce quindi la polarizzazione circolare o casuale che garantiscono, grazie alla rapida variazione della

direzione dei due vettori E ed B nel tempo, una maggior isotropia nell'interazione tra laser e materia.

2.3.2. Tipi di laser

A questo punto data la grande varietà di sorgenti laser (una lista completa e aggiornata può essere consultabile sulla pagina web del famoso wikipedia http://it.wikipedia.org/wiki/Lista_di_tipi_di_laser) si è dovuto decidere su quali sorgenti laser concentrare l'attenzione. Avendo come obiettivo la realizzazione di un dispositivo funzionante e in ambito industriale, si sono scartate tutte quelle sorgenti che, usate a carattere di ricerca nei laboratori sono, ad oggi, difficilmente integrabili in una macchina automatica, sia perché difficilmente reperibili e sia perché l'implementazione industriale richiederebbe un'affidabilità un'efficienza e una modularità che difficilmente qualsiasi dispositivo da laboratorio può garantire.

Si è deciso, quindi, sulla base della teoria precedentemente esposta, di valutare una serie sorgenti già industrializzate che avessero:

- Efficienza elevata
- Lunghezze d'onda diverse tra di loro
- Buona qualità del fascio
- diverso regime di generazione

Si sono quindi presi in considerazione sorgenti laser a CO_2 sorgenti laser Nd:YAG pompate a diodi, sorgenti in fibra FAYb, sorgenti a semiconduttori a diverse lunghezze d'onda e sorgenti ad eccimeri.

I laser a gas CO_2 sono stati presi in considerazione perché, oltre ad essere uno dei pochi laser operanti a lunghezze d'onda nel lontano infrarosso (6,3/10.6) presentano anche rendimenti del 20/30%, con possibilità, quindi, di raggiungere potenze elevate; inoltre essendo industrialmente molto sviluppate propongono diverse filosofie costruttive che consentono a loro volta, di ottenere diverse qualità del fascio, diversi modi funzionamento (regime continuo, regime impulsato), diversi modi di pompaggio e diversi sistemi di raffreddamento.

I laser a Nd:YAG sono stati presi in considerazione perché presentano:

- lunghezze d'onda nel vicino infrarosso;
- buona qualità del fascio;

- possono operare a diversi regimi;
- fascio laser facilmente trasportabile con una fibra ottica;

Per contro queste sorgenti hanno bassi livelli di efficienza e quindi hanno bisogno di un efficace sistema di smaltimento del calore.

I laser in fibra (laser allo stato solido) FAYb sono stati presi in considerazioni perché hanno:

- un'efficienza molto alta, 50% possono quindi raggiungere potenze interessanti, con sistemi di raffreddamento ad aria;
- producono fasci con lunghezze d'onda nel vicino infrarosso ,quindi possono essere facilmente trasportati con fibre ottiche;

hanno per contro come detto in precedenza una qualità del fascio bassa.

I laser a diodi o a semiconduttori sono stati presi in considerazioni perché hanno:

- un'efficienza molto alta, 100% possono quindi raggiungere potenze elevate, senza bisogno di fastidiosi sistemi di smaltimento di calore;
- producono fasci con lunghezze d'onda sia nel vicino infrarosso che nel visibile,quindi possono essere facilmente trasportati con fibre ottiche;
- possono essere sfruttati insieme a cristalli non lineari per ottenere fasci laser con lunghezze d'onda in seconda e in terza armonica cioè con lunghezze d'onda nel visibile e nel ultravioletto [7](fig.17)

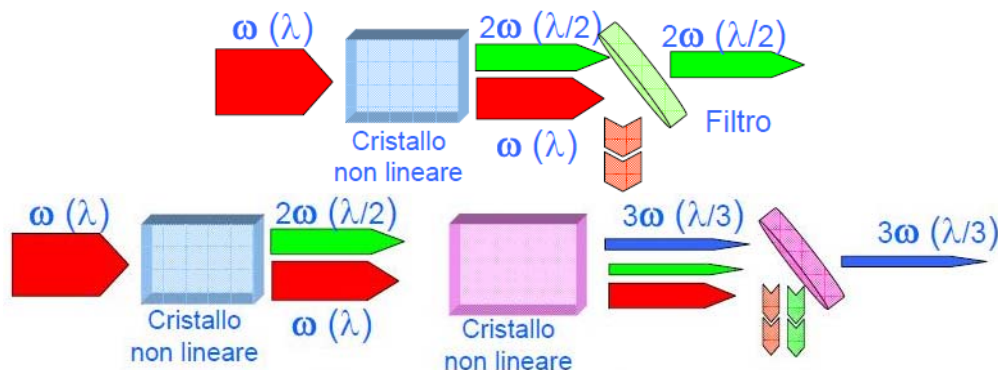


Fig. 17 generazione seconda e terza armonica

Queste sorgenti hanno per contro come detto in precedenza una qualità del fascio bassa.

I laser ad eccimeri sono stati presi in considerazione perché producono fasci con una lunghezza d'onda nel ultravioletto e sono abbastanza sviluppati industrialmente soprattutto per applicazioni nella chirurgia.

In seguito è riportata una tabella (tab.3) in cui sono elencate con i relativi valori

le caratteristiche di ognuna delle sorgenti laser analizzate.

Caratteristiche del fascio	Laser a CO2	Laser a Nd:YAG	FAYb	Laser a semiconduttori 2 ^a e 3 ^a arm.	Laser eccimeri
Potenza media (Kw)	20	4	6	0.01	0,21875
Lunghezza d'onda (μ)	10,6	1,06	1,06	0.5-0.3	0. 353-0.192
Rendimento	10 – 15%	3 - 5%	50%	1%	5-10%
Durata sorgente	20000 ore	15000 ore	60000 ore	Dipende dalla durata del cristallo	10 ⁶ impulsi
Guida del fascio	A specchi	Fibra ottica	Diretta/fibra ottica	A specchi	A specchi
M ²	1.1	1.2	1.5	2.2	1.1
Regime emissione	Cw-impulsato	Cw-impulsato	Cw-impulsato	Cw-impulsato	impulsato
Raffreddamento	Aria/acqua	Aria/acqua	Aria	Acqua	Acqua

Tab 3 caratteristiche dei laser selezionati

Da una successiva analisi si sono scartate le sorgenti laser ad eccimeri e quelle a Nd:YAG. Le prime perché, presentano durate non soddisfacenti per un'applicazione come quella in studio, che richiede un'elevata vita ai componenti installati nella macchina. Le seconde perché possono essere sostituite da sorgenti in fibra che presentano costi di gestione minori e lunghezze d'onda simili.

Ci si riserva però di analizzarli più in dettaglio qualora si riscontrasse una importanza rilevante della qualità del fascio sulla lavorazione che si dovrà ottenere.

2.3.3. Interazione laser materia

L'interazione tra radiazione elettromagnetica e la materia è l'aspetto fondamentale da tenere in considerazione quando si vuole sfruttare l'energia di un laser per lavorare un determinato materiale.

La radiazione laser infatti quando colpisce una superficie di un materiale può essere assorbita, trasmessa e riflessa (in generale per ogni corpo che incontra si

assisterà a tutti e tre i fenomeni anche se in molti casi uno prevarrà sull'altro), di queste quelle che consente di effettuare cambiamenti sul materiale attraverso o l'aumento di temperatura o la rottura dei legami tra gli atomi, è solo la parte assorbita che deve essere quindi prevalente.

Il meccanismo d'interazione della radiazione laser rispetto a un determinato materiale dipende da molti fattori i più importanti sono[9]:

- lunghezza d'onda;
- composizione del materiale;
- durata dell'impulso;
- potenza/energia;
- temperatura del materiale

L'energia trasportata da una radiazione laser, proporzionale alla frequenza e quindi alla lunghezza d'onda, viene assorbita dalla materia, generando transizioni energetiche al suo interno, in base al tipo di legame elettronico che ne definisce la composizione[10][11].

In un atomo, il numero degli stati energetici che l'elettrone può occupare è ridotto rispetto a quello di una molecola in quanto le transizioni che possono avvenire sono solo quelle elettroniche.

$$E_{\text{atomo}} = E_{\text{nucleo}} + E_{\text{traslazionale}} + E_{\text{elettronica}}$$

In una molecola bisogna tener conto dei contributi vibrazionali e rotazionali dovuti al fatto che gli atomi presenti in una molecola possono ruotare attorno alla loro distanza interatomica e che le molecole possono ruotare attorno a loro stesse intorno a uno o più assi[10].

$$E_{\text{atomo}} = E_{\text{nucleo}} + E_{\text{traslazionale}} + E_{\text{elettronica}} + E_{\text{vibrazionale}}$$

$$E_{\text{elettronica}} > E_{\text{vibrazionale}} > E_{\text{rotazionale}}$$

Quindi la radiazione uv-visibile che presenta alte frequenze avrà energia sufficiente a causare la variazione sia dell'energia elettronica degli atomi che quelle vibrazionale e rotazionale delle molecole.

La radiazione IR invece con frequenze più basse potrà determinare la variazione dell'energia vibrazionale e di quella rotazionale della molecola, ma non sarà in grado di eccitare il moto elettronico.(fig.18)(tab.4)

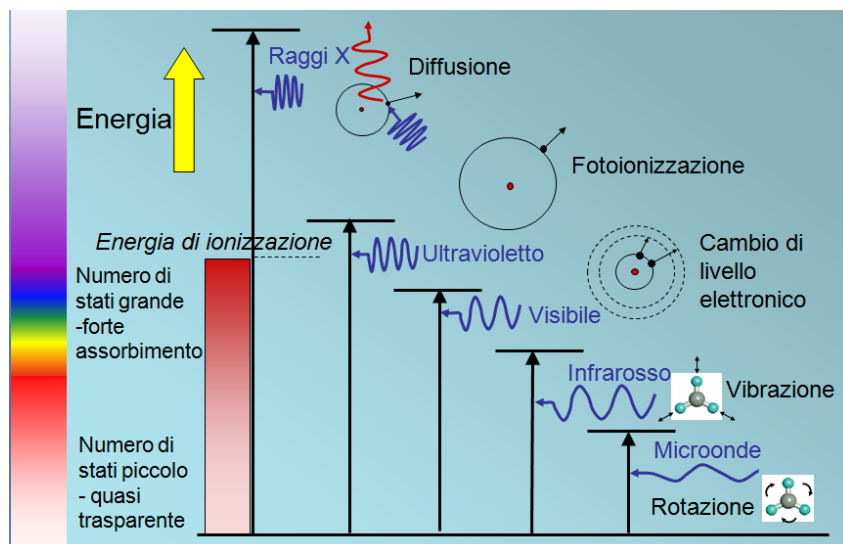


Fig. 18 interazione della radiazione con la materia

Queste variazioni di energia generano:

- quando coinvolgono le molecole, un aumento di temperatura causato appunto dall'aumentato di moto molecolare, che trasmessa nel materiale in tempi molto rapidi porta ad avere cambiamenti di stato altrettanto rapidi;
- quando coinvolgono gli elettroni di valenza liberi presenti nei legami cristallini tipici dei metalli, portano ad un aumento di temperatura per resistenza elettrica dovuta all'innesco di correnti parassite, questa trasmessa nel materiale in tempi molto rapidi porta ad avere anche in questo caso cambiamenti di stato;
- quando coinvolgono gli elettroni di valenza legati, generano una rottura del legame con successiva dissociazione/ionizzazione della molecola

E (eV)	λ	Tipo di eccitazione	Regione spettrale
0.01	100 μm	Rotazioni molecolari	Infrarosso
0.1	10 μm	Vibrazioni molecolari	
1	1 μm	Elettroni di valenza	Visibile
1.75-3.1	0.7-0.4 μm		Ultravioletto
10	0.1 μm		
1000	10 Å	Elettroni interni	Raggi X
10000	1 Å		
10^6	0.01 Å	Nucleo	Raggi γ

Tab 4 interazione radiazione materia

ogni materiale quindi assorbe e la radiazione elettromagnetica a seconda della lunghezza d'onda:

- i metalli assorbono più facilmente radiazioni con lunghezze d'onda nel visibile e nel vicino infrarosso $1\mu-0.4\mu\text{m}$ (fig.19)

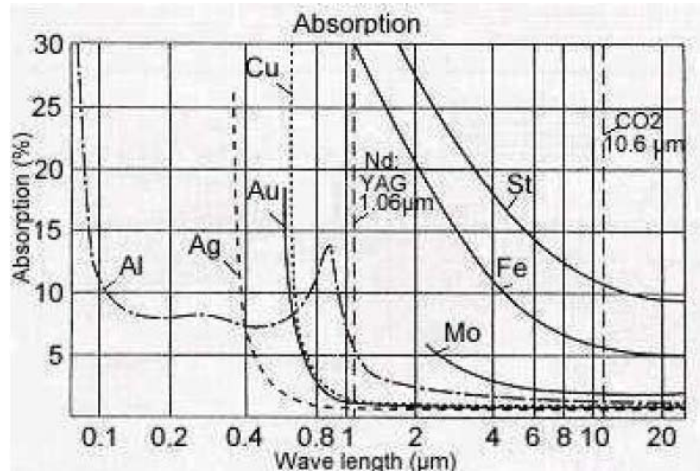


Fig. 2 assorbimento di alcuni metalli

- i composti molecolari assorbono più facilmente radiazioni con lunghezze d'onda nel medio e lontano infrarosso (fig.20)

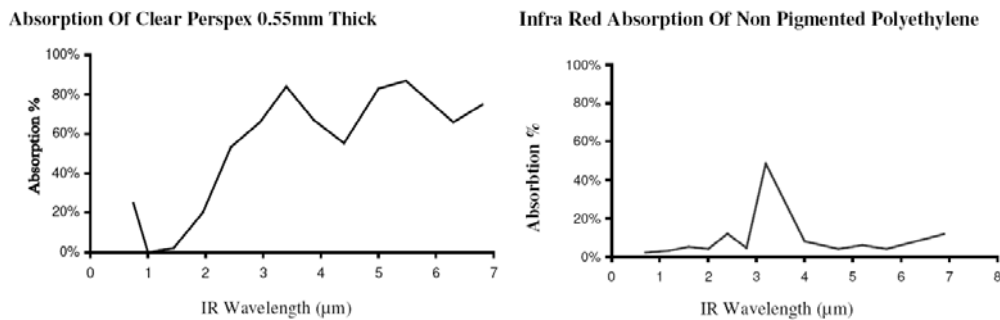


Fig. 20 assorbimento di alcuni composti molecolari

In particolare ogni gruppo molecolare assorbe a una determinata lunghezza d'onda (questa caratteristica è sfruttata in spettroscopia per fare una analisi qualitativa dei composti).

Si nota inoltre che le radiazioni con lunghezze d'onda nell'ultravioletto sono facilmente assorbite da molti materiali sia di carattere molecolare che di carattere metallico, perché trasportando, come si è detto, un'energia sufficiente a interagire sia con gli elettroni di valenza legati nelle molecole sia con quelli liberi dei cristalli metallici.

Si definisce quindi in base al materiale il coefficiente d'assorbimento A , definendo l'intensità della radiazione incidente con la legge di Lambert-Beer

$$\frac{I_1}{I_0} = e^{-Ax}$$

Che tiene conto della porzione d'intensità del fascio incidente sul materiale, questo coefficiente inoltre permette di determinare la lunghezza di penetrazione della radiazione come l'inverso del coefficiente $1/A$ cioè lo spessore di materiale che la radiazione deve attraversare affinché l'intensità venga ridotta a $\sim 1/3$ del valore iniziale.

Questo coefficiente di assorbimento inoltre aumenta all'aumentare della temperatura, come esposto in diversi studi [12][13] (fig.21).

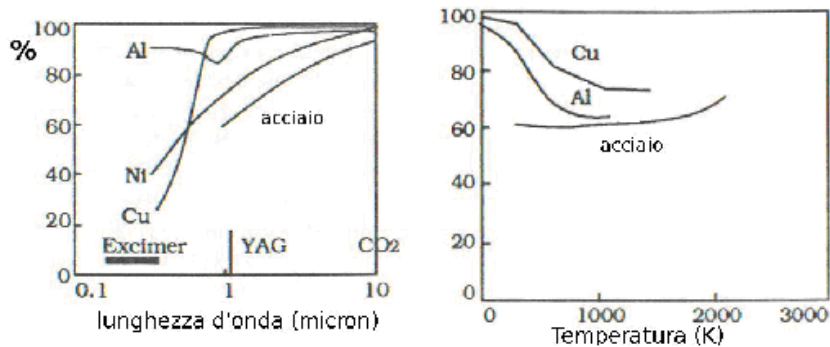


Fig. 21 riflessione al variare della temperatura

La durata dell'impulso cioè la durata con cui la radiazione laser incide sul materiale condiziona gli effetti termici generati infatti, ogni materiale è caratterizzato da un tempo di rilassamento termico (K =diffusività termica materiale)

$$t_{\text{ril term}} = (l_p)^2 / (4 K)$$

che è il tempo di propagazione del calore nella lunghezza di penetrazione

$$l_p = \frac{1}{A}$$

Se l'impulso è più breve di questo tempo il forte aumento di temperatura ed il relativo danno termico saranno localizzati, e il materiale circostante subirà un modesto riscaldamento a seguito della successiva diffusione termica, se invece l'impulso è più lungo di questo tempo il calore ha tempo di diffondersi per profondità maggiori di quella di penetrazione, causando alterazioni più diffuse. L'intensità della radiazione determina il processo di asportazione del materiale (ablazione), infatti, se il fascio laser incide sul materiale con una densità di potenza minore di una certa soglia E_{th} , dipendente dal tipo di materiale (che ne assorbe una certa quantità), non si verifica asportazione di materiale ma solo una serie di effetti come il cambio struttura, cambio aspetto rugosità superficiale, cambio colore ecc. (usati tipicamente nelle marcature laser di

codici di rintracciabilità sui prodotti) dovuti ad effetti termici, se invece viene superata questa soglia si genera un processo di asportazione locale di materiale, tramite la sua vaporizzazione, con poca alterazione termica delle zone limitrofe, questo processo si chiama appunto ablazione e può essere di diverso tipo a seconda della durata dell'impulso e dell'energia assorbita[10], e il fenomeno di rimozione di materiale e' descritto dalle "curve di rate", che rappresentano la velocità di scavo (quantità di materiale rimosso per ogni impulso) in funz. della fluenza laser[J/cm²], come mostrato in figura(fig.22)

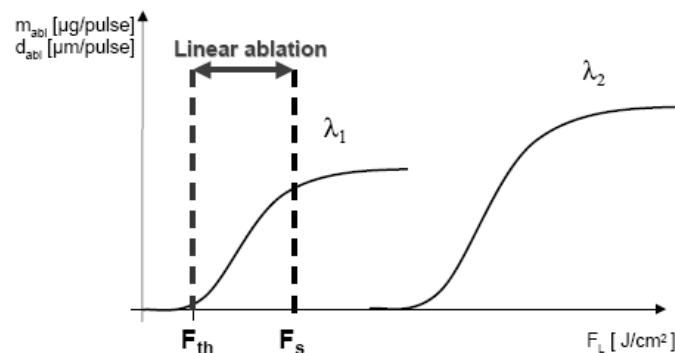


Fig. 22 curve di rate

Queste curve mostrano che la profondità di asportazione ha un andamento lineare con l'aumento dell'intensità fino al raggiungimento di un limite superiore, nel quale si ha la formazione di plasma (gas ionizzato) che assorbendo la radiazione scherma il materiale, cambiando così la relazione di linearità precedente. Inoltre assorbendo la radiazione ancora incidente il plasma si espande molto rapidamente sviluppando un'onda di shock in grado di provocare la fotoframmentazione del materiale (fig.23)

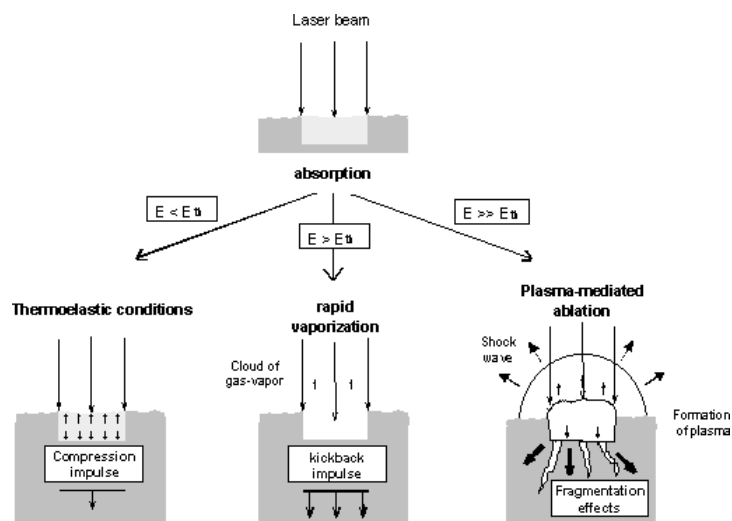


Fig. 23 effetti della radiazione laser

Chiaramente più si riesce ad avere una densità di potenza alta più è facile avere ablazione di materiale. Le densità richieste, si ottengono in genere, focalizzando, con opportune lenti, i fasci laser generati dalle sorgenti in un punto (il più piccolo possibile). Muovendo poi questo punto lungo una direzione o percorso si riesce ad ottenere l'asportazione di materiale voluta. La densità di potenza necessaria dipende, quindi anche dalla velocità con cui si muove lo spot (punto di focalizzazione), infatti più si va veloce e minore sono gli effetti generati dall'assorbimento di energia, ovvero minore è il materiale asportato.

2.3.4. Prove interazione laser-materiale

Considerando le conoscenze acquisite a livello teorico sull'interazione tra fascio laser e materia, si può concludere che l'ablazione di materiali che assorbono molta radiazione laser è ottenibile facendo incidere su di essi fasci di minor energia, generati di conseguenza da sorgenti di potenze non elevate. Da questa considerazione ci si aspetta quindi che, materiali che hanno una composizione interna di tipo molecolare assorbendo maggiormente radiazioni con lunghezze d'onda nel lontano infrarosso, siano più facilmente lavorabili (utilizzando potenze minori) con sorgenti tipo quelle a CO₂, e che, i materiali come i metalli assorbendo maggiormente radiazioni a lunghezze d'onda nel visibile e nel vicino infrarosso, siano più facilmente lavorabili con laser tipo YAG e a semiconduttori, inoltre ci si può aspettare che tutti i tipi di materiale assorbendo bene le lunghezze d'onda nel visibile e nel UV siano facilmente lavorabili da questo tipo di laser.

Ci si rende conto però che la scelta della sorgente laser da utilizzare nell'applicazione in studio, data la complessità dei fenomeni in gioco, non è determinabile basandosi solo su considerazioni di livello teorico, ancora di più se, come nel nostro caso, i materiali da lavorare sono multi layer, cioè ottenuti accoppiando film di materiali diversi.

Si è proceduto quindi, facendo delle prove sperimentali, usando sia il marcatore a disposizione dell'azienda sia gli altri tipi di sorgenti che si è precedentemente deciso di analizzare. Le sorgenti non presenti in azienda, sono state messe a disposizione da diversi produttori presso le loro sedi, durante questa fase, oltre al lavoro di sperimentazione preventivato si è colta anche

l'occasione per raccogliere il maggior numero di informazioni sul modo in cui vengono gestiti comunemente sistemi laser sia per quanto che riguarda la gestione della sicurezza che per quanto riguarda la guida del fascio laser, inoltre si sono raccolte informazioni sulle esperienze tecniche degli operatori del settore.

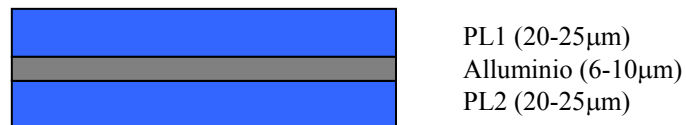
Le prove sono state fatte sottoponendo tre tipici materiali da incarto a passate a diversa velocità e potenza di diversi tipi di laser.

I materiali provati sono:

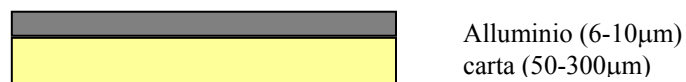
materiale 1-multistrato composto da un primo strato di carta e due successivi strati plastici



materiale 2-multistrato composto da un primo strato di materiale plastico un secondo strato di alluminio e un ultimo strato di materiale plastico



materiale 3-multistrato composto da un primo strato di alluminio e un secondo strato di carta (stagnola)



TEST LASER CO₂ PRESENTE IN AZIENDA

In questi test si sono sottoposti i materiali descritti in precedenza alla radiazione prodotta dal marcatore a disposizione della GD caratterizzato da:

potenza media 20W

lunghezza d'onda 10,6 μ m

sistema galvanometrico per la movimentazione del fascio

diametro dello spot 0.29 mm

si sono ottenuti i seguenti risultati:

il materiale 1

sottoposto ad una passata con la potenza massima disponibile e una velocità pari a 300 mm/sec, presenta un'incisione totalmente passante (fig.24)

sottoposto ad una passata con la potenza massima disponibile e una velocità pari a 500 mm/sec presenta un'incisione non uniforme (parzialmente passante) (fig.24)

sottoposto ad una passata con la potenza massima disponibile e una velocità pari a 700 mm/sec presenta la rimozione del solo strato cartaceo lasciando inalterati gli altri strati (fig.24)



Fig. 24 effetti CO₂ sul materiale 1

queste prove mostrano che il materiale nel suo complesso è facilmente lavorabile con un laser CO₂, come ci si aspettava essendo formato da tutti “materiali di tipo molecolare”, inoltre si è notato che agendo sulla velocità di passata si può regolare facilmente l'effetto ottenuto in particolare si osserva che al disotto di una certa velocità la radiazione viene assorbita solo dal primo strato generando solo l'ablazione di questo senza coinvolgere gli strati sottostanti.

il materiale 2

sottoposto ad una passata con la potenza massima disponibile e una velocità pari a 300 mm/sec, presenta la rimozione totale del primo strato plastico con nessun effetto sullo strato metallico intermedio lo strato plastico inferiore invece presenta un'alterazione termica in corrispondenza del materiale rimosso in superficie (fig.25)

sottoposto ad una passata con la potenza massima disponibile e una velocità pari a 500 mm/sec, presenta la rimozione totale del primo strato plastico con nessun effetto su quelli sottostanti altra differenza rispetto al caso precedente è rappresentata dalla larghezza della parte asportata che a vista si presenta più

sottile (fig.25)

sottoposto ad una passata con la potenza massima disponibile e una velocità pari a 700 mm/sec presenta la rimozione totale del primo strato plastico con una larghezza del tratto asportato minore dei casi precedenti (fig.25)



Fig. 3 effetti laser CO2 sul materiale 2

queste prove mostrano che il materiale interagisce, in modo evidente, con la radiazione laser solo con il primo strato, che viene asportato, infatti questo essendo un materiale di tipo molecolare assorbe bene la lunghezza d'onda prodotta da un laser CO₂ mentre quello sottostante essendo di tipo metallico ne assorbe molto meno innescando così solo un processo di riscaldamento che altera termicamente la parte plastica inferiore, questo fenomeno si è osservato inoltre, solo per la velocità di passata più lenta.

Il materiale 3

sottoposto ad una passata con la potenza massima disponibile una velocità pari a 300 mm/sec, non presenta la rimozione dello strato superficiale d'alluminio e nessuna alterazione del materiale cartaceo sottostante, lo stesso risultato si può osservare anche sottoponendo il materiale a passate a velocità più elevate, la prova dimostra che per i materiali metallici l'effetto più rilevante, andando a colpire il materiale con una radiazione laser di lunghezza d'onda nel lontano infrarosso, è la riflessione, anche perché se la radiazione venisse trasmessa sarebbe assorbita dallo stato cartaceo sottostante che presenterebbe effetti rilevabili

PROVA LASER IN FIBRA FAYb PRESSO LA PANASONIC ELETTRIC WORKS

In questi test si sono sottoposti i materiali elencati sopra alla radiazione

prodotta da un marcatore laser con sorgente allo stato solido in fibra, caratterizzato da:

potenza media 12 W

lunghezza d'onda 1,06 μm

sistema galvanometrico per la movimentazione del fascio

diametro dello spot 60 μm

Il materiale 1:

- sottoposto ad una passata con la potenza massima disponibile e una velocità pari a 200 mm/sec, presenta una leggera alterazione dello strato superficiale cartaceo e nessuna alterazione dei materiali plastici sottostanti, lo stesso risultato si può osservare anche sottoponendo il materiale a passate a velocità più elevate (fig.26).

La prova dimostra che le lunghezze d'onda delle radiazioni laser nel vicino infrarosso non vengono assorbite dai materiali di carattere molecolare, si è notato inoltre che se la radiazione colpisce una parte colorata del materiale si riesce ad ottenere un'asportazione di materiale che può essere anche passante se si procede a basse velocità.



Fig. 26 effetti laser FAYb sul materiale 1

Il materiale 2:

- sottoposto ad una passata con la potenza massima disponibile e una velocità pari a 200 mm/sec, presenta un'incisione non passante si nota inoltre che lo strato inferiore plastico presenta un'evidente alterazione mentre quello plastico superiore risulta completamente rimosso (fig.27)
- sottoposto ad una passata con la potenza massima disponibile e una velocità

pari a 500 mm/sec il campione si presenta come nel caso precedente ma con uno effetto minore sul primo strato plastico (fig.27)

- sottoposto ad una passata con la potenza massima disponibile e una velocità pari a 800 mm/sec sul campione è presente un'asportazione molto sottile dei primi due materiali mentre il terzo rimane come negli altri casi intatto (fig.27)

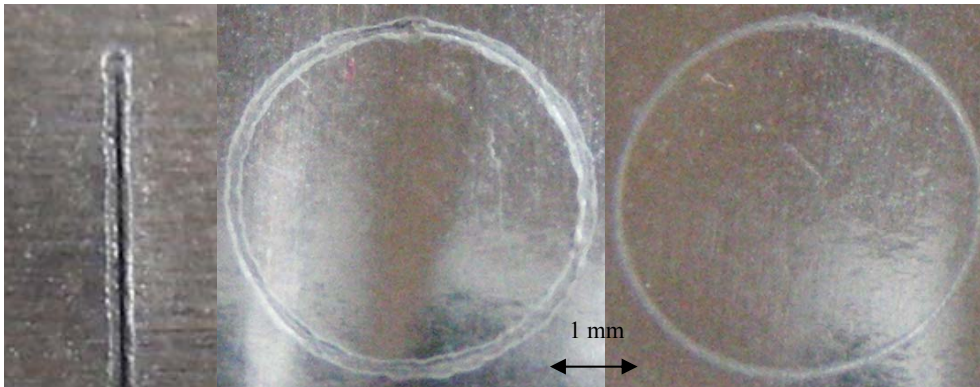


Fig. 27 effetti laser FAYb sul materiale 2

i risultati ottenuti si spiegano se la radiazione laser interagisce con lo strato metallico interno provocandone così l'ablazione che generando un flusso di materiale vaporizzato verso l'esterno provoca l'asportazione del solo strato superficiale plastico, lo strato plastico inferiore risente di questo processo solo quando la densità di potenza è elevata cioè quando si va più piano

Il materiale 3

- sottoposto ad una passata con la potenza massima disponibile e una velocità pari a 200 mm/sec, presenta un'incisione totalmente passante si nota inoltre che lo strato inferiore cartaceo presenta un'evidente annerimento (carbonizzazione) sui bordi dove è stato asportato il materiale (fig.28)
- sottoposto ad una passata con la potenza massima disponibile e una velocità pari a 500 mm/sec presenta un'incisione totalmente passante inoltre come nel caso precedente lo strato inferiore cartaceo presenta un'annerimento (carbonizzazione) in corrispondenza del materiale asportato (fig.28)
- sottoposto ad una passata con la potenza massima disponibile e una velocità pari a 800 mm/sec presenta un'incisione non uniforme (parzialmente passante) si nota che in corrispondenza delle zone in cui è avvenuta la perforazione il materiale cartaceo risulta annerito (fig.28)

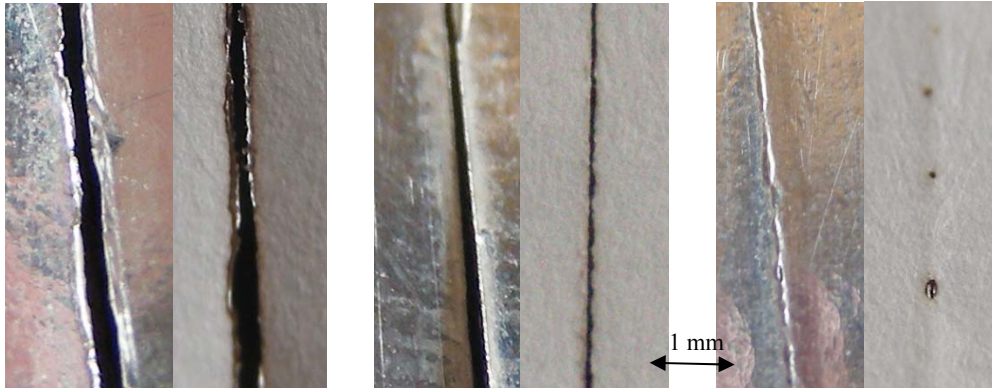


Fig. 48 effetti laser FAYb sul materiale 1

queste prove mostrano che il materiale interagisce, in modo evidente, con la radiazione laser solo con il primo strato, che viene asportato, infatti questo essendo un materiale di tipo metallico assorbe bene la lunghezza d'onda prodotta dal laser FAYb mentre quello sottostante essendo di tipo molecolare non ne assorbe e il processo di riscaldamento che altera termicamente la parte inferiore cartacea e da attribuire al calore trasmesso dal metallo sovrastante, infatti questo fenomeno si è osservato anche per velocità di passata più lente.

