

UNIVERSITÀ DEL SALENTO

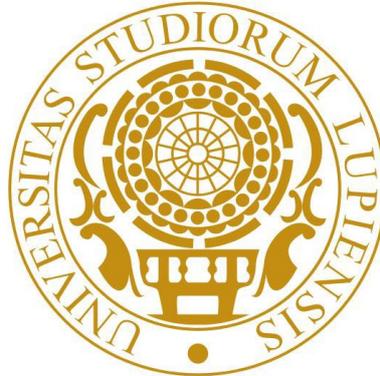
Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in Ingegneria Industriale

Tesi di laurea Triennale

Rivelatori ad altissima trasparenza per la fisica delle particelle

Modellazione e realizzazione del prototipo di un rivelatore multi filo a
deriva per l'esperimento Mu2e



Relatori:

Ch.mo Prof. Domenico Laforgia

Ch.mo Prof. Marco Panareo

Candidato:

Matteo Spedicato

a.a. 2013-2014

Ai miei Nonni

Ringraziamenti

Desidero ricordare tutti coloro che mi hanno aiutato nella stesura della tesi con suggerimenti, critiche ed osservazioni: a loro va la mia gratitudine, anche se a me spetta la responsabilità per quanto ivi contenuto. Ringrazio anzitutto il professor Domenico Laforgia ed il professor Marco Panareo, relatori: senza il loro supporto e la loro guida sapiente questa tesi non esisterebbe.

Proseguo con il personale dell'Istituto Nazionale di Fisica nucleare di Lecce, attraverso il suo direttore Dottor Giovanni Mancarella. In particolare desidero ricordare il dirigente di ricerca Dottor Francesco Grancagnolo: ha suscitato in me l'interesse per argomenti estranei al mio percorso di studi. Un sentito ringraziamento è rivolto al personale tecnico del Servizio Meccanica Sig. Alessandro Miccoli e Sig. Giuseppe Fiore: entrambi hanno permesso la mia crescita professionale trasferendo parte delle loro esperienze e conoscenze, mettendomi alla prova, correggendo i miei sbagli, ascoltando e commentando le mie proposte.

Un ringraziamento particolare va alla mia famiglia: attraverso i vostri incoraggiamenti, le vostre critiche e il vostro aiuto, mi avete accompagnato in questo percorso di studi. A mio padre Antonio e mia madre Valeria: mi avete trasmesso il valore della famiglia, della collaborazione e dell'amore reciproco. A mia sorella Sara: anche se siamo spesso in contrapposizione ti voglio un bene dell'anima e sono orgoglioso della donna che stai diventando. Infine, ma non in ordine di importanza, un pensiero è rivolto a Giulia, compagna di quella magnifica avventura che è la vita: mi sei stata vicina nella tempesta come nel sereno, donandomi il tuo amore ogni giorno. Mi hai supportato nei momenti difficili spronandomi a non mollare, ti sei fatta carico delle mie debolezze e mi hai reso una persona migliore..

Grazie a coloro che hanno fatto un po' di più, si sono spinti un tantino più in là e si sono sforzati più dello stretto necessario: per me questo ha fatto la differenza.

Arnesano, 16 luglio 2014

Matteo Spedicato

Sommario

Questo lavoro di tesi è volto alla modellazione e realizzazione del prototipo di un tracciatore multi-filo a deriva. Nella prima parte sarà trattato il contesto scientifico in cui questo lavoro si pone, fornendo accenni di fisica delle particelle, descrivendo, brevemente quali sono le finalità dell'esperimento "Mu2e" e la struttura complessiva dell'apparato.

La seconda parte avrà come oggetto il suddetto prototipo: si fornirà una descrizione approfondita degli elementi che lo caratterizzano, dei processi tecnologici utilizzati per realizzarli, motivando le scelte progettuali effettuate.

Nella terza parte sarà trattata l'innovativa procedura di assemblaggio utilizzata e si fornirà una descrizione dettagliata delle attrezzature necessarie alla costruzione.

Infine, si effettuerà un'analisi critica del lavoro svolto, ponendo l'accento sulle problematiche emerse e fornendo, laddove possibile, le proposte per eventuali soluzioni da implementare per sviluppi futuri.

Indice

Sommario	iv
1 Introduzione alla fisica delle particelle e descrizione dell'esperimento	1
1.1 Cenni di Fisica delle particelle	1
1.1.1 I costituenti della materia	1
1.1.2 Le interazioni fondamentali	2
1.1.3 Il MODELLO STANDARD	3
1.2 L'esperimento	5
1.2.1 Finalità dell'esperimento	5
1.2.2 Descrizione dell'apparato	6
1.2.3 Le camere a deriva	7
2 Il prototipo	10
2.1 Descrizione del prototipo	10
2.2 Le PC-Board	13
2.3 Gli spacer	14
2.4 I fili	16
2.4.1 Caratterizzazione dei fili	17
2.5 Frame di supporto delle PC-Board	18
2.6 Box di test	21
2.7 Il sistema di distribuzione del gas	23
3 Assemblaggio del prototipo e attrezzature	26
3.1 Macchina di filatura	26
3.1.1 Descrizione Hardware	26
3.1.2 Descrizione Software	31
3.2 Attrezzatura di messa in tiro dei fili	32
3.3 Procedura di assemblaggio	32

4 Conclusioni	39
A Tavole	41
B Tabelle	60
Bibliografia	70

Elenco delle figure

1.1	I costituenti della materia	2
1.2	Il MODELLO STANDARD	4
1.3	Schema delle componenti dell'esperimento Mu2e	6
1.4	Esempio di una camera proporzionale a multi filo	7
1.5	Principio di funzionamento di una camera a deriva	8
1.6	La camera a drift di KLOE	9
2.1	Tipologie di PC-Board	11
2.2	Stratigrafia di una cella	12
2.3	Tipologie di PC-Board	14
2.4	Dimensioni principali delle PC-Board	15
2.5	Spaziatori in policarbonato	16
2.6	Comportamento dei fili sotto carico	19
2.7	Deformazione frame di supporto delle PC-Board	21
2.8	Il sistema di distribuzione del gas	25
3.1	Macchina di filatura	27
3.2	Testina di posizionamento	28
3.3	Software di controllo della macchina di filatura	33
3.4	Attrezzatura di messa in tiro dei fili	34
3.5	Fasi del processo di filatura	37
3.6	Fasi del processo di assemblaggio	38

Elenco delle tabelle

B.1	Parametri geometrici delle PC-Board	60
B.2	Coordinate degli spigoli delle PC-Board	65

Capitolo 1

Introduzione alla fisica delle particelle e descrizione dell'esperimento

1.1 Cenni di Fisica delle particelle

Lo scopo del seguente capitolo è fornire alcune nozioni di base di fisica delle particelle, attraverso delle informazioni generali riguardo la fisica moderna e la struttura della materia come oggi la conosciamo, per introdurre l'esperimento Mu2e e chiarire cosa esso si propone di studiare.

1.1.1 I costituenti della materia

Alla fine del diciannovesimo secolo era condizione diffusa che la materia fosse composta da particelle elementari: gli atomi. L'esistenza di circa cento elementi chimici, con caratteristiche ricorrenti, portava alla conclusione che essi avessero una struttura interna. Nello studio della fisica atomica era sufficiente ammettere la validità della legge di Coulomb e conoscere l'esistenza del nucleo, composto da protone e neutrone, e dell'elettrone, per avere un'idea del raggio d'azione e dell'intensità delle forze nucleari. Tuttavia tali conoscenze si rivelarono insufficienti per spiegare come funziona il nucleo, come interagiscono le particelle al suo interno e quali forze le tengono insieme. La scoperta e l'analisi del decadimento beta nel 1930 presentava nuovi problemi e un nuovo punto di partenza a sviluppi successivi, in quanto portò alla scoperta di una quarta particella, il neutrino, la cui esistenza era stata ipotizzata in accordo con le leggi fondamentali di conservazione dell'energia, dell'impulso e del momento angolare. Contemporaneamente la scienza sperimentale portò alla scoperta di nuove particelle che lo sviluppo tecnico di grandi macchine acceleratrici ha poi permesso di produrre in laboratorio e ha dato la possibilità di studiarle in dettaglio. Bombardando il nucleo con protoni si rivelò l'emissione

di nuove particelle ed aumentando l'energia delle collisioni si scoprirono sempre più particelle, arrivando a catalogarne a centinaia. Dunque, era chiaro che tali particelle non potessero essere considerate "fondamentali". Al presente, le particelle elementari sono: leptoni, quark e mediatori delle interazioni. Al fine di trovare un denominatore comune a tutti i fenomeni fisici osservati, si sono sviluppate e si vanno sviluppando interessanti teorie, tra cui il MODELLO STANDARD o la TEORIA DELLE STRINGHE. Quello a cui nessuna teoria può sottrarsi è il confronto con i dati sperimentali: le predizioni teoriche devono convergere alla realtà degli eventi naturali, valutandone l'errore commesso e il loro campo di applicabilità.

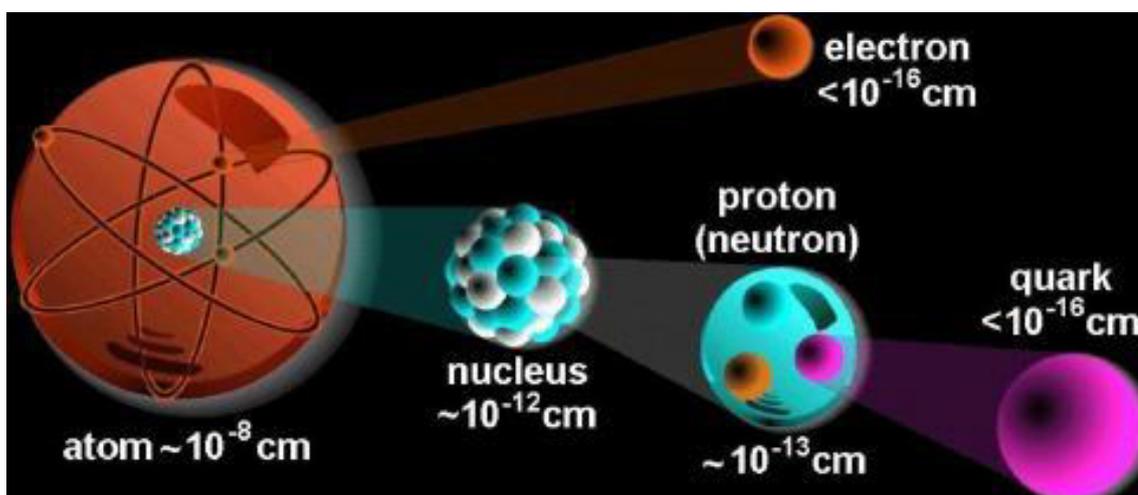


Figura 1.1: La struttura della materia

1.1.2 Le interazioni fondamentali

Parallelamente allo studio di particelle via via più elementari, seguiva l'analisi delle forze attive in natura e quindi delle interazioni tra particelle. Al presente le interazioni fondamentali che regolano tutti i fenomeni fisici sono quattro:

interazione gravitazionale, interpretata, nella fisica classica, come una forza attrattiva mutuamente scambiata tra corpi dotati di massa e, nella relatività generale, come una conseguenza della curvatura dello spaziotempo, dovuta dalla presenza di corpi dotati di massa o energia

interazione elettromagnetica, definita come una forza generata da un campo elettromagnetico su particelle cariche in condizioni di quiete o di moto

interazione forte, responsabile del legame tra quark nella formazione dei protoni, neutroni ed altre particelle

interazione debole, forza che può manifestarsi tra leptoni e quark, tra soli leptoni o tra soli quark, che può intervenire sui neutrini ed è anche responsabile del decadimento β .

Si sono sviluppate inoltre alcune teorie che tenderebbero ad un ulteriore raggruppamento: l'interazione elettromagnetica e quella debole, sarebbero assimilabili ad un unico fenomeno, l'interazione "elettrodebole"; la forza gravitazionale e quella elettromagnetica potrebbero essere descritte tramite un modello unificato denominato "supergravità". Tuttavia queste teorie non hanno fino ad ora trovato alcun riscontro sperimentale.

1.1.3 IL MODELLO STANDARD

Il MODELLO STANDARD è una teoria quantistica elaborata allo scopo di descrivere tre interazioni fondamentali, escludendo la forza gravitazionale, e le particelle ad esse collegate. È stata sviluppata nei primi anni '70 ed è considerata una delle maggiori conquiste della fisica delle particelle, poiché in grado di classificare le particelle elementari.

Secondo il principio di esclusione di Pauli, non possono esistere contemporaneamente e nello stesso luogo due particelle nello stesso stato (identico spin, identica carica di colore, identico momento angolare, etc.). Il modello prevede il raggruppamento delle particelle in due categorie:

- I **Fermioni**, a cui appartengono leptoni e quark, sono soggetti al principio di esclusione di Pauli, sono raggruppati in sei categorie, tre "generazioni" di leptoni e tre di quark e costituiscono tutta la materia conosciuta;
- I **Bosoni** sono noti come particelle "mediatrici di forza", che rendono possibili le interazioni fondamentali e non sono soggetti al principio di esclusione di Pauli.

Le tre generazioni di quark costano ciascuna di un quark di carica $+2/3$ ed uno di carica $-1/3$ della carica dell'elettrone. I quark di prima generazione sono *up* e *down* (u , d) quelli di seconda *charm* e *strange* (c , s) e la terza è composta da *top* e *bottom* (t , b). I quark di prima generazione, se combinati secondo lo schema *uud* formano il protone, mentre nello schema *udd* il neutrone. I quark di seconda e terza generazione non sono stabili e possono decadere in elementi della prima generazione. I quark hanno "carica di colore" che li rende soggetti all'interazione forte: tale interazione aumenta all'aumentare della distanza, facendo sì che essi non possano mai essere osservati separatamente, bensì in gruppi aventi carica di colore complessiva nulla e carica elettrica che è sempre un numero intero. I gruppi formati da quark prendono il nome di adroni.

I leptoni sono particelle fondamentali aventi spin $1/2$ di \hbar ¹ e sono suddivisi in tre generazioni, ad ognuna delle quali è associato un neutrino: elettrone e e neutrino ν_e , muone μ e neutrino ν_μ , tauone τ e neutrino ν_τ .

¹ $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ indicando con h la costante di Plank

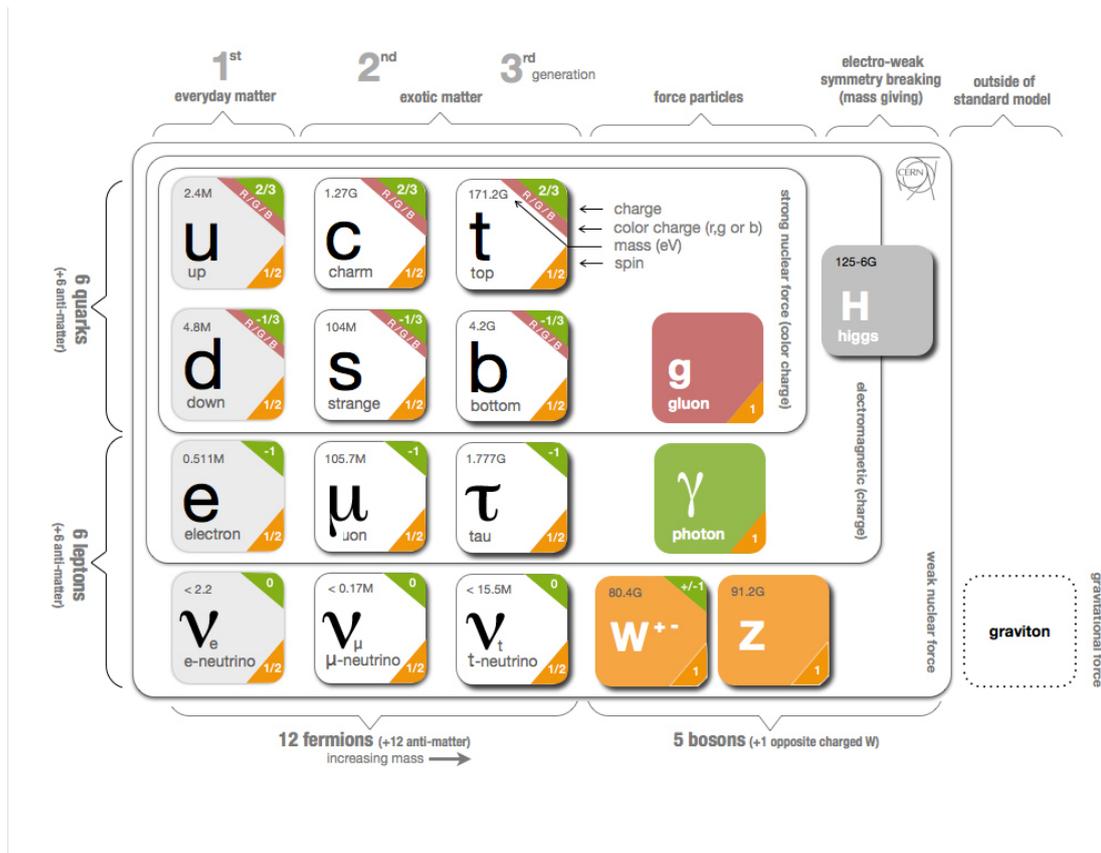


Figura 1.2: Le particelle fondamentali descritte dal MODELLO STANDARD .

I bosoni vettori, come precedentemente affermato, sono i mediatori delle tre forze fondamentali e il loro numero dipende dalle proprietà del modello matematico che descrive il gruppo di appartenenza. Il fotone γ è il mediatore dell'interazione elettromagnetica, ai bosoni W^+ , W^- e Z si associa l'interazione debole, mentre i mediatori dell'interazione forte sono otto gluoni indipendenti (dall'inglese *glue colla*). In Figura 1.2 è riportata una tabella riassuntiva delle particelle contemplate dal modello standard con alcune loro proprietà. La teoria di gauge, su cui si basa il MODELLO STANDARD , non è in grado di descrivere bosoni vettori (*spin* unitario) dotati di massa, osservati sperimentalmente. Introducendo un ulteriore bosone massivo, il bosone di Higgs H , è possibile includere anche i bosoni massivi, ovvero spiegare la massa dei fermioni. Nel 2012 è stato dato l'annuncio dell'osservazione sperimentale di una particella con caratteristiche assimilabili al bosone di Higgs.