PROVA LASER DPSSL IN SECONDA ARMONICA (532) PRESSO UN POSSIBILE FORNITORE

In questi test si sono sottoposti i materiali elencati sopra alla radiazione prodotta da un marcatore laser con sorgente pompata a diodi e in seconda armonica, caratterizzato da:

potenza media 6 W

lunghezza d'onda 532 nm

sistema galvanometrico per la movimentazione del fascio

diametro dello spot non nota

il materiale 1:

- sottoposto ad una passata con la potenza massima disponibile e una velocità pari a 80 mm/sec, presenta un' incisione completamente passante di spessore molto sottile (fig.29)
- sottoposto ad una passata con la potenza massima disponibile e una velocità pari a 100 mm/sec, presenta un' incisione non passante che coinvolge tutti gli strati del materiale (fig.29)
- sottoposto ad una passata con la potenza massima disponibile e una velocità

pari a 120 mm/sec, presenta un' incisione non passante che coinvolge solo gli strati superficiali plastici (in questo caso il campione è stato testato rovesciato) (fig.29)



Fig. 59 effetti laser seconda armonica sul materiale 1

i test dimostrano che il materiale nel suo complesso è facilmente lavorabile con un laser con lunghezza d'onda nel visibile, inoltre si è notato che agendo sulla velocità di passata si può regolare facilmente l'effetto ottenuto in particolare si osserva che al disotto di una certa velocità la radiazione viene assorbita solo dai primi strati generando solo l'ablazione di questi senza coinvolgere gli strati sottostanti.

Il materiale 2:

- sottoposto ad una passata con la potenza massima disponibile e una velocità pari a 100 mm/sec, presenta un' incisione completamente passante di spessore molto sottile (fig.30)
- sottoposto ad una passata con la potenza massima disponibile e una velocità pari a 120 mm/sec, presenta un' incisione non passante che coinvolge solo i primi due strati del materiale (fig.30)
- sottoposto ad una passata con la potenza massima disponibile e una velocità pari a 140 mm/sec, presenta un' incisione non passante che coinvolge solo gli strati superficiali plastico e alluminio(fig.30)

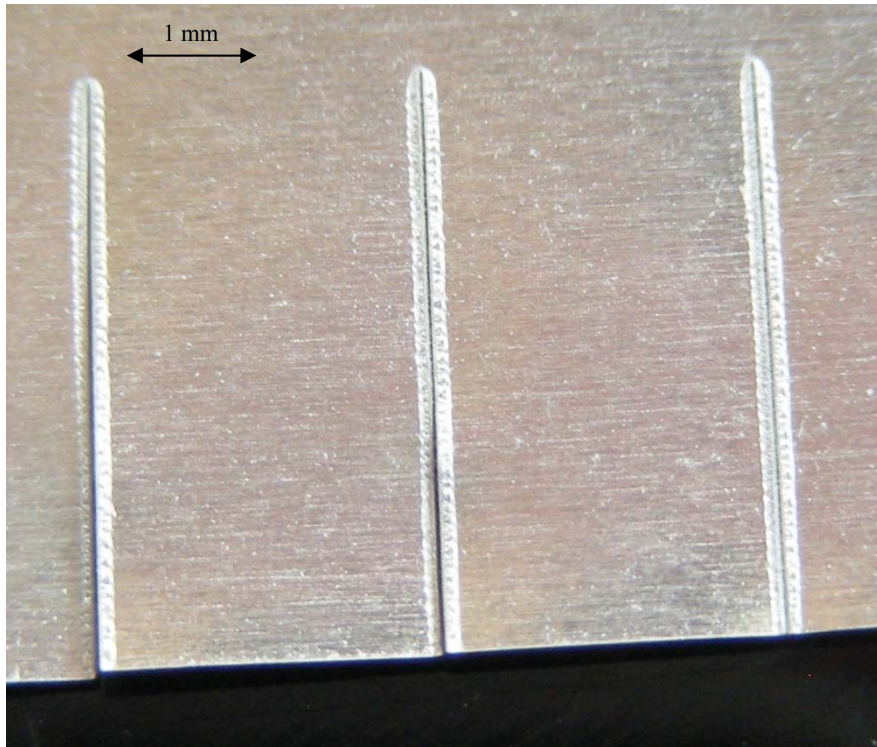


Fig. 30 effetti laser seconda armonica sul materiale 2

queste prove mostrano anche in questo caso che il materiale nel suo complesso è facilmente lavorabile con un laser con lunghezza d'onda nel visibile, inoltre si è notato che agendo sulla velocità di passata si può regolare facilmente l'effetto ottenuto in particolare si osserva che al disotto di una certa velocità la radiazione viene assorbita solo dai primi strati generando solo l'ablazione di questi senza coinvolgere gli strati sottostanti, si osserva che il materiale 2 è lavorabile con velocità maggiori rispetto al materiale 1 questo ci porta a dire che la componente metallica assorbe evidentemente meglio questa radiazione laser rispetto a alla componente plastica.

Il materiale 3:

- sottoposto ad una passata con la potenza massima disponibile e una velocità pari a 80 mm/sec, presenta un'incisione totalmente passante si nota inoltre che lo strato inferiore cartaceo presenta un annerimento (carbonizzazione) sui bordi dove è stato asportato il materiale (fig.31)
- sottoposto ad una passata con la potenza massima disponibile e una velocità pari a 100 mm/sec presenta un'incisione non totalmente passante inoltre come nel caso precedente lo strato inferiore cartaceo presenta un leggerissimo annerimento in corrispondenza del materiale asportato. (fig.31)

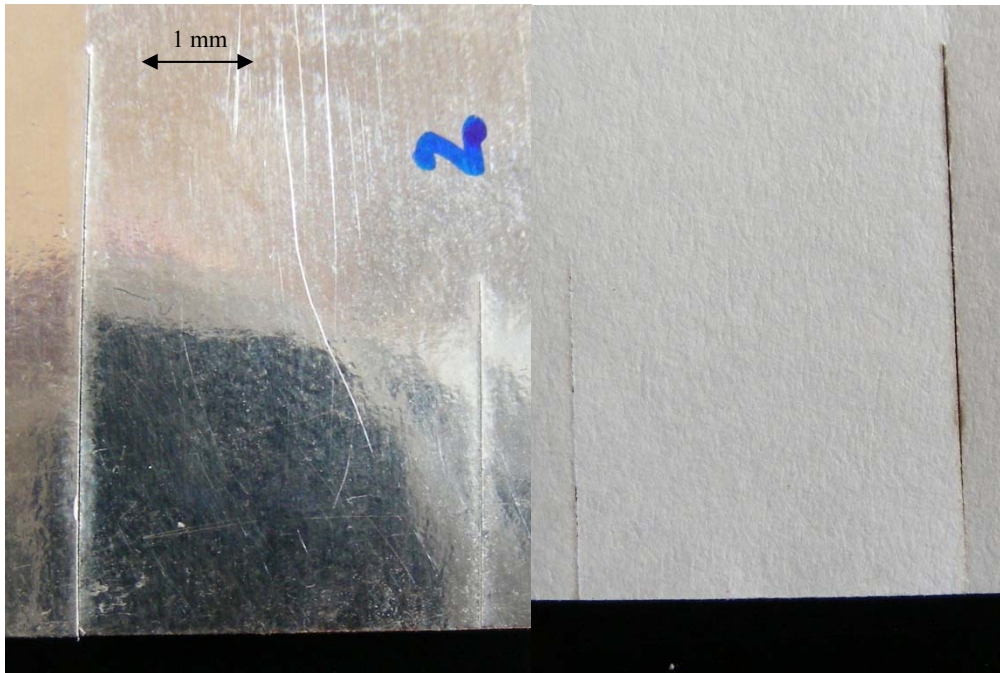


Fig. 316 effetti laser seconda armonica sul materiale 3

questi test mostrano che la radiazione laser viene assorbita dal primo strato metallico e non viene trasmessa da quest'ultimo, infatti il materiale asportato si può attribuire interamente al processo di ablazione dello strato metallico che evaporando asporta anche lo strato cartaceo che così subisce l'alterazione termica rilevata, si nota inoltre che è possibile regolare facilmente l'effetto ottenuto variando la velocità di passata

2.3.5. Determinazione tipo di laser

Dalle prove fatte si è innanzitutto osservato che con le potenze messe a disposizione (tipiche dei marcatori laser i.e. di codici a barre) nessun dei laser provati è in grado di ottenere un'incisione, anche parziale, alle velocità di passata richieste, che ricordo devono essere minimo di 1300 mm/sec, quindi si è concluso che per ottenere quando ci si è prefisso, si deve aumentare la potenza delle sorgenti, infatti, così facendo, ci si aspetta che aumentando la densità di potenza agente sul materiale, si riesca ad ottenere il processo di ablazione in meno tempo e conseguentemente ad andare più veloce.

Considerando le sorgenti analizzate si può notare che quella che produce un fascio che viene assorbito meglio da tutti i materiali e quella allo stato solido in seconda armonica, quindi ci si può aspettare che per questo tipo di sorgente può essere necessario ricorrere ad una potenza più bassa rispetto alle altre, per

ottenere le prestazioni richieste. Questo tipo di sorgente però può arrivare a produrre un fascio con una potenza massima non superiore ai 10W perché i cristalli non lineari usati in questo tipo di sorgente hanno un'efficienza molto bassa, quindi si scaldano molto e si degradano velocemente anche con potenze di pochi Watt. Quindi non possono essere utilizzate nella applicazione in studio.

Le altre sorgenti, cioè quella al CO₂ e quella in fibra FAYb, anche potendo generare facilmente potenze più alte, non riescono a processare tutti i materiali allo stesso modo, in particolare si osserva che i laser a CO₂ riescono ad ablate con potenze basse materiali senza componenti metalliche mentre quelle in fibra riescono a lavorare più facilmente (in termini di potenza necessaria) materiali in cui è presente una componente metallica.

A questo punto le informazioni a disposizione sono sufficienti per decidere, in base anche alle priorità e alle esigenze della G.D, quale tipo di sorgente utilizzare, infatti essendo i materiali di tipo cartaceo, quelli maggiormente utilizzati nel confezionamento delle sigarette e essendo in particolar modo richiesta, da esigenze produttive a un incisione parziale su un materiale tipo, il materiale 1, si è deciso di focalizzare l'attenzione sulle sorgenti a CO₂, e di determinare così una serie di specifiche per questo tipo di laser che garantiscano le prestazioni richieste.

Si è inoltre deciso di non precludere la possibilità di utilizzare in futuro le sorgenti in fibra e quindi nelle considerazioni che seguiranno si terrà in considerazione questo fatto, e si agirà di conseguenza.

2.3.6. Definizione specifiche sorgente laser

Una volta delineato il tipo di sorgente da utilizzare, si sono definite le caratteristiche di dettaglio di questa. Il tutto in considerazione delle specifiche date e in considerazione che la prima versione della stazione di lavoro è una versione sperimentale, che serve anche per la determinazione di tutte quelle caratteristiche (tipo di sistema di raffreddamento) che in questa fase di progettazione possono essere definite solo approssimativamente.

Definizione potenza sorgente

Durante le prove con la sorgente laser di tipo CO₂ si è notato che, non si riesce ad ottenere la lavorazione voluta, nel tempo richiesto, con la potenza di emissione massima del marcatore pari 20W ma, variando la potenza d'emissione e mantenendo la velocità costante si ottengono diversi tipi asportazione di materiale. Si è perciò deciso di studiare quale sia la relazione esistente tra questi fattori al fine di riuscire ad estrapolare il valore di potenza richiesto che permettesse di ottenere la lavorazione voluta alla velocità richiesta.

Facendo una ricerca sul web si è trovato nel sito della Synrad (importante produttore americano di sorgenti laser CO₂) un'applicazione che permette di calcolare in modo approssimativo la velocità di taglio in relazione alla potenza delle sorgenti laser e allo spessore del materiale.

Graficando i risultati ottenuti utilizzando questo software (fig.32), ci si accorge

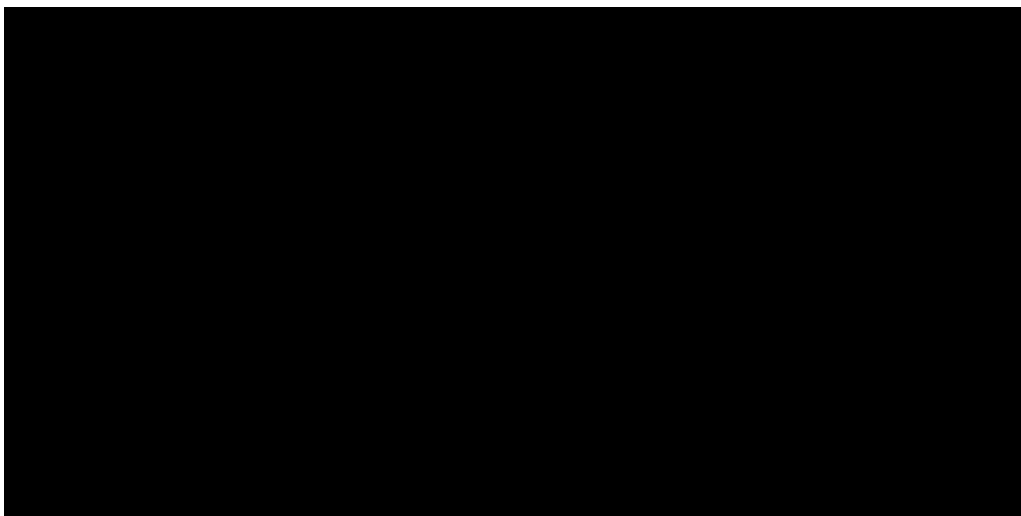


Fig.32 diagramma velocità potenza ricavate con software Synrad

che, per un determinato materiale, le velocità di taglio, per spessori costanti,

sono calcolate utilizzando un modello che si serve di una relazione di proporzionalità diretta tra velocità e potenza. Da una ricerca successiva, di tipo bibliografico, si è avuta la conferma di questo fatto, infatti ci si è accorti che molti autori [14],[15],[16] studiando i parametri di taglio laser, definiscono, per lo stesso spessore di materiale, la velocità di taglio, proporzionale alla potenza della sorgente.

$$P_L = \frac{\sqrt{\pi} w_0 \rho s v [C(T_{DT} - T_0) + H_{DT}]}{A}$$

Dove: P_L è la potenza del fascio laser; A è il coefficiente d'assorbimento del materiale; w_0 è il diametro dello spot; s è la profondità di taglio; v è la velocità di taglio; ρ è la densità del materiale; C è il calore specifico del materiale; T_0 è la temperatura ambiente; T_{DT} è la temperatura di combustione del materiale; H_{DT} è il calore di combustione del materiale.

Dai dati ricavati da queste ricerche, è emersa anche che un'altra informazione: ogni materiale richiede per una determinata potenza e spessore, una velocità di taglio diversa (come è lecito aspettarsi avendo un diverso coefficiente d'assorbimento).

Quindi per definire la potenza che permette di raggiungere la velocità di lavorazione necessaria all'applicazione in esame, si è proceduto con una serie di prove empiriche utilizzando il marcatore laser CO₂ a disposizione.

Queste prove hanno avuto come obiettivo, prima la verifica dell'ipotesi di proporzionalità esistente tra potenza e velocità (asportando la stessa quantità di materiale), poi l'estrapolazione del valore di potenza necessario per ottenere l'effetto desiderato con i vincoli imposti dalle specifiche di partenza.

Infatti, se la prima ipotesi è verificata, l'estrapolazione del valore di potenza cercata, può essere fatta semplicemente trovando il rapporto tra i due parametri e moltiplicandolo per la velocità richiesta dall'applicazione (considerando costante la densità di potenza relativa alle dimensioni dello spot del marcatore). In questo modo si verifica anche che, gli altri parametri (diametro spot, temperatura del materiale, coefficiente d'assorbimento considerati per esempio nella relazione sopra), si mantengono costanti durante la lavorazione e non influenzano il valore del rapporto tra velocità e potenza.

Per mettere in atto le prove, si è sfruttata la possibilità fornita dal marcatore, di

regolare sia la potenza del fascio che la velocità di passata, inoltre, potendo realizzare nella stessa lavorazione diverse linee a diversa velocità e potenza, si è generata una griglia costituita da una serie di linee diverse.

Questa griglia presenta sull'asse delle ordinate una scala di potenza che, dovendo essere discretizzata per attribuire ad ogni linea un valore di potenza, è stata divisa secondo una serie di valori ricavati sfruttando la serie R5 di Renald. Così facendo si riesce ad avere una semplice scala logaritmica che copre tutto il range di potenze erogabili dalla sorgente. Sull'asse delle ascisse la griglia presenta una scala discretizzata di rapporti tra velocità e potenza ottenuta dividendo, anche il range di velocità ottenibili con il marcatore, secondo la serie R5 e combinando i valori ottenuti con quelli delle potenze sulla base dei risultati ottenuti nelle prove precedenti. Si è ottenuta così una scala R5 di rapporti tra velocità e potenza che consente di avere il rapporto tra la massima velocità e la massima potenza in alto a destra e viceversa il rapporto tra la minima velocità e la minima potenza in basso a sinistra.

I valori di velocità riportate nelle colonne tabella seguente sono stati ricavati considerando i valori di potenza 20W; 12,6W; 8W; 5W; 3,2W corrispondenti rispettivamente al 100%,63%;40%;25%;16% della potenza erogabile dal marcatore.

Velocità (mm/sec)					Potenza	% Potenza
160	250	400	630	1000	20W	100%
100	160	250	400	630	12,6W	63%
63	100	160	250	400	8W	40%
40	63	100	160	250	5W	25%
25	40	63	100	160	3,2W	16%
8	12,5	20	31,5	50	Scala R5 v/P	

Tab. 5 valori linee griglia

In questo modo si riesce ad avere sia una visione completa del range di potenze e di velocità, sia una visualizzazione immediata dell'effetto generato sul materiale da passate a potenze diverse mantenendo però il rapporto con la velocità costante.

Si tiene a precisare però che, alcuni valori riportati nella tabella sopra, sono stati approssimati perché il software del marcatore non gestisce

approssimazioni al centesimo e perché alcuni rapporti risultano leggermente diversi da quelli teorici.

Inoltre si è verificato che per avere una buona leggibilità la griglia di incisioni deve avere le linee disposte secondo il modulo rappresentato sotto(fig.33)

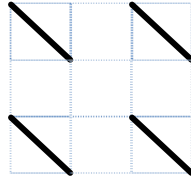


Fig. 33 disposizione linee griglia

Quest'ultima, dovendo essere distribuita sull'area di lavoro del marcatore 110x110 mm impone, una lunghezza delle incisioni pari $10 \cdot \sqrt{2}$ mm. Infine, essendo la griglia simmetrica, si è provveduto a mettere un segno di riferimento sull'angolo in alto a sinistra così da riconoscere subito il verso con cui il campione è stato posizionato durante la prova. Implementando questi dati in un file di lavoro del marcatore e lanciando la sessione di lavoro, si è ottenuto la seguente serie di incisioni(fig.34)

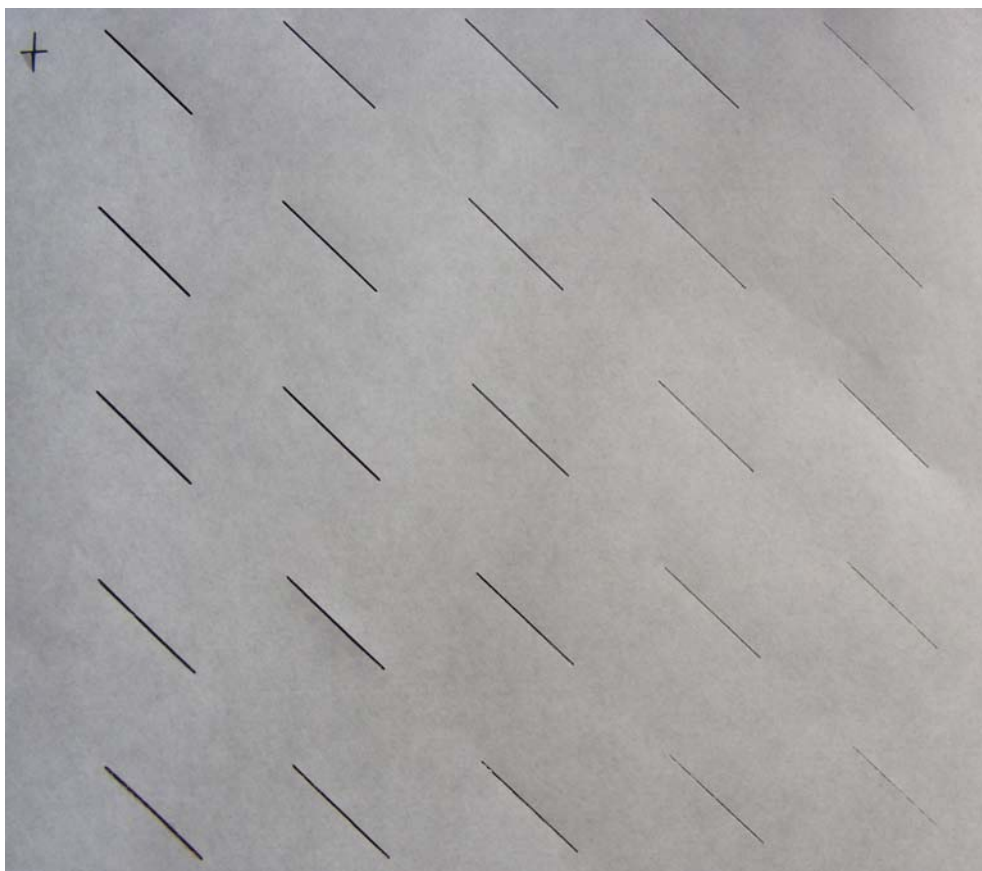


Fig. 34 griglia incisioni

Analizzandole si osserva innanzi tutto che la griglia, per come è stata strutturata, permette di ottenere una serie di incisioni di diverse caratteristiche e pertanto di avere una rappresentazione completa del tipo di lavorazioni che si possono ottenere. Si osserva poi, che alla potenza massima fornita dal marcatore si ottiene un'incisione passante ad una velocità 250 mm/sec una incisione parziale a 400 mm/sec e un'incisione di indebolimento 1000 mm/sec. Inoltre la caratteristica di ogni incisione rimane invariata per ciascuna colonna, pertanto è confermata l'ipotesi di proporzionalità tra potenza e velocità di passata.

Si può quindi affermare che procedendo come esposto in precedenza si può estrapolare la potenza necessaria per ottenere l'effetto desiderato sul materiale alla velocità richiesta.

Si può cioè considerando la velocità richiesta pari a 1300 mm/se calcolare la potenza necessaria, dividendo questa per il valore del rapporto velocità potenza corrispondente all'incisione non passante

$$1300/20=65W$$

procedendo allo stesso modo si ricava che se si vuole ottenere una incisione passante è richiesta una potenza

$$1300/12,6\approx 100 W$$

e per un'incisione di indebolimento è richiesta una potenza di

$$1300/50=26 W$$

pertanto si può concludere che se si utilizza una sorgente laser da 100 W con gli stessi parametri di regime di generazione del fascio e diametro dello spot si ottengono tutti i tipi di incisione voluti nei tempi richiesti.

Vista la capacità riscontrata nella griglia di evidenziare i parametri di taglio, si è deciso di sfruttarla per fare ulteriori prove. In particolare è stata usata per verificare le indicazioni fornite durante le prove preliminari da alcuni produttori di sorgenti laser riguardo all'influenza del diametro dello spot sui parametri di lavorazione. Questi sostenevano che quando si utilizzano spot più grandi per ottenere uno stesso tipo di lavorazione bisogna disporre di potenze maggiori.

Queste considerazioni sono state ritenute plausibili perché, in prima analisi, essendo la densità di potenza agente su un materiale, definita come, rapporto

della potenza del fascio sull'area dello spot, si ha che varia allo stesso modo con cui l'area dello spot e quindi con il quadrato del diametro pertanto diminuisce molto aumentando il diametro dello spot.

Avendo a disposizione sempre il solito marcatore, per simulare uno spot più grande si è posizionato il materiale fuori fuoco. Si è fatto questo perché, rimanendo invariato il profilo di un fascio gaussiano durante la focalizzazione [17], si può simulare bene la variazione di densità di potenza al aumentare delle dimensioni dello spot.

Ripetendo perciò la prova fatta in precedenza posizionando il materiale sfocato di 20 mm si sono ottenuti i risultati riportati in (fig.35)

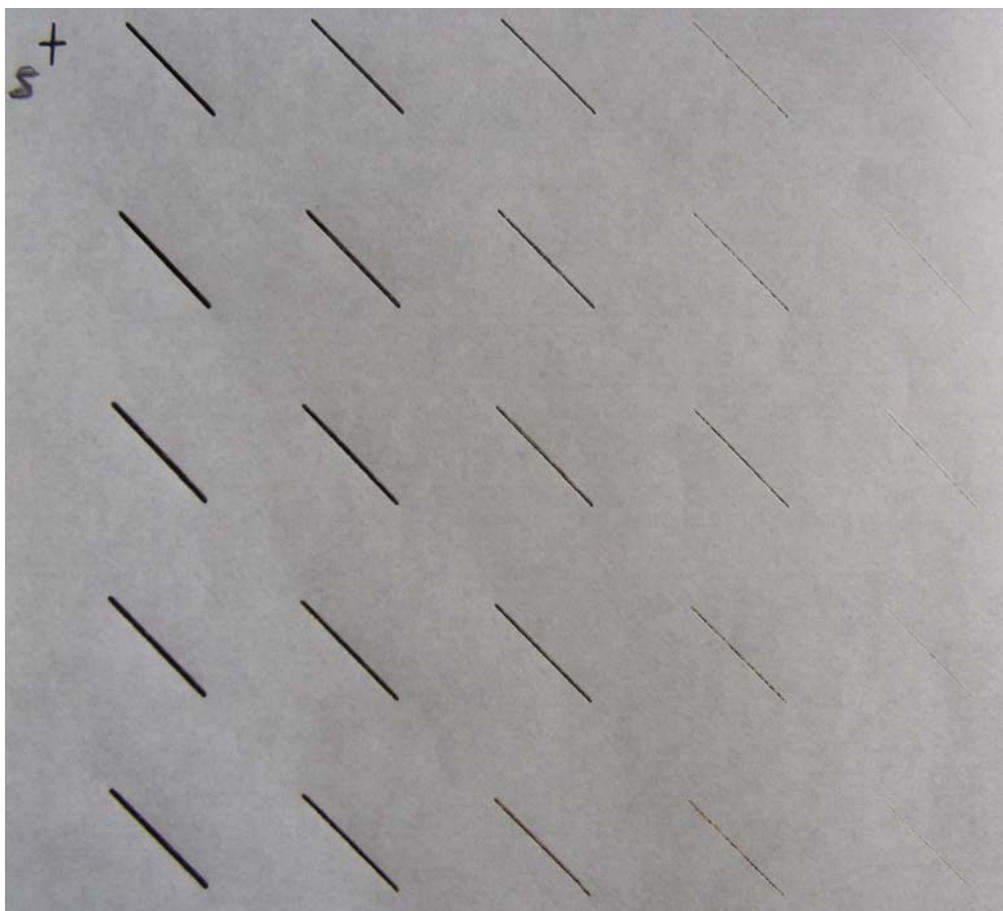


Fig. 35 griglia incisioni sfuocato 20 mm

Da questi si nota una più marcata differenza tra le colonne che ci porta ad affermare che la dimensione dello spot sicuramente influenza, come preventivato, il risultato ottenibile. In particolare si nota che si ottiene l'incisione passante e quella non passante alle stesse velocità della prova a fuoco mentre si ottiene l'indebolimento a velocità più basse (addirittura alle velocità con cui si riusciva ad avere indebolimento nella prova a fuoco in

questo caso non si ha praticamente asportazione di materiale). Pertanto si è concluso la grandezza dello spot influenza solo l'innesco dell'ablazione che una volta in essere provoca gli stessi effetti che si ottengono con medesime velocità di passata e potenza di uno spot più piccolo.

Inoltre misurando la larghezza delle incisioni ottenute con la lavorazione a fuoco, ci si è accorti che queste coincidono con il diametro dello spot dichiarato dal costruttore del marcatore. Quindi misurando la larghezza delle incisioni ottenute con la lavorazione fuori fuoco si è risalito alla dimensione dello spot e si è concluso che, con spot di 0.37 mm si ottengono gli stessi risultati di incisione passante e parziale ottenibili con lo spot focalizzato 0,29 mm, mentre se si vuole ottenere un indebolimento si dovrà andare più piano.

Si è infine concluso che i parametri della lavorazione definiti dalla prova a fuoco sono utilizzabili anche con diametri dello spot di 0,37 mm. Questo perché si è constatato che alle densità di potenza relative queste dimensioni dello spot, il materiale reagisce allo steso modo.

Definizione regime di generazione fascio

La potenza appena definita è estrapolata partendo da una sorgente con un regime di emissione continuo. Questo potrebbe condizionare le considerazioni fatte fin'ora infatti, se si lavora invece in regime di emissione pulsato si hanno potenze di picco più alte ed è quindi possibile che gli effetti sul materiale siano diverse, ottenendo magari gli stessi risultati con una sorgente di minore potenza.

Il regime pulsato tipico delle sorgenti laser a CO₂ può avere impulsi con una frequenza che va da 5kHz a 100kHz, questi se vengono utilizzati muovendo il punto di focalizzazione con velocità elevate rischiano di generare una serie di punti allineati invece che un'incisione con spessore uniforme. In effetti considerando avere un tipico regime di emissione a 5kHz si ha che in un millimetro si realizzano andando ad una velocità di 1300 mm/sec

$$5000/1300=3,84 \text{ impulsi/mm,}$$

con una conseguente irregolarità del profilo dell'incisione, specialmente se il diametro dello spot è molto piccolo, l'immagine che seguente rappresenta il risultato ottenuto provando un dispositivo che opera in regime impulsato (fig.36).



Fig.36 incisione regime impulsato

Se invece, si utilizzano impulsi con frequenze più alte, si possono ottenere in teoria profili migliori. In realtà però non tutti gli impulsi generati dalla sorgente presentano la stessa potenza di picco quindi anche se si riesce ad avere una serie di punti parzialmente sovrapposti con sorgenti molto impulsive si può lo stesso ottenere un profilo non uniforme.