Nonostante la congruenza di molti risultati sperimentali, il MODELLO STANDARD non è ancora stato accettato come teoria completa, a causa di alcuni aspetti:

1. esso contiene ben 19 parametri liberi che devono essere determinati sperimentalmente;
2. non contempla la quarta interazione fondamentale, quella gravitazionale;
3. non prevede l'esistenza della materia oscura;
4. non prevede che i neutrini siano dotati di massa.

Alcune teorie tenderebbero ad estendere il MODELLO STANDARD come, ad esempio, la teoria della Supersimmetria. La Grand unification theory (GUT) tenderebbe a unificare diverse teorie e ad estendere il modello standard.

1.2 L'esperimento

1.2.1 Finalità dell'esperimento

Nel MODELLO STANDARD i leptoni compaiono in tre generazioni, a ciascuna delle quali è associato un numero quantico, detto numero o sapore (dall'inglese *flavor*) leptonico. Il numero leptonico totale è conservato, anche se non esiste una simmetria nota associata a tale legge. Il MODELLO STANDARD non prevede l'esistenza di neutrini massivi ma l'evidenza sperimentale delle oscillazioni dei neutrini richiede che la loro massa sia diversa da zero. L'estensione del MODELLO STANDARD a neutrini massivi implica la possibilità di mescolamento tra sapori leptonici, cioè l'esistenza di fenomeni con *cLFV* (*charged lepton flavour violation*). Se ciò avvenisse, si avrebbe un chiaro segnale di fisica oltre il MODELLO STANDARD. I fenomeni legati alla possibile osservazione di questa violazione sono molteplici:

- Decadimento doppio-beta senza neutrini ($\beta\beta 0\nu$) $N \rightarrow N' e^- e^-$
- Conversione di μ^- in e^- nel campo di un nucleo $\mu^- N \rightarrow e^- N$
- Varie tipologie di decadimenti di leptoni μ e τ
- Decadimento di mesoni con due leptoni di egual carica
- Decadimento di mesoni con un leptone o con leptoni di sapore diverso
- etc.

Lo scopo principale dell'esperimento *Mu2e* [1] è la ricerca di un'eventuale violazione della legge di conservazione del numero leptonico nel processo di conversione $N \rightarrow N' e^- e^-$ con una sensibilità

$$R_{\mu e} = \frac{\mu^- + A(Z, N) \rightarrow e^- + A(Z, N)}{\mu^- + A(Z, N) \rightarrow \nu_\mu + A(Z - 1, N)} \leq 6 \cdot 10^{-17} \quad (1.1)$$

sul 90% di confidence level. La motivazione principale per un esperimento al LHC (*Large Hadron Collider*) è la possibilità di osservare delle particelle super-simmetriche nell'ordine dei 10^{12} eV. Molti modelli di super-simmetria predicono una conversione del segnale

$\mu \rightarrow e$ con $R_{\mu e} = 10^{-15}$. Mu2e si propone di verificare la conversione $\mu \rightarrow e$ con una sensibilità maggiore di un ordine di grandezza.

1.2.2 Descrizione dell'apparato

L'esperimento Mu2e [1] sarà situato al FERMI NATIONAL LABORATORY (FNAL) e prevede lievi modifiche al complesso di accelerazione già esistente. Un *booster* accelererà i protoni necessari alla produzione del fascio muonico a $8 \cdot 10^9$ eV. In Figura 1.3 sono schematizzate le varie componenti dell'esperimento. In particolare, il fascio di protoni andrà a collidere con un bersaglio, il *Production Target*, producendo particelle che decadranno in muoni. All'interno del *Production Solenoid* è presente un gradiente magnetico da 5 a 1 Tesla, per cui i muoni vengono catturati e accelerati verso il *Transport Solenoid*, che può essere pensato come un filtro capace di far passare solo muoni negativi. I muoni μ^- verranno infine fatti collidere con una seconda targhetta, *Stopping Target*, che dovrebbe provocarne il decadimento in elettroni e^- . Il *Detector Solenoid* è il cuore dell'esperimento e contiene il *Tracker*, a cui è richiesta la ricostruzione della traccia delle particelle, e il *Calorimeter*, il cui compito è una misurazione di energia.

Il tracker Mu2e è progettato per misurare con precisione la traiettoria degli elettroni in

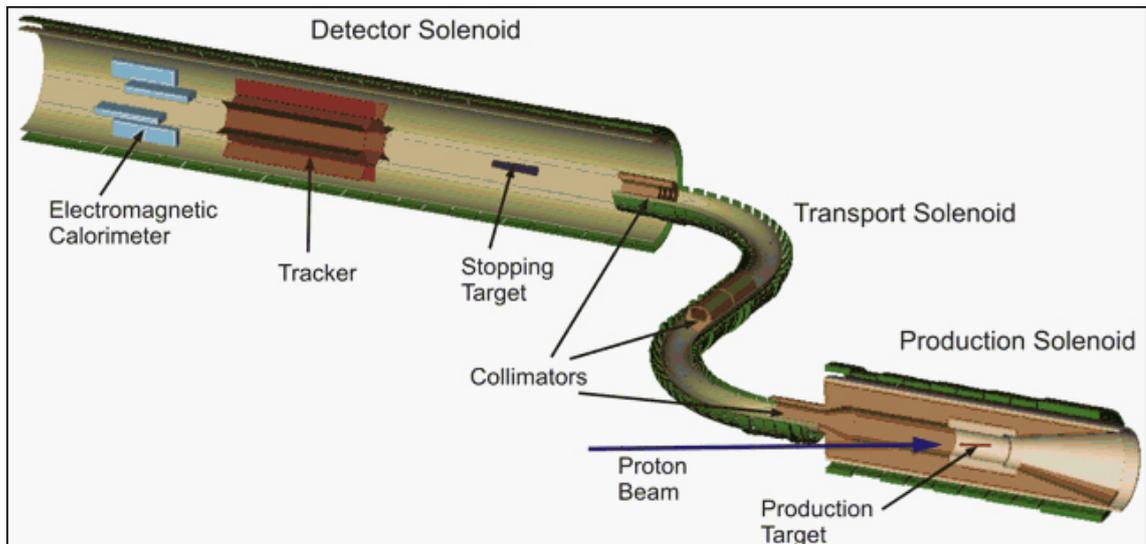


Figura 1.3: Schema delle componenti dell'esperimento Mu2e

un campo magnetico uniforme di 1 Tesla, al fine di determinare la loro quantità di moto. Sono state proposte due differenti tipologie di tracker:

- I-Tracker (*Italian Tracker*) [2]
- T-Tracker (*Transvers Tracker*)

Il primo consiste in una *camera a deriva a multi filo*, mentre il secondo in una *camera a tubes*. Questo lavoro di tesi è incentrato sulla modellazione e realizzazione del prototipo dell' I-Tracker, consistente in un ipotetico spicchio di camera.

Una commissione scientifica atta all'approvazione e al controllo dell'esperimento, ha valutato entrambe le proposte, concentrandosi sui calcoli di risoluzione, sul costo e sulla fattibilità. La scelta è infine ricaduta sul T-Tracker, nonostante le due alternative risultassero comparabili sugli aspetti sopra citati.

1.2.3 Le camere a deriva

Le *camere proporzionali a multi filo* sono dei rivelatori in grado di misurare la traiettoria di una particella carica, attraverso la sua interazione con il gas contenuto nel rivelatore. Esse sono costituite da piani paralleli di fili ($\phi \approx 10 \mu m$), ognuno dei quali alimentato e letto da un'elettronica indipendente.

Quando una particella ionizza il gas di riempimento, solo i fili più vicini alla sua traiettoria raccolgono il segnale elettrico: in questo modo il filo che produce il segnale identifica una coordinata della particella. Il campo elettrico attorno ai fili è molto elevato e questo fa sì che gli elettroni primari siano fortemente accelerati e che raggiungano energie cinetiche sufficienti a ionizzare il gas. Si produce allora una "valanga" di carica che viene raccolta sui fili e convertita in segnale elettrico, il cui tempo di arrivo e ampiezza vengono registrati elettronicamente. Interpolando le posizioni rilevate è possibile ricostruire la traiettoria della particella. Alternando piani in cui i fili sono disposti in una direzione e nella direzione ortogonale è possibile effettuare una rilevazione tridimensionale della traiettoria. In generale, tutti i rivelatori di questo tipo sono in un ambiente gassoso a bassa

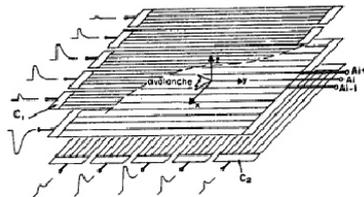


Figura 1.4: Esempio di una camera proporzionale a multi filo

densità e facilmente ionizzabile, come ad esempio una miscela *He – Ne*.

Le *camere a deriva* sono una tipologia particolare di camera proporzionale a multi filo con un funzionamento leggermente diverso. Una particella, entrando nel volume sensibile del rivelatore, libera elettroni per ionizzazione che si spostano per effetto di un intenso campo elettrico verso un filo anodico. Utilizzando un rivelatore ausiliario, quale ad esempio uno *scintillatore*, è possibile effettuare una misura del tempo che intercorre da quando la particella lo ha attraversato a quando si rileva il segnale sul filo anodico. Si ottiene allora il *tempo di deriva*. Perché il sistema funzioni è importante mantenere un campo elettrico

costante; a tal fine si circondano i fili anodici (*sense wire*) di fili catodici (*field wire*), con geometrie poliedriche aventi tutte il filo anodico in posizione centrale. A partire dalla conoscenza della velocità dell'elettrone è possibile ricavare la distanza della ionizzazione primaria. È importante avere un valore accurato della velocità di deriva degli elettroni, la

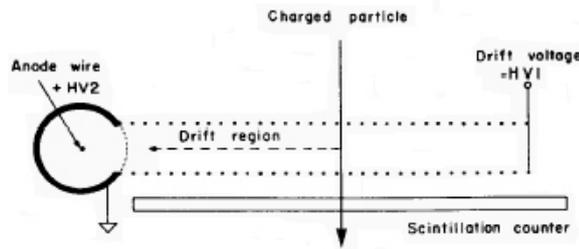


Figura 1.5: Principio di funzionamento di una camera a deriva

quale dipende dalle proprietà del gas e dal campo elettrico.

I tracciatori multi filo a deriva sono solitamente immersi in un campo magnetico uniforme al fine di determinarne la quantità di moto e il segno delle cariche. Il campo magnetico è solitamente generato tramite un solenoide, posizionato in modo tale che le sue linee di campo siano parallele alla direzione del fascio. Una particella carica in moto in un campo magnetico è soggetta alla forza di Lorentz che agisce secondo una direzione normale alla direzione del moto. La direzione della particella subirà quindi una curvatura; il verso della curvatura dipende dalla carica della particella mentre il raggio di curvatura è funzione della quantità di moto della particella. Dalla curvatura è possibile risalire quindi alla misura della quantità di moto e del segno della carica delle particelle.

Le camere a deriva esistono sia in configurazioni di tipo planare, in cui le superfici sensibili sono costituite da piani paralleli di fili, sia cilindriche, in cui le superfici sono cilindriche e coassiali.

Le camere cilindriche offrono una ricostruzione della traccia tramite interpolazione di punti aventi coordinate cilindriche $\{\theta, \rho, z\}$. Se i fili fossero disposti parallelamente all'asse del tracciatore saremmo in grado di ricavare solo due coordinate spaziali, il raggio ρ e l'angolo θ , senza avere alcuna informazione riguardo alla proiezione sull'asse del tracciatore z . Per avere una ricostruzione spaziale è quindi necessario disporre i fili secondo una geometria di tipo stereo. In particolare, incrociando strati di fili con angolo stereo di segno opposto è possibile ottenere le tre coordinate, tramite il segnale rilevato da fili vicini tra loro.

In particolare l'I-Tracker proposto è una camera a deriva a multi filo cilindrica a celle quadrate. I primi 12 layer sono formati da celle di dimensioni $6,58 \text{ mm} \times 6,58 \text{ mm}$ che

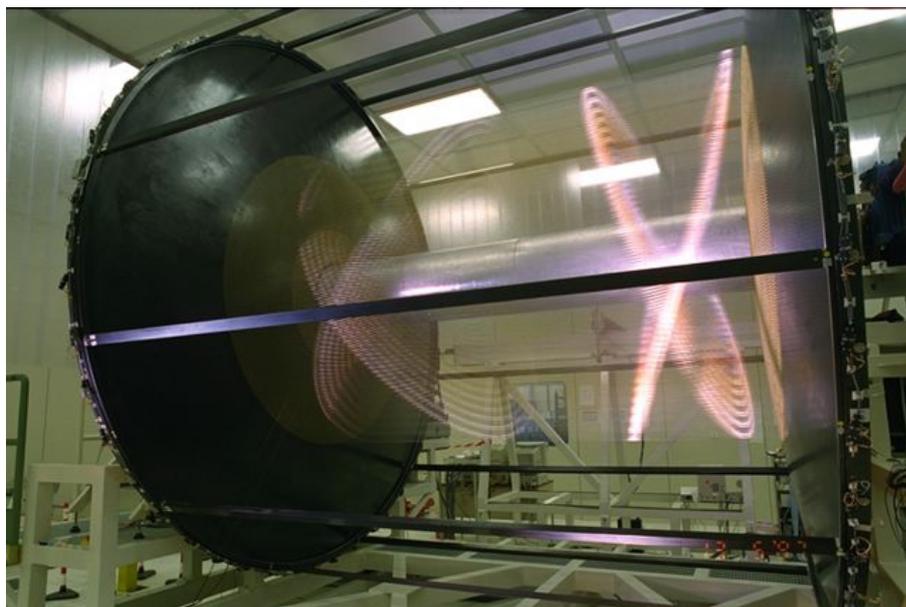


Figura 1.6: Esempio di camera a deriva cilindrica: il tracciatore dell'esperimento KLOE. Si possono notare i 52140 fili sostenuti da due piatti forati in materiale composito. Gli anelli luminosi sono un effetto ottico di riflessione.

crescono fino alla dimensione di $8.04 \text{ mm} \times 8.04 \text{ mm}$. Il numero di celle sensibili è di 12528, 348 per layer, mentre il numero totale di fili è 52140 disposti su 36 layer, con un rapporto tra i fili catodici e anodici di 4 a 1. I fili tesi, esercitano sulla struttura di supporto uno sforzo di trazione di 2200 kg equivalente a circa 21600 N . L'angolo stereo è di circa $\pm 200 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$. È stato proposto di utilizzare per tutte le componenti strutturali la fibra di carbonio poiché, a parità di resistenza, permette una maggiore permeabilità alle particelle grazie alla sua bassa densità. Il tracciatore dovrebbe lavorare in un campo magnetico uniforme di circa 0.6 T e con una miscela gassosa (90 – 10)% Elio-Isobutano $\text{He} - i\text{C}_4\text{H}_{10}$. Verrà comunque tralasciata una descrizione approfondita del tracciatore finale poiché esula dagli scopi di questo lavoro di tesi. Sarà invece fornita una descrizione dettagliata del prototipo costruito, nonché delle attrezzature utilizzate per realizzarlo.

Capitolo 2

Il prototipo

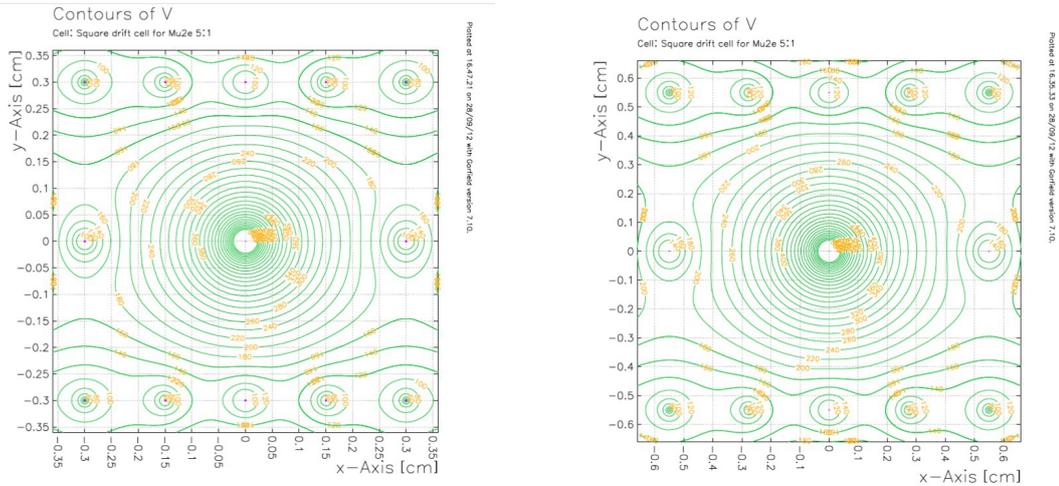
2.1 Descrizione del prototipo

Il prototipo del tracciatore per l'esperimento *Mu2e* è costituito da uno spicchio di camera, racchiuso da una struttura portante a tenuta di gas.

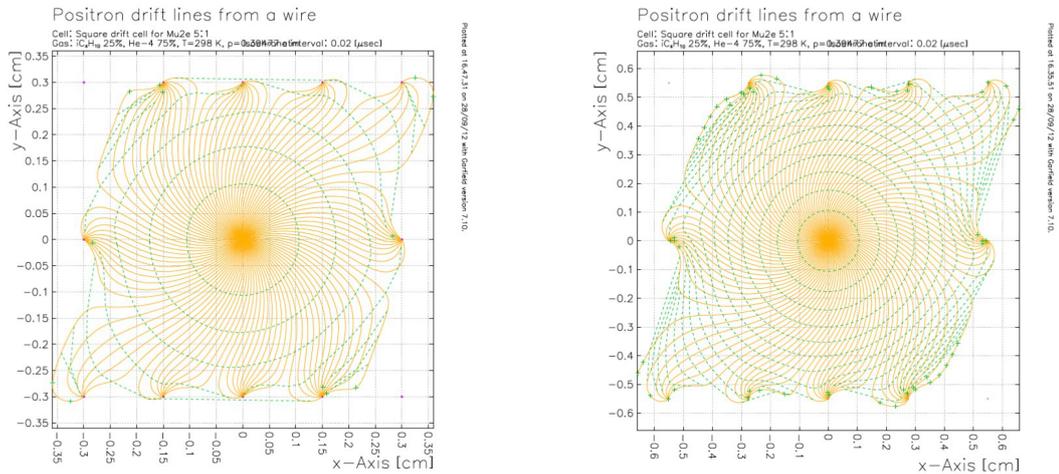
Sono presenti circa 1300 fili totali: i fili anodici, atti alla raccolta del segnale, sono circa 200 mentre la restante parte è costituita da fili catodici, il cui scopo è di definire il campo elettrico nell'intorno di ogni filo anodico. La configurazione geometrica della cella elementare è di tipo quadrato e prevede il filo anodico al centro con tre fili catodici per lato; la dimensione delle celle assume un valore minimo in corrispondenza del diametro interno ($\phi_i = 854 \text{ mm}$), presentando un lato di 6.58 mm fino a un massimo di 8.04 mm , in corrispondenza del diametro esterno ($\phi_e = 1046 \text{ mm}$). Questa configurazione permette di determinare due delle tre coordinate del moto di una particella; la terza coordinata, quella lungo l'asse dello spicchio di camera, è ottenuta fornendo ai fili un angolo stereo di $0,2 \text{ rad}$, a segno alterno per layer consecutivi. Ogni arco circolare contenente uno strato di fili è denominato sublayer, mentre tre archi consecutivi formano uno strato di celle detto layer.

In Figura 2.1 è possibile vedere la configurazione del campo elettrico nell'intorno di un filo di anodico per celle elementari. Il primo e l'ultimo layer non saranno utilizzati per l'acquisizione di segnale ma per limitare gli effetti di bordo e consentire una configurazione più stabile del campo elettrico, attraverso il collegamento di tutti i fili di tali layer a potenziale di massa.

La tecnologia utilizzata per la realizzazione di questo tipo di tracciatore è innovativa sotto diversi aspetti. Difatti, in passato erano già stati realizzati tracciatori multi filo a deriva con una metodologia diversa: il tracciatore per l'esperimento KLOE [6], ad esempio, era costituito da due piatti circolari paralleli traforati, sostenuti da travi longitudinali; i



(a) Curve di campo elettrico equipotenziali per celle da 6 mm (a sinistra) e 8 mm (a destra).



(b) Curve a equal tempo di drift per celle da 6 mm (a sinistra) e 8 mm (a destra).

Figura 2.1: Campo elettrico e tempo di drift di una cella elementare.

fili venivano inseriti uno per volta facendoli passare attraverso questi fori e bloccati tramite feedthrough. La realizzazione di un tracciatore con dimensioni della cella così basse (6.58 mm), come quello descritto in questa tesi, non rende possibile l'uso di feedthrough, a causa degli eccessivi ingombri degli stessi.

La soluzione adottata prevede, invece, la saldatura dei fili di ogni sublayer su una scheda elettronica flessibile, denominata PC-Board. Per garantire le condizioni di campo elettrico di progetto, le schede con i fili saldati devono essere posizionate correttamente all'interno dei frame di supporto. Degli spessori in policarbonato, gli spacer, si occupano di definire la distanza relativa delle schede tra loro e la giusta curvatura, mentre le superfici interne di battuta dei frame offrono il corretto posizionamento delle stesse rispetto

all'asse camera. Il contatto tra schede e spacer è garantito da una striscia di biadesivo 3M calibrato, dello spessore di 0,1 mm.

La stratigrafia completa di una cella (Figura 2.2), a partire dal diametro interno, prevede quindi:

- spacer in policarbonato a spessore maggiore
- adesivo calibrato 0,1 mm
- schedina contenente solo fili catodici
- adesivo calibrato 0,1 mm
- spacer in policarbonato a spessore minore
- adesivo calibrato 0,1 mm
- schedina contenente fili anodici intervallati a fili catodici
- adesivo calibrato 0,1 mm
- spacer in policarbonato a spessore minore
- adesivo calibrato 0,1 mm
- schedina contenente solo fili catodici
- adesivo calibrato 0,1 mm
- spacer in policarbonato a spessore maggiore.

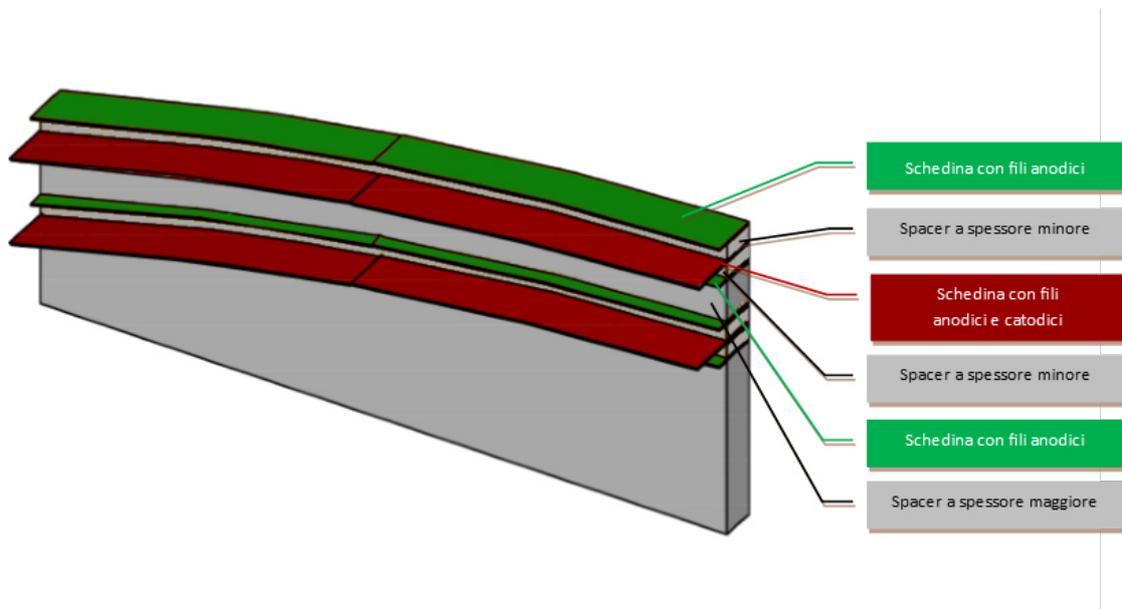


Figura 2.2: Stratigrafia di una cella

Nella struttura tracciante si alternano layer ad angolo stereo positivo, i cui fili alloggiavano nello slot di destra, a layer ad angolo stereo negativo, i cui fili alloggiavano nello slot di sinistra. Layer positivi e negativi si alternano lungo l'altezza del prototipo. Alla posizione radiale di un layer nello slot di destra corrisponde la posizione dello spaziatore a maggior spessore nello slot di sinistra e viceversa, al fine di evitare la compenetrazione di layer di segno opposto. Gli spaziatori sono però configurati in modo tale che, i sublayer contenenti fili di campo ad angolo stereo positivo e quelli ad angolo negativo, abbiano i fili a contatto al momento del loro incrocio.

I due frame di supporto, contenenti le relative schedine, sono paralleli e posti ad una distanza fissa tra loro di 625 mm ; vengono bloccati in questa posizione sul telaio del box di test.

Il segnale uscente dalle schedine viene raccolto dall'elettronica di "front end" ed elaborato da un calcolatore.

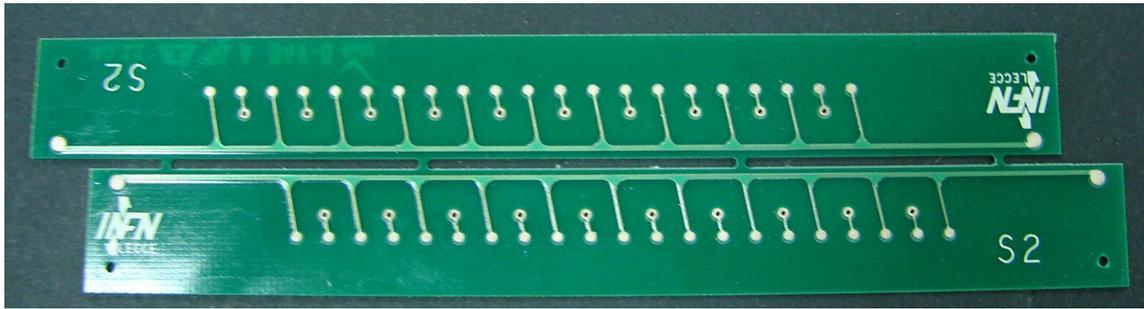
2.2 Le PC-Board

Le schede elettroniche su cui terminano e sono saldati i fili sono denominate *PC-Board*. Sono realizzate in vetronite FR-4 dello spessore di 0.3 mm , con piste foto-incise in rame dello spessore di $0,02\text{ mm}$, su cui sono saldati i fili. Le schedine devono potersi curvare per adagiarsi sugli spaziatori curvilinei, frapposti ad esse. Le PC-Board sono di due tipologie differenti, tipo S e tipo F.

Le schede di tipo F (Figura 2.3b) ospitano solo fili anodici e vengono utilizzate per definire il campo elettrico. Sono costituite da tre parti separabili: le due più esterne contengono una pista foto-incisa per l'intera lunghezza su cui vengono saldati i fili; la parte centrale contiene delle piste circolari di riferimento, che agevolano l'azzeramento della testina della macchina, e viene rimossa a processo di filatura concluso. Allo scopo di effettuare il collegamento con il potenziale di massa, la pista di saldatura si protrae, agli estremi, verso il centro della scheda.

Le schede di tipo S (Figura 2.3a) contengono fili anodici alternati a fili catodici. Sono costituite da due parti che vengono separate dopo il processo di filatura. Sulla superficie presentano due tipologie di piste: le piste corte, indipendenti tra loro, ospiteranno i fili catodici; le piste a lunghezza maggiore, connesse tra loro tramite una pista per tutta la lunghezza della scheda, ospiteranno i fili anodici. Entrambe sono inclinate rispetto alla lunghezza della scheda di un angolo di 0.2 rad . Le schede di tipo S che sono posizionate nello slot destro dei frame presentano un'inclinazione da destra verso sinistra, viceversa quelle montate nello slot sinistro da sinistra verso destra. Le piste di una scheda presentano un passo differente per ogni piano che andranno a costruire, variabile da un minimo di 2.956 mm a un massimo di 4.004 mm .

Sia sulle schede di tipo S che su quelle di tipo F viene posizionato, nella zona estrema della scheda non contenente le piste, uno strato di biadesivo calibrato dello spessore di



(a) Scheda di tipo S



(b) Scheda di tipo F

Figura 2.3: Tipologie di PC-Board

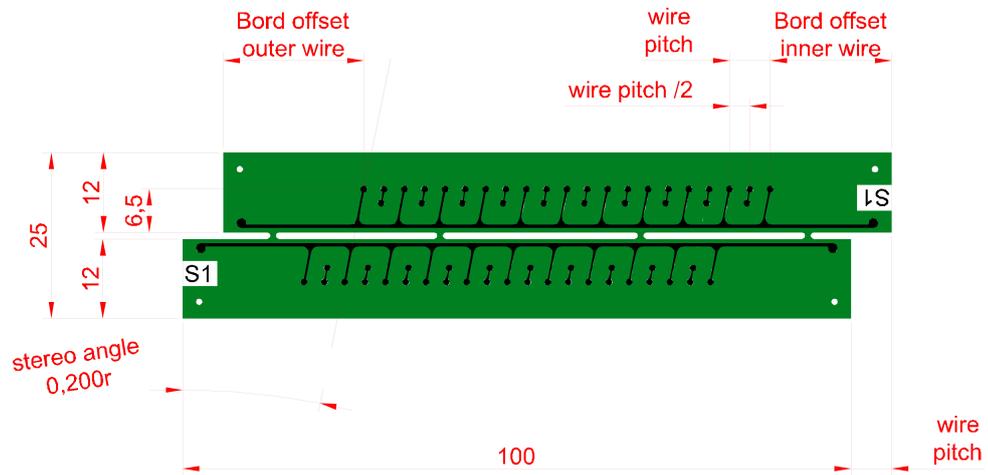
0,05 mm; questo accorgimento ha il duplice scopo di limitare lo stress meccanico sul filo nel punto di saldatura, già oggetto di stress termico, e di agevolare l'operazione di saldatura stessa evitando che il filo si sposti. Le sezioni principali delle schede, che saranno montate sui frame, presentano spigoli laterali paralleli fra loro ma sfasati di un passo. La geometria, con le dimensioni principali, può essere consultata dalla Figura 2.4 le cui quote fanno riferimento alla Tabella B.1 in appendice.

La stratigrafia della camera prevede che ogni scheda di tipo S sia posizionata tra due schede di tipo F, a distanza predefinita, cosicché ogni filo anodico sia circondato da otto fili catodici che ne definiscono il campo elettrico nel suo intorno.

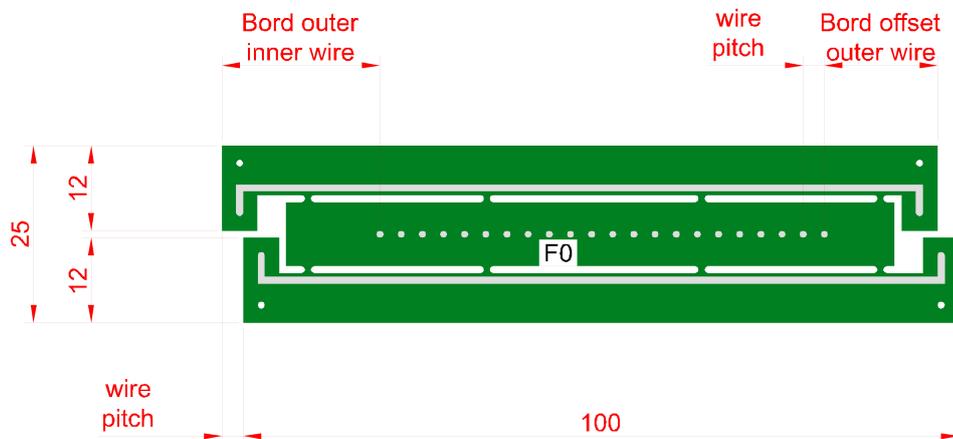
Data la variabilità dimensionale delle schede e l'elevata precisione richiesta, si è proceduto alla modellazione delle stesse tramite software cad (Autodesk Autocad®) e, successivamente, sono state esportate in un formato compatibile con il processo di realizzazione, affidato ad una ditta esterna.

2.3 Gli spacer

La stratigrafia costruttiva prevede che le PC-Board siano disposte in modo da formare una serie di superfici con curvatura cilindrica, coassiali tra loro.



(a) Scheda di tipo S

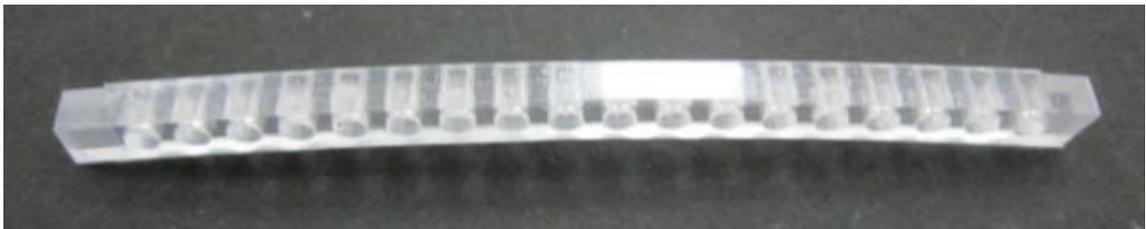


(b) Scheda di tipo F

Figura 2.4: Dimensioni PC-Board

Gli *spacer* costituiscono le superfici cilindriche di riferimento su cui vengono posizionate e incollate le PC-Board. Sono, essenzialmente, degli “archetti” in polycarbonato trasparente di spessore definito, con una serie di fori atti a migliorare il flusso del gas. Vengono inseriti nella scanalatura longitudinale interna dei frame e costituiscono gli spessori calibrati che mantengono le PC-Board ad una definita distanza tra loro.

Sono presenti due differenti tipologie di spaziatori. Gli spaziatori a spessore minore sono frapposti tra le schede di tipo S e quelle di tipo F e presentano dei fori $\phi 1 \text{ mm}$. Gli spacer a spessore maggiore si frappongono a due schede di tipo F consecutive e hanno la funzione di compensare lo spessore della cella ad angolo stereo di segno opposto. Sono stati realizzati per contornitura su fresatrice CNC, partendo da un foglio di polycarbonato trasparente dello spessore di 5 mm . Poiché lo spessore di alcuni di essi non consentiva un agevole bloccaggio sul piano di lavoro, il foglio di polycarbonato è stato incollato su un piano di alluminio per mezzo di nastro biadesivo 3M dello spessore calibrato di $0,1 \text{ mm}$. La lavorazione è stata eseguita mediante fresa a tre tagli $\phi 3 \text{ mm}$ con profondità di passata $0,2 \text{ mm}$, al fine di garantire basse forze di taglio per rispettare le tolleranze di progetto.