Quindi essendo la potenza richiesta non elevata si è deciso di considerare sorgenti laser che consentono di operare in regime di emissione in continua.

A riguardo di ciò si osserva che le sorgenti laser a CO₂ come accennato nel paragrafo “tipi di laser”, sono molto industrializzate e presentano diverse tipologie costruttive. Ognuna di queste garantisce oltre ad una diversa qualità del fascio e un certo livello di potenza erogabile, anche un range di regimi di emissione diverso a seconda della tipologia costruttiva .

In particolare una sorgente laser a CO₂ può essere:

- a cavità ottica a flusso;
- a cavità ottica sigillata.

Le sorgenti a flusso continuo di gas possono essere eccitate sia in continuo che in modo impulsato con frequenze che possono arrivare a 2kHz.

Per le sorgenti sigillate, invece alcuni produttori riescono, eccitando la cavità risonante in radio frequenza, ad ottenere regimi di emissione molto pulsati (fino a 25kHz) aumentando poi la pressione del gas all’interno delle cavità risonante riescono a raggiungere regimi impulsati fino a 100kHz. Questa tipologia costruttiva, chiamata slab(fig.37), non consente di operare in un regime di emissione puramente continuo, perché l’eccitazione è in radiofrequenza, ma solo in regime continuo simulato, generato andando a far operare la sorgente alla frequenza massima e aumentando al massimo la durata del impulso(duty cycle). Per quelle ad alta pressione questo regime non può essere sfruttato.

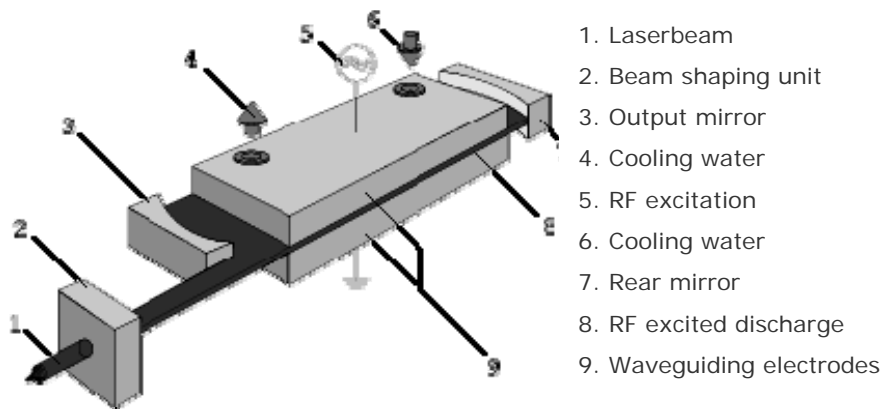


Fig. 37 sorgente laser sigillata slab

Sembra quindi che le sorgenti più adatte all'applicazione in studio che richiede velocità di passata abbastanza elevate sia quella a con cavità non sigillata che garantisce regimi di emissione continui. questo tipo di sorgenti però sono molto ingombranti, in quanto necessitano di un impianto di ricircolo del gas (che viene consumato durante la generazione laser), perciò non possono essere utilizzate nel nostro caso. Si è pertanto scelto di utilizzare una sorgente sigillata a bassa pressione che permette di simulare il funzionamento con emissione in continuo e nel contempo, si presentano in genere più compatte di quelle a flusso.

Definizione raffreddamento

Le sorgenti laser CO₂ sigillate, avendo rendimenti bassi (complessivamente 4%) generano un elevato calore (le potenze di nostro interesse si devono smaltire circa 2300W) che deve essere smaltito opportunamente per garantire l'integrità della sorgente.

I produttori di sorgenti propongono per le potenze fino a 100W sia sistemi di raffreddamento a liquido che sistemi di raffreddamento ad aria. Essendo la potenza precedentemente definita proprio di 100W si è dovuta fare una scelta su che tipo di raffreddamento utilizzare.

Il sistema di raffreddamento ad acqua presenta sicuramente un'affidabilità più alta perché la sua efficienza è garantita anche in condizioni ambientali "estreme" per contro, però, questo tipo di raffreddamento presenta degli ingombri notevoli infatti si deve prevedere l'istallazione di un chiller (gruppi refrigeratori d'acqua a compressione) e di una serie di collegamenti idraulici tra la sorgente, il generatore RF e appunto il chiller

Il sistema di raffreddamento ad aria consiste invece, in una serie di ventole montate direttamente sulla sorgente e sul generatore RF che presentano a loro volta un'alettatura sulle superfici esterne, presenta pertanto di ingombro nettamente inferiore rispetto al sistema a liquido. Per contro però, questo tipo di raffreddamento è molto condizionato dalle condizioni ambientali che non devono superare certi limiti (in genere la temperatura ambiente massima ammessa è 40 °C). Inoltre, se l'ambiente di lavoro è molto polveroso, possono verificarsi degli accumuli di materiale tra le alettature che fanno diminuire l'efficienza del sistema di raffreddamento.

Dalle osservazioni sopra si deduce che la scelta del sistema di raffreddamento non è così semplice come potrebbe sembrare, infatti entrambe le tipologie presentano vantaggi e svantaggi molto condizionati. Si è deciso, così, di utilizzare nella prima versione della stazione di lavoro (che sarà una versione sperimentale) un sistema di raffreddamento ad aria così da valutare se in effetti le condizioni ambientali sia di temperatura che di polverosità, siano nel caso in esame condizionanti.

2.3.7. Scelta sorgente da acquistare

La sorgente laser con le caratteristiche appena definite è disponibile nei cataloghi di molti produttori di sorgenti con caratteristiche leggermente diverse tra di loro. Si è dovuta quindi scegliere quale sorgente acquistare, tra quelle proposte da: Rofin (serie sc x10); Synrad (serie t100); Universal (serie ULCR-100)(fig.38).

Per fare questa scelta si sono confrontati:

- gli ingombri;
- il prezzo;
- il tipo di raffreddamento proposto;
- intercambiabilità tra i tipi di raffreddamento;
- caratteristiche del fascio generato.(stabilità di potenza, diametro del fascio, M^2 , divergenza Rise Time)

Per avere una visione immediata questi parametri (riportati nei data sheet reperibili anche su internet) sono stati riportati nella tabella seguente

		Rofin sx10	Synrad t100	Universal ULCR-100
Costo		30.000 euro	10600 euro	11900 euro
Potenza		100W	100W	100W
Stabilità di potenza		±7%	±7%	±5%
Diametro del fascio		3.8 ±0.4 mm	2.2 ± 0.2mm	4 ± 1mm
Divergenza		7.0mR	7.0mR	5 ± 1 mrad
M ²		<1.2±0.1	<1.1 ±0.1	<1.3 ± 0.2
Rise or Fall Time		<75µsec	<75µsec	<120 ± 40 µsec
Raffreddamento		Water	Air/Water	Air/Water
ingombri	Alimentatore RF	371x255x270	444 x 330 x 164	Integrati 864x270x192
	Sorgente	791x222x171	571 x 196 x 159	

Tab. 7 confronto laser CO2



Fig. 38 laser Rofin, Universal, Synrad

Analizzando la tabella e disegni di ingombro forniti, si è deciso di utilizzare la sorgente della synrad perché:

- 1) ha una sorgente molto compatta separata dal generazione RF (con sicuri vantaggi di posizionamento e di smaltimento del calore)
- 2) presenta una struttura di fissaggio standard che permette

l'intercambiabilità sia tra la versione raffreddata ad acqua e ad aria e sia tra versioni di differenti potenze

- 3) presenta caratteristiche del fascio molto buone (quando non superiori paragonabile alle altre)
- 4) un prezzo inferiore alle altre sorgenti.

2.4. Determinazione della gestione del fascio

Definita la sorgente laser ci si è concentrati sull'aspetto che garantisce ai sistemi laser la flessibilità che li caratterizza. Si sono, cioè, determinati sulla base delle esigenze richieste dall'applicazione in esame, i dispositivi e i componenti che permettono di gestire il fascio. Pertanto, si sono definiti in dettaglio i parametri da rispettare e sulla base di questi si è provveduto a:

- scegliere i componenti commerciali da acquistare
- definire alcuni parametri costruttivi della parte da realizzare internamente

2.4.1. Determinazione dispositivo di movimentazione del fascio

La flessibilità richiesta alla stazione di lavoro che si sta definendo richiede che questa sia in grado di avere, oltre alla ripetibilità voluta la capacità di gestire:

- il cambio della forma della lavorazione;
- il cambio della lunghezza della lavorazione;
- il cambio della posizione relativa della lavorazione.

Il sistema di movimentazione del fascio deve quindi essere in grado di gestire questi fattori senza perdere in efficienza, cioè senza che si perda la capacità di realizzare la lavorazione voluta ad una determinata velocità .

Ad esempio, il sistema per quando definito in precedenza, (con una sorgente laser a CO₂ da 100W) deve riuscire a realizzare una semi incisione sul materiale scelto con una velocità massima di $100 \times 20 = 2000$ mm/sec, (20 rapporto velocità potenza relativo alla semi incisione).

Si è dedotto, pertanto che, il sistema di movimentazione non può essere un sistema cartesiano come quelli usati nelle macchine per il taglio laser per metalli, che possono arrivare a velocità di 1m/s, ma dovrà essere, del tipo di quelli usati comunemente nei marcatori laser, cioè un sistema costituito da una

testa di scansione galvanometrica. Questa, infatti, garantisce la velocità di movimentazione del fascio, riflettendolo su due specchi montati alle estremità di altrettanti galvanometri (comandati per mezzo di segnali analogici o digitali) (fig.39), che muovendosi a velocità angolari fino a 35rad/s, permettono di raggiungere velocità lineari molto elevate su superfici relativamente non distanti. Ad esempio ad una distanza di 100mm si possono avere velocità di, $35\text{rad/sec} \cdot 100\text{mm} = 3,5 \text{ m/sec}$.

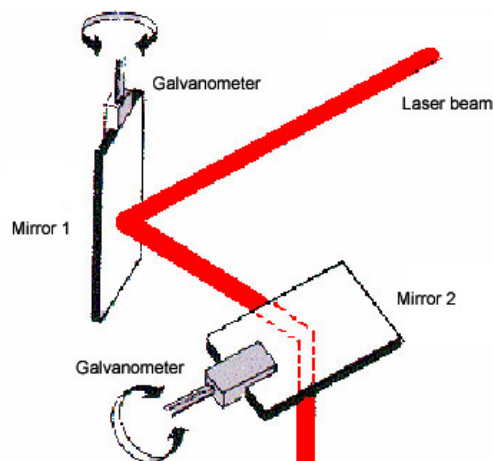


Fig. 39 sistema galvanometrico

I sistemi di scansione galvanometrici, in genere costituiti dal sistema di movimentazione accoppiato con il sistema di focalizzazione, sono caratterizzati in base :

- alla lunghezza d’onda del fascio da movimentare, infatti ogni lunghezza d’onda, per essere riflessa, richiede, specchi e lenti sia di diverso materiale che di diverso trattamento superficiale;
- alle dimensioni del fascio che riescono a processare, infatti per ogni diametro del fascio si utilizzano specchi di dimensioni più piccoli possibili, al fine di limitare le azioni inerziali, molto condizionanti in questo tipo di applicazione;
- al tipo di area di lavoro che riescono a coprire, perché a seconda del tipo di ottica utilizzata si può ottenere la focalizzazione solo su un piano (sistemi bidimensionali) o su più piani (sistemi tridimensionali).

Si vede subito che, il sistema di scansione galvanometrico per ora, può essere definito solo parzialmente, in quanto, anche conoscendo la lunghezza d’onda del fascio laser che si utilizzerà (CO2 con lunghezza d’onda di $10,6\mu\text{m}$) non è

ancora stata definita l'area di lavoro e il diametro del fascio. Queste dipendono da fattori che verranno approfonditi più attentamente nei prossimi paragrafi e che riguardano, rispettivamente, caratteristiche costruttive e caratteristiche ottiche.

Pertanto si è, determinato solo il materiale e il trattamento superficiale delle lenti e degli specchi.

Per quanto riguarda le lenti, basandosi sulle esperienze lavorative di alcuni dipendenti G.D e sulle informazioni ricavati da pubblicazioni sul argomento [18] si è deciso di utilizzare lenti in seleniuro di zinco (ZnSe) con un coating superficiale antiriflesso. Tale scelta trova motivazione nel fatto che questo cristallo così trattato permette di trasmettere più del 99% dell'energia disponibile, inoltre, al contrario di altri materiali usati comunemente per questo tipo di lenti (germanio che trasmette radiazioni con lunghezze d'onda da 1.8 a 23 micron), trasmette anche lunghezze d'onda nel visibile (da 0.6 a 21.0 microns) dando così la possibilità di implementare nel sistema un dispositivo che, attraverso un emettitore laser nel visibile di bassa potenza, permetta di avere un'anteprima del percorso della radiazione di potenza senza avere problemi di sicurezza.

Per ciò che concerne gli specchi, si è deciso di utilizzare quelli in berillio Be perché presentano, come esposto anche in [19], vantaggi considerevoli in termini leggerezza, rigidità, buona conducibilità termica che consentono una considerevole ottimizzazione delle dimensioni degli specchi e di conseguenza delle velocità di scansione.

2.4.2.Determinazione dell'area di lavoro

I sistemi di scansione, appena descritti, muovono il fascio agendo sugli angoli di rotazione dei due galvanometri. In questo modo, essendo gli angoli massimi di scansione dei galvanometri definiti da le loro caratteristiche costruttive, riescono a coprire sul piano di focalizzazione una area che può essere al massimo quadrata.

Questa considerazione, ha permesso, subito, di definire l'area di lavoro, infatti, essendo la larghezza massima del materiale, su cui deve essere fatta la lavorazione, pari a 300mm ed essendo richiesta la possibilità di poter spostare

la lavorazione lungo tutta la larghezza del materiale, si è determinato che l'area di lavoro dovrà essere di 300x300mm. Il tutto compatibilmente alle caratteristiche del ottica che si definiranno successivamente.

Si nota inoltre che l'area di lavoro influisce in modo positivo sui vincoli temporali a cui si è fatto riferimento fino a questo momento, infatti essendo maggiore del doppio della lunghezza di svolgitura (passo della lavorazione) aumenta l'area a disposizione per effettuare la lavorazione, così come si può vedere nello schema riportato nella figura che segue.(fig.40)

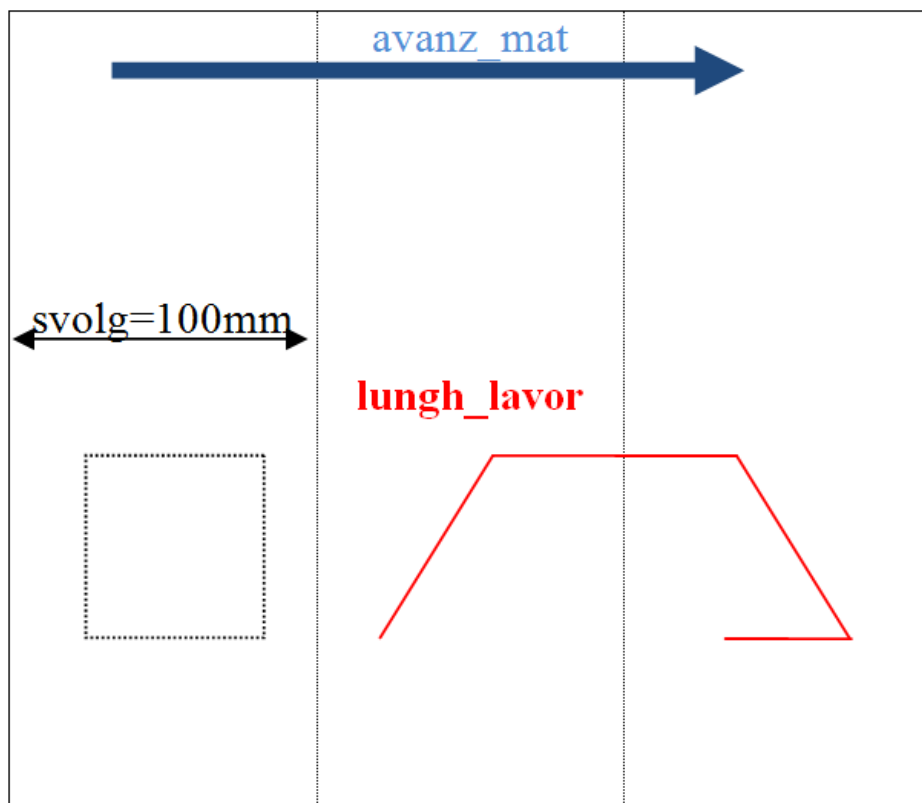


Fig. 40 Area di lavoro doppia

Si può a questo punto pensare di riuscire a fare le lavorazioni richieste senza preoccuparsi di uscire fuori dall'area di lavoro.

Questa considerazione dando ancora più flessibilità al sistema che si sta realizzando, consente all'area di lavoro, definita prima, di diventare un parametro estremamente importante.

2.4.3.Determinazione dei componenti ottici e del sistema di scansione

Come anticipato, per definire completamente il sistema di scansione bisogna, determinare le caratteristiche dei componenti di focalizzazione che lo

compongono.

In particolare si deve definire prima di tutto se utilizzare un sistema 2D o 3D, perché a seconda del tipo cambia sia la disposizione che il tipo di componenti ottici da definire.

La focalizzazione in un sistema di scansione 2D è ottenuta con una lente posta dopo il secondo specchio di riflessione. Questa focalizza il fascio in entrata su un piano normale all'asse della lente, ciò è reso possibile dalla particolare forma di quest'ultima che le permette a seconda dell'angolo d'incidenza del fascio Θ di variare la distanza focale F in modo da riportare il punto di focalizzazione, che altrimenti si troverebbe su una superficie sferica, su un piano. Queste particolari lenti vengono perciò chiamate lenti F-Theta.

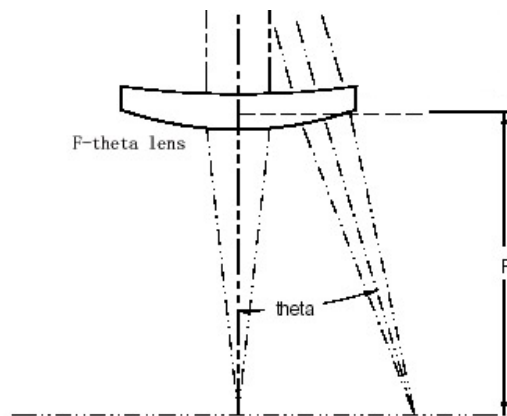


Fig. 41 sistema di focalizzazione 2D

La focalizzazione nei sistemi di scansione 3D è ottenuta con due lenti, una fissa e l'altra azionata con un dispositivo lineare. Queste poste prima degli specchi, permettono la correzione della focalizzazione su un piano e la variazione del piano di focalizzazione durante la lavorazione.

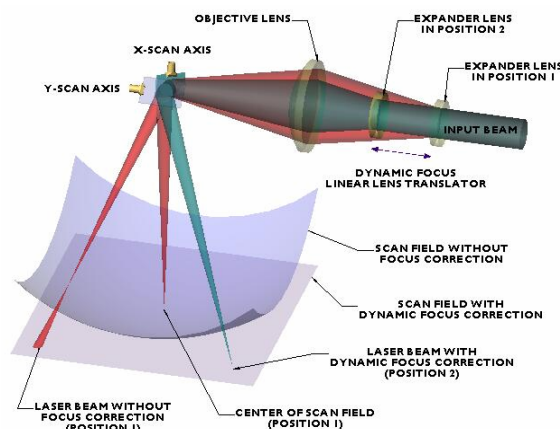


Fig. 42 sistema di focalizzazione 3D

Tali sistemi, anche essendo molto flessibili, garantiscono velocità inferiori

rispetto ai sistemi di scansione 2D , perchè:

- richiedono specchi di grandi dimensioni, per gestire, a seconda della distanza di focalizzazione, diverse dimensioni del fascio incidente sugli specchi;
- il dispositivo di movimentazione della lente presenta velocità minori rispetto a quelle raggiungibili dai galvanometri.

Perciò, dovendo lavorare sempre materiali sottili che ben si adattano ad essere lavorati su una superficie fissa, si è deciso di adottare il sistema di scansione bidimensionale che mette a riparo da limiti di velocità imposti dal sistema di scansione.(fig.43)

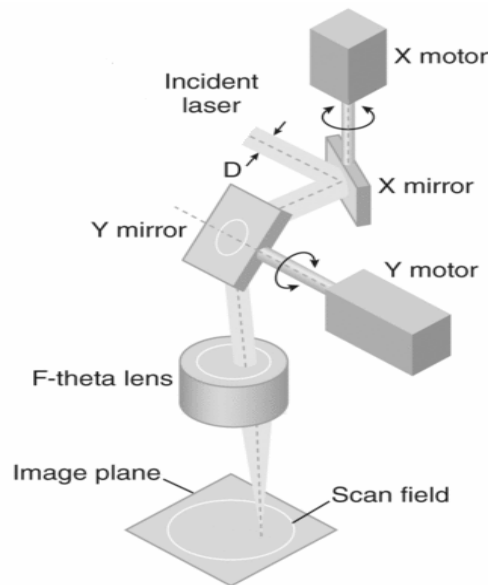


Fig. 43 sistema di di scansione galvanometrico

Pertanto si sono definite le caratteristiche della lente F-Theta che sono la distanza focale che permette di lavorare l'area di lavoro determinata in precedenza, e il diametro del fascio incidente che definisce insieme alla distanza focale il diametro dello spot.

A tal proposito consultando diversi cataloghi di lenti F-Theta, si è notato che quelle che garantiscono una focalizzazione su aree di lavoro uguali a quella definita in precedenza (300x300mm) sono molte e si differenziano per dimensioni dello spot che generano, per distanze di focalizzazione e per diametri del fascio in entrata. Infatti, come si può ricavare dalla teoria della diffrazione, la dimensione dello spot è legata a gli altri fattori dalla seguente relazione

$$d=4M^2\lambda f/\pi D$$

ed è quindi:

- inversamente proporzionale al diametro del fascio in ingresso D
- direttamente proporzionale alla distanza focale f alla lunghezza d'onda λ e la qualità del fascio M^2 ,

ovvero, come mostrato nella (fig.44), diminuisce se il fascio in ingresso è grande, aumenta se la distanza focale aumenta.

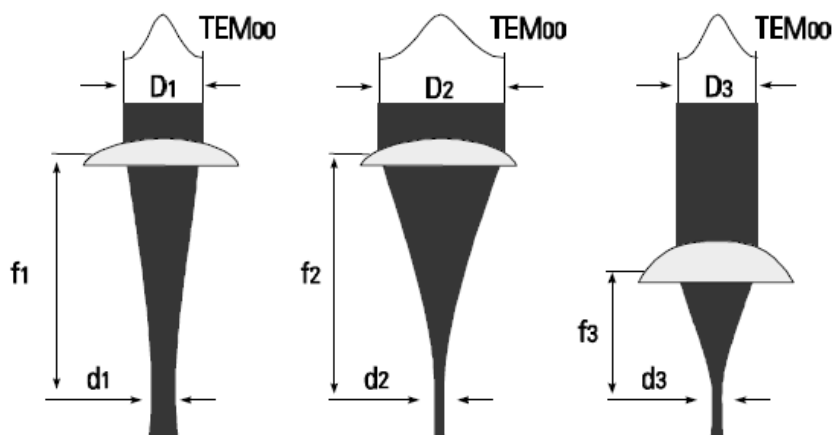


Fig. 44 focalizzazione fascio

Essendo la lunghezza focale dipendente dall'area di lavoro richiesta, perché legata a quest'ultima dal massimo angolo d'incidenza del fascio in ingresso, se si vogliono, come è preferibile, dimensioni dello spot piccole, si deve avere un diametro del fascio in ingresso grande, questo però, come detto, condiziona la velocità dei galvanometri.

Si è selezionata pertanto una lente che avesse le seguenti caratteristiche per avere il giusto compromesso

Materiale	ZnSe con coating AR/AR
diametro lente	70 mm
Distanza focale	419,9 mm
Distanza di flangiatura	432,1 mm
Diametro del fascio in ingresso	20 mm
Area di lavoro	300x300mm
Dimensioni dello spot	350 mm

Tab. 8 caratteristiche lente F-Theta

Questa, anche avendo uno spot più grande di quello con cui si sono fatte le prove sperimentali, permette di avere in ingresso nella testa di scansione, un fascio di diametro non eccessivamente elevato è di conseguenza buone prestazioni di velocistiche.

Questa scelta è stata fatta perché, come si è visto nelle prove preliminari, l'aumento del diametro dello spot influisce poco sui tipi di lavorazione che si devono realizzare.

Una volta deciso anche il diametro del fascio processato dal sistema galvanometrico, si sono definite tutte le caratteristiche che hanno consentito di selezionare, tra tutte quelle disponibili sul catalogo di diversi produttori, la testa di scansione prodotta dalla general scanning e che ha le caratteristiche riportate in seguito. Questa rispetto a tutte le altre presenta un controllo digitale dei galvanometri che consente di avere sia un controllo migliore che una verifica costante con successiva auto regolazione dello stato dei galvanometri.

Dimensione fascio in ingresso	20 mm
Velocità tipica di marcatura	9,3 rad/sec
Velocità tipica di jump	43,75 rad/sec
Angolo di scansione max	$\pm 20^\circ$
Protocollo di comunicazione digitale	XY2-100
Peso	~ 5 kg
Materiale specchi	Be
Focale lenti montabili	163-254-330-420

Tab. 9 caratteristiche testa di scansione

A questo punto si nota che il diametro del fascio prodotto dalla sorgente synrad definita in precedenza ($2.2 \pm 0.2\text{mm}$) è diverso dalle dimensioni del fascio in ingresso nella testa di scansione (20mm). Questo problema può essere superato facilmente utilizzando un dispositivo chiamato beam expander di comune impiego nei sistemi laser che allarga il diametro del fascio in ingresso attraverso due lenti allineate. La prima con le superfici entrambe concave che sfuoca il fascio e la seconda con superfici entrambe convesse che posta ad un'opportuna distanza ricollima il fascio con un diametro più grande(fig.45).

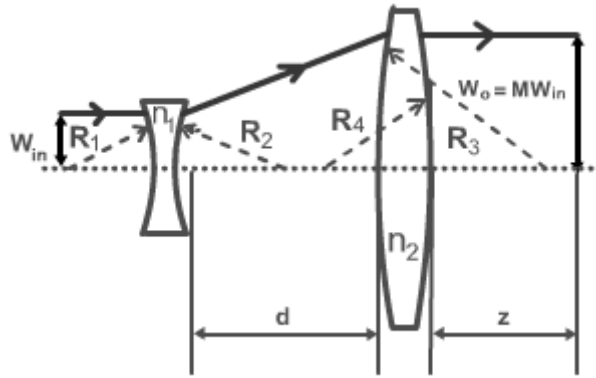


Fig. 45 schema beam expander

Questi dispositivi si caratterizzano a seconda del fattore d'ingrandimento M che identifica il rapporto tra il diametro del fascio in uscita e il diametro del fascio in ingresso. Di conseguenza nel caso in esame deve avere un fattore d'ingrandimento

$$M=20/2,2\approx 9.$$

Cercando nei cataloghi dei produttori di questi dispositivi se n'è individuato uno con un fattore d'ingrandimento $M=9,4$, che si è deciso di utilizzare perché anche se consente di ottenere un diametro massimo in uscita di 22,56mm relativo al massimo diametro prodotto dalla sorgente 2,4 mm, si può riportare facilmente il diametro del fascio alle dimensioni desiderate, predisponendo all'uscita del beam expander, un'apertura circolare da 20mm che, insieme all'apertura della testa di scansione, riesce a profilare il fascio in ingresso schermando la parte più esterna del fascio laser che ha minor intensità (profilo del fascio è gaussiano). Un dispositivo del genere è comunemente usato per profilare i fasci prodotti dalle sorgenti asimmetriche in modo da escludere onde di diffrazione che si generano quando un'onda attraversa un'apertura.

2.4.4. Definizione dei componenti commerciali di controllo

Come si è accennato in precedenza, la testa di scansione è controllata attraverso segnali analogici o digitali che fanno muovere i galvanometri. Questi sono generati da un hardware controllato, attraverso un protocollo standard (per i segnali digitali) chiamato XY2-100 e da una scheda elettronica a sua volta gestita da un software.(fig.47)

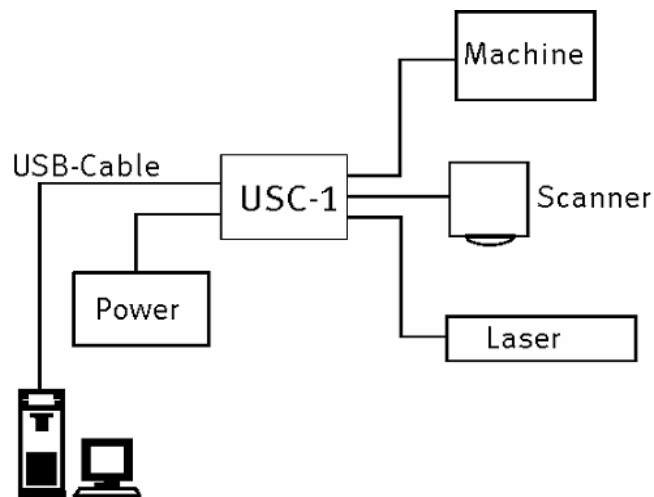


Fig. 47 schema componenti di controllo testa di scansione

Esistono però in commercio diverse tipologie sia di software che di hardware basati sul protocollo XY2-100, si è dovuto pertanto fare una scelta anche di questo tipo di componenti.

Questa scelta è stata fatta con la collaborazione dell'ufficio di esperimenti elettrici, che ha fornito una serie di parametri, la loro valutazione e l'assistenza necessaria per le prove che sono state fatte con una testa di scansione messa a disposizione, in conto visione, da un fornitore(fig.48).

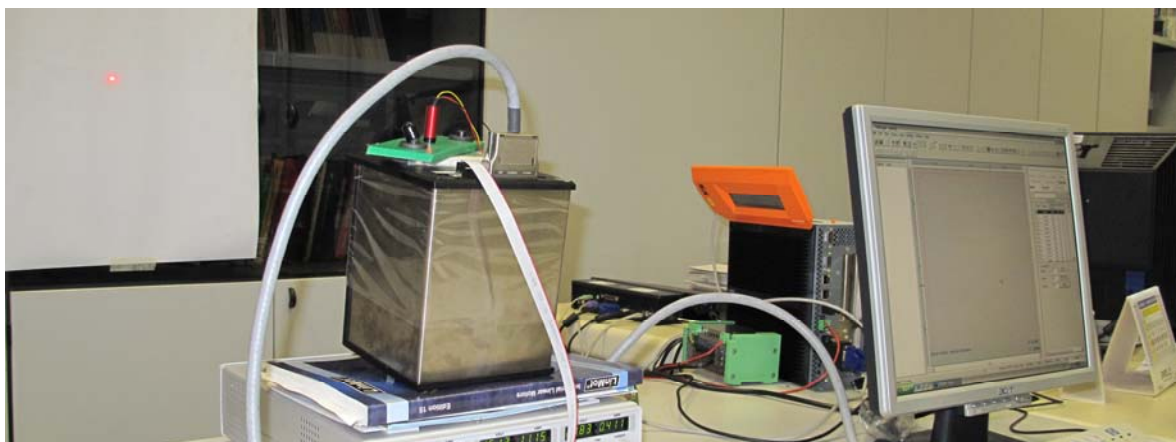


Fig. 48 prove testa di scansione

In particolare si sono analizzate:

- le caratteristiche dei diversi dispositivi hardware, richiedendo una completa e semplice interfacciabilità, sia con le periferiche della stazione di lavoro che con quelle comunemente utilizzate in azienda;
- le funzioni implementate nel software, per svolgere una serie di operazioni che sono state ritenute fondamentali.

Per ciò che riguarda le caratteristiche del hardware, esso dovrà sicuramente

avere:

- un ingresso encoder, per poter gestire la lavorazione in movimento;
- la possibilità di connessione ad un PC tramite cavo di rete o USB, per rispettare gli standard aziendali;
- la possibilità di controllare i parametri di emissione della sorgente laser, per non implementare un ulteriore hardware di controllo specifico;
- un segnale generato di carattere digitale, per poter gestire la testa di scansione scelta.

Per quanto riguarda il software, provandone alcuni, si è deciso che le caratteristiche base da richiedere sono:

- La possibilità di importazione di formati vettoriali standard (dwg, dxf, ...), così da poter gestire i cambiamenti di forma della lavorazione anche lontano dalla stazione di lavoro, perché questa una volta implementata in macchina può trovarsi in diverse parti del pianeta;
- La possibilità di associare ai diversi layer dei formati vettoriali dei parametri di lavorazione specifici, così da poterli gestire anche questi ultimi in zone diverse da quelle dove si trova la stazione di lavoro;
- La possibilità di ottimizzazione manuale o automatica del percorso e della sequenza di taglio, perché si è notato che, durante le prove fatte con la testa di scansione a disposizione, il tempo di lavorazione, specialmente di forme composte da più linee, è molto influenzato da questi due fattori. Infatti, come si può vedere anche in figura sotto (fig.49), quando si deve fare la lavorazione su un materiale in movimento se questa è fatta andando in contro all'avanzamento del materiale si ottiene un percorso più corto e viceversa il contrario.

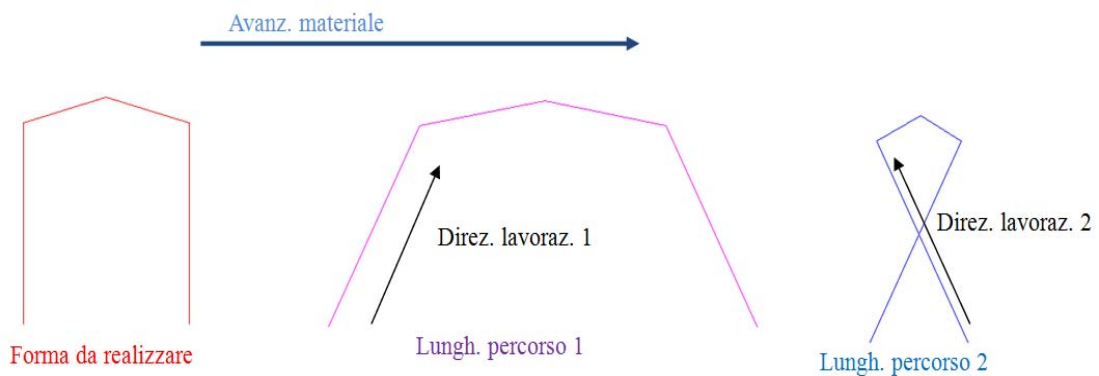


Fig. 49 verso passata-lunghezza percorso

Inoltre, essendo la realizzazione di più linee separate ottenuta attraverso una successione di tratti con sorgente accesa oppure spenta, si ha che la sequenza con cui si realizzano i vari tratti, condiziona notevolmente la lunghezza del percorso e quindi il tempo di lavorazione (fig.50).

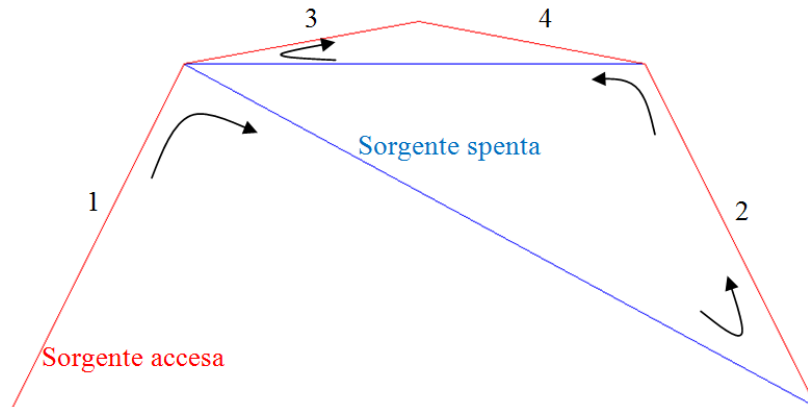


Fig. 50 sequenza incisione - lunghezza percorso

– La possibilità di gestire in modo efficace i cambi di direzione necessari per realizzare tagli di linee spezzate, perché si è notato durante le prove che, aumentando la velocità di scansione si generano, in corrispondenza di cambi di direzione bruschi, effetti di distorsione del percorso, dovuti alle inerzie degli specchi.

La scelta quindi è ricaduta sul pacchetto offerto dalla SCAPS che presenta, una scheda di controllo (fig.51) con tutte le caratteristiche richieste e in più la possibilità di memorizzare in una memoria interna un file di lavoro che le consente di controllare la testa di scansione senza che sia collegata ad un calcolatore e un software SAM LIGHT (fig.52) che soddisfa tutte le specifiche elencate in precedenza

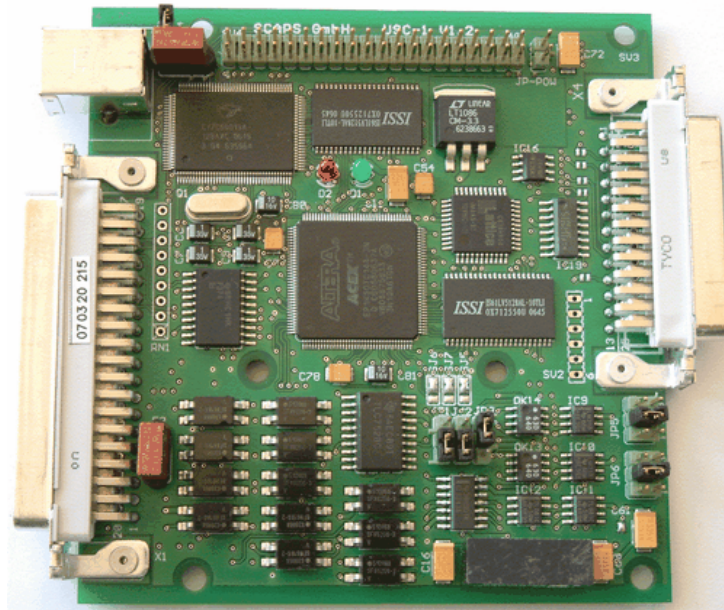


Fig. 51 hardware SCAPS

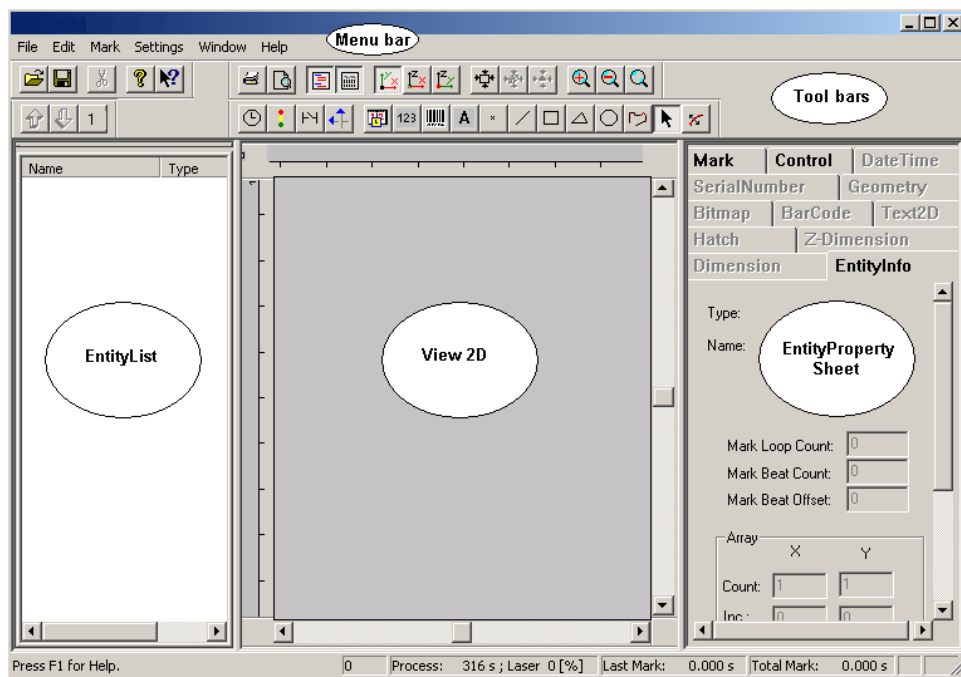


Fig. 52 software SamLight

2.4.5. Definizione beam combiner

Dalle prove fatte con la testa di scansione avuta a disposizione, si è apprezzata l'utilità di avere un sistema che permetta di vedere, in completa sicurezza, un'anteprima della lavorazione che si deve fare sul materiale. Infatti, come si vede anche dall'immagini nella pagina seguente (fig.53), durante le prove si è predisposta in corrispondenza dell'apertura della testa di scansione un puntatore laser di bassissima potenza che, comandato come se fosse la

sorgente si potenza, ha permesso di valutare in completa sicurezza tutti i parametri precedentemente esposti.

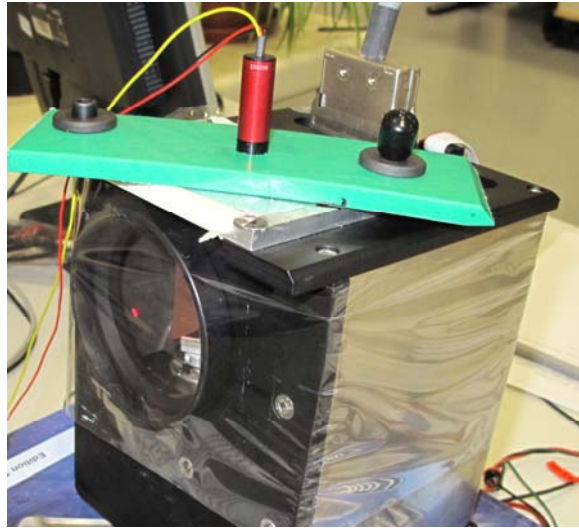


Fig. 53 puntatore per prove testa di scansione

Si è deciso pertanto, di dotare anche la stazione di lavoro con un dispositivo dello stesso tipo. Per fare ciò, si è valutato dapprima una serie di dispositivi commerciali proposti da diversi produttori. questi però sono stati immediatamente considerati non conformi al sistema in progettazione, perché si presentano tutti come parti di sistemi modulari di trasporto del fascio cioè mostrano tutti connessioni e dimensioni che condizionerebbero molto la configurazione del sistema in progettazione che per le specifiche date deve essere il più compatto possibile. Successivamente riscontrando che questo tipo di dispositivo non presenta particolari problemi costruttivi si è deciso di costruirselo internamente. Infatti questi sono composti fondamentalmente da un puntatore laser, del tipo di quelli usati nelle prove della testa galvanometrica, che va far incidere il fascio prodotto su uno specchio disposto a 45° , chiamato beam combiner, che trasmette completamente la radiazione laser incidente dalla parte opposta di quella dove incide il fascio del puntatore, e riflette completamente il fascio del puntatore, così da ottenere l'inserimento del fascio del puntatore nel percorso del fascio della sorgente laser di potenza.

Ad avvalorare ancora di più la possibilità di costruirsi internamente un dispositivo che assolvesse a questo compito è stato anche il prezzo dei dispositivi commerciali (circa 2000euro) che sono sembrati eccessivi alla luce del fatto che, il prezzo dei due componenti fondamentali che li costituiscono sono notevolmente più bassi, circa 300 euro il puntatore, e circa 600 euro il

beam combiner.

Nell'analizzare il problema della realizzazione del dispositivo e ci si è accorti che gli unici aspetti a cui far fronte sono:

- La determinazione delle dimensioni dello specchio
- La determinazione della deviazione del fascio che attraversa il beam combiner, dovuto al fenomeno della rifrazione;
- il posizionamento angolare del puntatore rispetto allo specchio, che deve essere tale da garantire, dopo la riflessione sullo specchio, un perfetto parallelismo con il fascio prodotto dal fascio di potenza, così da avere una perfetta corrispondenza tra il punto di focalizzazione del fascio di potenza e quello di anteprima.

Per quanto riguarda il primo aspetto, considerando che lo specchio deve essere inclinato di 45° e che deve essere attraversato da un fascio di diametro pari a 20mm, si è cercato di trovare, nei cataloghi dei produttori di specchi, uno che avesse un diametro maggiore di $20 \cdot \sqrt{2} = 28\text{mm}$, così si è scelto di utilizzarne uno in ZnSe (materiale che come si è detto trasmette molto bene le radiazioni a 10.6 μm) con le caratteristiche seguenti (tab.10)

Diametro	38±0,05 mm
Spessore	3 mm
materiale	ZnSe

Tab. 10 caratteristiche beam combiner

Per quanto riguarda il secondo aspetto, trovando che l'indice di rifrazione del materiale dello specchio è pari a 2,4, calcolando la deviazione del fascio che attraversa lo specchio attraverso la seguente relazione

$$d = t \sin \alpha \left(1 - \frac{\sin \alpha}{n \cos \alpha} \right)$$

(t è lo spessore α l'angolo d'inclinazione n l'indice di rifrazione)

Si è definito che tra l'ingresso e l'uscita del fascio nel dispositivo di beam injector si avranno ≈1,5mm di spostamento verso l'alto (fig.54).

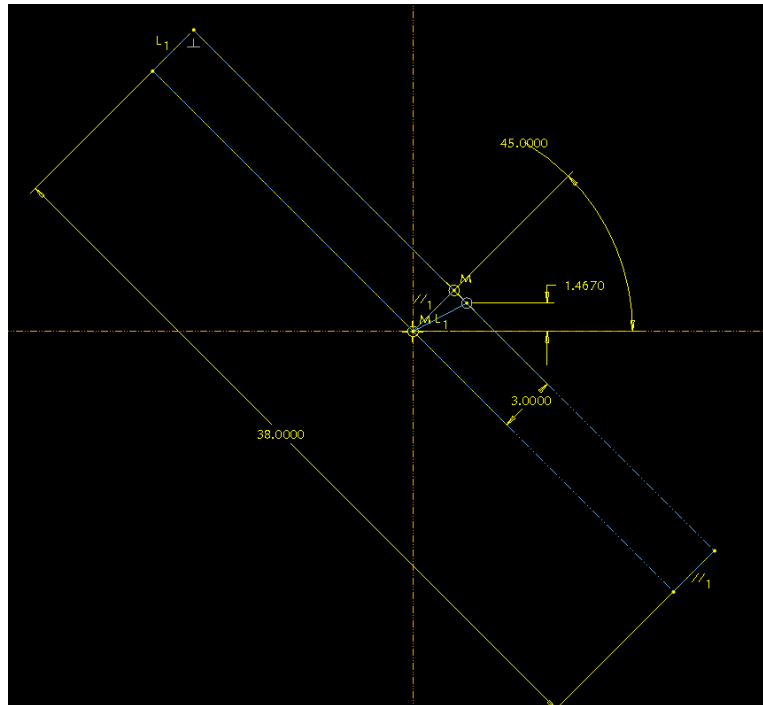


Fig. 54 deviazione fascio beam combiner

Infine, si è deciso di prevedere un dispositivo di allineamento del puntatore per regolare la sua posizione angolare rispetto allo specchio.

2.5. Costi e tempi di realizzazione

Definiti tutti i componenti commerciali che fanno parte della stazione di lavoro progettazione, si sono riassunti in una tabella tutti i componenti con i relativi costi e date di consegna così da avere contemporaneamente un valore della somma dei costi che una stima dei tempi entro cui dovranno essere disponibili anche i particolari realizzati internamente per poter, nel più breve tempo possibile cominciare le prove di valutazione finale.

Componente	Costo	Data consegna
Sorgente+alimentatore	10600 euro	15 giugno
Testa di scansione	3300 euro	13 luglio
Lente F-Theta	1500 euro	13 luglio
Software	1940 euro	6 luglio
Hardware	970 euro	6 luglio
Beam expander	1720 euro	13 luglio
Puntatore	300 euro	10 maggio
Beam combiner	390 euro	15 giugno
Totale	≈ 20720 euro	Ultimo comp. 6 luglio

Tab. 11 tempi e costi

Capitolo 3

Dimensionamento della stazione di lavoro

3.1. Raccolta informazioni per dimensionamento

Prima di iniziare il dimensionamento della stazione di lavoro si è ricercato, in tutte le macchine prodotte dalla G.D, di un'applicazione laser che potesse essere considerata simile a quella in esame, così da avere a disposizione un esempio da cui trarre spunto. Durante questa ricognizione, si è appreso che nelle macchine per la produzione di sigarette, realizzate in una business unit diversa da quella in cui è stato svolto questo lavoro, è presente un'applicazione laser che realizza i fori di aerazione sul lato delle sigarette. Questa applicazione però, anche se presenta la stessa tipologia di sorgente, si mostra molto diversa da quella in esame, perché è caratterizzata da una sorgente laser di potenza molto più alta (600W) e da una gestione del cammino ottico e della focalizzazione del fascio laser più, ingombrante e complessa, rispetto a quella che si vuole realizzare, perciò non la si è potuto considerare come esempio da seguire nel dimensionamento.

Di conseguenza, il lavoro di dimensionamento dell'applicazione è stato affrontato definendo prima un nuovo schema generale del gruppo che rispondesse alle esigenze di ingombro e poi, risolvendo in dettaglio le problematiche che sono venute alla luce analizzando i vincoli imposti dalle specifiche di progetto, quelli imposti dalle caratteristiche dei componenti scelti e quelli imposte dalle normative vigenti.

3.1.1. Definizione dello schema generale della stazione

Osservato che non esistono nelle macchine G.D un'applicazione che possa ritenersi simile a quella che si vuole realizzare, si è dovuto studiare uno schema preliminare da cui partire per il dimensionamento del gruppo.

Nella prima fase dello studio di questo schema, da tutti i dati a disposizione, si sono estrapolati i vincoli d'interfacciamento che la configurazione la stazione di lavoro deve rispettare tra stazione e macchina che tra componenti ciascun

componente.

I primi vincoli presi in considerazione sono stati quelli d'interfacciamento della stazione di lavoro con la macchina, questi sono:

- lo spazio massimo che la stazione di lavoro può occupare, definita da un volume posto ad un'altezza dal pavimento di 950 mm con base di dimensioni 1150x1400 mm e con profondità di 500mm limitata posteriormente da una piastra di riferimento;

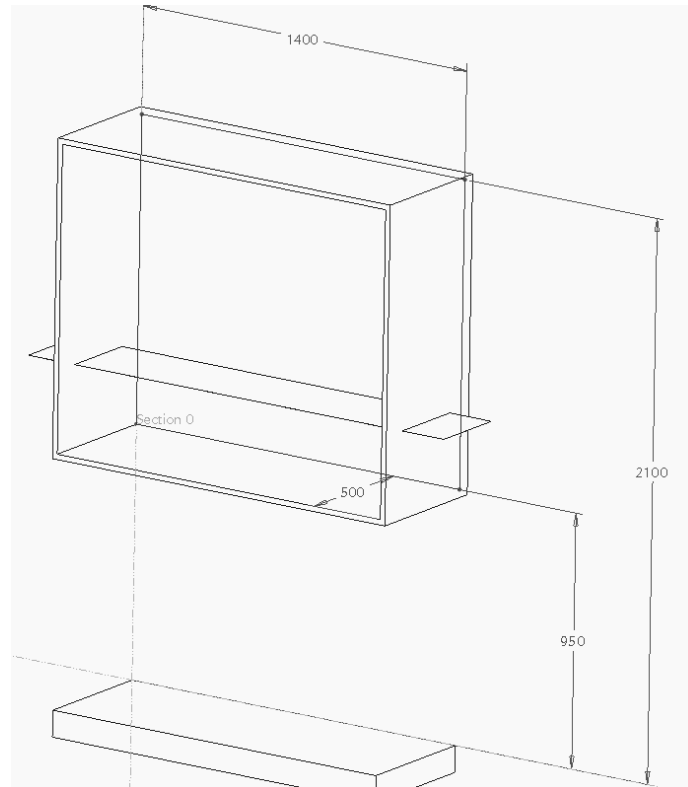


Fig. 55 ingombri macchina

- il posizionamento del materiale nella zona di macchina dove andrà a montarsi il gruppo, definito da un piano a 250 mm dalla piastra di riferimento e a 1210 mm dal pavimento;
- le dimensioni del materiale che sono al massimo di 300 mm di larghezza.

Considerando poi i parametri operativi e le dimensioni dei componenti scelti, si è cominciato a definire il loro posizionamento nello spazio a disposizione.

Per prima cosa si è considerato il posizionamento della testa di scansione, perché, avendo questa, montata in corrispondenza dell'uscita del fascio laser, la lente F-Theta, deve garantire con la sua posizione il giusto posizionamento della lente, sia in termini di centraggio che di distanza di focalizzazione rispetto all'area di lavoro.

Per quanto riguarda la distanza di focalizzazione, si è fatto riferimento ad un valore, presente nei dati relativi alla lente, chiamato working distance WD o flange focal length FFL, che rappresenta la distanza che deve intercorrere tra il piano di scorrimento del materiale e la superficie della testa di scansione su cui viene montata la lente per garantire la corretta focalizzazione.

Per quanto riguarda il centraggio della lente rispetto all'area di lavoro, si è fatto riferimento alla posizione del centro dell'ultimo specchio della testa di scansione (specchio d'uscita), perché questa definisce anche il centro della lente. Allineando poi il centro dello specchio con il centro dell'area di lavoro si ottiene automaticamente anche il centraggio della lente.

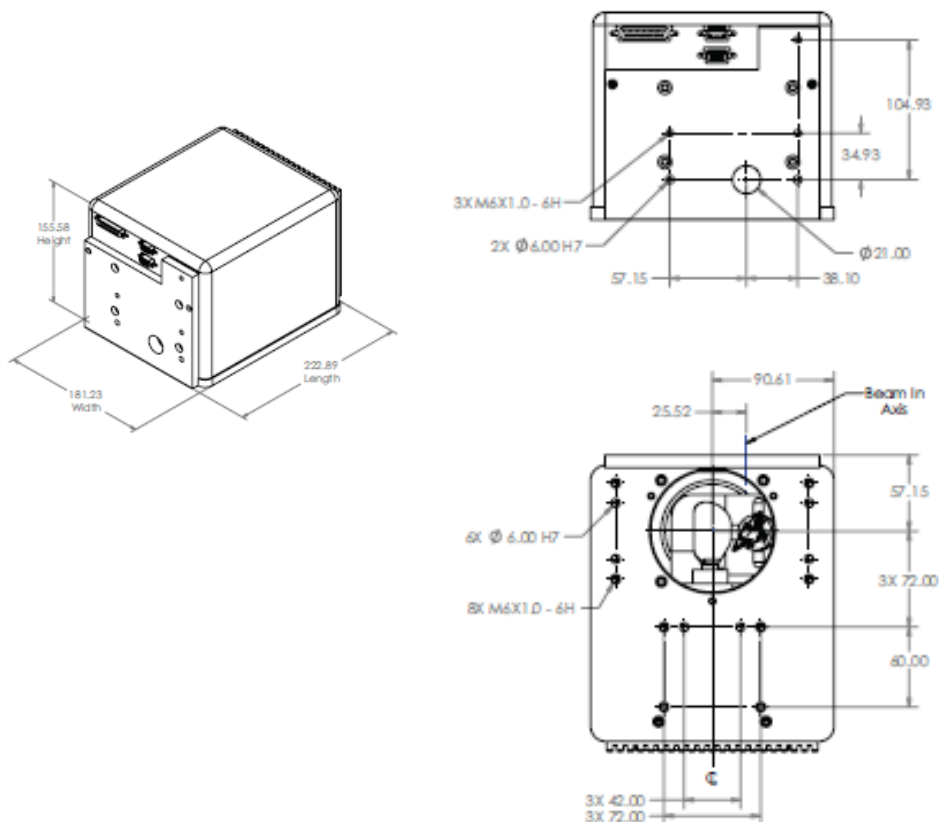


Fig. 56dimensione testa di scansione

La testa di scansione, riportata nel disegno sopra con le dimensioni d'ingombro e di montaggio, è stata posizionata con il piano di montaggio della lente ad una distanza dal piano di scorrimento pari a $WD=432.1$ mm e con il centro dell'ultimo specchio ad una distanza pari alla distanza del centro del materiale dalla piastra di riferimento posteriore che vale 250mm.

Definita la posizione della testa di scansione si è potuta determinare la posizione della sorgente laser facendo riferimento, ai vincoli relativi al

cammino ottico tra sorgente e testa di scansione, ai vincoli relativi alle condizioni di funzionamento nonché ai vincoli d'interfacciamento della sorgente con la macchina.

I vincoli relativi al cammino ottico sono:

- la necessità di far giungere il fascio laser dalla sorgente alla testa di scansione
- la necessità di avere un cammino ottico abbastanza lungo per potervi disporre sia il beam expander che il beam combiner e i relativi sistemi di fissaggio che devono essere attraversati dal fascio laser per i motivi descritti nel cap.2;
- il disallineamento di 1,5 mm del fascio provocato dal beam combiner, come calcolato in precedenza;
- la necessità di avere un cammino ottico il più possibile lineare, così da evitare le sicure complicazioni derivanti da eventuali dispositivi di riflessioni ad angolo del fascio;

mentre i vincoli relativi alle condizioni di funzionamento d'interfacciamento con la macchina sono:

- la necessità di avere le zone in prossimità delle ventole, libere da ostacoli che condizionerebbero il corretto funzionamento del sistema di raffreddamento ad aria;
- la necessità di rispettare i limiti d'ingombro, data la lunghezza relativamente elevata della sorgente rispetto agli altri componenti come si può vedere nel disegno a pagina 74 .

Per soddisfare i vincoli sopra esposti si è posizionata la sorgente laser:

- con l'asse del foro d'uscita del fascio laser parallelo all'asse del foro d'ingresso nella testa di scansione;
- spostando la testa di scansione verso destra nello spazio a disposizione (mantenendo comunque il posizionamento che garantisce la corretta focalizzazione) per far in modo che la sorgente laser riesca a rimanere negli ingombri imposti;
- con la superficie di fissaggio inferiore, cioè quella su cui sono presenti le sfere che fanno da riferimento per il montaggio, disposta verso il basso così da avere lo spazio intorno alle ventole sgombro da ostacoli per il

flusso d'aria;

- con la superficie di fissaggio frontale, cioè quella su cui è realizzato il foro d'uscita del fascio, ad una distanza dalla superficie della testa di scansione dove è presente il foro d'ingresso del fascio, pari alla somma delle lunghezze dei componenti intermedi (beam expander e beam combiner) ,più un valore stimato dei relativi sistemi di collegamento

$$188+(38/\sqrt{2})+100=314,8\text{mm}$$

Definita questo punto anche la posizione della sorgente, facendo riferimento ai vincoli imposti dalle caratteristiche di generazione del fascio si è potuta determinare la sequenza con cui il fascio attraversa il beam expander e il beam combiner. Infatti, essendo la posizione dell'asse del fascio emesso dalla sorgente, definita con una approssimazione di $\pm 2\text{mm}$ rispetto all'asse del foro, per identificare con certezza la posizione del fascio si è avuta la necessità, di prevedere un sistema di allineamento. Questo come verrà chiarito in seguito, può essere realizzato sfruttando le caratteristiche del beam expander , quindi si è deciso di disporre nello schema generale il beam expander prima del beam combiner.

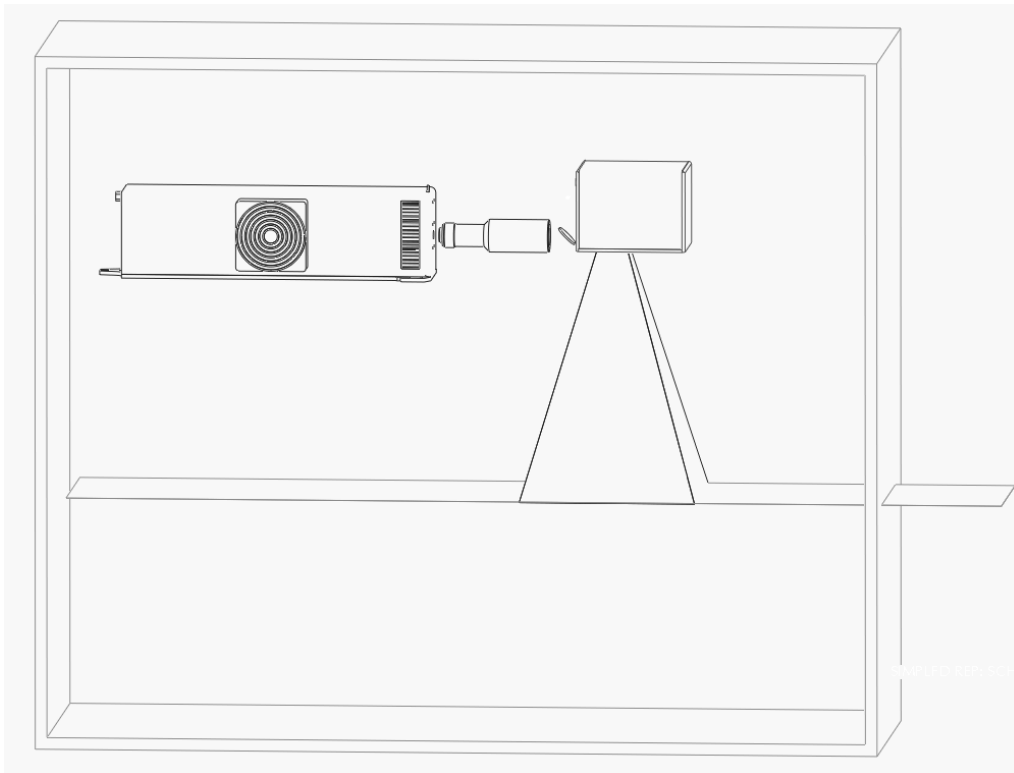
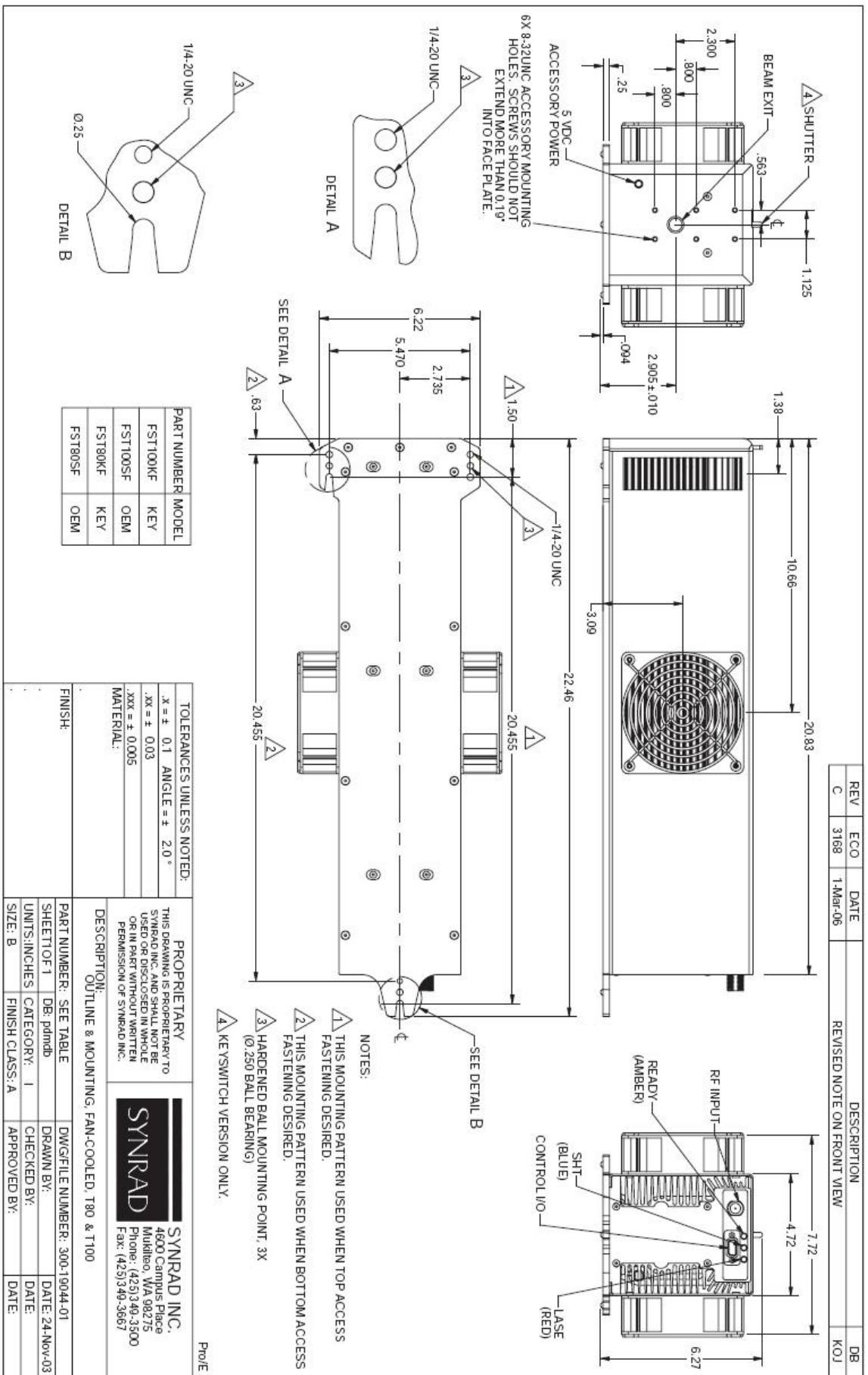


Fig. 57 schema stazione di lavoro



3.2. Definizione gruppi

Determinato lo schema generale e la disposizione dei componenti commerciali che fanno parte della stazione di lavoro, si sono dovuti dimensionare una serie di particolari, da far realizzare in officina, necessari a garantire la corretta implementazione nella macchina e il corretto funzionamento della stazione.