(a) Spacer a spessore maggiore



(b) Spacer a spessore minore

Figura 2.5: Spaziatori in polycarbonato

2.4 I fili

I fili costituenti il tracciatore sono di due tipi, anodici e catodici. I fili catodici sono caratterizzati da dimensioni contenute al fine di ottenere un campo elettrico di elevata intensità. Sono meccanicamente soggetti all'azione del peso proprio e di forze dovute alle interazioni elettrostatiche con gli altri fili. Il peso proprio, in particolare, porterà il filo ad

un abbassamento nel centro (sagitta), il cui scostamento è inversamente proporzionale allo sforzo di trazione che tende il filo e direttamente proporzionale alla densità lineare dello stesso. Per tali motivi è necessario adottare fili con buona resistenza alla trazione, bassa densità ed elevata conducibilità elettrica. Altre caratteristiche peculiari sono la rigidità (in disaccordo con la necessità di diametri ridotti) e l'assenza di alterazioni superficiali. I fili catodici hanno un diametro maggiore di quelli anodici per limitare la concentrazione del campo elettrico sulla superficie ed evitare di amplificare il segnale dovuto alla raccolta di ioni positivi. Ad essi è richiesta bassa densità ed elevata conducibilità elettrica. Sono stati quindi utilizzati:

- **Fili catodici in alluminio rivestito d'argento**

Produttore: California Fine Wire

Tipo: Aluminium 5056 AG PLTD

Diametro: 40 μm

Carico di rottura: 60000 *psi* - 413,7 *MPa*

Carico di snervamento: 42000 *psi* - 289,6 *MPa*

Elongazione: 0,74

Modulo elastico: 56,34 *GPa*

- **Fili anodici in tungsteno rivestito d'oro**

Produttore: California Fine Wire

Tipo: Tungsten Gold PLTD 3-5%

Diametro: 20 μm

Carico di rottura: 420000 *psi* - 2898,8 *MPa*

Carico di snervamento: 372000 *psi* - 2564,9 *MPa*

Elongazione: 2

Modulo elastico: 91,4 *GPa*

2.4.1 Caratterizzazione dei fili

Data la criticità dovuta agli sforzi a cui sono soggetti i fili, è stato necessario caratterizzarli per definire il carico di transizione elasto-plastico. I fili soggetti alla forza di Coulomb durante il funzionamento della camera devono rimanere in campo elastico al fine di evitare che deformazioni permanenti ne possano aumentare irreversibilmente il valore della sagitta, con il rischio di scarica tra fili di potenziale diverso.

La normativa ASTM D 3379-75 (1989) "Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus for High-Modulus Single-Filament Materials" fornisce le linee guida per realizzarne la caratterizzazione. In particolare, essa prevede di utilizzare degli appositi supporti in PET ramato di forma rettangolare aventi, nel centro, una cava di lunghezza

fissata. Il filo in materiale metallico viene saldato sul provino che viene successivamente tranciato nella metà, cosicché l'unico sforzo registrato sia riconducibile al filo e non influenzato dalla resistenza del provino. Il campione siffatto viene inserito in un reometro, con il quale si effettua la classica prova di trazione.

L'analisi secondo normativa [7] presenta dei tempi di esecuzione relativamente lunghi a causa della realizzazione dei provini e della disponibilità della macchina, senza contare l'elevato numero di campioni oggetto di test, necessari ad ottenere un'adeguata statistica. Per questo motivo è stata effettuata un'analisi qualitativa preventiva, con lo scopo di avere un'idea del comportamento dei fili di alluminio e tungsteno soggetti a trazione.

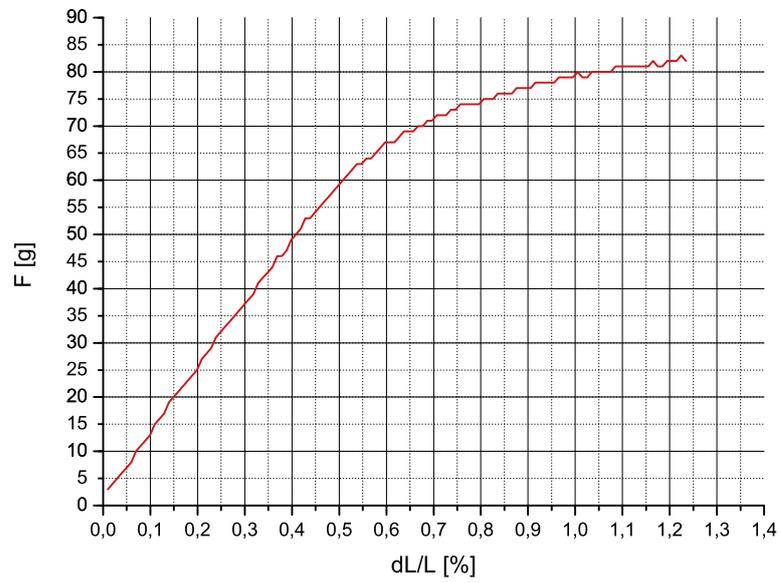
La prova è stata effettuata mediante un'attrezzatura piuttosto semplice costituita da un profilato di tipo Bosch: ad un'estremità è fissata una slitta micrometrica solidale a un dinamometro elettronico, all'altra è presente un supporto fisso, tale che la distanza iniziale a ogni prova sia di $500,00 \pm 0,05 \text{ mm}$. Il dinamometro utilizzato può riportare il valore della misura espresso in grammi o in Newton e presenta una sensibilità di $\pm 1 \text{ g}$. La slitta micrometrica ha invece una sensibilità di $\pm 0,01 \text{ mm}$. Il filo oggetto di studio viene saldato tra le due estremità senza apporre tensione. Una volta fissato il filo si agisce sulla slitta micrometrica a spostamenti di $10 \mu\text{m}$ fino a quando non si registra un aumento della tensione che passa a circa 2 g . Alla distanza iniziale di 500 mm bisogna quindi sommare il valore di spostamento della slitta, per il quale il filo inizia ad essere caricato: tale somma rappresenta il valore di L_0 . Si procede all'elongazione del campione registrando per ogni step il relativo valore del carico misurato dal dinamometro. Si può quindi tracciare un grafico del carico in grammi in funzione dell'allungamento percentuale $\Delta L/L_0$. Analizzando il grafico relativo al filo di tungsteno (Figura 2.6a) si può notare che la curva presenta un tratto iniziale rettilineo fino ad un certo valore, per poi cambiare vistosamente di inclinazione; in prima analisi, la valutazione del campo di comportamento elastico può essere effettuata graficamente, fissando il carico relativo alla transizione elasto-plastica al valore di 60 g .

Al contrario, l'alluminio presenta una curva (Figura 2.6b) che può essere approssimata interamente lineare, con rottura a un carico di 50 g .

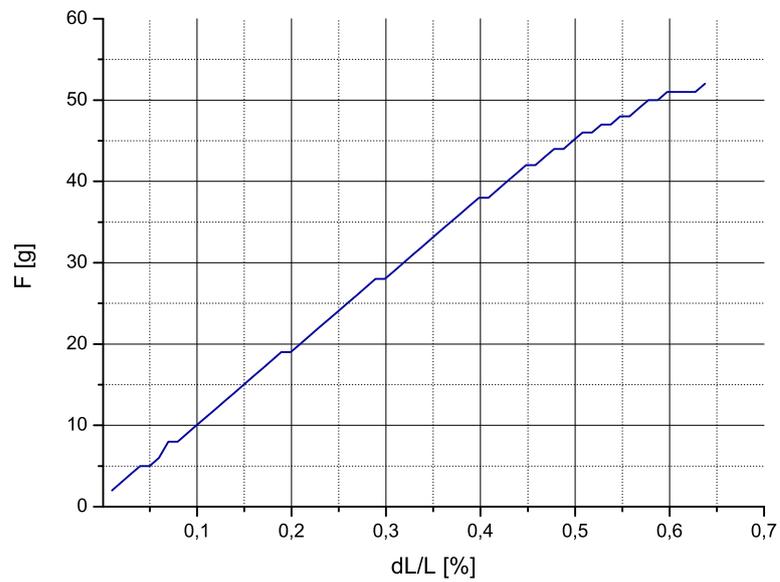
Il valore di tensione di progetto, atto a garantire una sagitta nei limiti imposti, rientra con un fattore di sicurezza di circa tre nei limiti del regime elastico, in quanto risulta essere 6 g per l'alluminio e 10 g per il tungsteno.

2.5 Frame di supporto delle PC-Board

I frame di supporto sono la struttura portante contenente le PC-Board. Ognuno di essi è assimilabile a una piastra di spessore 10 mm su cui sono stati praticati due sedi in cui vengono alloggiati le schedine. Gli spacer vengono incassati a cassetto nel frame tramite delle scanalature realizzate a mezzo di una fresa a T. Poiché le PC-Board presentano



(a) Tungsten Gold PLTD 3-5% 20 μm



(b) Aluminium 5056 AG PLTD 20 μm

Figura 2.6: Analisi qualitativa del comportamento dei fili sotto carico: diagramma sforzo-elongazione

lunghezza uguale tra loro, ma sono disposte in modo tale da rappresentare superfici cilindriche di diametro crescente al crescere della distanza radiale dall'asse camera, la corda che sottende due spigoli della stessa schedina presenta lunghezza differente per ogni sub-layer; per questo motivo, le sedi praticate sui frame presentano superfici non piane ma aventi curvatura tale da consentire il corretto allineamento delle schedine. La modellazione di tale superficie è stata realizzata mediante un'interpolazione di punti, rappresentati in un opportuno sistema di riferimento dagli spigoli delle PC-Board (Tabella B.2) mediante una curva di tipo spline, valutando le tolleranze dimensionali atte a garantire il corretto posizionamento, in relazione alle attrezzature disponibili per le lavorazioni e alla precisione delle PC-Board stesse.

I due frame presentano:

- 6 fori filettati M6, sulla base d'appoggio, necessari al bloccaggio dei frame stessi sull'attrezzatura di messa in tiro dei fili e, successivamente, nel box di test;
- alcuni fori passanti $\phi 6 \text{ mm}$, nella zona frontale, per l'allineamento della struttura di supporto dell'elettronica di front end;
- una coppia di fori filettati M4, sulle superfici laterali, per il bloccaggio di una struttura di supporto, utilizzata nello spostamento dall'attrezzatura di messa in tiro dei fili al box di test.

La progettazione e modellazione, in questo caso, è avvenuta per via inversa: i frame sono stati modellati in funzione dei limiti geometrici di progetto e successivamente è stato condotto uno studio di deformazione qualitativo tramite il metodo degli elementi finiti. Difatti, i fili sotto tensione esercitano una forza che si scarica direttamente sui frame di supporto, una volta portati alla lunghezza nominale; quest'ultimi possono essere schematizzati strutturalmente come costituiti da tre travi a sbalzo, incastrate in estremità, su cui agisce un carico uniformemente distribuito poiché la piccola distanza tra due sublayer di fili consecutivi consente questa approssimazione. Il carico sul singolo frame è dato dalla somma delle tensioni sui singoli fili. I fili anodici, aventi una densità lineare inferiore a quelli catodici, esercitano una forza di 6 g per filo mentre quelli catodici di 10 g. Approssimando per difetto un numero totale di fili di 1300, di cui solo 200 catodici, il carico risultante sull'intero frame risulta essere:

$$F = (1300 - 200) * 0.006 + 200 * 0.01 = 8.6 \text{ kg} \quad (2.1)$$

In realtà, essendo i fili inclinati di un angolo stereo ($\theta = 0.2$), il carico risultante F andrebbe moltiplicato per il $\cos(0.2)$; tuttavia, è preferibile valutare la deformazione dei frame sotto l'azione di F , poiché cautelativa.

È ancora accettabile definire il carico uniformemente distribuito, nonostante i fili anodici esercitino reazioni diverse rispetto a quelli catodici, in quanto la disposizione degli stessi nella cella presenta un filo catodico circondato da 6 anodici.

Dall'analisi effettuata, di cui si riporta lo schema in Figura 2.7, si evince come la deformata presenti il massimo scostamento in estremità, il cui valore non inficia il corretto

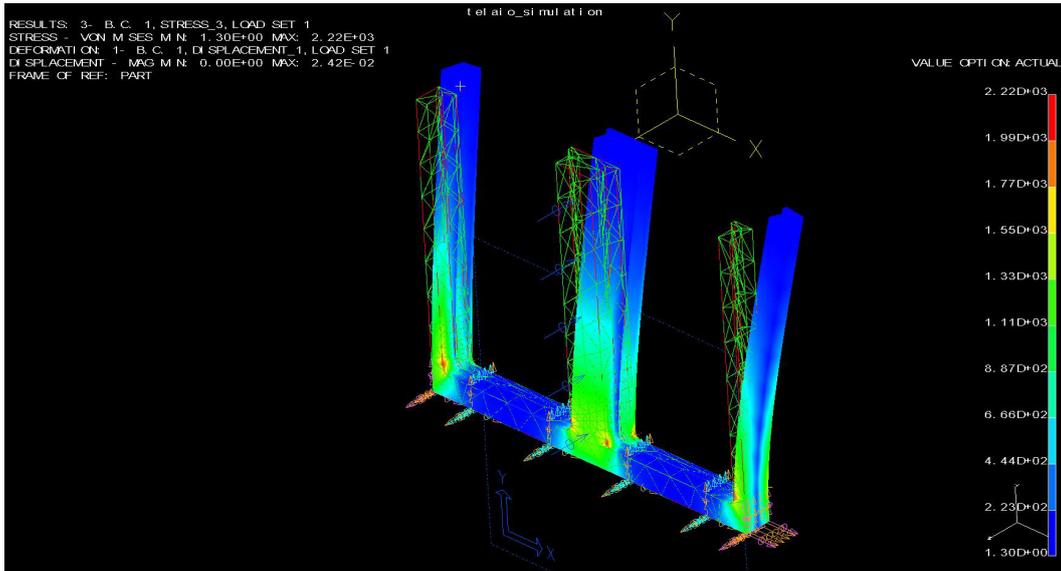


Figura 2.7: Simulazione strutturale qualitativa mediante metodo degli elementi finiti dei frame di supporto delle PC-Board soggetti al tiro dei fili

funzionamento dell'apparato.

I frame sono stati realizzati tramite asportazione dal pieno mediante lavorazioni CNC ed infine controllati con tastatore ottico a tre assi.

2.6 Box di test

Per il corretto funzionamento di un rivelatore multi filo a deriva, la zona sensibile deve essere in un ambiente gassoso controllato. La box di test funge quindi da volume di controllo a tenuta di gas, capace di lavorare sia a pressioni leggermente inferiori ad 1 atm (quindi in regime depressivo) sia a pressioni superiori a quella atmosferica. Inoltre è necessario un ricambio continuo della miscela gassosa al fine di rimuovere eventuali impurità che si formano nel processo di ionizzazione.

In riferimento alla 'Tavola 1' in appendice, in cui è rappresentato un esplosione del prototipo assemblato, la struttura portante della box di test è composta da un telaio di cui fanno parte i quattro tramezzi (Item 4) e le due cornici frontali (Item 5). I tramezzi sono connessi alle due cornici per mezzo di viti e, una volta posizionati correttamente, si è provveduto alla rifinitura delle zone di contatto mediante stucco metallico e carta abrasiva a grana finissima, cosicché da garantire una superficie di tenuta uniforme. Inoltre, i quattro fori adibiti al bloccaggio dei relativi tramezzi sono tali da permettere l'incasso delle viti; si è provveduto a effettuare una colata di resina epossidica nell'incasso della testa delle viti

per eliminare le eventuali fughe attraverso il collegamento bullonato.

I due frame (Item 1), con i relativi fili, sono solidali a questa struttura poiché vincolati alle guide (Item 3), a loro volta fissate a due tramezzi tramite collegamento bullonato. La tenuta è affidata ai due pannelli top (Item 13), ai due pannelli laterali (Item 14) e ai due tappi frontali (Item 7). In particolare sia i pannelli top che i pannelli laterali sono fissati alla struttura portante grazie a 52 viti M6x20; la tenuta è garantita da quattro guarnizioni piatte in gomma (non rappresentate nella 'Tavola 1'). I pannelli di tenuta e la struttura portante sono realizzati in alluminio. Poiché questo materiale presenta una bassa permeabilità alle particelle oggetto di studio, sui pannelli sono state realizzate delle finestre rettangolari composte da un due griglie in alluminio (Item 15) tra le quali è incollato un foglio di PET (Item 16); queste finestre sono adagiate in una sede sottoposta dei pannelli e sono fissate tramite 40 viti a testa esagonale (Item 25), inoltre la tenuta al gas è garantita, anche in questo caso, da una guarnizione piatta in gomma (Item 19). La necessità di interporre il foglio di PET a due griglie è dovuta al fatto che la camera deve poter lavorare sia in regime depressivo sia come recipiente in pressione; le griglie servono quindi ad irrigidire il foglio di PET che altrimenti si deformerebbe irreparabilmente, non garantendo la tenuta. D'altro canto sarebbe stato possibile sostituire questo 'sandwich' con delle finestre in policarbonato (o simili) di opportuno spessore ma a discapito della trasparenza alle particelle. Una soluzione più performante sarebbe costituita da finestre in quarzo, tuttavia il costo eccessivo non ne giustifica il guadagno in termini di prestazione.

I tappi frontali (Item 7), realizzati in policarbonato, sono fissati alla cornice frontale e la tenuta è assicurata tramite O-Ring, adagiati nell'apposita sede presente sulla cornice. I tappi di chiusura presentano delle scanalature di dimensione opportuna, in cui vengono inserite le schede con l'elettronica di disaccoppiamento connesse alle PC-Board solidali ai frame. Queste schede presentano, nella zona di contatto con la piastra, uno spessore maggiorato e la tenuta è effettuata tramite l'incollaggio delle schede alla piastra di chiusura frontale; a tal proposito, è stata utilizzata una colla ciano-acrilica dall'elevata fluidità (Loctite 420 di Henkel) che, bagnando per capillarità le superfici di incollaggio e polimerizzando velocemente, garantisce la tenuta del gas senza inquinarlo. Questa scelta rappresentava uno dei punti a maggior criticità progettuale; dopo opportuni test effettuati su una scatola con una sola scanalatura, monitorando la pressione della stessa, si è potuto verificare l'efficacia di questa soluzione.