Si sono dovuti pertanto, dapprima definire una serie di vincoli costruttivi, che comprendevano oltre a quelli relativi alle problematiche interne (ingombri, parametri operativi necessari,ect..), anche quelli relativi alle normative sulla sicurezza dei sistemi laser e delle macchine in generale, poi definire una serie di soluzioni tecniche che consentissero di rispettare quest'ultimi.

Nei paragrafi che seguono sono stati, nel primo, riportati i vincoli imposti dalle normative, perché a differenza degli altri non sono ricavabili dalle considerazioni fatte fin'ora e negli altri sono state descritte le soluzioni tecniche adottate.

3.2.1. Vincoli imposti dalla normativa di sicurezza

Per ricavare i vincoli costruttivi imposte dalle normative di sicurezza si è fatto riferimento alle seguenti norme:

- Norma CEI EN 60825-1:2003 “classificazione delle apparecchiature, prescrizioni e guida per l'utilizzatore”;
- Norma CEI EN 60825-4: “Barriere per laser”;

Secondo queste i sistemi laser devono essere classificati, in base alle loro proprietà, nelle seguenti classi:

CLASSE 1, Il fascio laser è considerato innocuo in qualsiasi condizione d'uso. Questo perché la radiazione emessa è sempre al disotto degli standard massimi consentiti (MPE, Massima Esposizione Permissa), calcolabile per ogni lunghezza d'onda e tempi di esposizione utilizzando la tabella 1 della normativa CEI EN 60825-1:2003;

CLASSE 2, I laser in questa classe possono emettere radiazione pericolosa, tuttavia la loro potenza è sufficientemente bassa da consentire, con un'azione di riflesso, di evitare esposizioni inattese. Questo non esclude la possibilità di riportare danni nel caso di esposizione prolungata ('prolungata' qui significa maggiore di 0,25 secondi, tempo entro il quale si ha riflesso incondizionato !).

Sono compresi in questa classe solo i laser ad emissione continua e nel visibile, con potenza ≤ 1 mW;

CLASSE 3A, I laser con emissione nel visibile e una potenza in uscita fino a 5mW per i laser in continua, o 5 volte il limite di classe 2 per i laser a impulsi ripetuti o a scanning. Possono emettere radiazioni sia nel campo del visibile che in quello del non visibile e i loro fasci non sono pericolosi se osservati direttamente in maniera non continua, mentre lo possono diventare se si utilizzano strumenti che amplificano e concentrano il fascio ottico (quali microscopi, binocoli, ecc.);

CLASSE 3B, I laser di classe 3B hanno potenze medie comprese tra i limiti della classe 3A e 500 mW. I laser di classe 3B sono pericolosi per gli occhi se non protetti e possono essere pericolosi per la pelle; anche le riflessioni diffuse da questi sistemi possono essere pericolosi;

CLASSE 4, I laser di questa classe sono più pericolosi in quanto, oltre ad avere una potenza tale da causare seri danni ad occhi e pelle anche se il fascio è diffuso, possono costituire un potenziale rischio di incendio, causare fuoruscita di materiale tossico e spesso il voltaggio e l'ampereaggio di alimentazione sono pericolosamente elevati.

Per ciascuna classe, sono previste inoltre, una serie di misure precauzionali riportate sinteticamente nella tabella seguente.

Classe 1	nessuna misura necessaria
Classe 1M	avvertire le persone che utilizzano strumenti ottici
Classe 2	non osservare direttamente il raggio laser; non direzionare il laser sul volto
Classe 2M	avvertire le persone che utilizzano strumenti ottici
Classe 3°	trattare come la classe 1M o 2M
Classe 3R	lasciar utilizzare solo da personale qualificato
Classe 3B	per designare l'addetto alla sicurezza laser TSL; la zona di utilizzazione con misure architettoniche; controllare gli accessi; dichiarare la presenza di laser all'entrata; lasciar utilizzare solo da personale qualificato; indossare eventualmente occhiali di protezione
Classe 4	stesse precauzioni che per la classe 3B; utilizzare i DPI (dispositivi di protezione individuali) necessari

Tab. 12 misure precauzionali per ogni classe laser

Andando ad attribuire anche alla stazione di lavoro in progettazione una classe come imposto dalla normativa, si nota che questa avendo al suo interno una sorgente in classe 4, secondo quanto dichiarato dal costruttore, diventa a sua volta un dispositivo in classe 4 e pertanto, per essere utilizzato, ha la necessità, di assolvere a tutte quelle precauzioni imposte dalla normativa che, come è facilmente intuibile consultando la tabella sopra, escludono un implementazione in macchina, pregiudicando tutto il lavoro svolto fin'ora.

Per fortuna la normativa prevede anche, che i sistemi laser possono essere attribuiti alla classe 1 anche se il loro radiazione è pericolosa, prevedendo però l'adozione di una serie di dispositivi che evitino, in condizioni d'uso normali, che l'apparecchio emetta e renda accessibili raggi pericolosi, ossia radiazioni superiori al valore limite imposto per la classe 1.

Per far in modo che, la stazione di lavoro in progettazione sia un dispositivo in classe 1, si dovuto predisporre tutti i sistemi di sicurezza imposti dalla normativa per riportare i dispositivi che emettono radiazioni pericolose a dispositivi di classe 1.

Questi sistemi sono di conseguenza i vincoli costruttivi che si stavano cercando e sono definiti da:

- l'involucro di protezione, di materiale definito secondo la normativa CEI EN 60825-4 e fissato in modo sicuro, ma preferibilmente non collegato, ai componenti che formano il fascio;
- gli interblocchi di sicurezza che spengono la radiazione, di classe 3R, 3B o 4 in caso di apertura dell'involucro. Essi possono essere disattivati solo per esigenze particolari di manutenzione e dopo espressa autorizzazione del responsabile, il quale è tenuto a verificare la loro corretta riattivazione al termine della manutenzione stessa.
- I dispositivi di Terminazione del fascio per evitare esposizioni involontarie a radiazione di classe 3B o 4 o la produzione di riflessi accidentali, i fasci devono essere terminati su mezzi di arresto o attenuazione alla fine nella zona utile di lavoro. Il materiale costitutivo del mezzo di arresto deve essere diffondente e con adeguate proprietà riflettenti e termiche o assorbente.
- Targhette, con le dizioni e le prescrizioni specifiche riportate nella normativa, che devono essere posizionati in modo da segnalare la classe e le

aperture da cui se rimosse emerge la radiazione.

Inoltre, si deve tener conto che la riclassificazione del dispositivo a seguito di qualsiasi modifica, quindi anche al seguito di una installazione di dispositivi di sicurezza deve essere fatta dal responsabile che ha in carico l'apparecchio, in collaborazione con il Tecnico di Sicurezza Laser.

Per quanto riguarda poi i vincoli relativi alla sicurezza macchina si è fatto riferimento alla Direttiva Macchine 98/37/CE e alla norma EN 11553 – 1 Sicurezza del macchinario – Macchine laser (nel caso di macchine con sistemi laser integrati).

Tale normativa per le macchine con dispositivi laser che durante il loro impiego producono fumi di composizione dipendente dal materiale lavorato impone l'utilizzo di apparecchiature di raccolta e smaltimento di questi ultimi senza che entrino in contatto con eventuali operatori.

3.2.2. Dimensionamento della protezioni del percorso materiale

In considerazione dei parametri ricavati dalla normativa riportata nel paragrafo precedente, si è deciso di predisporre un involucro protettivo che racchiudesse il volume in cui agisce il fascio laser, prevedendo di far terminare il fascio sulla superficie dell'area di lavoro e contemporaneamente che consentisse di assolvere alla necessità di raccolta dei fumi prodotti dalla lavorazione del materiale, che essendo costituiti da una componente generata dalle vaporazione della plastica, risultano essere molto pericolosi.

Per definire il dimensionamento dell'involucro sono state fatte le seguenti considerazioni:

– per quanto riguarda il materiale dell'involucro, la normativa prevede di utilizzare un materiale con proprietà schermanti rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione laser. In particolare per le radiazioni laser emesse da sorgenti a CO₂, (10.6 μm), può essere utilizzato come materiale il plexiglas, che assorbendo bene una radiazione a questa lunghezza d'onda, è un ottimo materiale schermante, inoltre essendo trasparente permette anche di vedere cosa accade all'interno dalle protezione. Il plexiglass però non ha le stesse proprietà nei confronti delle radiazioni emesse da sorgenti laser come quelle in

fibra, 1.06 μm che, come detto, rappresentano la soluzione ottimale nel caso si voglia lavorare un materiale con un componente metallica importante. Pertanto, volendo realizzare un dispositivo che permetta l'intercambiabilità della sorgente, senza che questa operazione comporti la sostituzione delle protezioni, si è deciso di utilizzare una lamiera in alluminio, perché, essendo questo materiale opaco sia alla radiazione emessa nel lontano infrarosso che a quella emessa nel vicino infrarosso, riesce a confinare nell'involucro tanto le radiazioni dei laser CO_2 quanto le radiazioni dei laser in fibra. Si è inoltre deciso che, le superfici dove è più probabile l'incidenza diretta della radiazione, devono essere sabbiate così da evitare eventuali riflessioni speculari del fascio.

– Per quanto riguarda le dimensioni d'ingombro dell'involucro di confinamento del fascio laser, invece, si è deciso di dividerlo in due parti, la prima comprendente solo il percorso tra sorgente laser e testa di scansione con i relativi fissaggi, che racchiude al suo interno il percorso tra gli specchi e gli attraversamenti dei componenti ottici (beam expander e beam combiner) e la seconda comprendente il percorso di focalizzazione e il piano di scorrimento del materiale. Così facendo si riesce a limitare al massimo gli ingombri delle protezioni, stando dentro i limiti imposti dalle specifiche di partenza e nel contempo, come è descritto in seguito, a isolare le ottiche, che devono essere mantenute pulite, dai fumi prodotti nella lavorazione.

In definitiva si è riuscito ad avere un ingombro della prima parte dell'involucro compresa tra sorgente e testa di scansione pari a un volume di 100x121.5x249 mm e un ingombro massimo della seconda parte pari a un volume di 477x358x420 mm. Le considerazioni che hanno portato ad ottenere questi risultati sono esposti, per quello che riguarda le protezioni della prima parte del cammino ottico del fascio nel paragrafo successivo e nei punti seguenti quello che riguarda le protezioni del percorso di focalizzazione.

– Per quanto riguarda il flusso del materiale, considerando che per isolare la radiazione laser, si è dovuta racchiudere anche l'area di lavoro nell'involucro protettivo, si è dimensionato un piano di scorrimento riportato nella tavola allegata a pagina 82, che oltre a consentire il corretto flusso di materiale costituisce una parte dell'involucro. Quest'ultimo si compone da una griglia di

dimensioni 301x366x13 mm costituita da lamierini in alluminio assemblati in modo da formare delle celle di dimensioni 13x13 mm, bloccata da 4 viti che agiscono su altrettanti blocchetti fissati ad una piastra inferiore. Su questa piastra, che costituisce anche il dispositivo di terminazione del fascio, sono anche fissati, alle estremità laterali della griglia, due rulli soffiati identici e intercambiabili che presentano un connettore per l'aria in pressione accessibile grazie ad un foro realizzato nella piastra inferiore e alle estremità una serie di fori filettati che permettono: nella parte anteriore il fissaggio di una piastrina di sicurezza e nella parte posteriore il fissaggio del piano di scorrimento alla piastra posteriore dell'involucro protettivo. La piastra inferiore del piano di scorrimento presenta sotto un connettore per il condotto d'aspirazione fissato contro un foro posizionato al centro del area di lavoro. In corrispondenza di questo poi al disotto della griglia è presente una piastrina circolare fissata alla piastra sottostante tramite delle colonnette di altezza opportuna. La piastra inferiore, infine, presenta nella parte posteriore una serie di fori filettati e spine che consentono il fissaggio di tutto il piano di scorrimento alla macchina.

Il dispositivo descritto essendo racchiuso totalmente nell'involucro protettivo permette isolare completamente la radiazione laser agente sul piano di lavoro. Si è fatto in modo, che tutta l'area di lavoro su cui incide direttamente il fascio coincida con la superficie del materiale e in sua assenza con la superficie sabbiata della griglia o della piastra inferiore, evitando così possibili riflessioni speculari del fascio focalizzato. Inoltre, si è provveduto a proteggere con una piastrina circolare il condotto d'aspirazione dei fumi che si trova al disotto dell'area di lavoro e a realizzare un labirinto (fig.58) , nel intercapedine di passaggio materiale, tra i rulli soffiati e la parete laterale della protezione.

Questa serve a trattenere all'interno dell'involucro la radiazione laser anche nel caso in cui venga montato sulle protezioni un dispositivo diverso da quello per cui è stato progettato. Infine si è provveduto a realizzare una serie di fori sulla piastra inferiore che servono per il fissaggio di un sensore che rileva la posizione del materiale all'uscita.

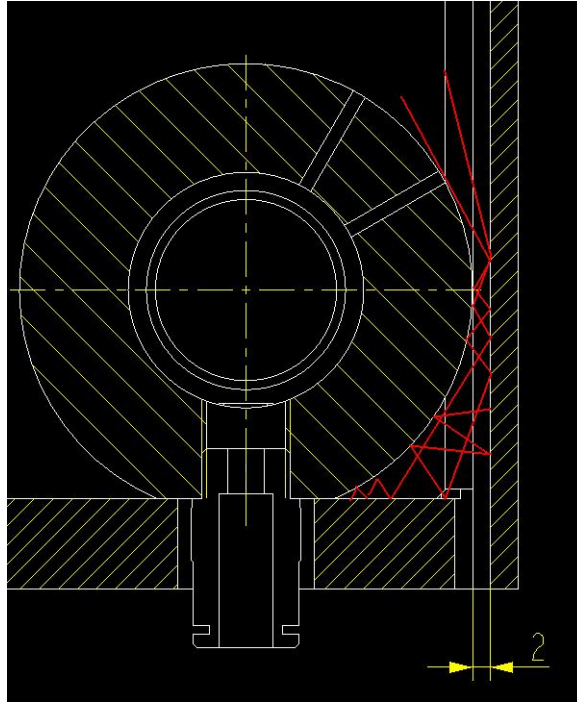


Fig. 58 labirinto d'imprigionamento fascio

Inoltre, soluzione adottata consente, attraverso le intercapedini di 2 mm lasciate tra i rulli soffiati e la parete dell'involucro, il passaggio del materiale che, arrivando dal basso e avvolgendosi sui rulli, crea il piano di lavoro desiderato 300x300 mm. Il materiale così scorre prima sui rulli, incontrando una bassa resistenza, grazie al flusso d'aria ottenuto per mezzo di una serie di fori realizzati sui rulli che tiene il materiale sospeso, poi si dispone a contatto della griglia, grazie alla leggera depressione dovuta all'aspirazione dei fumi posta nella parte sottostante, in modo da avere la giusta distanza di focalizzazione dalla lente F-Theta ed essere lavorato nelle condizioni ottimali. Infine esce dall'involucro protettivo dove, attraverso un sensore, se ne rileva la posizione per un eventuale correzione attraverso un successivo gruppo svolgitore.

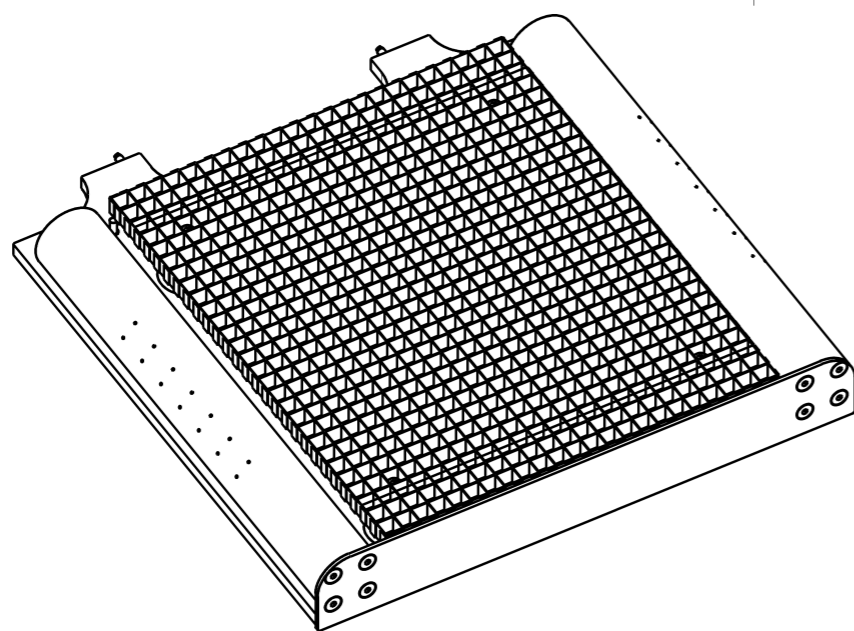
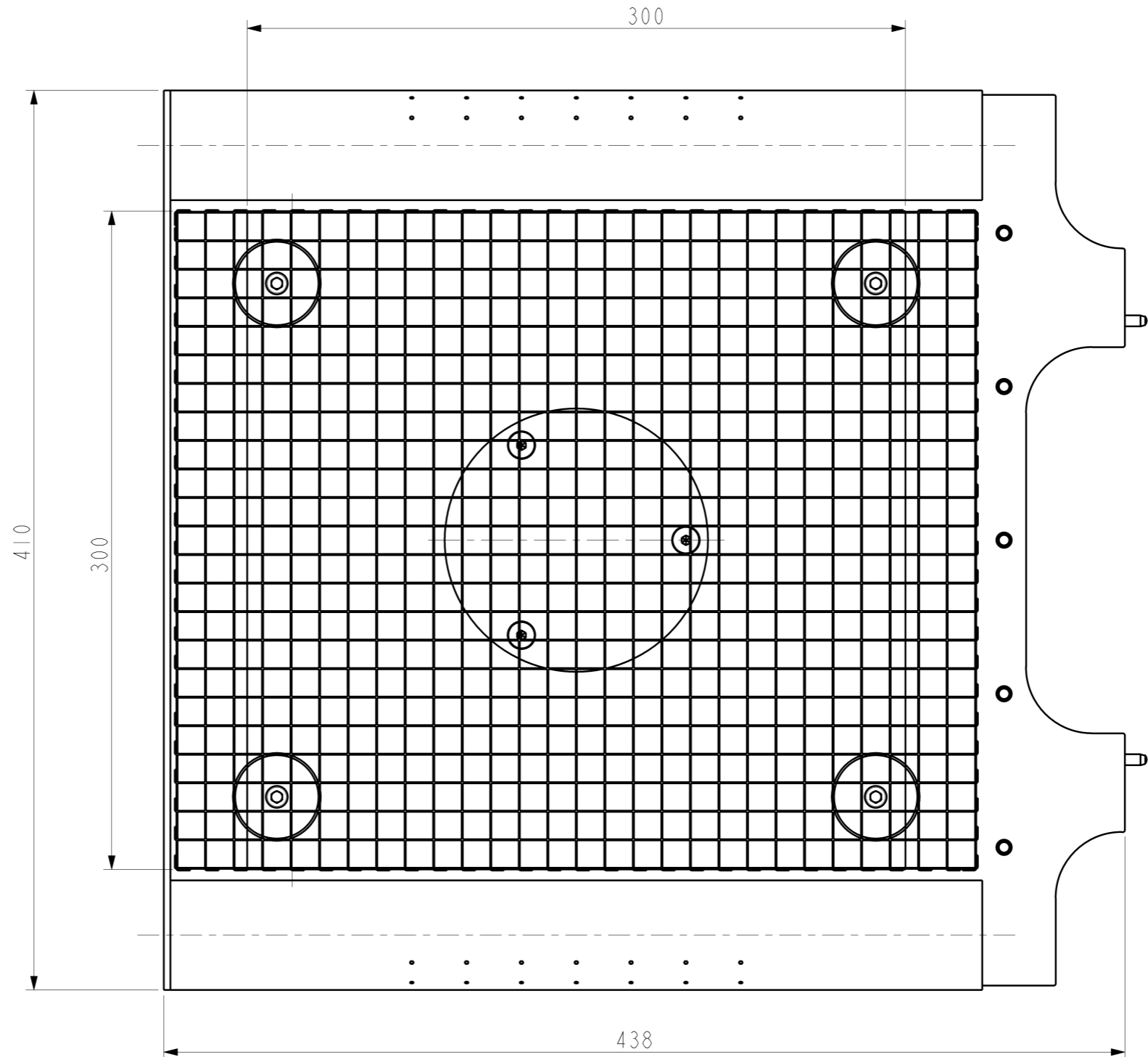
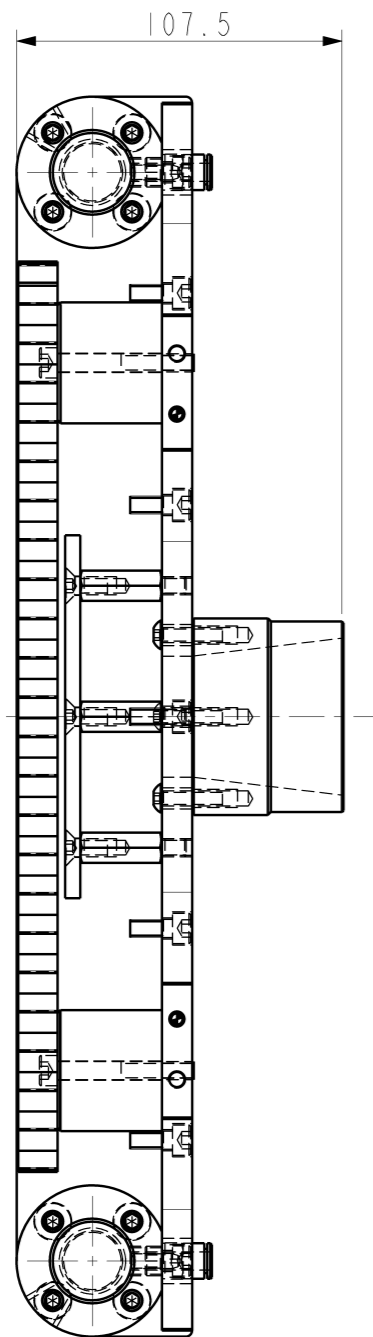
– Per quanto riguarda l'accessibilità all'area di lavoro, si è previsto un dispositivo che permetta di movimentare una parte dell'involucro protettivo così da permettere sia il primo posizionamento del materiale che un'eventuale ispezione durante uno stop di macchina. Questo dispositivo comprende uno sportello in lamiera di alluminio che avvolge la parte inferiore del volume di confinamento dell'area di lavoro fino alla piastra posteriore della protezione per una altezza di 225 mm, come si vede nelle immagini a pag 83.

D

C

B

A



G.D BOLOGNA TOLLERANZE GENERALI DI LAVORAZIONE		FOGLIO		PESO (kg)	SIMILE A:	ERA:
				SUP. EST. (cm ²)		
⊕	0.5	RACCORDI NON QUOTATI:		SMUSSI NON QUOTATI:		
±0.3	12.5/			N. PEZZI	QT. MATER.	FRAZ.
±0.1	3.2/	DESCRIZ. MATERIALE		LARGH. LUNGH.		
±0.1	0.8/	T.T		DATA SCALA		
±0.1	0.2/	FINITURA		DISEGNATORE MARRONE QUINTINO		
∅ FORI +	∅ ALBERI -	PIANO SCORRIMENTO MATERIALE				
DOCUMENTO RISERVATO A TERMINI DI LEGGE CON DIVIETO DI RIPRODUZIONE O DI RENDERSILO COMUNQUE NOTO A TERZI SENZA ESPLICITA AUTORIZZAZIONE						



Lo sportello scorre in modo telescopico sulla parte dell'involucro che rimane ferma liberando un volume sufficiente a effettuare tutte le operazioni di posizionamento iniziale del materiale e di ispezione. Tutto questo grazie a quattro carrelli fissati a coppia alle due estremità della parte posteriore dello sportello e guidati da due binari montati dietro la piastra posteriore delle protezioni con una tolleranza geometrica opportuna che evita l'iperstaticità del montaggio. L'apertura dello sportello è agevolata da una molla a gas da 100 N con estensione massima da 226,5 mm e corsa 80 mm. Questa è stata scelta e posizionata, sempre sulla parte posteriore delle protezioni, sulla base dello schema riportato in (fig.61) . Essa ha consentito, sfruttando il passaggio dal punto morto e considerando il peso dello sportello, circa 3kg, di avere una forza di chiusura pari a 20N e una forza di apertura pari a 76N. Si è fatto in modo, inoltre, di avere l'inizio della fase di spinta della molla verso il basso corrispondente con la posizione dello sportello così da evitare parzialmente sovrapposto alla piastrina di sicurezza dell'assieme "piano di lavorazione", escludendo così il pericolo di schiacciamento che altrimenti può concretizzarsi tra sportello e piano di lavoro. La soluzione ha permesso di rispettare le direttive della normativa sulla sicurezza macchine.

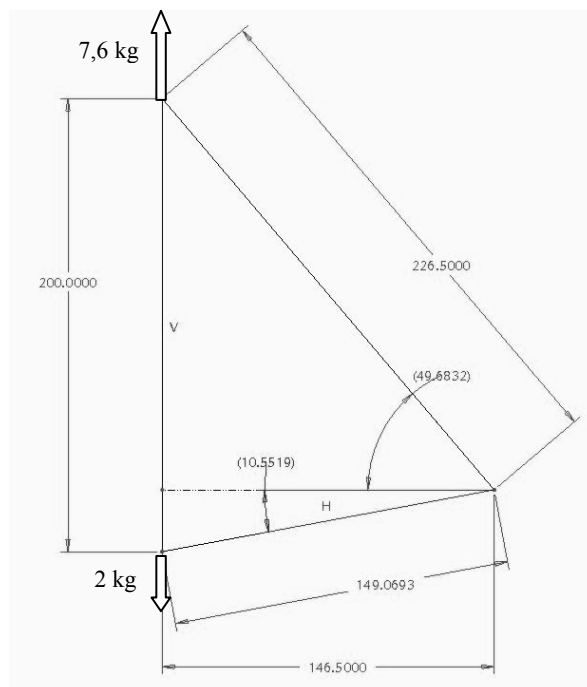


Fig. 59 schema molla

La corsa di apertura dello sportello è stata dimensionata in modo da avere, a sportello aperto, il bordo superiore delle protezioni coincidente con il bordo

superiore del portello per avere così il minimo ingombro possibile sia a portello chiuso che aperto. Questa prevede come fine corsa in fase di chiusura, la battuta sulla piastra inferiore e in fase di apertura, il fine corsa della molla. Si è poi provveduto a sigillare l'intercapedine esistente tra la parte fissa e quella mobile, di 2 mm con un feltro di spessore 2 mm che avendo una basso coefficiente d'attrito rispetto alla lamiera provoca minore resistenza all'avanzamento.

Per ultimo, considerando che la normativa prevede per gli involucri di protezione di radiazioni laser in classe 4 l'adozione di interblocchi che disattivano la sorgente laser in caso di apertura, si è provveduto a posizionare un micro di sicurezza magnetico in prossimità dei carrelli di guida attraverso un piastrino di fissaggio, in una posizione poco accessibile per evitare manomissioni, così come si può vedere in fig.

– Per quanto riguarda la rimozione dei fumi di lavoro dal volume dell'involucro, si è considerato di evitare il deposito dei prodotti della lavorazione sulla lente F-Theta, unico elemento ottico in questa zona, prevedendo un collettore per l'aspirazione posizionato, al disotto della griglia del piano di lavoro e un collettore di afflusso aria posizionato in corrispondenza della lente, sulla piastra superiore dell'involucro protettivo. Quest'ultimo è stato dimensionato in modo da avere un flusso d'aria entrante che lambisce la lente e trasporti, andando dall'alto verso il basso, i fumi di lavorazione lontano dalla superficie dell'ottica. Per di più, si è fatto in modo di avere la superficie della lente al disotto del bordo superiore del collettore così da avere con ragionevole sicurezza il sconfinamento del fascio nell'involucro protettivo.

Il passaggio del flusso d'aria attraverso il piano di lavoro è stato garantito dalla superficie grigliata ai lati del materiale che, per la sua conformazione, oppone poca resistenza e convoglia il flusso in modo ottimale.

Il dimensionamento del sistema di aspirazione è stato lasciato ad un produttore di questo genere di dispositivi che ha richiesto come dati di progetto, il tipo di materiali lavorati, il volume dal quale devono essere aspirati i fumi e una stima della quantità di materiale asportato per turno di lavoro. Successivamente si è fatta una stima del peso del materiale asportato per ogni turno da 8 ore,

considerando una asportazione di materiale di profondità 0,2 mm per uno spessore di 0,05 mm e una lunghezza di 200 mm, calcolando che per ogni turno vengono rimossi circa

$$0,2 \cdot 0,05 \cdot 200 = 2 \text{ mm}^3/\text{lavorazione} \quad 2 \cdot 600 \cdot 60 \cdot 8 = 576000 \text{ mm}^3/\text{turno}$$

che equivale a $0.000576 \text{ m}^3/\text{turno}$ e quindi ad un peso di circa

$$0.576 \cdot 1,15 = 0.66 \text{ kg/turno}$$

considerando il peso specifico della carta ($1,15 \text{ Kg/d m}^3$).

Inoltre, per essere cautelativi, si è previsto un secondo collettore di aspirazione posizionato sulla piastra posteriore dell'involucro nelle vicinanze del piano di lavoro, che può essere utilizzato nel eventualità che durante le prove preliminari venga riscontrato un non efficiente smaltimento dei fumi. L'apertura sulla piastra posteriore per l'eventuale secondo collettore, invece, può essere utilizzata, se non impiegata per l'aspirazione, come finestra d'ispezione visiva durante la fase di lavoro del dispositivo, prevedendo però un opportuna schermatura (e.g. plexiglas per radiazioni CO_2).