La coppia di 'pettini' (Item 6) ha la sola funzione di facilitare l'inserimento delle schede di disaccoppiamento nelle scanalature ed il collegamento cablato alle PC-Board. Una volta effettuato l'incollaggio non è più possibile accedere alle schede dalla zona frontale, quindi l'accesso alla camera è possibile solo attraverso i pannelli. Infine, le piastre di chiusura frontale presentano tre fori filettati, ai quali vengono fissati i connettori rapidi per il gas (Item 22), in numero di tre per lato.

L'elettronica di front-end (Item 10) è inserita a cassetto in un frame di policarbonato per lato (Item 8) e si interfaccia con le schede di disaccoppiamento a mezzo di connettori singoli. Il frame dell'elettronica di segnale è inserito nella piastra di chiusura frontale con

una leggera interferenza e non necessita di collegamenti bullonati.

Quattro distanziali per lato (Item 12) fungono da supporto alla piastra di chiusura frontale (Item 9). Quest'ultima presenta: due sedi rettangolari per il passaggio dei cavi di segnale, 20 fori necessari al fissaggio di connettori di alta tensione di tipo BNC per la polarizzazione dei fili anodici, 4 fori per altrettanti connettori SMA per l'accesso diretto al segnale dei fili e tre fori per consentire il passaggio dei tubi di servizio del gas. Nei restanti fori filettati vengono inserite delle viti in nylon (non riportate nella tavola per semplicità) con lo scopo di mantenere le schede di front end in posizione, onde evitare che vengano spostate dalle loro sedi sotto il peso dei cavi.

L'elettronica di front-end è stata posizionata all'esterno dell'ambiente a tenuta per semplificare l'eventuale operazione di sostituzione di una scheda guasta. Le schede di disaccoppiamento presentano componenti meno soggetti a guasti e usura (perché il loro circuito comprende solo resistenze e condensatori) e, se uno di questi si guastasse, l'unico effetto sarebbe l'esclusione di quell'unico canale, senza inficiare gli altri presenti sulla scheda.

Infine, dei carter in lamiera di alluminio circondano la zona in cui è presente l'elettronica di front-end e l'intera struttura esterna viene messa a potenziale di massa, così da fungere da gabbia di Faraday e limitare l'effetto di disturbi elettromagnetici esterni.

2.7 Il sistema di distribuzione del gas

Il controllo della miscela gassosa presente nel volume sensibile è fondamentale al corretto funzionamento di un tracciatore multi filo a deriva.

Il sistema di distribuzione del gas è di tipo centralizzato; uno schema esaustivo è descritto in Figura 2.8. Esso è costituito da una serie di bombole a pressione controllata che confluiscono a coppie su una valvola deviatrice a tre vie; è dunque possibile selezionare solo uno dei gas della coppia confluyente nella valvola o nessuno dei due. All'uscita di ognuna delle quattro valvole sono presenti un misuratore e un regolatore di portata. Il flusso controllato di ogni gas confluisce in un miscelatore, costituito da un serbatoio a tenuta contenente dei diaframmi forati. Il mixer è quindi seguito da una valvola a due vie e da un'ulteriore valvola di controllo del flusso, nonché un da manometro ottico e da un trasduttore di pressione.

Il tracciatore è connesso al sistema di distribuzione mediante attacchi rapidi. In parallelo all'ingresso e all'uscita del rivelatore è presente un misuratore di pressione differenziale, con il compito di monitorare il gas entrante e uscente. L'uscita della camera è collegata a una valvola deviatrice a tre vie che permette di selezionare il tipo di controllo a valle della stessa, effettuabile mediante regolatore di pressione proporzionale o flussometro di massa. Infine l'ultima diramazione termina, da una parte, con una pompa da vuoto e dall'altra con un buffer, la cui funzione principale è quella di velocizzare il processo di depressurizzazione della camera di test.

Tutto l'apparato è contenuto in un rack, ad esclusione delle bombole di gas tenute all'esterno del laboratorio.

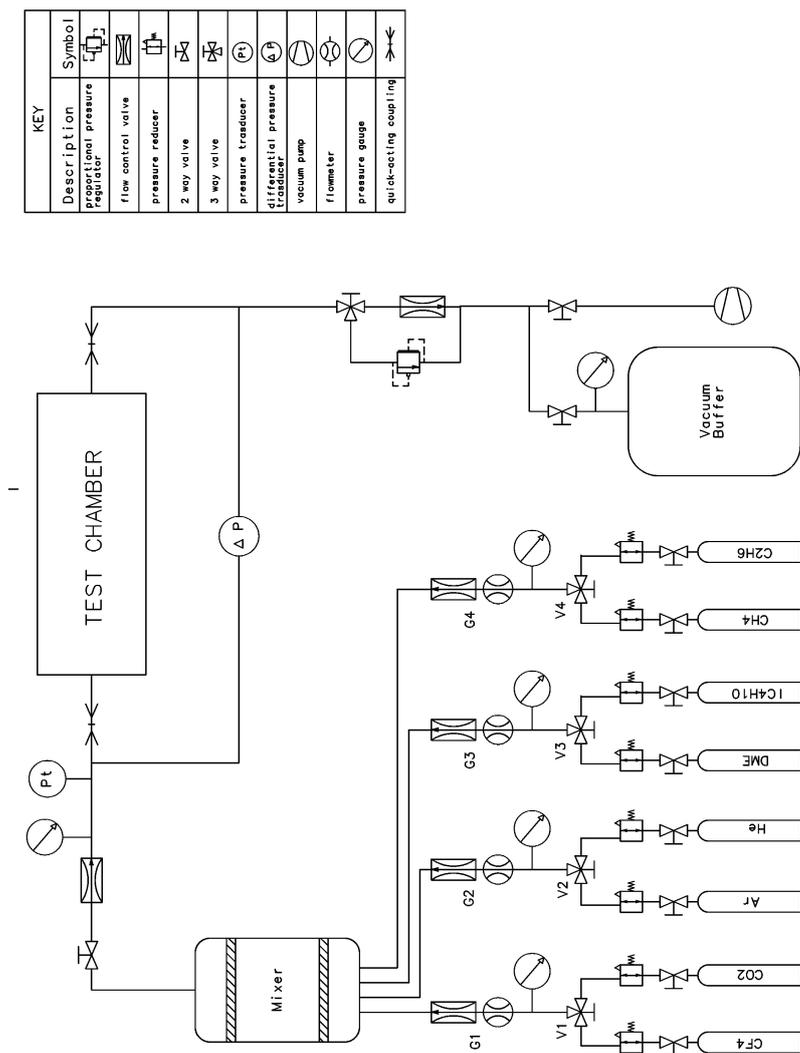


Figura 2.8: Impianto di distribuzione e controllo del gas con legenda dei simboli utilizzati (ISO 1219 - 1)

Capitolo 3

Assemblaggio del prototipo e attrezzature

In questo capitolo si fornirà una descrizione della procedura che porta alla costruzione del prototipo. Al fine di rendere più chiara la sequenza di operazioni, si fornirà prima una descrizione delle attrezzature realizzate che sono necessarie a eseguire correttamente tutte le operazioni relative a tale processo.

3.1 Macchina di filatura

La macchina di filatura è un robot a due assi utilizzato per il posizionamento del filo sulle schedine con una precisione di $\pm 0,02 \text{ mm}$. È posizionata su un tavolo ottico di granito da 150 mm di spessore ed è connessa ad un computer, che funge da interfaccia tra la macchina e l'operatore. Se ne riporta ora la componentistica hardware e software.

3.1.1 Descrizione Hardware

In Figura 3.1 sono indicati i componenti principali che compongono il robot di filatura. In dettaglio, esso è composto da:

Cilindro Costituito da un tubo in PVC, chiuso ai lati da due piatti in policarbonato, calettato mediante questi ultimi su un albero cilindrico in acciaio coincidente con l'asse di rotazione. Sul cilindro è presente una maschera in rame dello spessore di 2 mm con due sedi rettangolari, in cui alloggiavano le PC-Board durante il processo di filatura. La maschera in rame è stata realizzata in piano mediante lavorazioni di asportazione di truciolo partendo da un foglio in rame e, successivamente, calandrata a caldo per assumere la forma cilindrica atta all'accoppiamento sul cilindro, su cui è stata incollata. Si è scelto di realizzare questa maschera in rame per le sue proprietà di formabilità a caldo. La zona della superficie laterale del cilindro non occupata

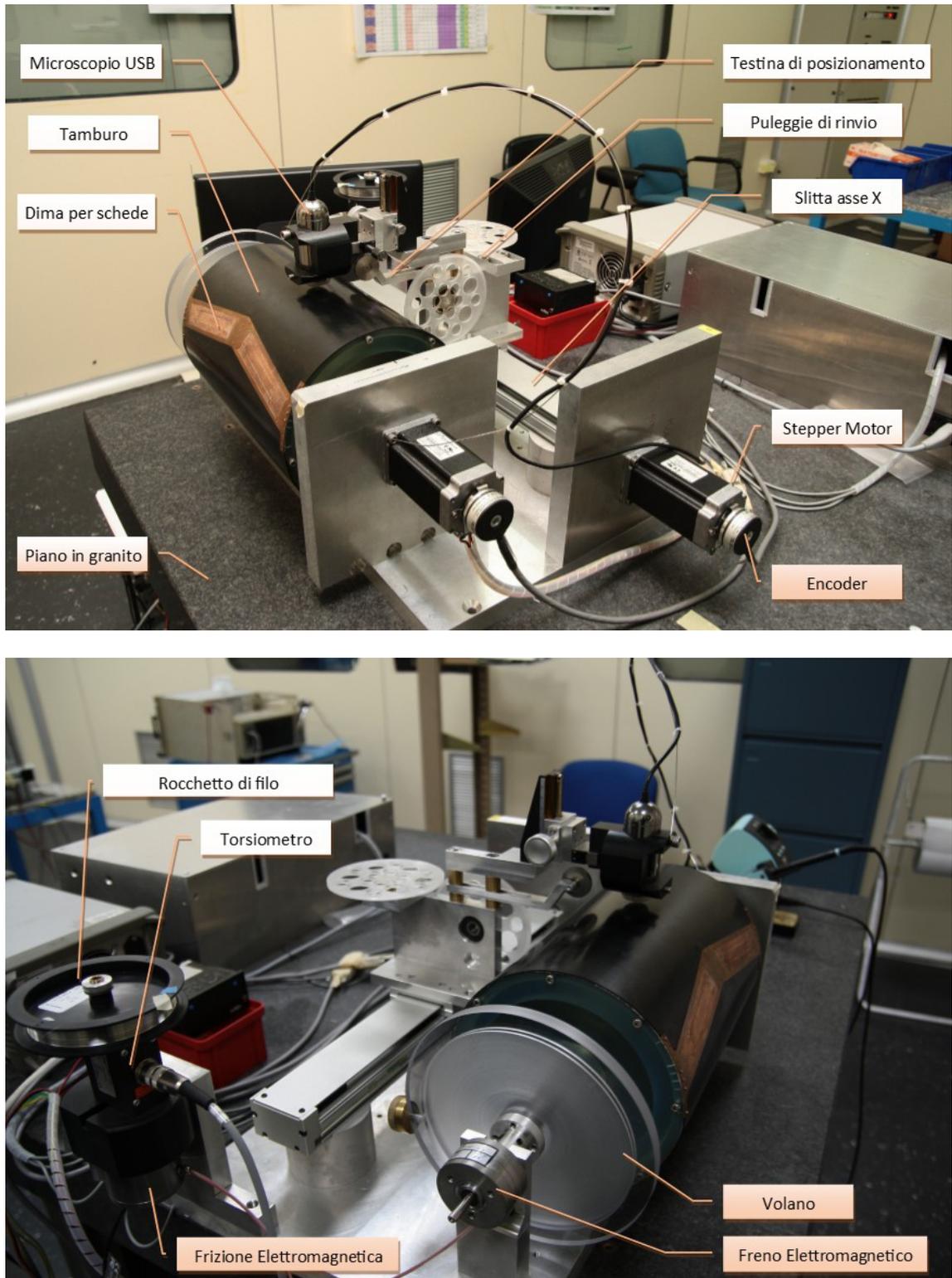


Figura 3.1: Macchina di filatura e componenti principali

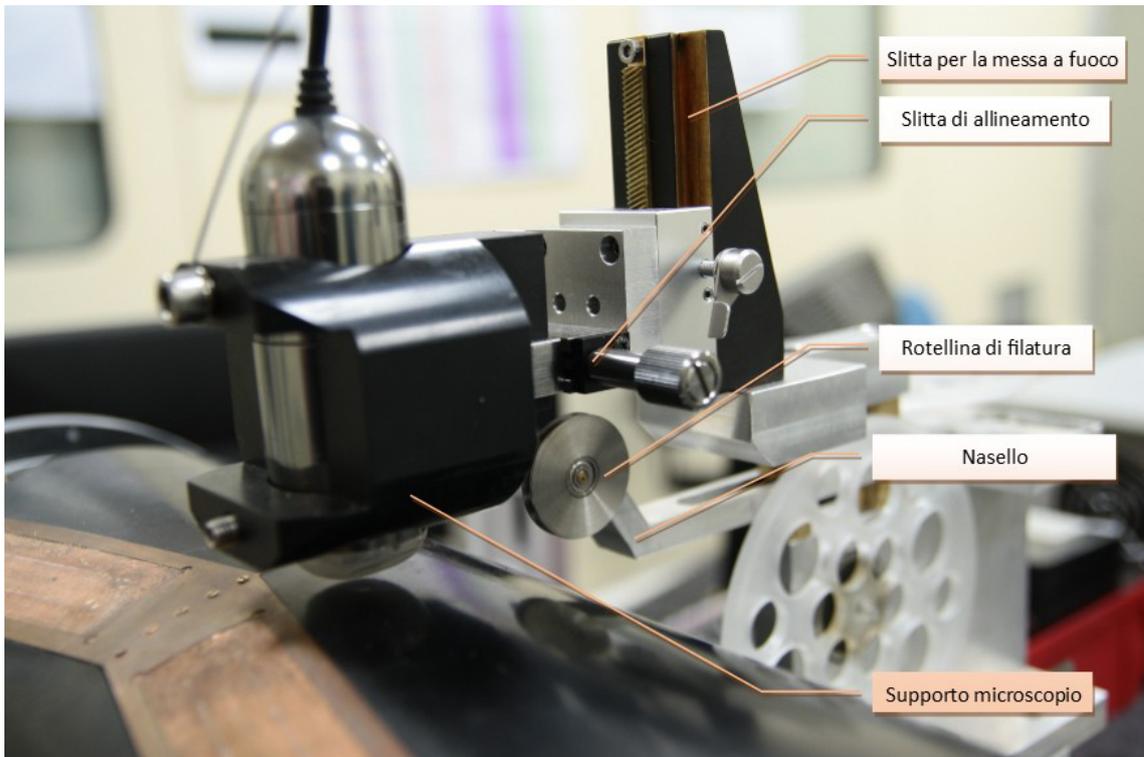


Figura 3.2: Vista in dettaglio della struttura della testina di posizionamento, ovvero dei componenti che la costituiscono.

dalla maschera è stata rivestita da uno strato di gomma dalla duplice funzione: eliminare eventuali spostamenti del filo durante il processo di filatura, grazie all'attrito presente tra filo e gomma, e far sì che il filo si avvolga su una superficie priva di discontinuità.

Testina di posizionamento Ha la funzione di guidare il filo durante l'avvolgimento sul cilindro. Ciò è reso possibile grazie alla rotellina in acciaio inox che presenta una scanalatura a V, con lo scopo di limitare eventuali disallineamenti al valore di tolleranza richiesto; la calettatura su un cuscinetto in miniatura ($\phi_{esterno} = 6,0 \text{ mm}$) permette di limitare l'attrito tra filo e rotellina a quello necessario al puro rotolamento. Precedentemente è stata testata una guida a V in teflon di tipo fisso che non ha dato risultati coerenti con le specifiche di progetto; difatti, l'attrito radente che si veniva a creare provocava uno stress meccanico alla superficie del filo che ne degradava la resistenza, senza contare che sulla guida in teflon si originava un solco provocato dal filo stesso. Rondella e cuscinetto sono calettati su un perno in ottone solidale al nasello. Quest'ultimo a sua volta è fissato tramite una serie di supporti in alluminio, sui quali alloggiavano le pulegge di rinvio, alla guida mobile della slitta assiale.

La testina comprende, inoltre, il supporto del microscopio, il microscopio e due slitte che consentono la messa a fuoco e l'azzeramento dell'unità ottica. La Figura 3.2 mostra in dettaglio la testina di posizionamento e i relativi componenti.