– Per quanto riguarda i fissaggi dell'involucro protettivo dell'area di lavoro, si è considerato che quest'ultimo deve essere fissato su una superficie piana della macchina e che deve essere presente un riferimento di posizionamento rispetto a quest'ultima. Poi, si è fatto in modo di avere il bordo della piastra superiore e quello della piastra inferiore allineati, una serie di fori filettati di fissaggio che garantiscono il sostegno del gruppo e una spinatura di riferimento sul bordo della piastra inferiore.

Infine, per prevenire la deformazione dello sportello durante la fase di apertura, è stata aggiunta una piastra di collegamento tra le due estremità posteriori dello sportello, che irrigidisce la struttura e contemporaneamente impedisce allo sportello di deformarsi a causa del momento generato dalla non simmetria del montaggio della molla.

3.2.3. Definizione del cammino ottico e dei dispositivi di allineamento

Il dimensionamento dell'involucro protettivo riguardante la parte di cammino ottico esistente tra testa di scansione e sorgente laser è stato fatto considerando oltre agli aspetti normativi e quelli emergenti dalle specifiche di partenza,

anche gli aspetti funzionali riguardanti i componenti ottici che il fascio laser deve attraversare nell'ordine già descritto. In particolare si è tenuto in forte considerazione tanto le specifiche ottiche dei componenti, arrivando anche a sfruttarne alcune come nel caso dell'allineamento del fascio che sarà descritto in seguito, quanto le specifiche d'interfacciamento dei componenti che devono essere integrati perfettamente nella parte di cammino ottico in esame.

Sono stati presi in considerazione :

– per quanto riguarda la protezione di sicurezza dalle radiazioni laser nella parte di cammino ottico compresa tra sorgente e testa di scansione, si è considerato che durante il normale utilizzo della stazione di lavoro, il cammino ottico non necessita di ispezioni e manutenzioni frequenti, essendo costituito da tutti componenti poco stressati, sia strutturalmente che termicamente. Pertanto, si sono dimensionate una serie di parti che, assemblate con la sorgente e la testa di scansione, garantiscono una chiusura fissa e sigillata del percorso del fascio, fino alla superficie interna della lente F-Theta, mettendolo al riparo sia dalla formazione di condensa che da accumuli di impurità che pregiudicherebbero, in modo definitivo, i componenti ottici presenti in questa parte del sistema.

Il materiale usato per avvolgere il percorso del fascio è stato l'alluminio. Questo, che oltre alle caratteristiche descritte nel paragrafo precedente, presenta anche una resistenza meccanica elevata che facilita il dimensionamento. Per avere poi un riferimento preciso che assicura il giusto posizionamento del fascio rispetto al foro della testa di scansione, si sono disposte delle spine di riferimento sui componenti dimensionati.

– per quanto riguarda la definizione del dispositivo di inserimento nel cammino ottico di un fascio visibile per antepresa, si è considerato che per un corretto funzionamento del beam combiner si deve rispettare lo schema rappresentato in fig., cioè si deve posizionare l'ottica a 45° sia rispetto al fascio laser di potenza che rispetto al fascio del puntatore considerando in più che il fascio del puntatore deve incidere, per essere posizionato perfettamente rispetto a quello di potenza, nella posizione d'uscita del fascio CO_2 dopo che questo ha attraversato il beam combiner e ha perciò subito il disallineamento, calcolato in precedenza, pari a 1,46 mm(fig. 60).

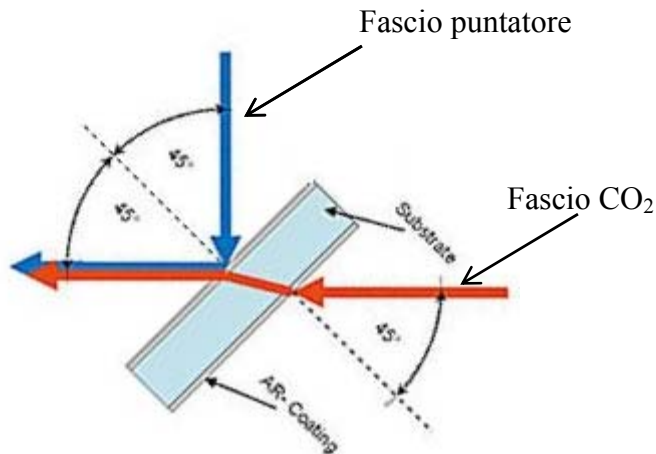
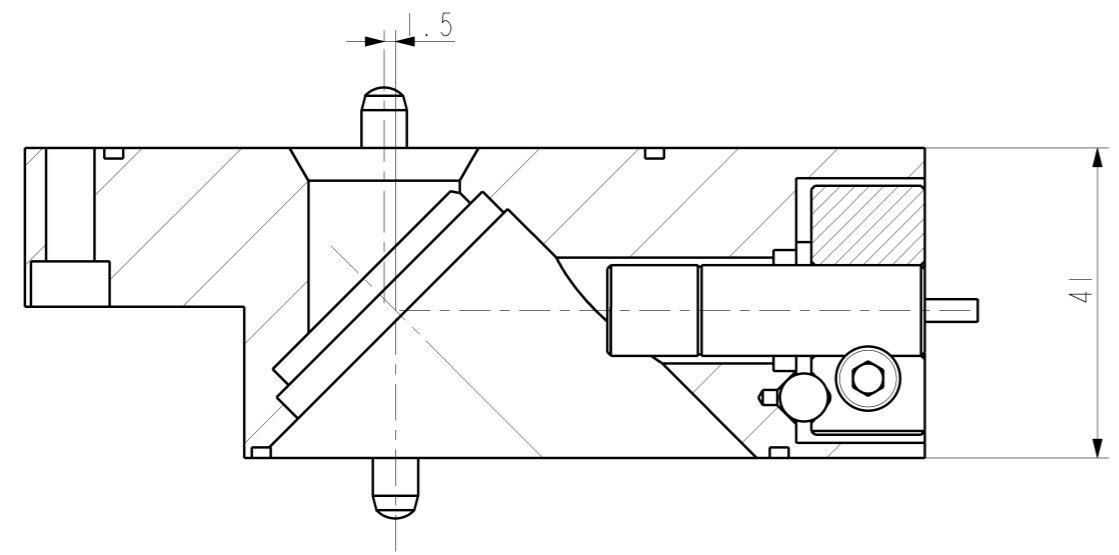
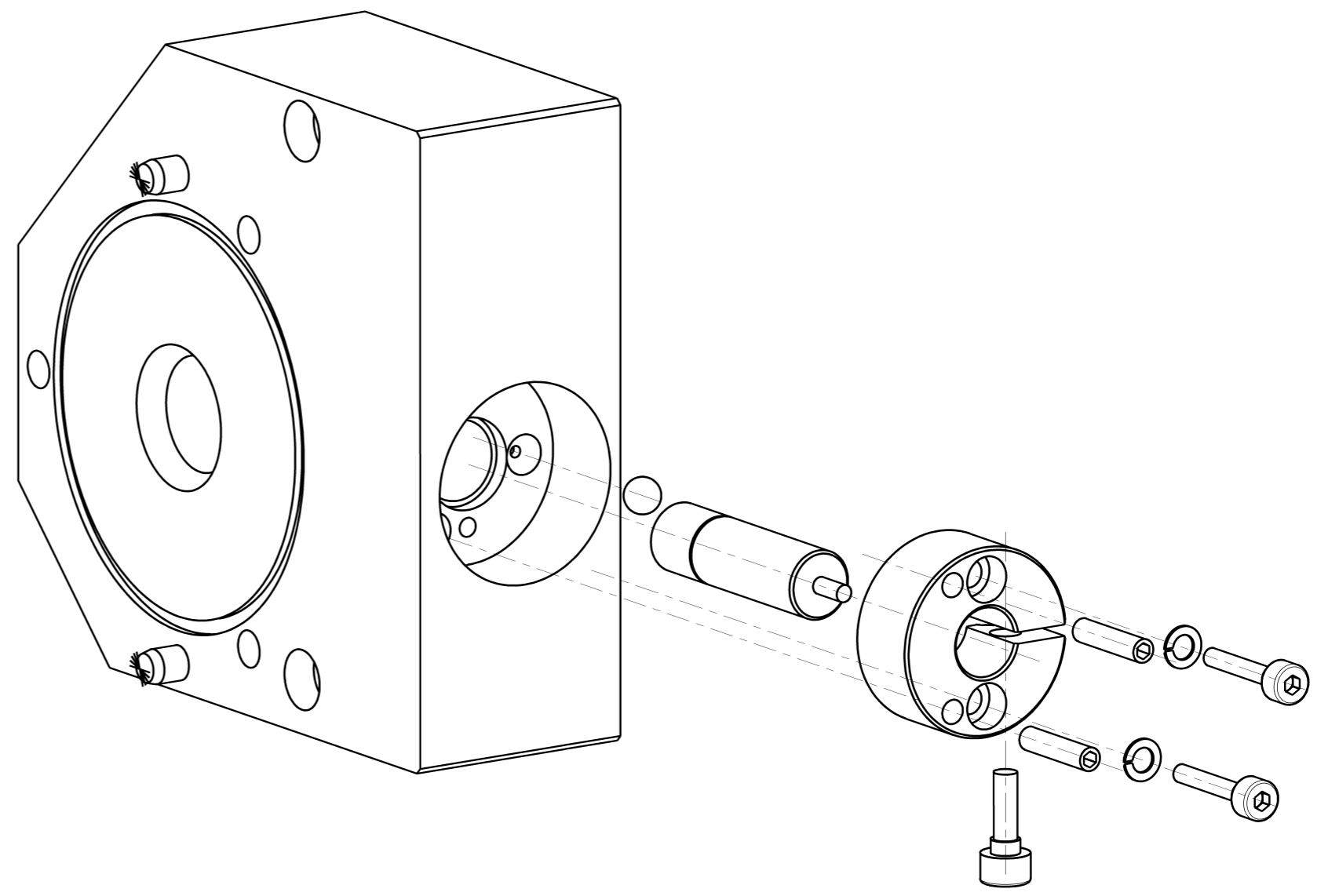
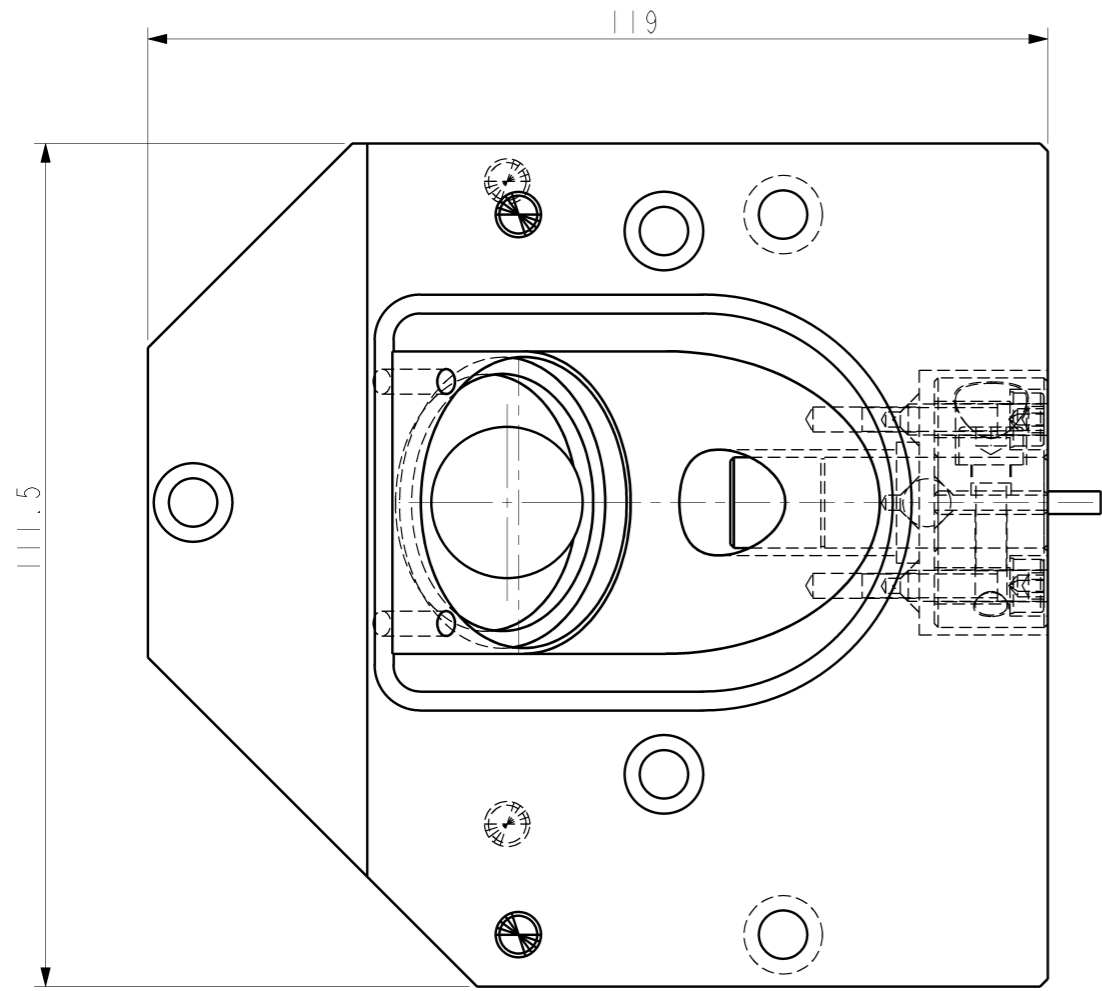


Fig. 60 beam combiner

Si è perciò dimensionato un particolare che permette di fissare come descritto, il beam combiner rispetto al fascio laser di potenza e che consente di montare un dispositivo di posizionamento per il puntatore, necessario per regolare accuratamente la posizione angolare del fascio visibile rispetto all'ottica. Il dispositivo di posizionamento angolare, consiste in una flangia elastica di fissaggio che viene registrata angularmente attraverso due grani filettati, disposti parallelamente al puntatore, che regolando l'altezza alle due estremità della flangia, permettono grazie ad una sfera di riferimento di inclinare la flangia. Questa è tenuta in posizione da due viti montate sempre parallelamente al puntatore che agiscono su due anelli elastici che permettono il movimento necessario nella fase di regolazione e il serraggio quando si trova la posizione ottimale del puntatore.

Il particolare di fissaggio permette, attraverso un foro d'ingresso calibrato, di operare una profilatura del fascio di potenza riportandolo, nel caso abbia di dimensioni maggiori per i motivi esposti all'inizio nel paragrafo precedente, al diametro di 20 mm; inoltre attraverso le spine di riferimento consente di riferire con precisione la posizione del fascio rispetto al foro d'ingresso della testa di scansione.

– Per quanto riguarda il dispositivo di allineamento, necessario come già detto per poter prevedere con esattezza la posizione dell'asse del fascio definita con una approssimazione di ± 2 mm rispetto all'asse del foro, si è valutato che, fruttando il principio di funzionamento del beam expander, può realizzare un sistema di allineamento relativamente semplice e poco ingombrante. Osservando che l'allargamento di un fascio circolare entrare in un beam



disegno fuori scala

G.D BOLOGNA TOLLERANZE GENERALI DI LAVORAZIONE \oplus 0.5 ∇ 12.5 ∇ 3.2 ∇ 0.8 ∇ 0.2 ○ FORI + ○ ALBERI - <small>DOCUMENTO RISERVATO A TERMINI DI LEGGE CON DIVIETO DI RIPRODUZIONE O DI RENDERSI COMUNQUE NOTO A TERZI SENZA ESPLICITA AUTORIZZAZIONE</small>		FOGLIO		PESO (kg)	SIMILE A:	EPA:
		RACCORDI NON QUOTATI:		SUP. EST. (cm ²)	SMUSSI NON QUOTATI:	
DESCRIZ. MATERIALE		N. PEZZI		OT. MATER.	FRAZ.	
T.T		LARGH.		LUNGH.		
FINITURA		DATA		SCALA		
		DISEGNATORE		MARRONE QUINTINO		
DISPOSITIVO ALLINEAMENTO PUNTATORE						

expander viene ottenuto moltiplicando la distanza di ogni sua retta generatrice dall'asse dell'ottica per il fattore d'ingrandimento del beam expander, si è intuito che facendo incidere il fascio in ingresso non centrato rispetto alle lenti del beam expander si può ottenere uno spostamento dell'asse del fascio in uscita, infatti regolando la distanza dell'asse del fascio rispetto a quello del beam expander, si ottiene all'uscita dell'ottica un'amplificazione fissa di questa distanza (fig.61) e quindi uno spostamento del fascio parallelamente a se stesso.

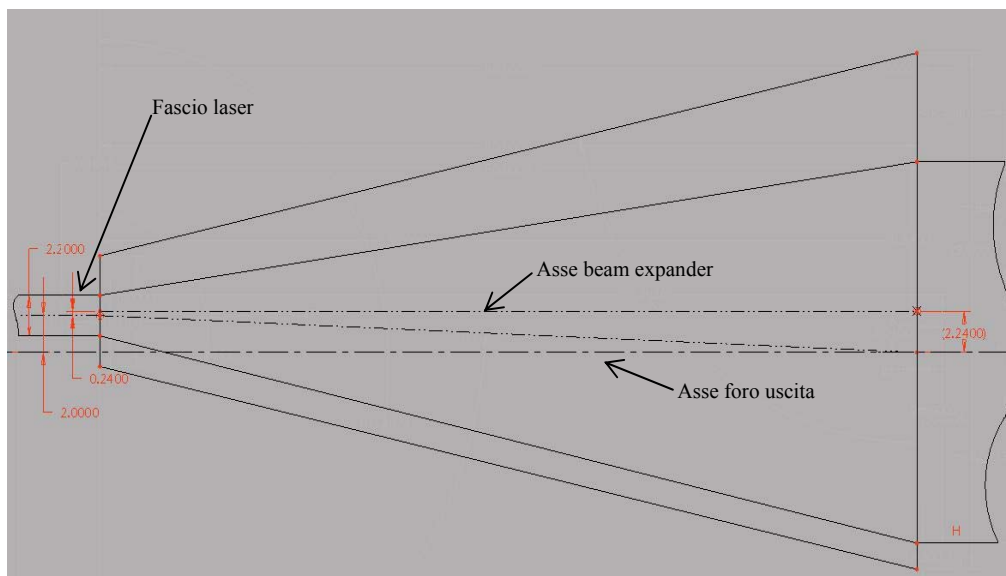


Fig.61 schema allineamento

Pertanto, si è concluso che, predisponendo un dispositivo che consente di regolare l'eccentricità dell'incidenza del fascio rispetto all'ottica, mantenendola perpendicolare al fascio, si può realizzare un ottimo sistema di allineamento. Per fare ciò si deve innanzitutto definire la posizione finale che si vuole far assumere al fascio e poi calcolare lo spostamento massimo dell'asse del beam expander rispetto all'asse del fascio che permette di riportare il fascio nella posizione voluta. Per quanto riguarda la posizione finale del fascio, si è deciso di farlo coincidere con l'asse del foro uscita dalla sorgente così da poter avere come riferimento, per tutti gli altri particolari del cammino ottico in esame, i riferimenti di montaggio della sorgente. A questo punto lo spostamento massimo di regolazione è stato calcolato considerando i ± 2 mm di posizionamento del fascio e lo schema riportato in fig. dai quali si è ricavata la relazione che permette di ottenere l'eccentricità Y e di conseguenza di conoscere lo spostamento massimo necessario $2+Y$, del beam expander con

fattore di ingrandimento $M=9,4$

$$2+Y=Y \cdot M \Rightarrow Y=0,24 \text{ mm} \Rightarrow 2+Y=2,24 \text{ mm.}$$

Osservando questi valori si è notato che, con questo dispositivo, si riescono a fare regolazioni anche di alcuni millimetri con spostamenti piccolissimi. Si è poi verificato, confrontando i diametri massimi dei fasci in ingresso e in uscita aumentati dell'eccentricità richiesta con i diametri delle lenti che, si è al riparo dal rischio di avere il diametro esterno del fascio al di fuori del diametro di una delle lenti del sistema ottico.

Sulla base di queste riflessioni si è previsto di fissare il beam expander su una piastrina che, essendo tenuta a contatto con il piano di riferimento da due viti con interposte delle molle a tazza, è capace di spostarsi e movimentare l'ottica parallelamente al fascio. La capacità di regolazione della posizione è stata poi conseguita predisponendo due viti che, realizzando una battuta con parte della loro testa su superfici ricavate su un piano fisso di riferimento e agendo nei fori filettati sulle due superfici perpendicolari ricavate nell'angolo in alto a sinistra della piastrina, fanno compiere degli spostamenti controllati alla piastrina che è guidata da una spina che scorre in una guida lineare in basso a destra come si può vedere nell'immagine in (fig.62)

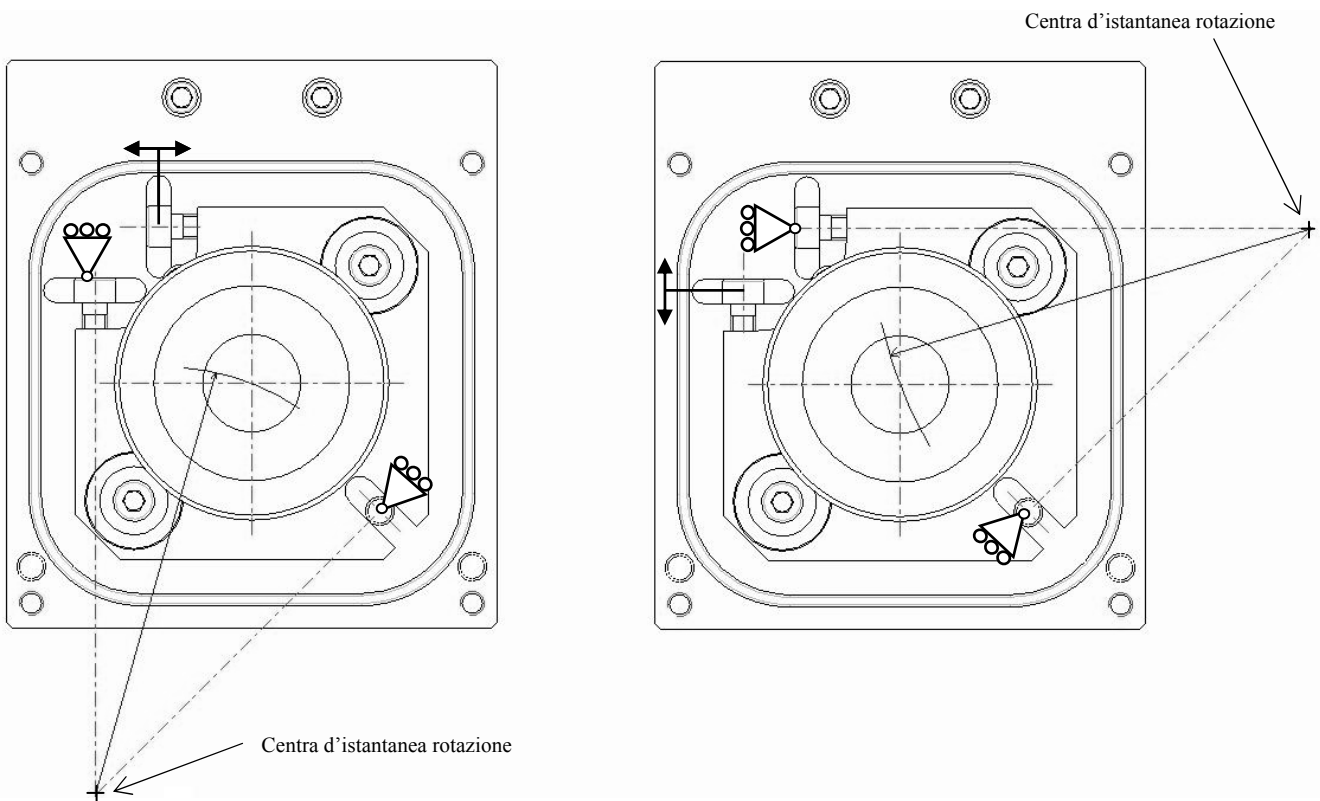


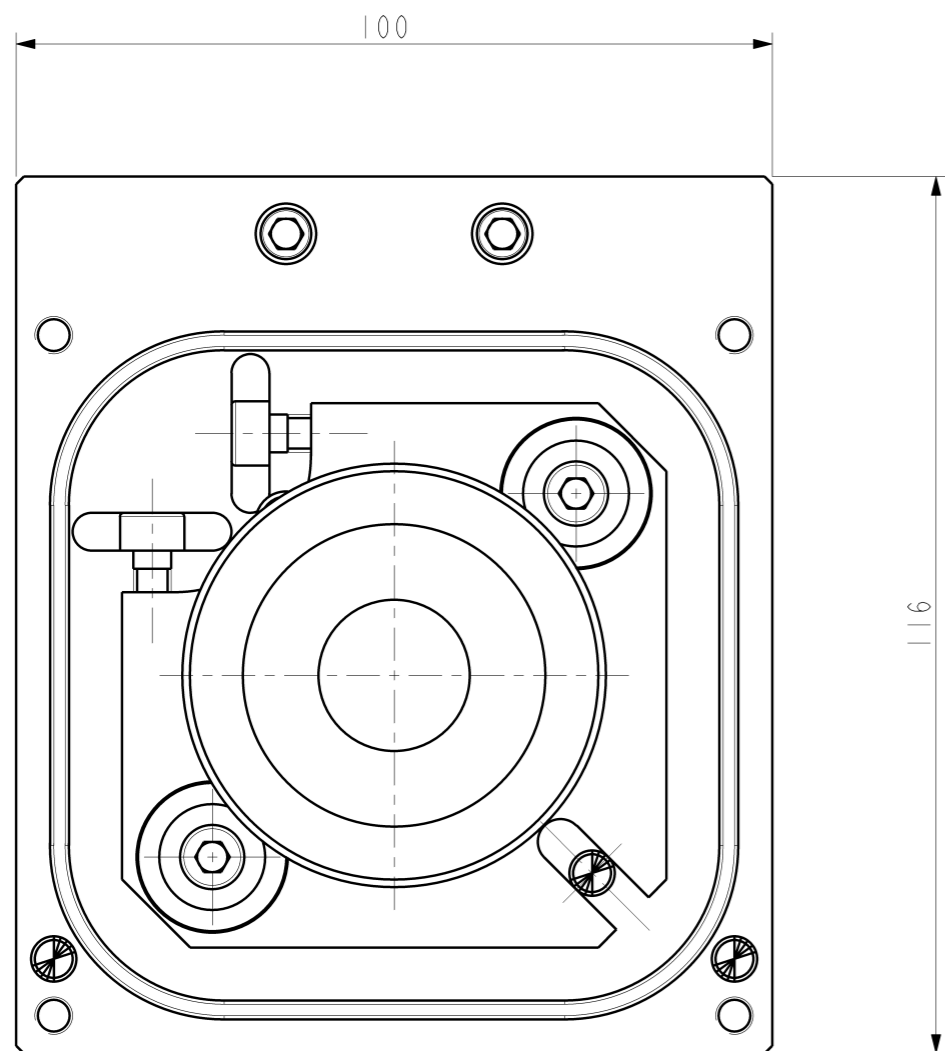
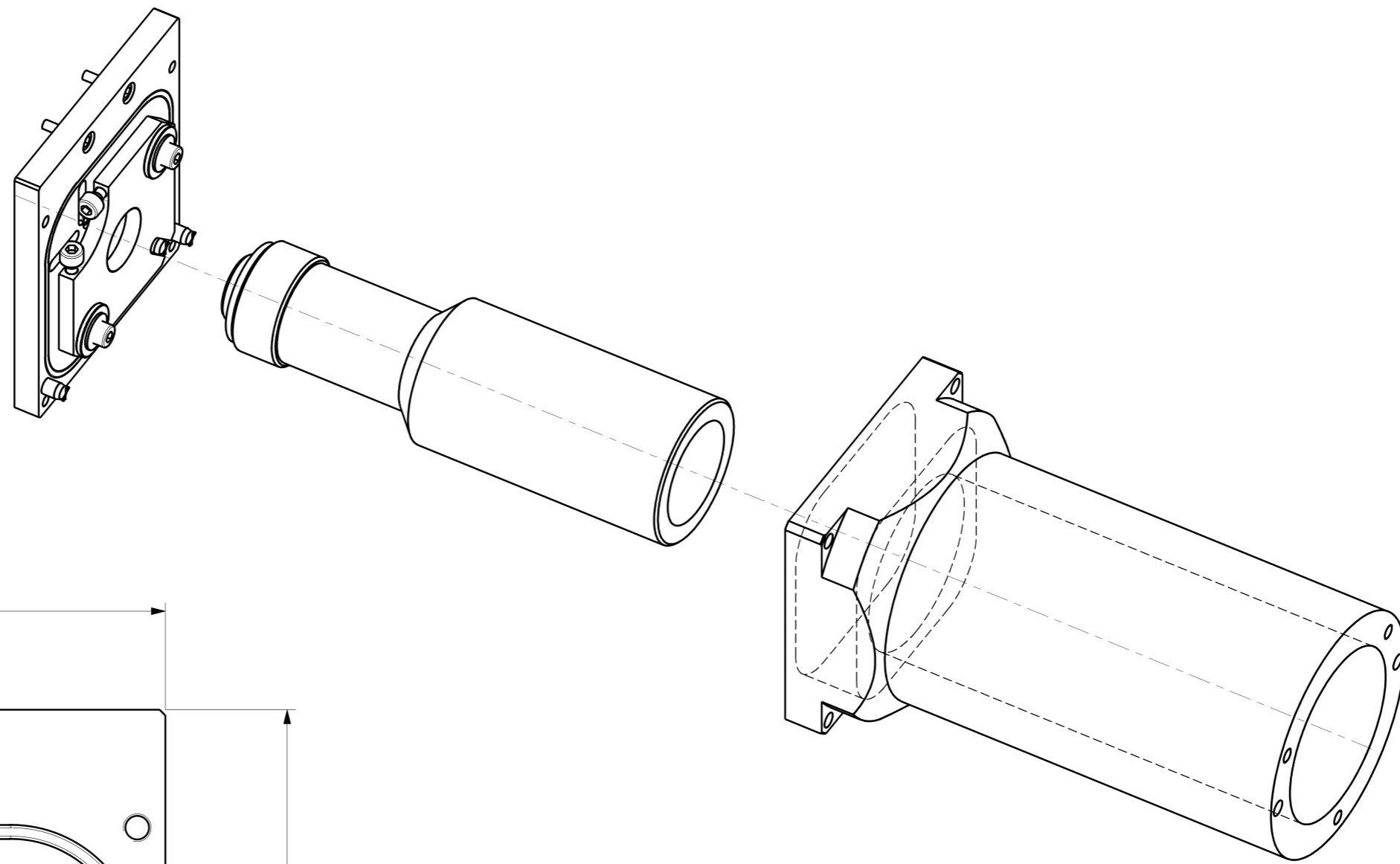
Fig.62 sistema di allineamento

D

C

B

A



disegno fuori scala

G.D BOLOGNA TOLLERANZE GENERALI DI LAVORAZIONE ⊕ 0.5 ∇ 12.5 ∇ 3.2 ∇ 0.8 ∇ 0.2 ○ FORI + ○ ALBERI - <small>DOCUMENTO RISERVATO A TERMINI DI LEGGE CON DIVIETO DI RIPRODUZIONE O DI RENDERSI COMUNQUE NOTO A TERZI SENZA ESPLICITA AUTORIZZAZIONE</small>	FOGLIO		PESO (kg)	SIMILE A:	EPA:
	RACCORDI NON QUOTATI:		SUP. EST. (cm ²)	SMUSSI NON QUOTATI:	
	±0.3	∇	N. PEZZI	QT. MATER.	FRAZ.
	±0.1	∇	DESCRIZ. MATERIALE	LARGH.	LUNGH.
	±0.1	∇	T.T	DATA	SCALA
	±0.1	∇	FINITURA	DISEGNATORE	MARRONE QUINTINO
	DISPOSITIVO ALLINEAMENTO LASER				

Il dispositivo appena descritto è stato concepito con lo scopo di essere racchiuso nel canotto di protezione, perciò tutte le sue dimensioni sono state ricavate a partire dal massimo spostamento di regolazione necessario, così da presentare il minor ingombro possibile in relazione alla sua funzionalità. In particolare è stato ottimizzato il posizionamento delle viti. Infatti quelle di regolazione sono state posizionate per garantire sia il minore spostamento possibile della piastrina che una facile accessibilità durante la fase di regolazione, mentre quelle di bloccaggio sono state posizionate in modo da richiedere un'apertura più piccola possibile sulla piastrina così da non richiedere particolari accorgimenti di serraggio per le molle a tazza.