Slitta Permette la movimentazione della torretta, contenente il nasello di posizionamento, parallelamente all'asse del cilindro; serve dunque a fornire il corretto passo all'elica di avvolgimento. La slitta utilizzata è una MOVITEC mod. CVP060AM avente:

- *Corsa*: 500 mm
- *Errore periodico (PEC)*: $13 \mu\text{m} / 300 \text{ mm}$
- *Riproducibilità*: $\pm 15 \mu\text{m}$
- *Larghezza del profilo*: 66 mm
- *Carico max in posizione orizzontale*: 2,3 kg
- *Carico in posizione verticale*: 1,9 kg

Torsiometro La sua funzione è il monitoraggio indiretto della tensione sul filo mediante misura della coppia presente sulla bobina, al fine di evitare di ricadere in campo anelastico. Il torsiometro utilizzato è di tipo DRFL, di cui si riportano le caratteristiche principali:

- *Produttore*: Instrumentation Device
- *Modello*: DFRL -0,06-w
- *Tecnologia*: trasmissione telemetrica
- *Range di misura*: $\pm 0,06 \text{ Nm}$
- *Accuratezza*: 0,15%

Frizione elettromagnetica Ha l'importante compito di regolare la tensione sul filo al di sotto del limite critico prescelto. In particolare, questo componente agisce da limitatore di coppia, aprendosi quando il momento torcente applicato alla bobina di filo, misurato dal torsiometro, supera il valore limite. Se ne riportano le caratteristiche principali:

- *Produttore*: Placid Industries
- *Modello*: H 35-24-2mE
- *Range di torsione*: 0,0042 – 0,2472 Nm
- *Potenza inerziale*: 10^{-5} Nm/s^2
- *Velocità massima*: 8000 rpm

Freno elettromagnetico Ha la funzione di arrestare il cilindro repentinamente ma senza irregolarità. Se questo elemento non fosse presente, l'elevata massa inerziale del cilindro provocherebbe all'arresto una forza, che si scaricherebbe sul filo con il rischio di fratturarlo; il modello scelto è:

- *Produttore:* Placid Industries
- *Modello:* B 2-24-2mE
- *Range di torsione:* 0,0057 – 0,2825 Nm
- *Potenza inerziale:* $6,214 \times 10^{-7} \text{ Nm/s}^2$
- *Velocità massima:* 2500 rpm

Stepper Motor Permettono la movimentazione del cilindro e della slitta. Gli stepper motor utilizzati sono dei NEMA 23 della National Instrument[®]:

- *Angolo per step:* 1,8 deg
- *Passi per rivoluzione:* 200
- *Accuratezza:* $\pm 3\%$
- *Carico radiale (20000 hr a 1500 rpm):* 9.1 kg
- *Carico radiale (20000 hr a 1500 rpm):* trazione 22,7 kg, compressione 2,7 kg
- *Velocità di rotazione max:* 3000 rpm
- *Coppia max:* 2,68 Nm
- *Encoder:* a basso profilo, mod. 780251-01 con 1000 letture/rivoluzione

Volano É costituito da un disco in policarbonato (dal diametro di 150 mm e spessore 10 mm) su cui è avvitata una massa eccentrica in ottone. Il suo compito è di stabilizzare il moto, compensando la massa eccentrica in rame presente sul tamburo. In assenza di questo accorgimento, il moto del tamburo subirebbe repentine accelerazioni e decelerazioni, a causa della massa eccentrica non bilanciata, causando scatti rotazionali del tamburo e una tensione variabile sul filo, difficile da compensare.

Pullegge di rinvio Servono da guida al filo, dal rocchetto alla testa di posizionamento. Il diametro esterno è di 80 mm, al fine di evitare repentine variazioni alla direzione del filo, con una gola a V della profondità di 0,5 mm. Presentano fori di alleggerimento per limitare la massa inerziale e sono calettate su un albero di piccolo diametro (circa 3 mm), per limitare il fattore d'attrito nell'accoppiamento.

Slitta micrometrica Permette la messa a fuoco dell'immagine del microscopio, una volta selezionato l'ingrandimento.

- *Produttore:* Edmund Optics
- *Modello:* 55-024
- *Corsa:* $\pm 20 \text{ mm}$
- *Passo:* 20,0 mm/giro

Slitta micrometrica Movimenta il microscopio parallelamente all'asse di avvolgimento, allo scopo di avere un riferimento ottico con la testina di posizionamento.

- *Produttore:* Edmund Optics
- *Modello:* 55-383

- *Corsa:* 19 mm
- *Passo:* 2,9 mm/giro

Microscopio digitale Questo strumento serve al controllo ottico della posizione del filo rispetto alla pista di saldatura, del passo e dello stato della saldatura a processo ultimato. Serve inoltre all'azzeramento relativo tra la testina di filatura e la prima pista. Lo strumento utilizzato è il microscopio digitale USB Dino-Lite:

- *Risoluzione:* 1280 * 1024 pixel (1,3 Mp)
- *Ingrandimento:* 20x – 500x
- *Interfaccia:* USB 2.0
- *Software:* DinoCapture®

Supporti Sono stati realizzati in alluminio partendo dal pieno e lavorati per asportazione di truciolo.

Convertitore analogico digitale Funge da interfaccia tra il segnale di feedback proveniente da frizione e freno (di tipo analogico) ed il software “Interactive Test Panel”.

Real Time Controller Ad esso è affidato il controllo e l'interfaccia dell'apparato. Si tratta di un controllo programmabile della serie CompactRIO Programmable Automation Controller:

- *Produttore:* National Instrument
- *Modello:* cRIO-9022
- *Processore:* Freescale MPC8347 a 533 MHz
- *Memoria volatile:* 256MB DDR2
- *Memoria fissa:* 2 GB

3.1.2 Descrizione Software

La sezione software della macchina [9] è composta da un programma di controllo e monitoraggio, realizzato mediante l'ambiente di programmazione Labview ed è caratterizzata da due interfacce grafiche:

Control Panel. Questo modulo funge da interfaccia di comando tra operatore e macchina, permettendo il controllo dei parametri di filatura e fornendo gli input di azionamento. È composto da tre sezioni principali (vedi Figura 3.3a):

- *Setting:* consente l'impostazione dei parametri di filatura, quali passo, velocità, accelerazione e numero di rivoluzioni totali.
- *Feedback:* visualizza una serie di parametri per il monitoraggio del corretto funzionamento della macchina, quali posizione assoluta dell'asse motore, velocità assoluta del motore ed eventuali errori segnalati dal Real Time Controller.

- *Controller*: fornisce gli strumenti di azionamento e arresto del dispositivo, nonché la possibilità di controllare i singoli assi autonomamente (modalità “Single Axis”) o l’uno in funzione dell’altro (modalità “Gearing”).

Measurement Panel. Questo modulo fornisce informazioni sulla tensione misurata indirettamente dal torsionmetro e permette di settare il valore di alimentazione di freno e frizione (vedi Figura 3.3b).

3.2 Attrezzatura di messa in tiro dei fili

Lo scopo di questa attrezzatura è portare i fili alla lunghezza nominale, una volta inserite le PC-Board nei frame di supporto.

È costituita da una struttura principale realizzata mediante profilati in alluminio tipo Bosch ($45\text{ mm} \times 45\text{ mm}$), su cui alloggiato una guida fissa e una guida mobile, libera di scorrere all’interno delle scanalature dei profilati a mezzo di due guide in teflon. La guida mobile è solidale a una slitta micrometrica (Physik Instrumente mod. M-405DG) per mezzo di una struttura di interfaccia che consente aggiustamenti angolari dei frame, garantendone il parallelismo. La regolazione della tensione sul filo avviene avvicinando o allontanando il frame solidale alla guida mobile grazie alla slitta micrometrica, con possibilità di controllo manuale o tramite computer. I frame di supporto sono posizionati sulle guide mediante battuta delle superfici di riferimento e fissati dal basso a mezzo di collegamenti bullonati. Una volta completato il processo di filatura, vengono posizionati due supporti laterali che congelano la posizione relativa dei frame, permettendone la rimozione da questa attrezzatura.

Le superfici di scorrimento dei profilati sono state lavorate tramite fresatura per renderle planari ed eliminare difetti di forma propri del processo di trafilatura. Se ne riporta lo schema in Figura 3.4a.

Sono inoltre presenti due ulteriori slitte manuali sulle quali, a mezzo di un supporto in PVC, alloggia un piccolo laser per il controllo della posizione del singolo filo. Queste ultime sono situate su un sistema a montante rimovibile (Figura 3.4b). Infine, una teca in policarbonato limita la deposizione di polvere e/o eventuali impurità presenti nell’ambiente durante le operazioni di costruzione.

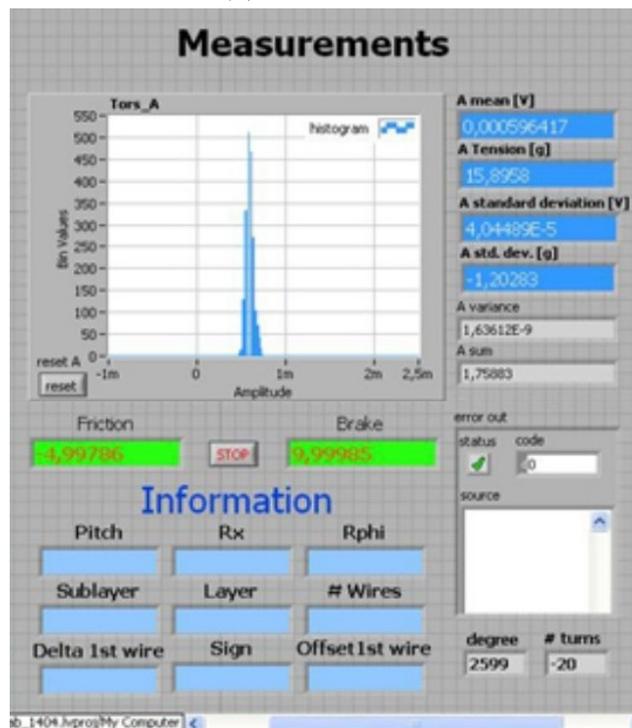
3.3 Procedura di assemblaggio

La procedura di assemblaggio può essere suddivisa in fasi:

1. I due frame vengono posizionati sulle rispettive guide dell’attrezzatura di messa in tiro dei fili; durante questa fase, agendo sui grani presenti sulla guida mobile, si è regolato il parallelismo tra le due facce misurando la distanza tra esse in più punti, mediante calibro centesimale.

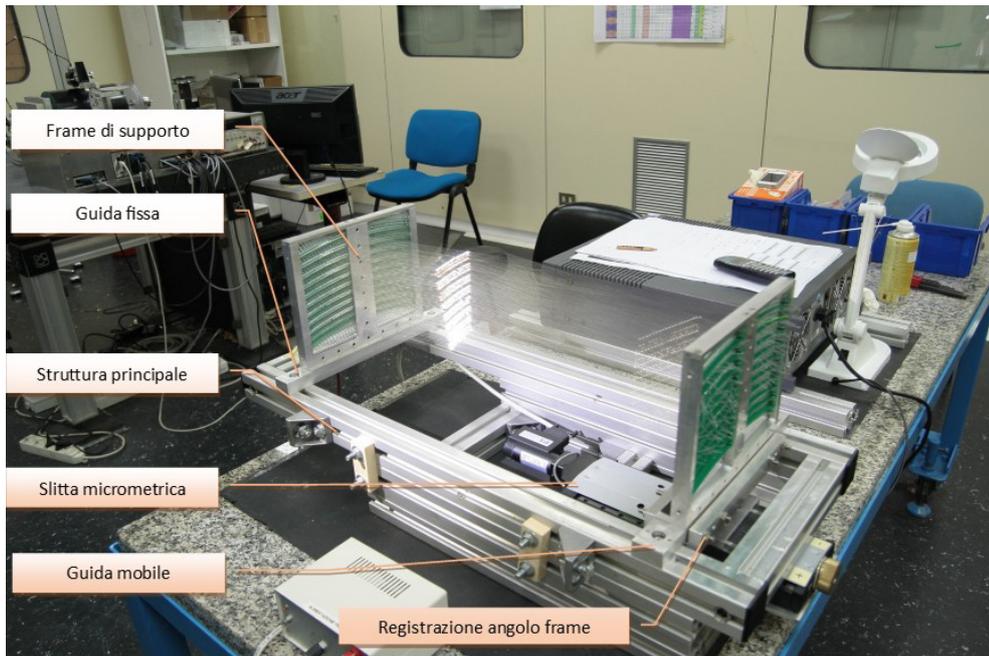


(a) Control Panel

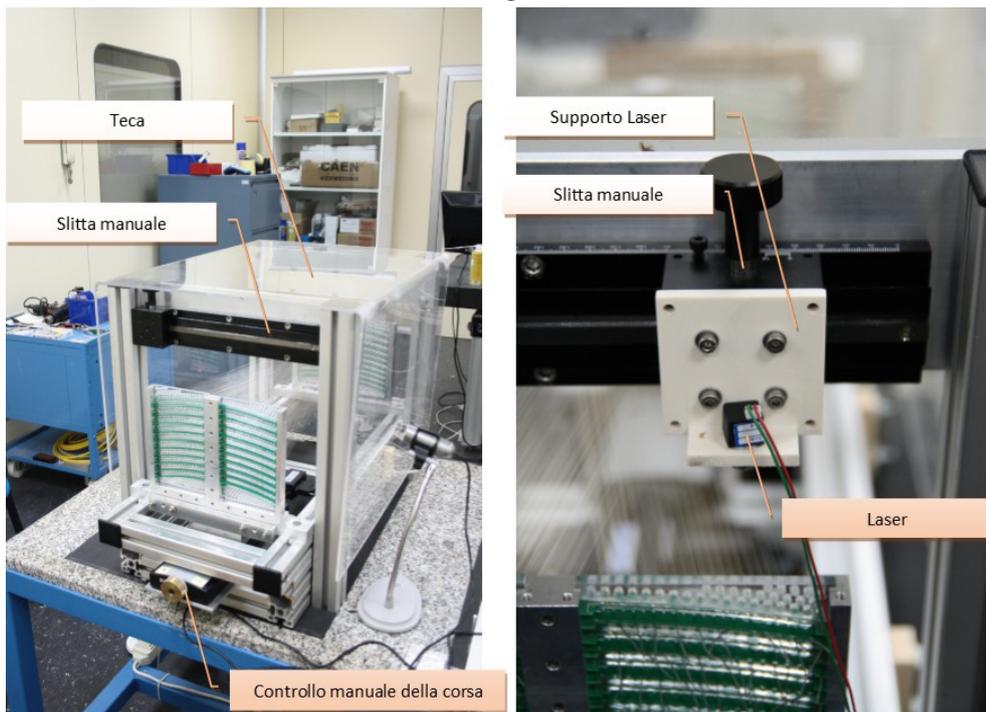


(b) Measurement Panel

Figura 3.3: Vista delle finestre disponibili del software di controllo della macchina di filatura



(a) Vista generale



(b) Particolare del sistema ottico di controllo della posizione e della struttura a montante

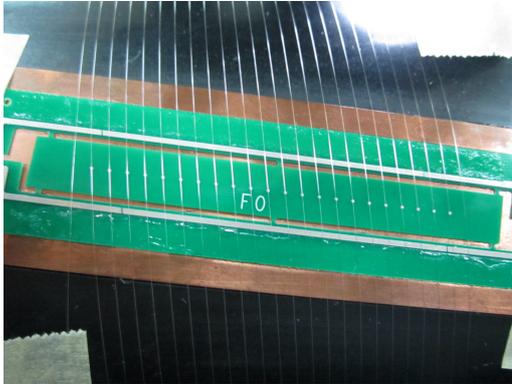
Figura 3.4: Attrezzatura di messa in tiro dei fili, ovvero dei componenti che la costituiscono.

2. Uno spaziatore per parte viene inserito nel frame, previa pulitura mediante alcool isopropilico ed incollaggio di una strip di biadesivo calibrato.
3. Viene spruzzato un sottile strato di adesivo spray sulle sedi della maschera di posizionamento presenti sul tamburo, previa protezione delle superfici non interessate.
4. Viene pulita la PC-Board relativa al sublayer in costruzione posizionandovi una strip di biadesivo calibrato.
5. Viene inserita la PC-Board all'interno dell'apertura sinistra o destra, a seconda del valore dell'angolo stereo; le superfici di battuta utilizzate come riferimento sono definite guardando frontalmente il cilindro, dalle superfici laterali dell'apertura, concorrenti nello spigolo alto al centro del cilindro stesso.
6. Avendo preventivamente azzerato il centro ottico del microscopio digitale rispetto al nasello di posizionamento, si effettua un posizionamento di tipo ottico portandosi sulla prima piazzola della PC-Board, movimentando l'asse della slitta e l'asse del cilindro in modo indipendente l'uno dall'altro; l'elevato ingrandimento garantisce che l'errore ottico commesso sia di molto inferiore a quello ammissibile in fase di filatura e corrispondente al diametro del filo in oggetto.
7. Si impostano i parametri relativi al sublayer in lavorazione e si abilita la sincronizzazione degli assi della macchina.
8. Ci si sposta fuori dalla PC-Board effettuando due giri in modalità 'Gearing' in senso contrario a quello di filatura.
9. Si fa passare il filo dalla bobina alla rondella sul nasello attraverso il sistema di carrucole e lo si fissa al cilindro mediante un pezzetto di nastro telato.
10. Si avvia la filatura impostando un numero di giri pari al numero di piazzole presenti sulle PC-Board, incrementato dei due giri di impegno e dei due di disimpegno; durante questa fase è possibile controllare che non vi siano errori inaccettabili di posizionamento poiché può essere monitorata attraverso il microscopio digitale e i valori di tensione letti attraverso il torsionmetro. I primi giri a vuoto sono necessari affinché il filo abbia il tempo di posizionarsi correttamente e le tensioni indotte dalla fase di accelerazione si stabilizzino intorno al valore nominale.
11. All'arresto della macchina si procede a custodire l'estremità del filo depositato con un ulteriore pezzetto di nastro telato, quindi si disimpegna il filo stesso tagliandone l'estremità.
12. Vengono desincronizzati gli assi e attraverso la movimentazione della slitta lineare si posiziona la torretta fuori dalla zona di filatura.
13. Si procede alla brasatura del filo sulle piste.
14. Se la PC-Board è di tipo S si effettua una nuova filatura del filo di secondo tipo.

15. Si recidono le zone di filo presenti nella fascia centrale della PC-Board e si procede alla separazione delle due parti della stessa.
16. Si svolge il telaio ottenuto, che sarà quindi costituito dalle due parti della PC-Board connesse attraverso i fili.
17. Si posiziona il telaio nel frame.
18. Si inserisce un nuovo spaziatore e si procede come sopra.