– Per quanto riguarda l'operazione di allineamento, si è considerato che per predisporre una soluzione tecnica che permetta di svolgere questa operazione direttamente sulla stazione di lavoro è necessario, volendo, riferire tutti i particolari di questa parte di cammino ottico alla superficie frontale della sorgente, realizzare due particolari molto ingombranti, uno per permettere il riferimento alla sfera di posizionamento del laser e una spinatura sulla parte frontale della sorgente, l'altro che consentire la visualizzazione del posizionamento del fascio garantendo comunque la sicurezza necessaria. Si è deciso, per semplificare, sia il percorso ottico del fascio che la procedura di allineamento, di predisporre un banco di allineamento che permette fissando il beam expander nella giusta posizione rispetto alla sorgente di avere un assieme già pronto per essere montato nella stazione di lavoro. Avendo la possibilità di sfruttare il banco di allineamento, si è realizzato un particolare molto semplice che, riferito alle sfere di posizionamento della sorgente attraverso il blocchetto di riferimento presente nel banco, può essere fissato sulla superficie frontale della sorgente garantendo il riferimento necessario per il montaggio del cammino ottico.

Inoltre, si è potuto realizzare un sistema che permette di verificare la posizione del fascio, ogni qualvolta si agisce sul dispositivo di allineamento, per mezzo di una croce costituita da fili metallici, con l'intersezione posizionata esattamente sull'asse del foro d'uscita, cioè sulla posizione che si vuole far raggiungere all'asse del fascio. Quest'ultimo attraversando la croce viene diviso in quattro quadranti che, visualizzati attraverso il cambio di colore del

target (carta termosensibile) posizionato subito dopo, permettono di rilevare attraverso la simmetria dell'impronta la posizione del fascio rispetto all'asse obiettivo. (fig.63)

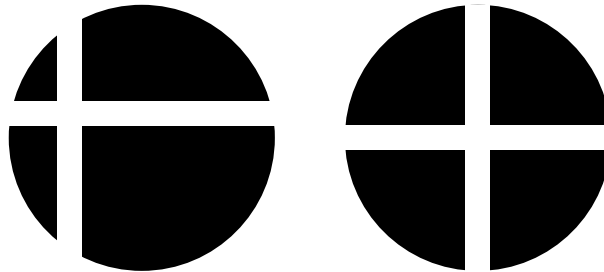


Fig..63 centraggio croce

Poi, si è deciso di posizionare due croci distanziate così da avere anche la possibilità di valutare la direzione del fascio.

Pertanto, il banco d'allineamento (fig. 64) è composto da una piastra sulla quale sono montati e riferiti, la sorgente laser con fissati la piastrina di riferimento, quella di allineamento e il beam expander; il blocchetto per il montaggio preciso della piastrina di riferimento; due piastre per il posizionamento delle croci; un blocco di terminazione del fascio sul quale è stata prevista la possibilità di posizionare il target in corrispondenza di un blocchetto di materiale refrattario; un involucro apribile in plexiglas che racchiude la parte di percorso del fascio dopo il beam expander rendendo, grazie anche al micro di sicurezza che ne controlla l'apertura, anche il banco d'allineamento in classe 1.

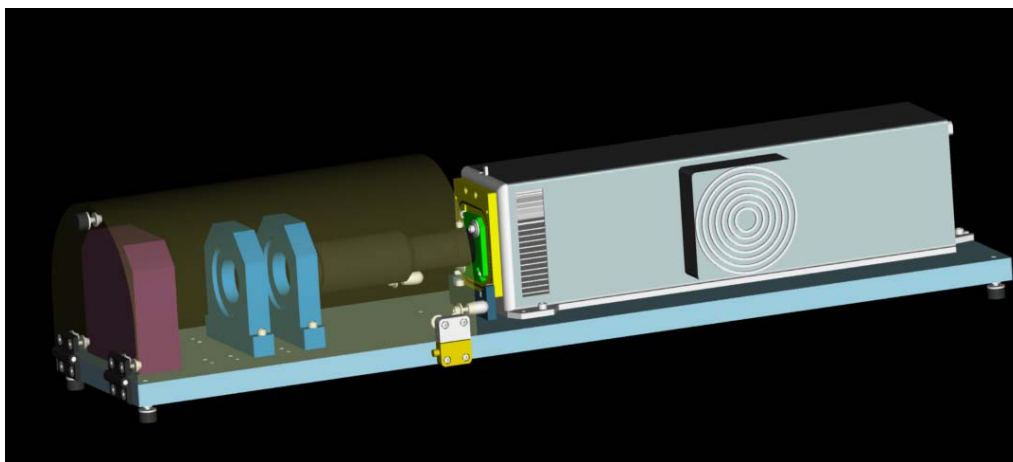


Fig. 64 banco allineamento

Le soluzioni tecniche adottate, descritte nelle pagine precedenti, sono state modellate con il software pro-engineer e riportate su tavole di complessivo e di particolare che ne hanno permesso la realizzazione e il montaggio. Alcune di

queste tavole sono allegate con il fascicolo di tesi.

3.2.4. Definizione simulatore

Nella fase finale del lavoro si è allestito di un banco di simulazione per verificare che il dimensionamento della stazione fosse stato fatto correttamente e contemporaneamente effettuare le prove di funzionamento e di collaudo necessarie per verificare l'applicabilità in macchina.

Il banco di simulazione è stato allestito montando su una piastra di supporto sostenuta attraverso piedi di sostegno, oltre alla stazione di lavoro anche una serie di gruppi che costituiscono la minima meccanica necessaria per garantire la movimentazione del materiale, che comunemente viene chiamato carta.

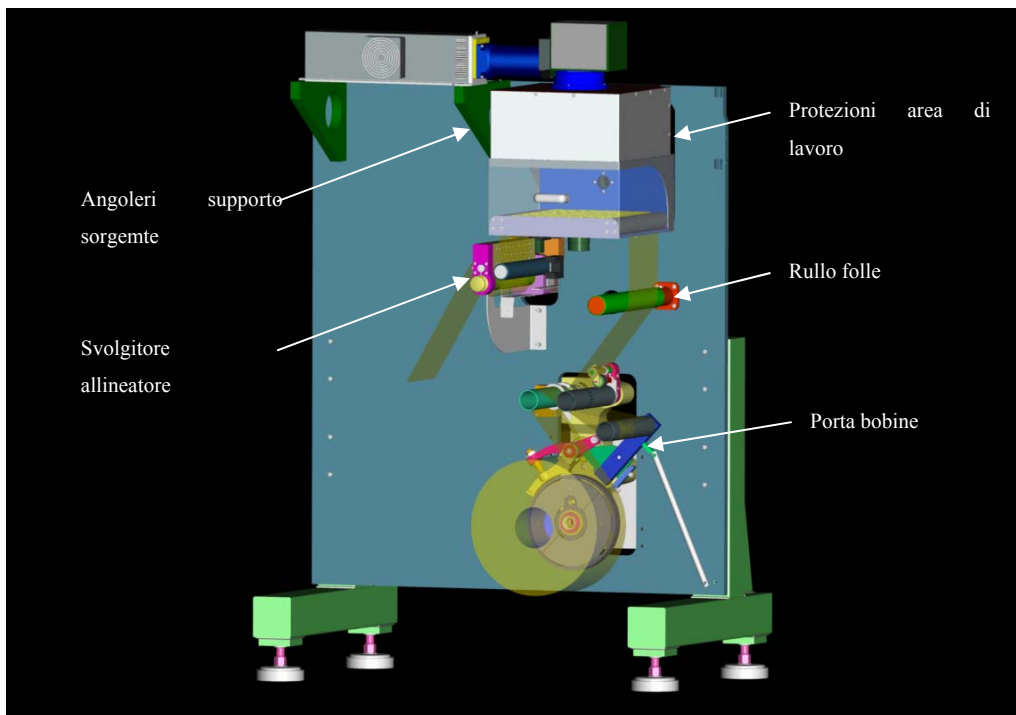


Fig.65 simulatore

In particolare si sono dovuti disporre e collegare ad una piastra (fig.65) :

- La stazione di lavoro;
- Un porta bobine, che attraverso un sistema di rilevazione della tenditura del materiale permette di frenare il moto di svolgimento del materiale con un freno che agisce sul supporto della bobina;
- Uno svolgitore, posto alla fine del giro carta, che attraverso un rullo aspirato messo in rotazione da una motorizzazione, permette la svolgitura

della carta. Questo gruppo consente il centraggio del materiale in base al segnale proveniente dal sensore di posizionamento, infatti grazie ad un dispositivo interno riesce ad inclinare l'asse di rotazione del rullo portando così la carta nella posizione desiderata;

- Un rullo folle di rinvio materiale, che consente di raccordare il giro carta tra l'uscita del porta bobine e l'ingresso nella stazione di lavoro;
- Una piastra dove sono collegati i componenti elettrici che consentono il funzionamento della stazione di lavoro.

Pertanto si è dovuto predisporre sulla piastra i fissaggi necessari per il montaggio e il riferimento reciproco dei gruppi costituenti il banco prova.

Per fissare la stazione di lavoro si è:

- dimensionato due angolari che fissano la sorgente e il cammino ottico fino alla testa di scansione nella posizione desiderata rispetto al piano di lavoro, attraverso una serie di fori filettati e di spinature realizzate nella parte posteriore per il fissaggio alla piastra e attraverso una serie di fori filettati e di sedi a V per le sfere per il fissaggio della sorgente laser.
- realizzato sulla piastra i fori e le sedi per le spine che permettono il fissaggio delle protezioni rispettando il posizionamento relativo tra testa di scansione e piano di lavoro.

Si è inoltre predisposta un'apertura sulla piastra in corrispondenza della parte posteriore delle protezioni dell'area di lavoro, che consente di accedere a quest'area per utilizzare la finestrella d'ispezione realizzata in corrispondenza della seconda apertura di aspirazione.

Per fissare il porta bobine, si è realizzata un'apertura nella piastra di sostegno che permette di fissare attraverso una seconda piastra posizionata a una distanza opportuna, il porta bobine in modo che presenti il giusto posizionamento della bobina rispetto alla stazione di lavoro. È stato necessario far ciò perché si è avuto a disposizione un porta bobine progettato per un'altra applicazione che presentava una diversa distanza del materiale rispetto al piano di riferimento.

Per fissare lo svorgitore si è dimensionare un blocchetto d'interfacciamento con la piastra di fissaggio, per far sì che il centro di scorrimento della carta sullo svolgatore coincidesse con il centro di scorrimento del materiale nella

stazione di lavoro. Inoltre, si è realizzata un'opportuna apertura sulla piastra per consentire l'alloggiamento della motorizzazione elettrica dello svolgitore.

Infine, si sono realizzati i fori di fissaggio del rullo folle in modo che quest'ultimo consenta di curvare la carta proveniente dal porta bobine posto in basso e allinearla al rullo d'ingresso del materiale nella stazione di lavoro.

Il fissaggio della piastra dei componenti elettrici è stata poi realizzato in pratica ricavando i fori e le filettature di fissaggio direttamente durante il posizionamento nella parte posteriore della piastra come era stato stabilito preventivamente.

Capitolo 4

Risultati e Conclusioni

Il lavoro svolto, che ha portato alla realizzazione di un dispositivo laser per la lavorazione di materiali per l'incarto, ha permesso, come preventivato, di aumentare il know how aziendale in merito all'utilizzo della tecnologia laser in questo tipo di applicazioni.

In particolare, durante le prove svolte per la definizione della sorgente, si è caratterizzata l'interazione tra laser e materia che ha permesso di concludere che per riuscire a lavorare i tipici materiali d'incarto alle velocità specifiche delle macchine per il packaging è necessario, allo stato attuale dello sviluppo delle cavità ottiche, utilizzare due differenti tipi di sorgenti laser a seconda della tipologia di materiale che si desidera processare.

In ultimo si è concluso che:

- si devono usare laser di tipo CO₂ (10,6 μm) se si vuole lavorare un materiale di tipo cartaceo;
- si devono usare laser prodotti in fibra 1,06 μm se si vuole lavorare un materiale in cui è presente una forte componente metallica.

Inoltre, si è riusciti a concludere, sulla base di prove empiriche, che la relazione esistente tra la potenza e velocità di passata è caratterizzata da una dipendenza lineare tra questi due parametri.

Si sono poi tratte una serie di conclusioni riguardanti gli aspetti costruttivi di questo tipo di dispositivo che si dimostrano utili nel caso si vogliano realizzare internamente altre stazioni di lavoro di questo tipo ma anche nel caso si decida di avvalersi di costruttori esterni di dispositivi laser, che permettono di definire con precisione le specifiche costruttive e di valutare, nel migliore dei modi le performance di un eventuale dispositivo o componente proposto.

In particolare si è concluso che:

- gli unici dispositivi di movimentazione del fascio che permettono di raggiungere le velocità di passata richieste per soddisfare la produttività delle macchine per il packaging sono dispositivi di scansione galvanometri. Di questi i sistemi 2D garantiscono velocità elevate e quelli 3D garantiscono una flessibilità maggiore, offerta dalla possibilità di gestire la distanza focale e

l'area di lavoro;

– le normative sulla sicurezze riguardanti i dispositivi che utilizzano la tecnologia laser sono molto restrittive e impongono spesso soluzioni tecniche impegnative.

Per quanto riguarda la funzionalità della stazione di lavoro progettata, purtroppo non si è riuscito ad inserire tutti i risultati ottenuti e le caratteristiche operative riscontrabili durante la fase di prova e collaudo del dispositivo. Questo perché ci sono stati notevoli ritardi nella consegna di alcune ottiche che non hanno permesso nei tempi imposti per la stampa della tesi, di montare tutta la stazione di lavoro e di iniziare in tempo utile le prove.

Nonostante ciò però si sono potute fare alcune prove da cui si è concluso che:

- provando il giro carta, il piano di scorrimento funziona come previsto portando il materiale nella giusta posizione senza che si siano riscontrati problemi di impedimenti e di degradazione della qualità della carta nei contatti;
- provando il funzionamento della sorgente laser sul banco di allineamento, la scheda di controllo e il software scelti per la gestione della testa galvanometrica riescono come voluto a gestire le accensioni e gli spegnimenti anche della sorgente e simulare il funzionamento in continuo dell'emissione del fascio;
- che il micro di sicurezza usato per tenere sorvegliata l'apertura delle protezioni risponde alle specifiche di sicurezza imposte dalla normativa;
- provando il dispositivo di allineamento del fascio laser, questo funziona come preventivato. In particolare si è riuscito ad allineare il fascio laser come nella figura 67 partendo dalle condizioni iniziali riportate nell'impronta in fig.66.

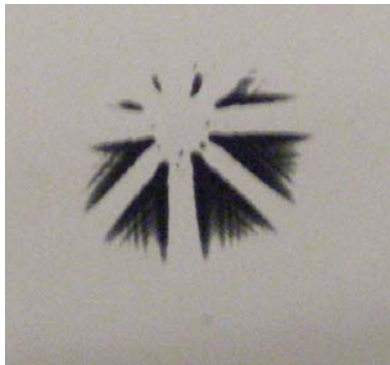


Fig. 66 impronta iniziale

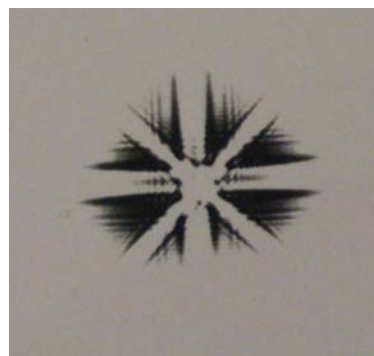


Fig. 67 impronta fascio allineato

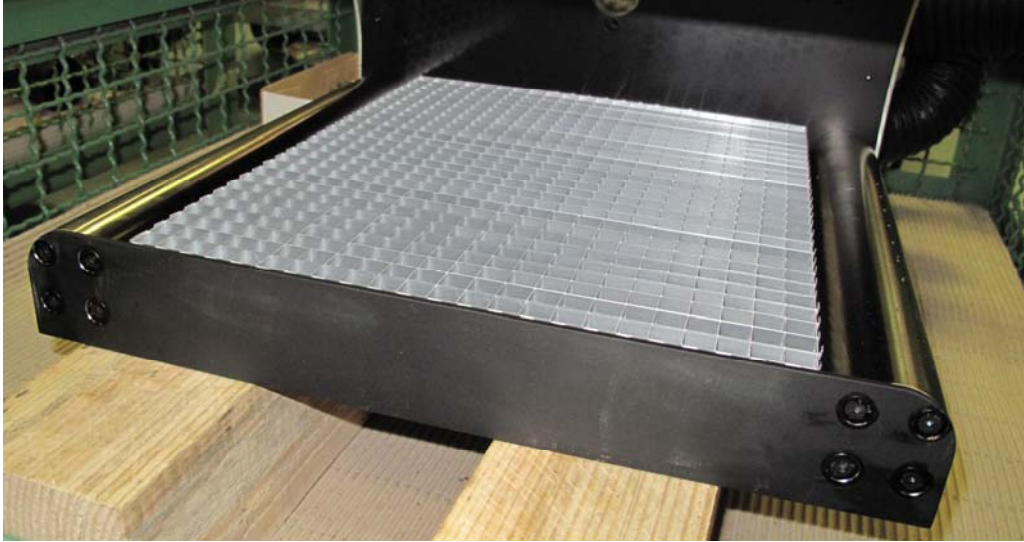
Pertanto posso dire che il lavoro svolto ha permesso di raggiungere gli obiettivi posti dall'azienda.

Personalmente mi ritengo soddisfatto del lavoro svolto perché sono riuscito a portare a termine un progetto che richiedeva un forte impegno sia nell'apprendimento teorico dell'argomento "laser" che di acquisizione di capacità di utilizzo degli strumenti messi a disposizione dall'azienda. Particolare soddisfazione ho avuto nel vedere realizzato e funzionante ciò che è stato analizzato e sintetizzato nei disegni costruttivi.

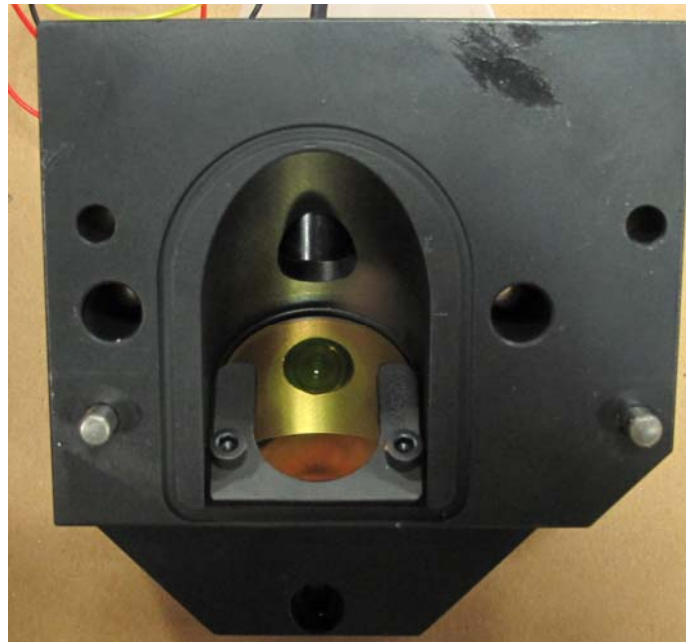
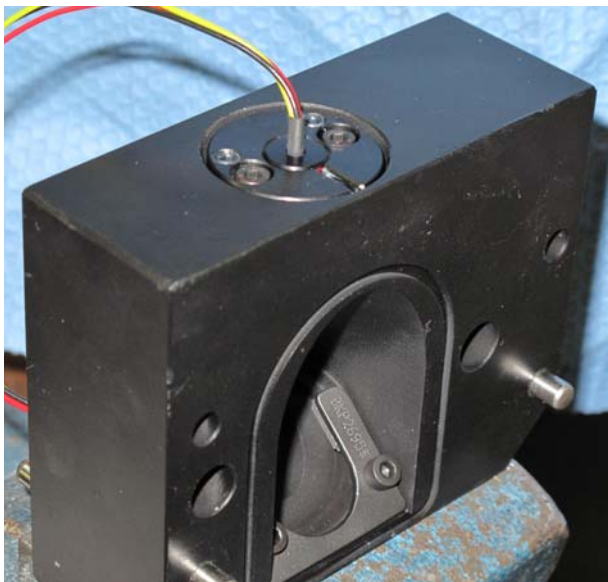
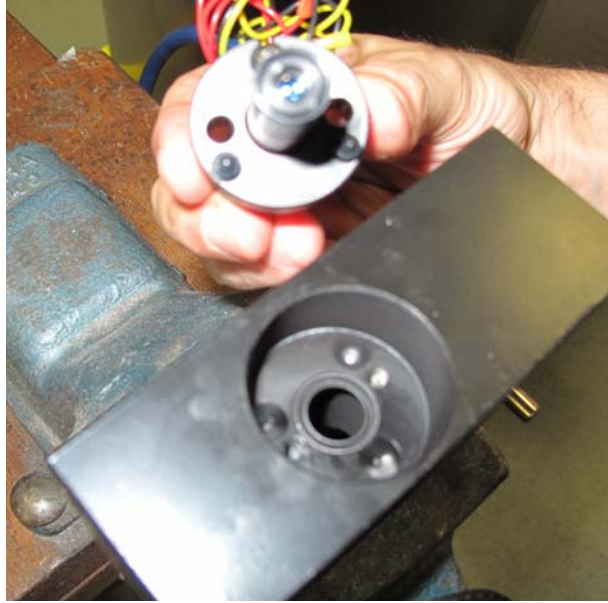
Nelle successive pagine sono riportate alcune foto in cui si possono vedere i gruppi costruiti e le soluzioni tecniche adottate.

PROTEZIONI AREA DI LAVORO





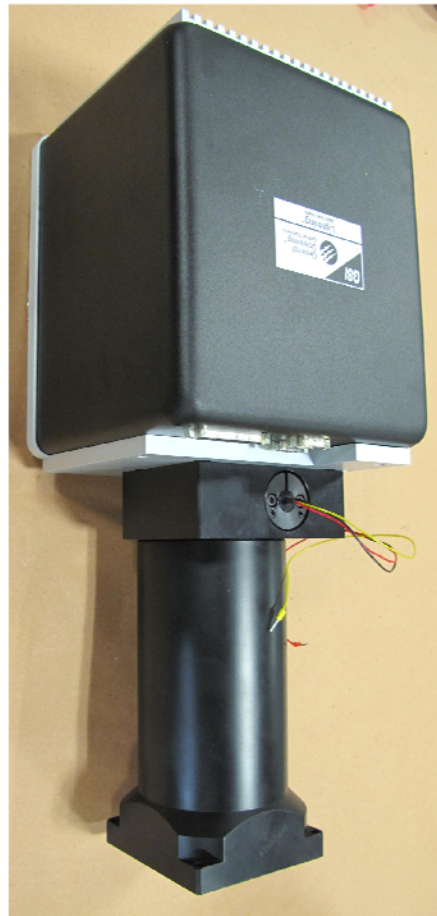
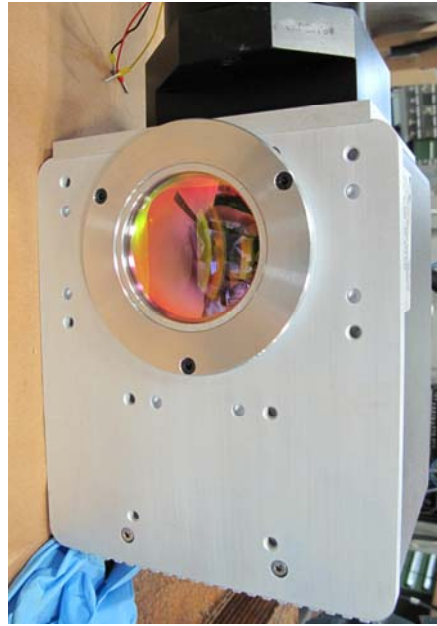
DISPOSITIVO ALLINEAMENTO PUNTATORE



DISPOSITIVO E BANCO D'ALLINEAMENTO







SORGENTE E DISPOSITIVI DI GESTIONE DEL FASCIO

SIMULATORE



BIBLIOGRAFIA

- [1] Appunti di optoelettronica M.Brenici
- [2] Appunti delle lezioni Corso di Applicazioni di Elettromagnetismo cap.2 Elena Botta
- [3] Appunti delle lezioni Corso di Applicazioni di Elettromagnetismo cap.4 Elena Botta
- [4] Ottica gaussiana Relazione di Ottica Quantistica. Prof. Giulietti Danilo
- [5] Appunti delle lezioni Corso di Applicazioni di Elettromagnetismo cap 5 Elena Botta
- [6] Beam Profiling. Allen Cary
- [7] Principi di funzionamento dei laser e caratteristiche della radiazione emessa. Dr. Guido Toci
- [8] Appunti delle lezioni Corso di Applicazioni di Elettromagnetismo cap.6 Elena Botta
- [9] Doctoral Thesis "The Absorption of Laser Light by Rough Metal Surfaces" 2008:08. David Bergström
- [10] LASER: CARATTERISTICHE, PRINCIPI FISICI, APPLICAZIONI Prof. Francesco Fusco
- [11] Seminario presso panasonic works 02/2009 Prof. Paolo VILLORESI
- [12] Sperimentazione comparata di sistemi di adduzione del gas per la saldatura laser della lega di alluminio AA5083 Dr.Giuseppe Basile;
- [13] "Study of dynamic absorptivity at 10.6 μm (CO₂) and 1.06 μm (Nd-YAG) wavelengths as a function of Temperature Sainte-Catherine", a cura di D.; Ricaud, J.-P.; Sabatier, L. Dec. 1991
- [14] Microelectronics and Reliability "laser processing for microelectronics packaging application" a cura di Zsolt Illyefalvi-Vitéz 2000
- [15] Journal of Materials Processing Technology 159 (2005) 279–285 "Laser cutting of different polymeric plastics" a cura di F. Caiazza , F. Curcio ,G. Daurelio , F. Memola Capece Minutolo
- [16] Proceedings of the International Conference on LASERS'98 "Theoretical and empirical sequential modeling of CO₂ laser cutting of polymetacrilate" a cura di Cicala, E.F. ; Nichici, A. ; Ignat, S.A.
- [17] FASCI GAUSSIANI - C. Calì - DIEET-UNIPA (2007.1)
- [18] Optical substrate for high power for CO₂ laser II-VI
- [19] Laser focus world "Optical Materials: Silicon carbide mirrors benefit high-speed laser scanning" 2008 a cura di KEVIN F. CARR

Ringrazio tutte le persone che mi hanno sostenuto e incoraggiato nel raggiungimento di questo importante traguardo.

In particolare ringrazio:

l'Ing. Spirito, che con la sua inestimabile assistenza ha permesso la realizzazione di questo lavoro di tesi;

gli ex-coinquilini, ormai validi amici su cui poter contare, protagonisti di tanti momenti della mia vita universitaria che rimarranno per sempre tra i miei ricordi più belli. In ordine di apparizione: Soss, Fabio, Alessio, Nico, Dario, Luca, Daniele, Miki.

gli amici di Fossacesia, conosciuti, non so neanche quando, probabilmente ci sono sempre stati e sempre ci saranno