Una volta ultimata la fase di filatura si prosegue con il posizionamento dei frame, contenenti i layer di fili, all'interno della box di test. Questa fase può essere riassunta attraverso i seguenti punti:

1. Si inserisce il tappo di chiusura del frame bloccandolo mediante collegamento bullonato.
2. Agendo sulla slitta micrometrica della guida mobile dell'attrezzatura di messa in tiro, si portano i due frame alla distanza nominale.
3. Si congela questa posizione relativa bloccando i due frame attraverso due piastre laterali; in questo modo, è possibile svincolare la struttura dall'attrezzatura di messa in tiro mantenendo fissa la posizione relativa tra i frame.
4. La struttura composta dai due frame e dalle piastre di supporto laterali viene inserita nella box di test, viene bloccata a mezzo di un collegamento bullonato alle due guide fissate, a loro volta, alla struttura portante del box stesso.
5. É ora possibile disimpegnare i frame dalle piastre di supporto laterali.
6. Si procede al cablaggio dell'elettronica di disaccoppiamento con le PC-Board.
7. Si incolla l'elettronica di disaccoppiamento al tappo frontale, avendo inserito queste schede nelle scanalature presenti sullo stesso.
8. Si procede a sigillare il box di test mediante le piastre di chiusura.
9. Si conclude il montaggio dell'apparato mediante l'assemblaggio delle zone contenenti l'elettronica di front-end.



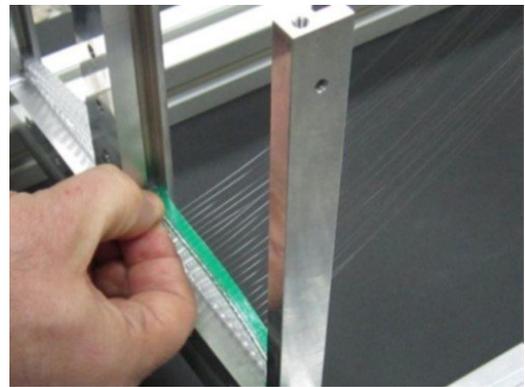
(a)



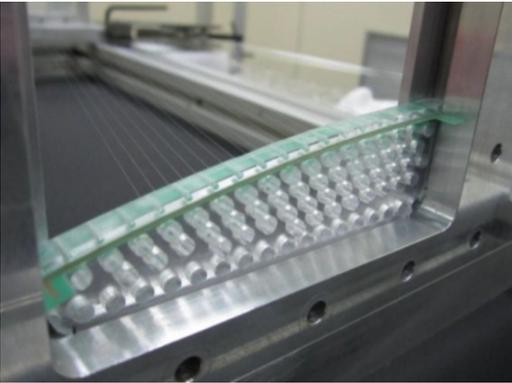
(b)



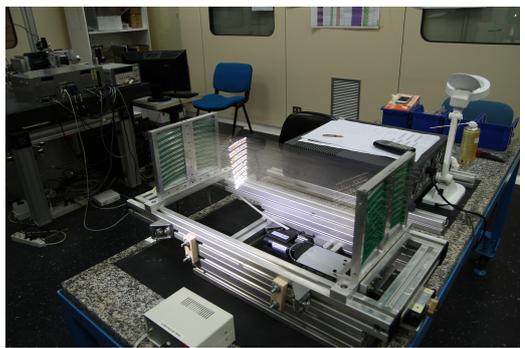
(c)



(d)

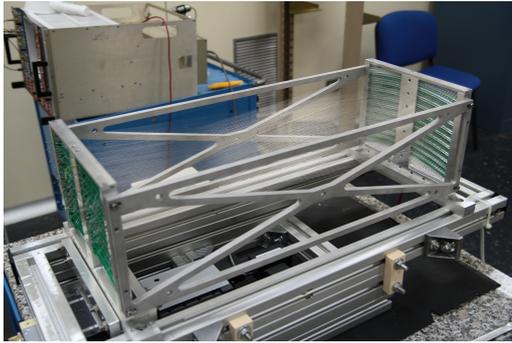


(e)

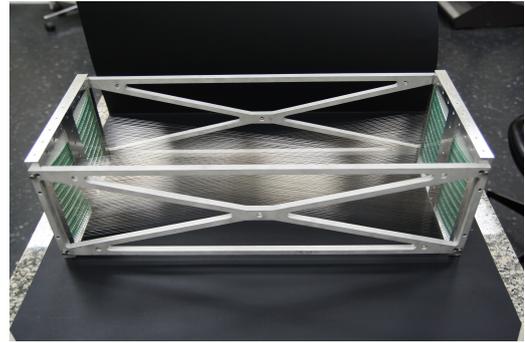


(f)

Figura 3.5: Alcune fasi caratteristiche del processo di filatura.



(a)



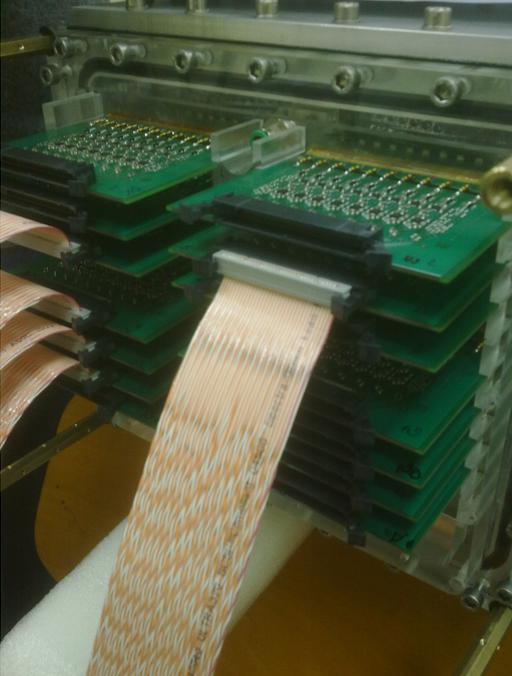
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.6: Alcune fasi caratteristiche dell'inserimento del prototipo nella box di test

Capitolo 4

Conclusioni

Questa tesi di laurea ha avuto come oggetto la modellazione e realizzazione del prototipo del tracciatore per l'esperimento *Mu2e*, ovvero uno spicchio di camera multi filo a deriva. Questo lavoro ha impegnato è stato svolto in sinergia con il servizio di Meccanica della sezione di Lecce dell' *Istituto Nazionale di Fisica Nucleare*.

La tecnologia utilizzata per la realizzazione di questo tipo di tracciatore è risultata innovativa sotto diversi aspetti. Difatti, in passato erano già stati realizzati tracciatori multi filo a deriva con una metodologia diversa: il tracciatore per l'esperimento KLOE [6], ad esempio, era costituito da due piatti circolari paralleli traforati, sostenuti da travi longitudinali; i fili venivano inseriti manualmente uno per volta facendoli passare attraverso questi fori e bloccati tramite feedtrought. La realizzazione di un tracciatore con dimensioni della cella così basse (6.58 mm), come quello descritto in questa tesi, non rende possibile l'utilizzo di feedtrought, a causa degli eccessivi ingombri degli stessi. Il nuovo processo sperimentato ha l'obiettivo di automatizzare il processo di filatura del rivelatore, eliminando l'errore connesso alla manualità del lavoro. La realizzazione di un prototipo era necessaria alla valutazione della fattibilità della nuova procedura, per riscontrarne eventuali problematiche e valutarne eventuali criticità.

Gli obiettivi sono stati raggiunti, il prototipo realizzato è stato testato presso il fascio di elettroni alla *Beam Test Facility* (BTF) dell'INFN di Frascati. Si sono riscontrate delle problematiche inerenti al funzionamento della macchina di filatura, alcune delle quali risolte in corso d'opera.

Il principale difetto riscontrato in questo processo è dovuto allo scarso controllo durante la fase di saldatura del filo sulla piazzola delle schedine. Difatti, quest'ultima, rimane una delle poche operazioni svolte manualmente che, se non effettuata correttamente, porta all'evaporazione del sottile strato superficiale di argento o oro presente sui fili, cosicché la saldatura degli stessi non ne garantisce il bloccaggio sulle schedine. Una delle soluzioni a questo problema potrebbe essere quella di prestagnare le piazzole di saldatura con stagno a basso punto di fusione e automatizzare anche il processo di saldatura, mediante uno stilo ad aria calda; questa fase potrebbe essere controllata via software e sarebbe auspicabile

il monitoraggio della temperatura di saldatura, utilizzando ad esempio dei misuratori ad infrarossi.

Un altro aspetto oggetto di studio futuro potrebbe riguardare l'implementazione di un sistema di controllo della tensione meccanica sul singolo filo, una volta che le PC-Board siano inserite nei frame. Infatti, ad oggi, la garanzia che i fili siano soggetti a una tensione compresa nel range di progetto è data da condizioni puramente geometriche: i frame sono a una distanza tale da provocare un allungamento sul filo ben definito; il valore dell'allungamento è funzione della tensione sul filo e calcolabile attraverso la legge di Hook.

Da un punto di vista puramente meccanico l'oggetto ha soddisfatto gli obiettivi prefissati, sia come necessità strutturali sia come tenuta di gas.

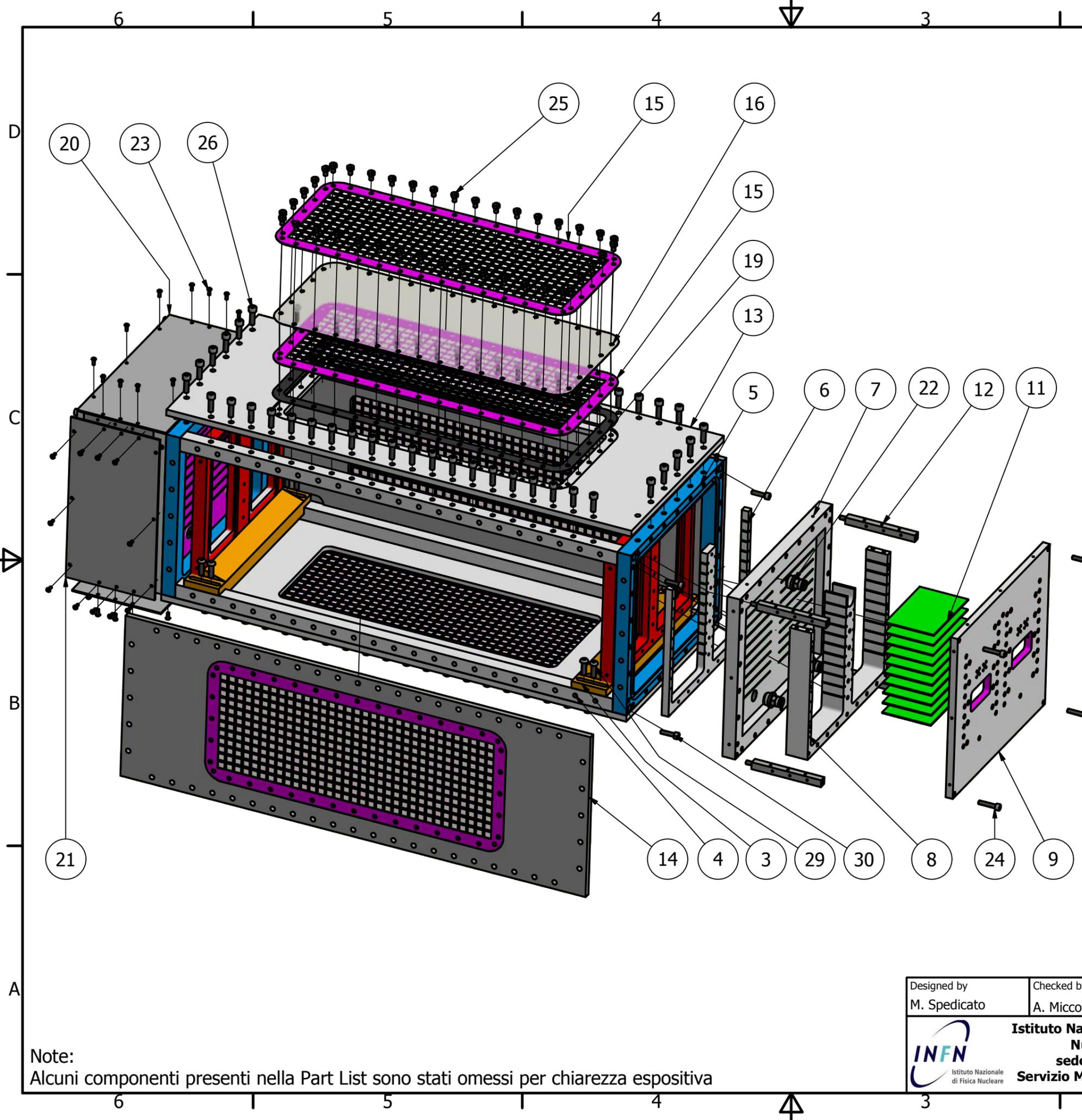
In una prima fase si sono spezzati un certo numero di fili. Questo fenomeno è stato riscontrato anche sui rivelatori del passato ed è noto come "mortalità infantile"; una possibile causa della rottura del filo può essere imputata a difetti interni, casuali e non controllabili. Durante il test al BTF di Frascati, sotto fascio di elettroni e^- con energia di circa 450 MeV. In particolare sono state effettuate 24 sessioni di presa dati, valutando due diverse miscele di gas (He/i-butano 85/15 ed He/i-butano 90/10), disponendo il fascio nelle tre direzioni del prototipo e acquisendo un totale di circa 945000 eventi.

Questa tecnologia con gli opportuni perfezionamenti è stata riadattata per la realizzazione del tracciatore multi filo a deriva dell'esperimento MEG. L'esperienza maturata con questo lavoro fornirà una parte del know-how necessario a questo nuovo progetto, incentrando l'attenzione sulle problematiche sorte e fornendo una base per una stima realistica delle tempistiche di realizzazione.

Appendice A

Tavole

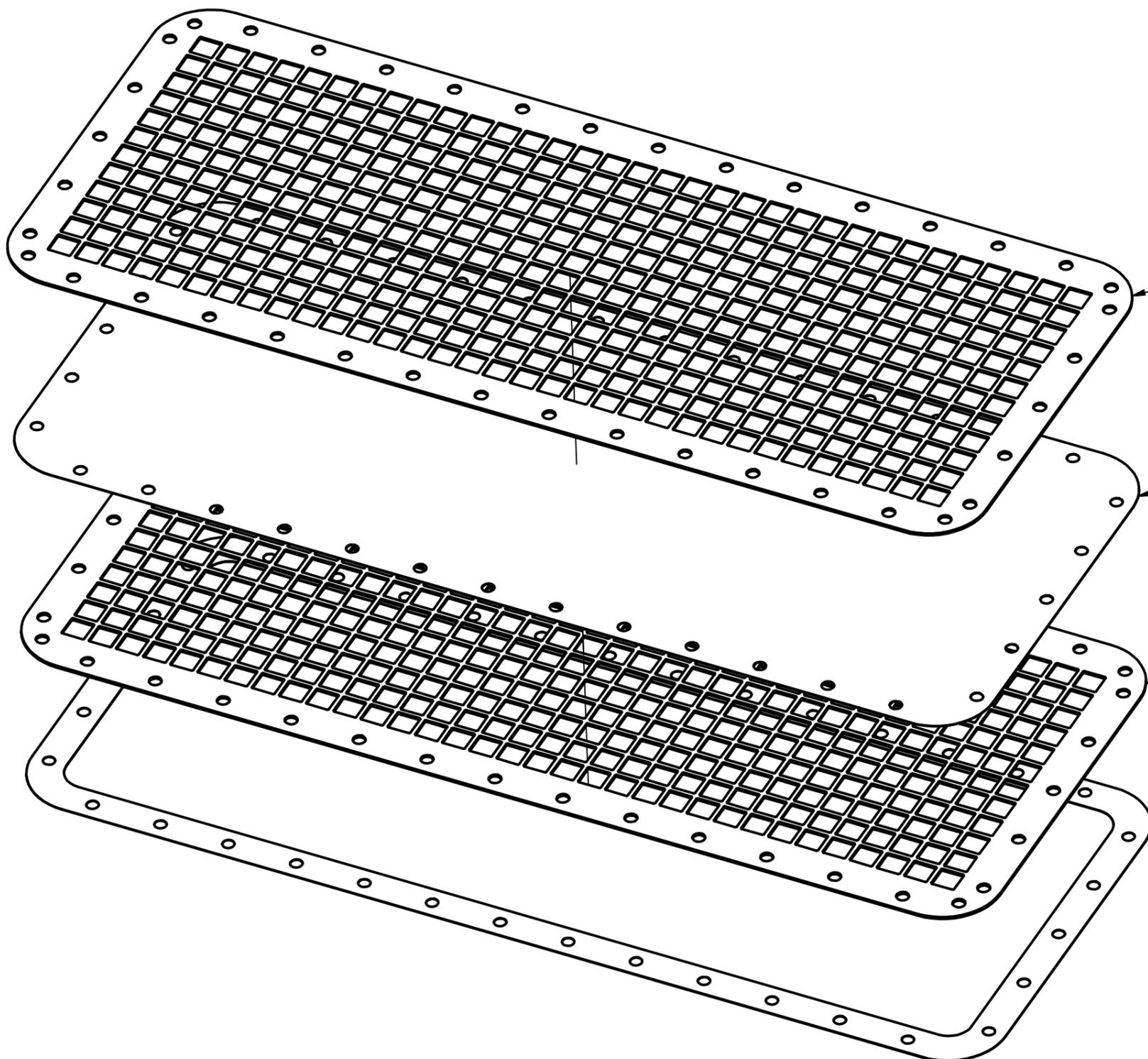
Tavola	1	- Mu2e Prototype: Exploded view	
Tavola	2	- Frame	- Item 01
Tavola	3	- Coperchio di chiusura frame	- Item 02
Tavola	4	- Guida	- Item 03
Tavola	5	- Tramezzo	- Item 04
Tavola	6	- Cornice frontale	- Item 05
Tavola	7	- Pettine interno	- Item 06
Tavola	8	- Tappo frontale	- Item 07
Tavola	9	- Frame elettronica	- Item 08
Tavola	10	- Piastra di chiusura frontale	- Item 09
Tavola	11	- Distanziale	- Item 12
Tavola	12	- Pannello Superiore	- Item 13
Tavola	13	- Pannello Laterale	- Item 14
Tavola	14	- Griglia	- Item 15
Tavola	15	- Carter pannello superiore	- Item 20
Tavola	16	- Carter pannello laterale	- Item 21