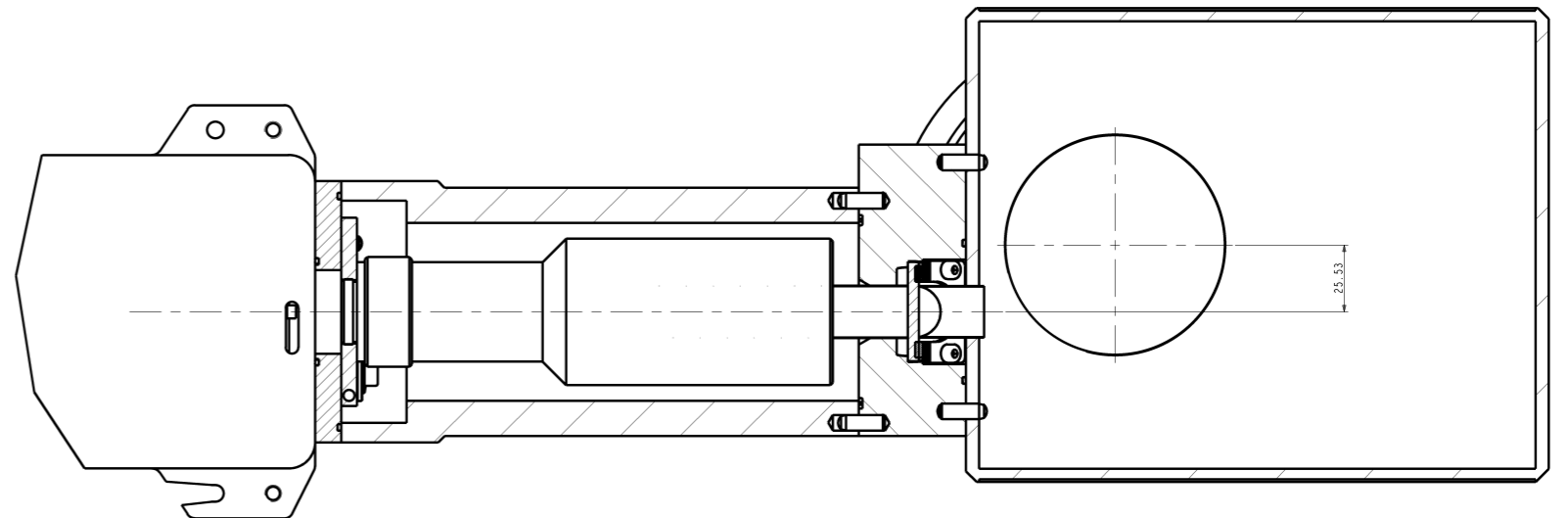
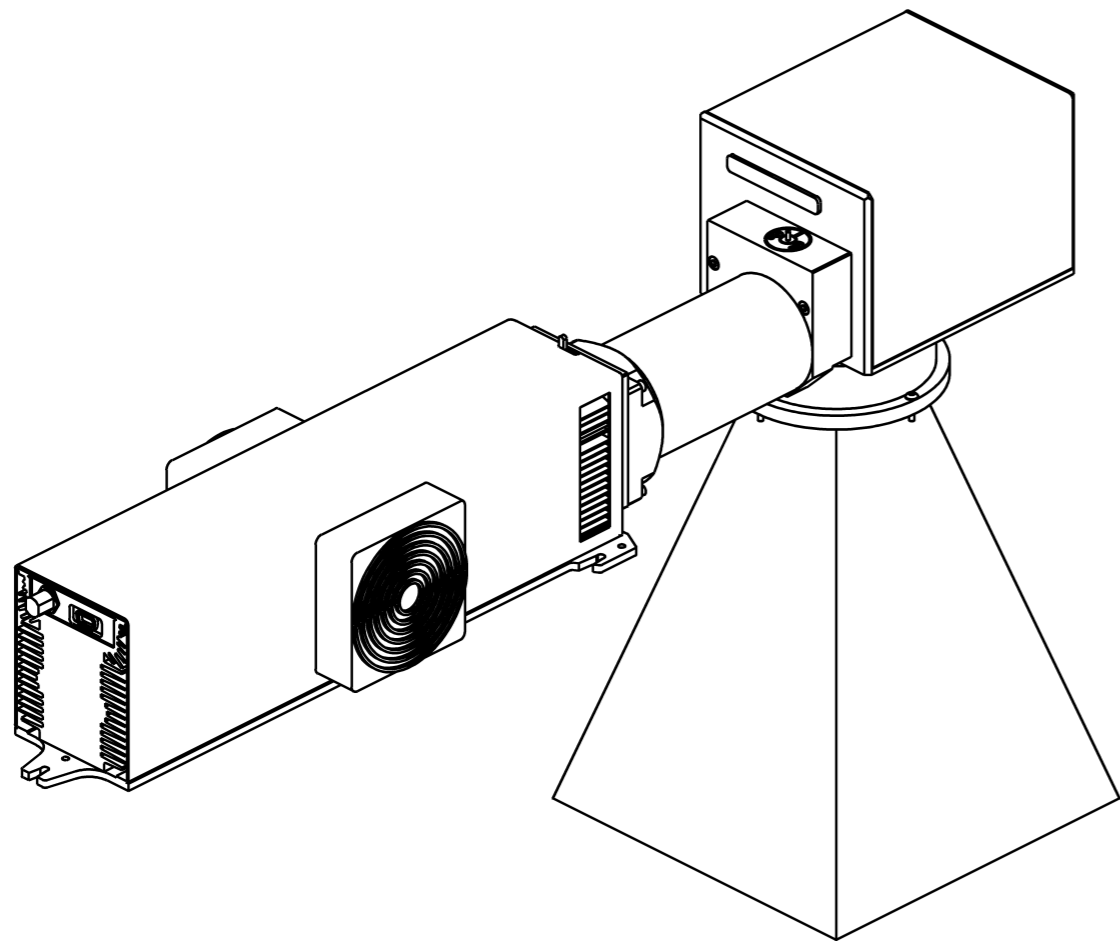
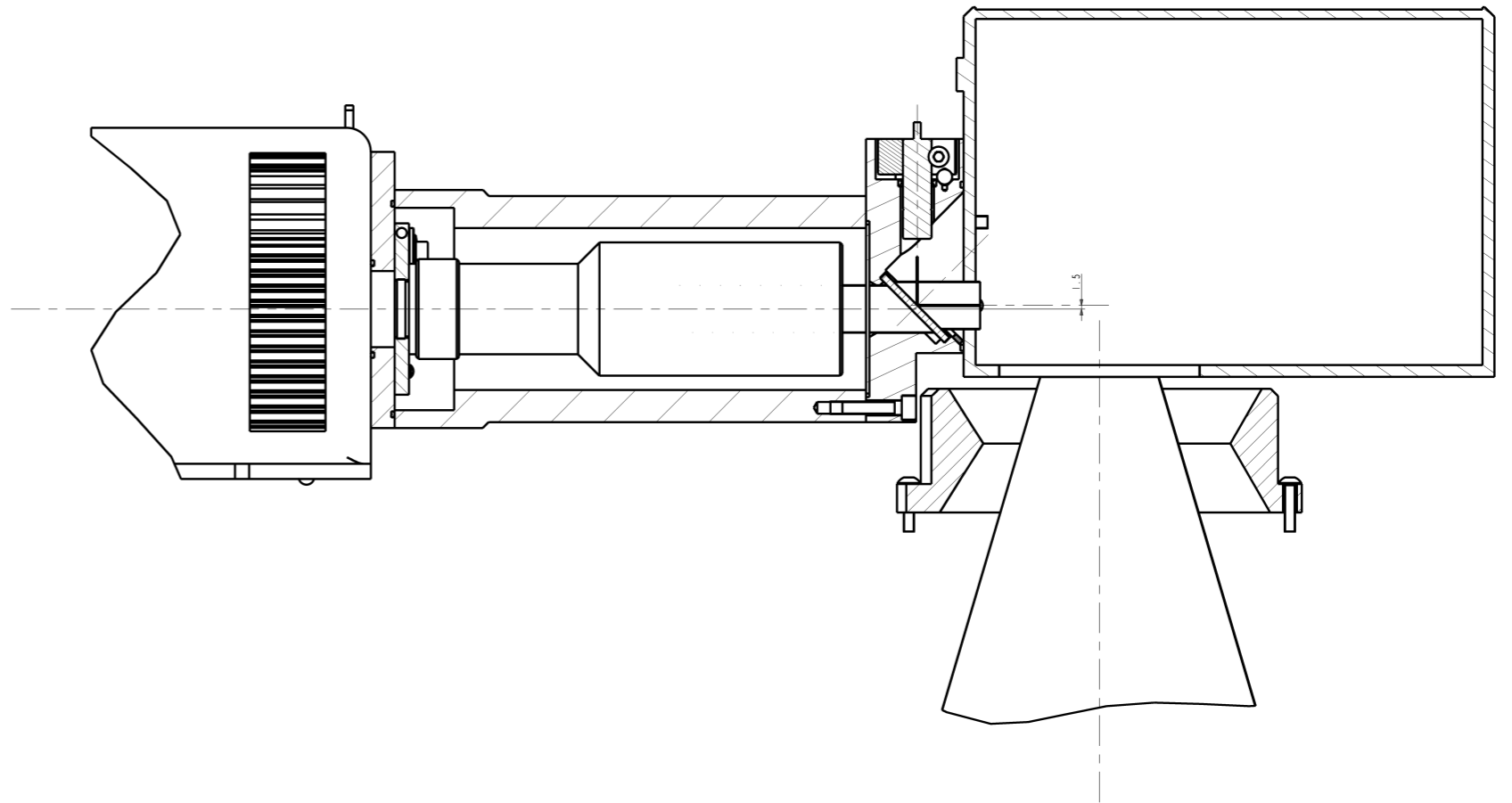
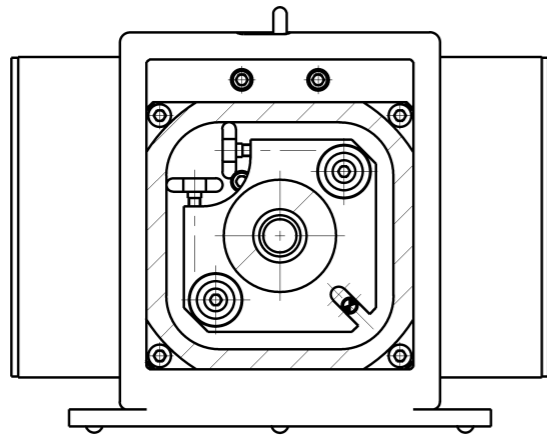
Teseo amico che più di tutti sa ascoltare

Lucia che in questi ultimi mesi mi ha sopportato e supportato con tutta la pazienza di cui disponeva, non so davvero come abbia fatto;

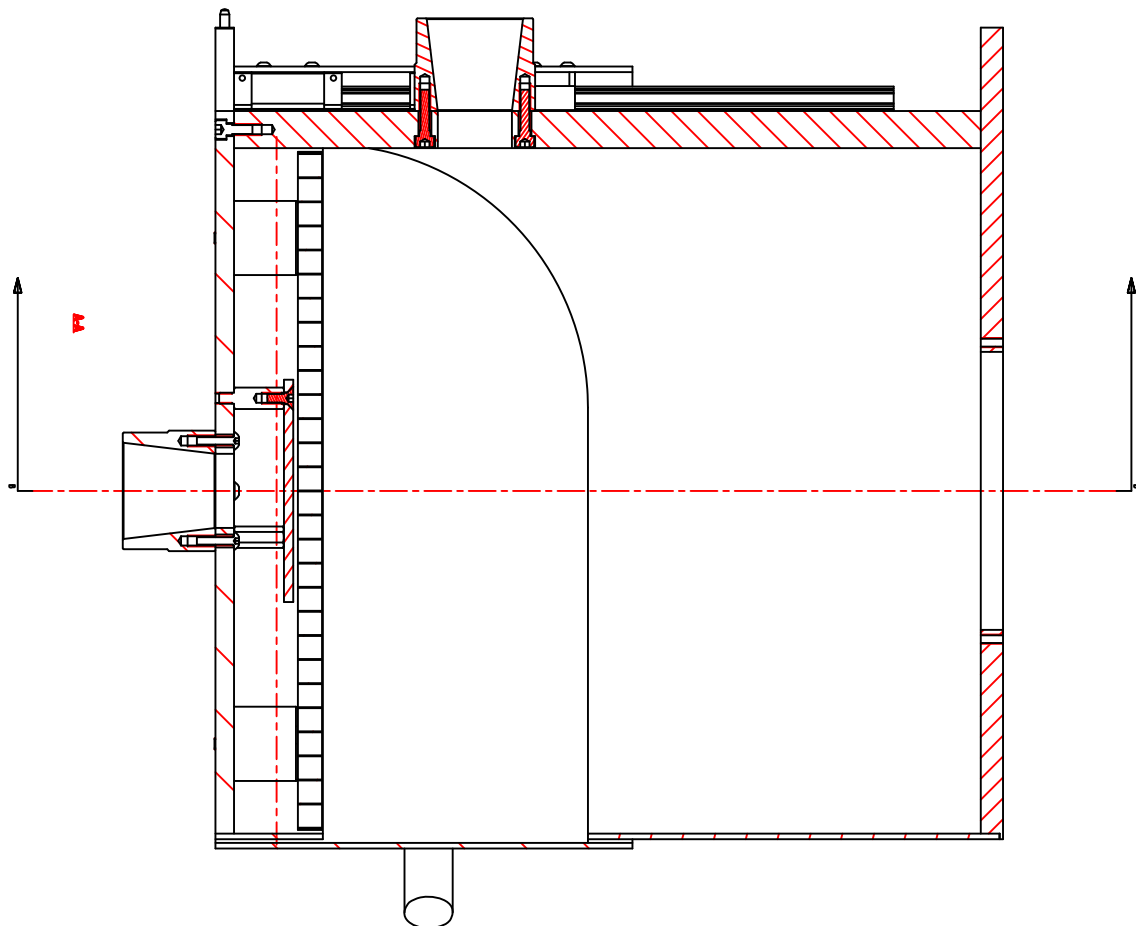
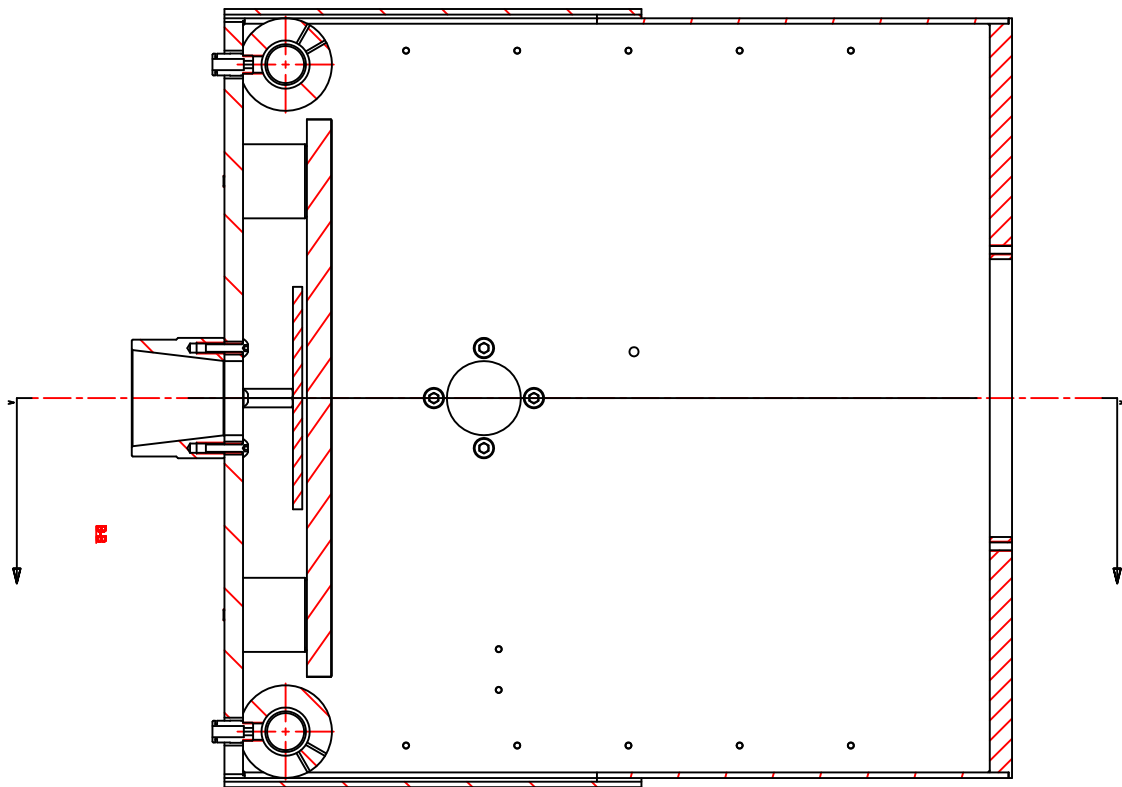
Emilio fratello e amico come pochi;

i nonni che crescendomi amorevolmente mi hanno fatto diventare quello che sono;

i miei genitori che sostenendomi come nessun altro durante tutta la mia vita mi hanno sempre aiutato con tutti i loro mezzi, grazie davvero di tutto.

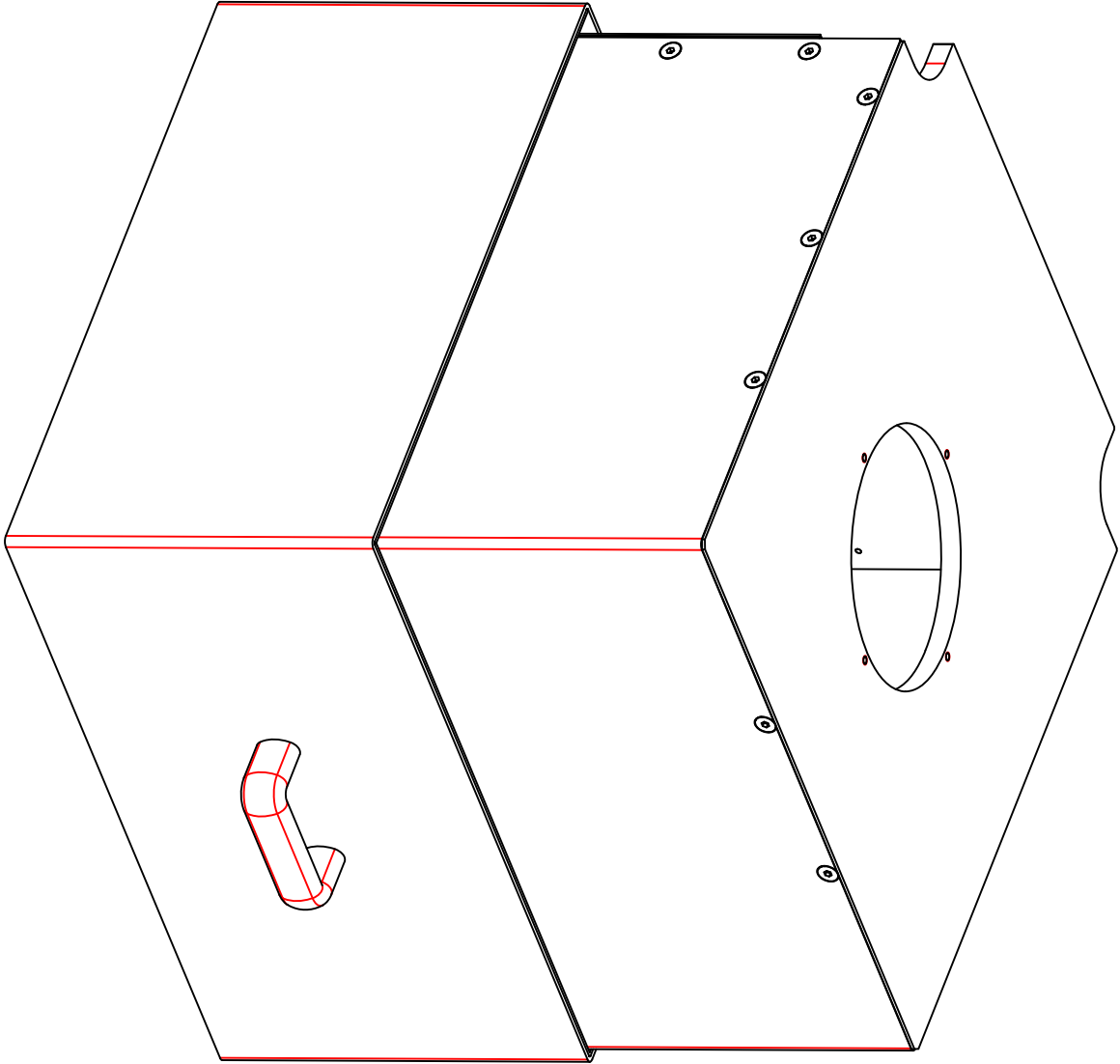
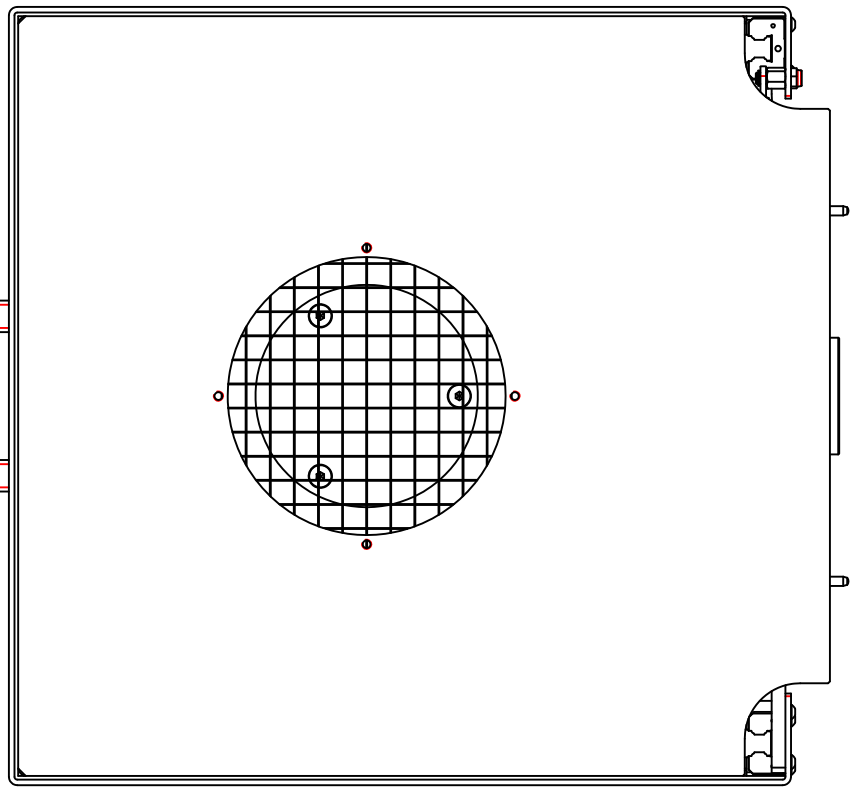


G.D.			
MULTIPLI SCALARI S. L. S.p.A.		OGGI TO	
0.5	0.5	SCALARI NON QUOTATI:	SCALARI NON QUOTATI:
0.3	0.3		
0.1	0.1		
0.1	0.1		
0.1	0.1		
PONTI - ALBERTI		STABILIZZATORE	

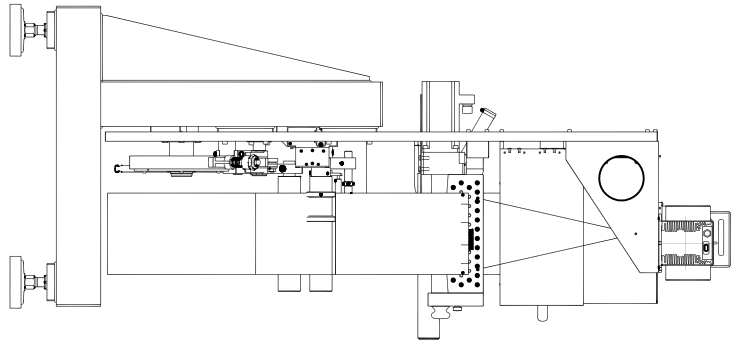
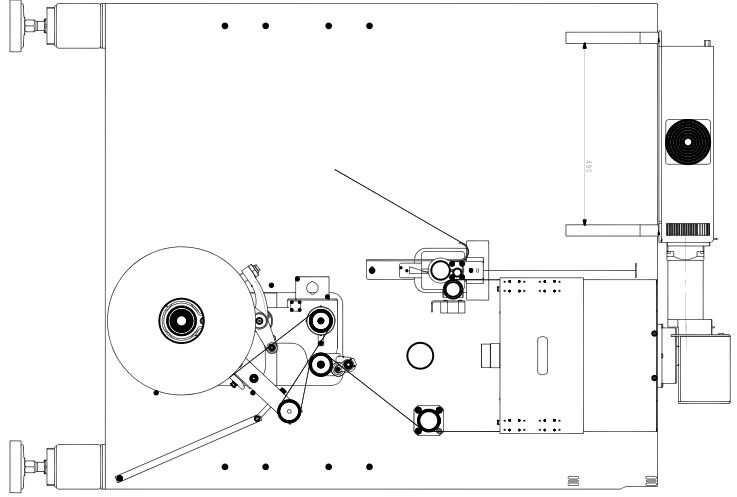
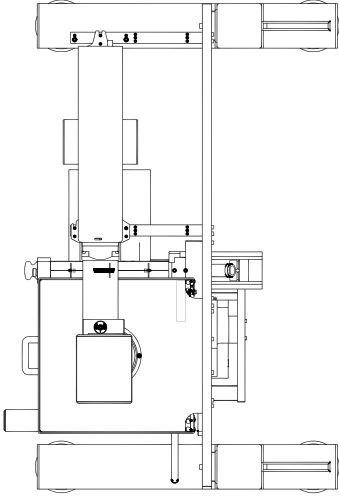
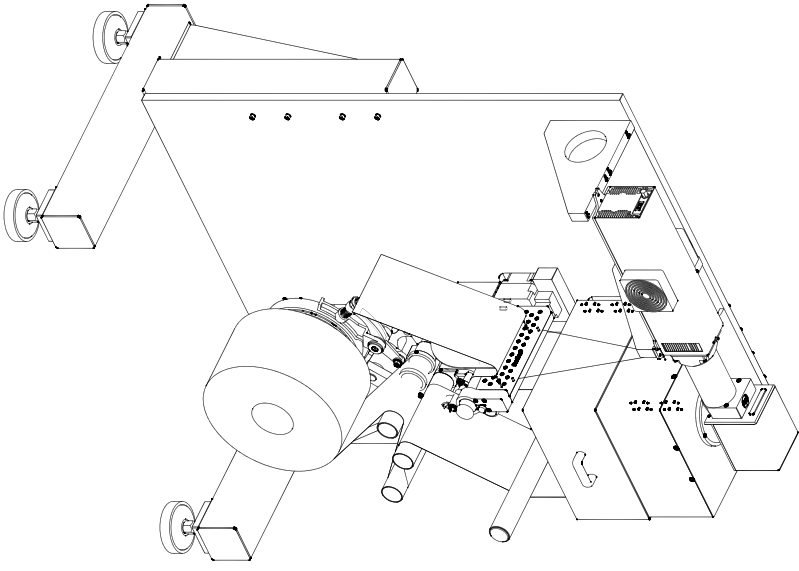


PROJEKT	
NO. 1	PROJEKT
NO. 2	PROJEKT
NO. 3	PROJEKT
NO. 4	PROJEKT
NO. 5	PROJEKT
NO. 6	PROJEKT
NO. 7	PROJEKT
NO. 8	PROJEKT
NO. 9	PROJEKT
NO. 10	PROJEKT
NO. 11	PROJEKT
NO. 12	PROJEKT
NO. 13	PROJEKT
NO. 14	PROJEKT
NO. 15	PROJEKT
NO. 16	PROJEKT
NO. 17	PROJEKT
NO. 18	PROJEKT
NO. 19	PROJEKT
NO. 20	PROJEKT
NO. 21	PROJEKT
NO. 22	PROJEKT
NO. 23	PROJEKT
NO. 24	PROJEKT
NO. 25	PROJEKT
NO. 26	PROJEKT
NO. 27	PROJEKT
NO. 28	PROJEKT
NO. 29	PROJEKT
NO. 30	PROJEKT
NO. 31	PROJEKT
NO. 32	PROJEKT
NO. 33	PROJEKT
NO. 34	PROJEKT
NO. 35	PROJEKT
NO. 36	PROJEKT
NO. 37	PROJEKT
NO. 38	PROJEKT
NO. 39	PROJEKT
NO. 40	PROJEKT
NO. 41	PROJEKT
NO. 42	PROJEKT
NO. 43	PROJEKT
NO. 44	PROJEKT
NO. 45	PROJEKT
NO. 46	PROJEKT
NO. 47	PROJEKT
NO. 48	PROJEKT
NO. 49	PROJEKT
NO. 50	PROJEKT
NO. 51	PROJEKT
NO. 52	PROJEKT
NO. 53	PROJEKT
NO. 54	PROJEKT
NO. 55	PROJEKT
NO. 56	PROJEKT
NO. 57	PROJEKT
NO. 58	PROJEKT
NO. 59	PROJEKT
NO. 60	PROJEKT
NO. 61	PROJEKT
NO. 62	PROJEKT
NO. 63	PROJEKT
NO. 64	PROJEKT
NO. 65	PROJEKT
NO. 66	PROJEKT
NO. 67	PROJEKT
NO. 68	PROJEKT
NO. 69	PROJEKT
NO. 70	PROJEKT
NO. 71	PROJEKT
NO. 72	PROJEKT
NO. 73	PROJEKT
NO. 74	PROJEKT
NO. 75	PROJEKT
NO. 76	PROJEKT
NO. 77	PROJEKT
NO. 78	PROJEKT
NO. 79	PROJEKT
NO. 80	PROJEKT
NO. 81	PROJEKT
NO. 82	PROJEKT
NO. 83	PROJEKT
NO. 84	PROJEKT
NO. 85	PROJEKT
NO. 86	PROJEKT
NO. 87	PROJEKT
NO. 88	PROJEKT
NO. 89	PROJEKT
NO. 90	PROJEKT
NO. 91	PROJEKT
NO. 92	PROJEKT
NO. 93	PROJEKT
NO. 94	PROJEKT
NO. 95	PROJEKT
NO. 96	PROJEKT
NO. 97	PROJEKT
NO. 98	PROJEKT
NO. 99	PROJEKT
NO. 100	PROJEKT

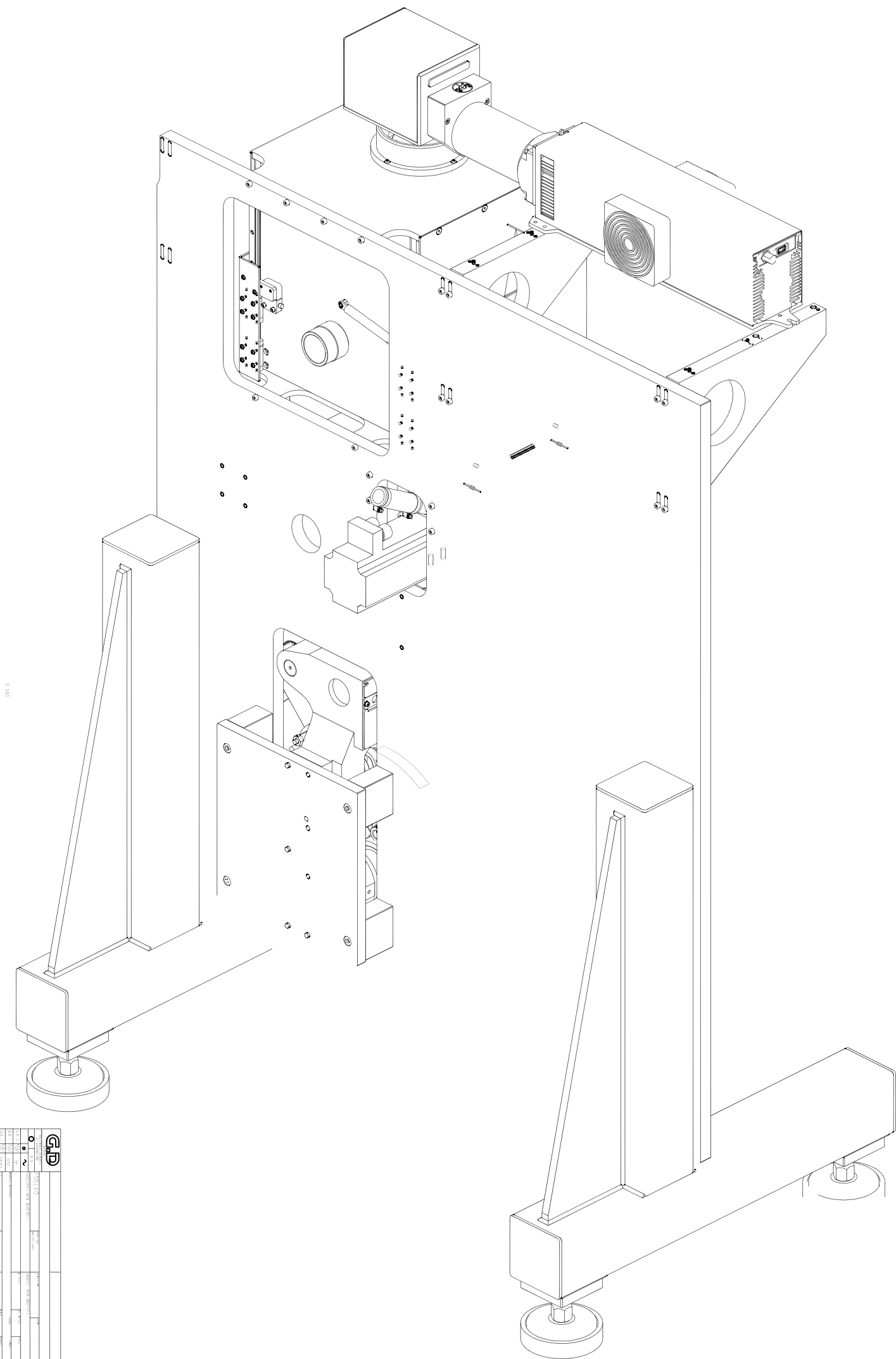
№ проекта	ИЗВ. №	ИЗМ. №	ИЗМ. №	ИЗМ. №	ИЗМ. №	ИЗМ. №	ИЗМ. №	ИЗМ. №	ИЗМ. №	ИЗМ. №	ИЗМ. №	ИЗМ. №	ИЗМ. №	ИЗМ. №
01-18/01														
ИЗДАНИЕ: 01.18/01										ГД				
ИЗДАНИЕ: 01.18/01														



PROJEKTANT:	PROJEKTANT:	PROJEKTANT:	PROJEKTANT:
PROJEKTANT:	PROJEKTANT:	PROJEKTANT:	PROJEKTANT:
PROJEKTANT:	PROJEKTANT:	PROJEKTANT:	PROJEKTANT:
PROJEKTANT:	PROJEKTANT:	PROJEKTANT:	PROJEKTANT:
PROJEKTANT:	PROJEKTANT:	PROJEKTANT:	PROJEKTANT:
Nazwa obiektu:			
Nazwa robót:			
Inwestor:			
Branża:			
Skala:			
Data:			
Kolor:			



002 9



005 1

Model No.	XXXXXXXXXX
Part No.	XXXXXXXXXX
Rev.	1.0
Date	10/10/2023
Drawn By	XXXXXXXXXX
Checked By	XXXXXXXXXX
Approved By	XXXXXXXXXX
Project No.	XXXXXXXXXX
Project Name	XXXXXXXXXX
Project Location	XXXXXXXXXX
Project Start Date	XXXXXXXXXX
Project End Date	XXXXXXXXXX
Project Manager	XXXXXXXXXX
Project Engineer	XXXXXXXXXX
Project Designer	XXXXXXXXXX
Project Checker	XXXXXXXXXX
Project Approver	XXXXXXXXXX
Project Status	XXXXXXXXXX
Project Description	XXXXXXXXXX
Project Details	XXXXXXXXXX
Project Notes	XXXXXXXXXX