PARTS LIST		
ITEM	QTY	PART NUMBER
1	2	Frame
2	1	Coperchio di chiusura frame
3	2	Guida
4	4	Tramezzo
5	2	Cornice frontale
6	2	Pettine interno
7	2	Tappo frontale
8	2	Frame elettronica
9	2	Piastra di chiusura frontale
10	40	Schede elettronica front end
11	40	Schede Segnale
12	8	Distanziale
13	2	Pannello superiore
14	2	Pannello laterale
15	8	Griglia
16	4	Mylar
17	2	Guarnizione pannello top
18	2	Guarnizione pannello laterale
19	4	Guarnizione finestre
20	4	Carter Pannello Superiore
21	4	Carter Pannello Laterale
22	6	Connettore gas 010838
23	92	ANSI B18.3.4M - M3 x 0.5 x 8
24	8	ISO 4762 - M5 x 25
25	160	ANSI B 18.6.7 M / IFI 513 - M5 x 0,8 x 8
26	208	ISO 4762 - M6 x 20
27	6	ASME/ANSI B18.3.5M - M3x10(2)
28	52	ISO 4762 - M5 x 30
29	8	ANSI B18.3.4M - M6 x 1 x 20
30	8	ISO 4762 - M5 x 20
31	4	Connettore SMA
32	40	Connettore HV (BNC)

Note:
Alcuni componenti presenti nella Part List sono stati omessi per chiarezza espositiva

Designed by M. Spedicato	Checked by A. Miccoli	Approved by A. Miccoli	Date 28/01/2014	Scale 1:5	Dimension without tolerance UNI ISO 2768-mH	Size A3
 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sede di Lecce Servizio Meccanica e Cad		Mu2e Prototype Exploded View			Mu2e Prototype Sheet 1 / 2	



15

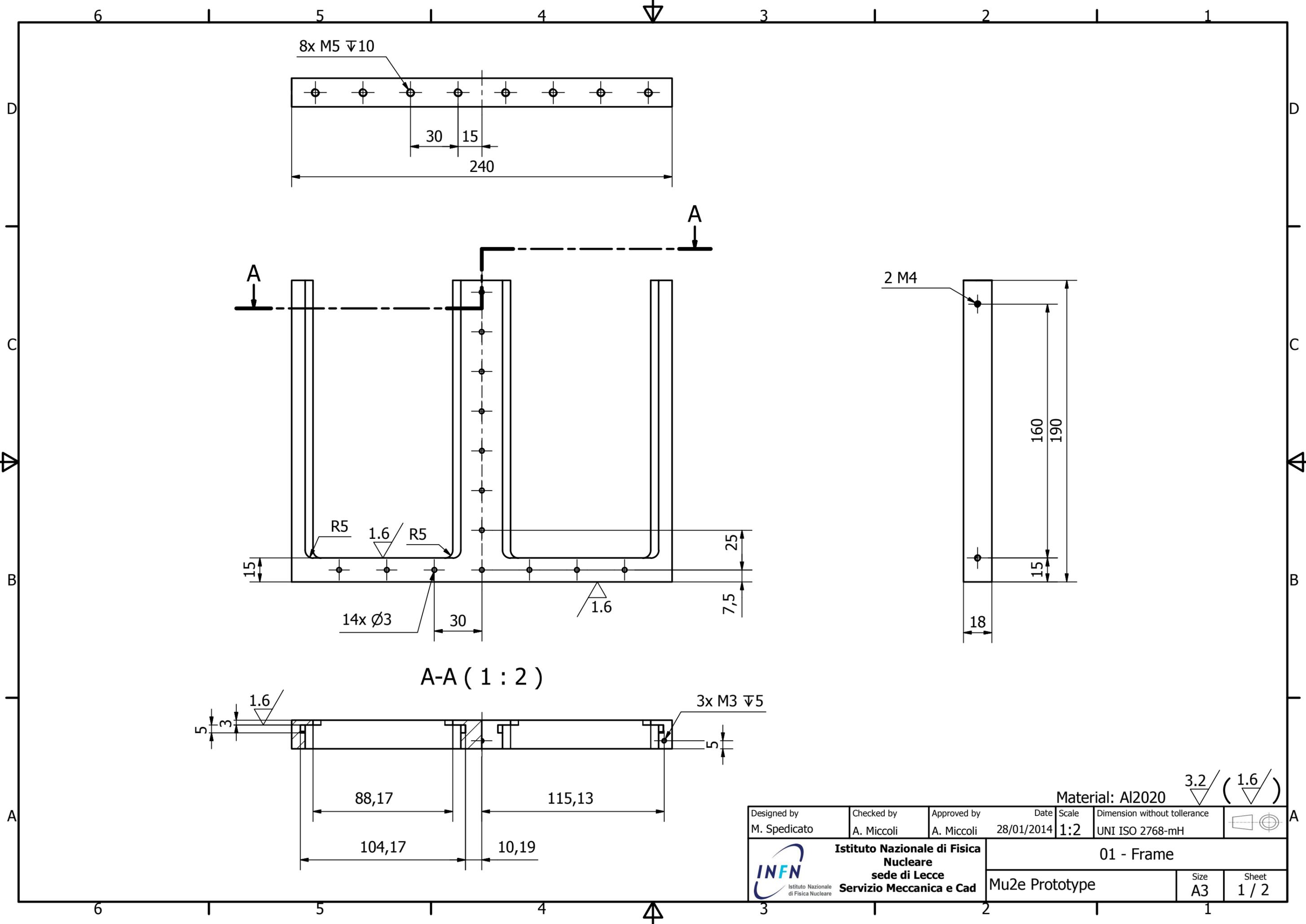
16

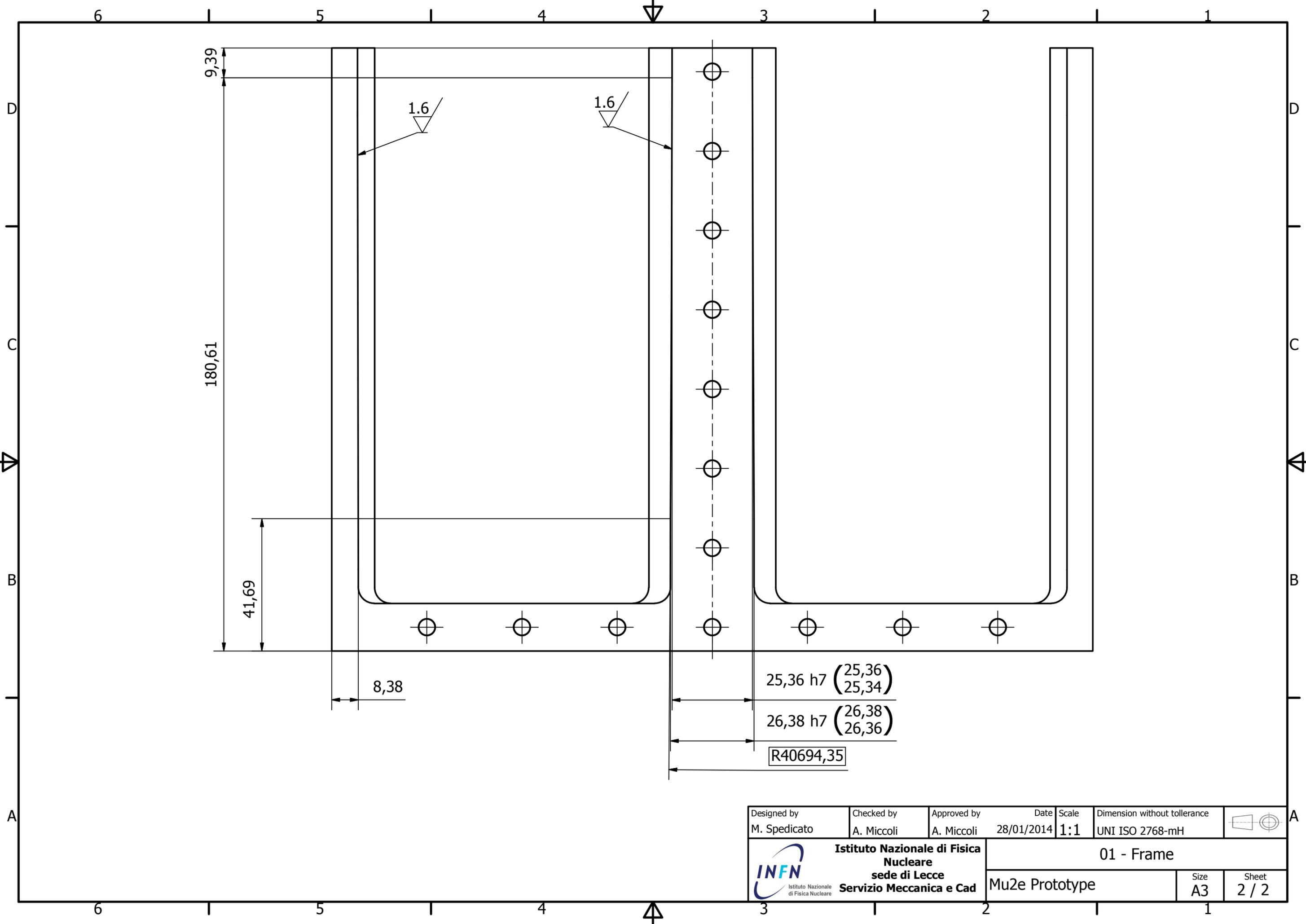
15

19

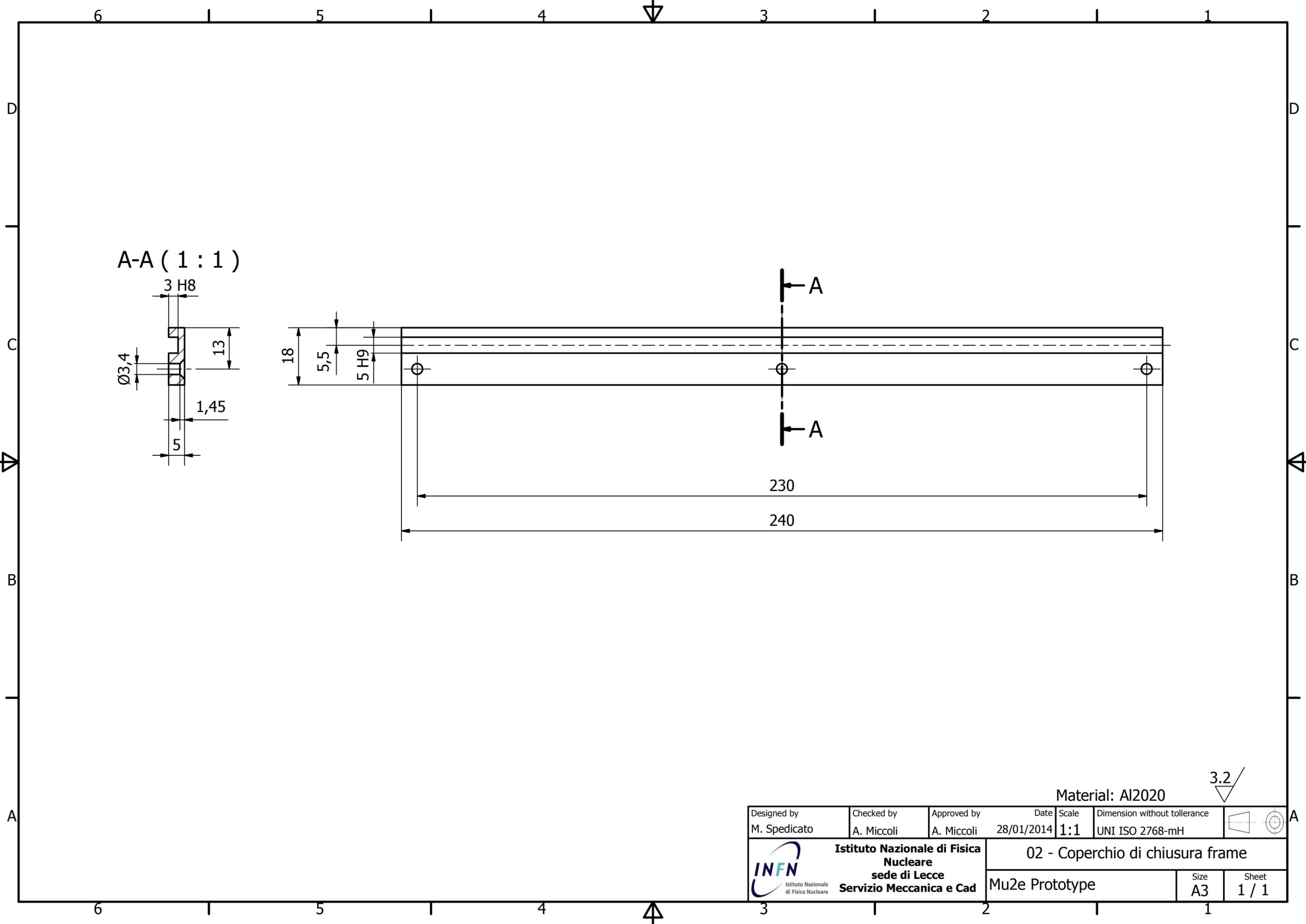
PART LIST			
Item	QTY	Name	
15	8	Griglia	
16	4	Mylar	
19	4	Guarnizioni finestre	

Designed by M. Spedicato	Checked by A. Miccoli	Approved by A. Miccoli	Date 28/01/2014	Scale 1:5	Dimension without tolerance UNI ISO 2768-mH	Size A3
 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sede di Lecce Servizio Meccanica e Cad			Mu2e Prototype Explosed View			
			Mu2e Prototype			





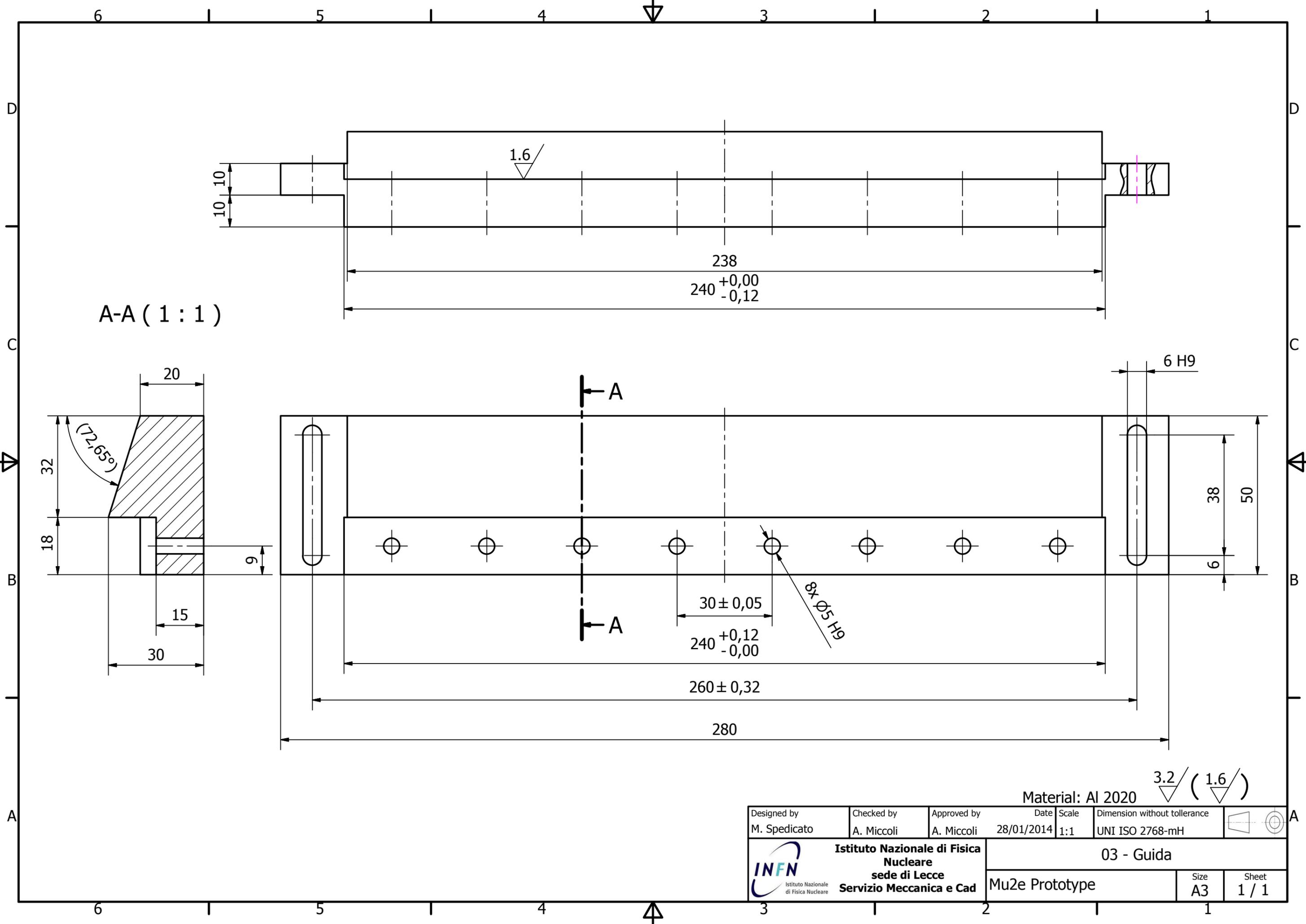
Designed by M. Spedicato	Checked by A. Miccoli	Approved by A. Miccoli	Date 28/01/2014	Scale 1:1	Dimension without tolerance UNI ISO 2768-mH	
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sede di Lecce Servizio Meccanica e Cad		01 - Frame		Size A3	Sheet 2 / 2	
				Mu2e Prototype		



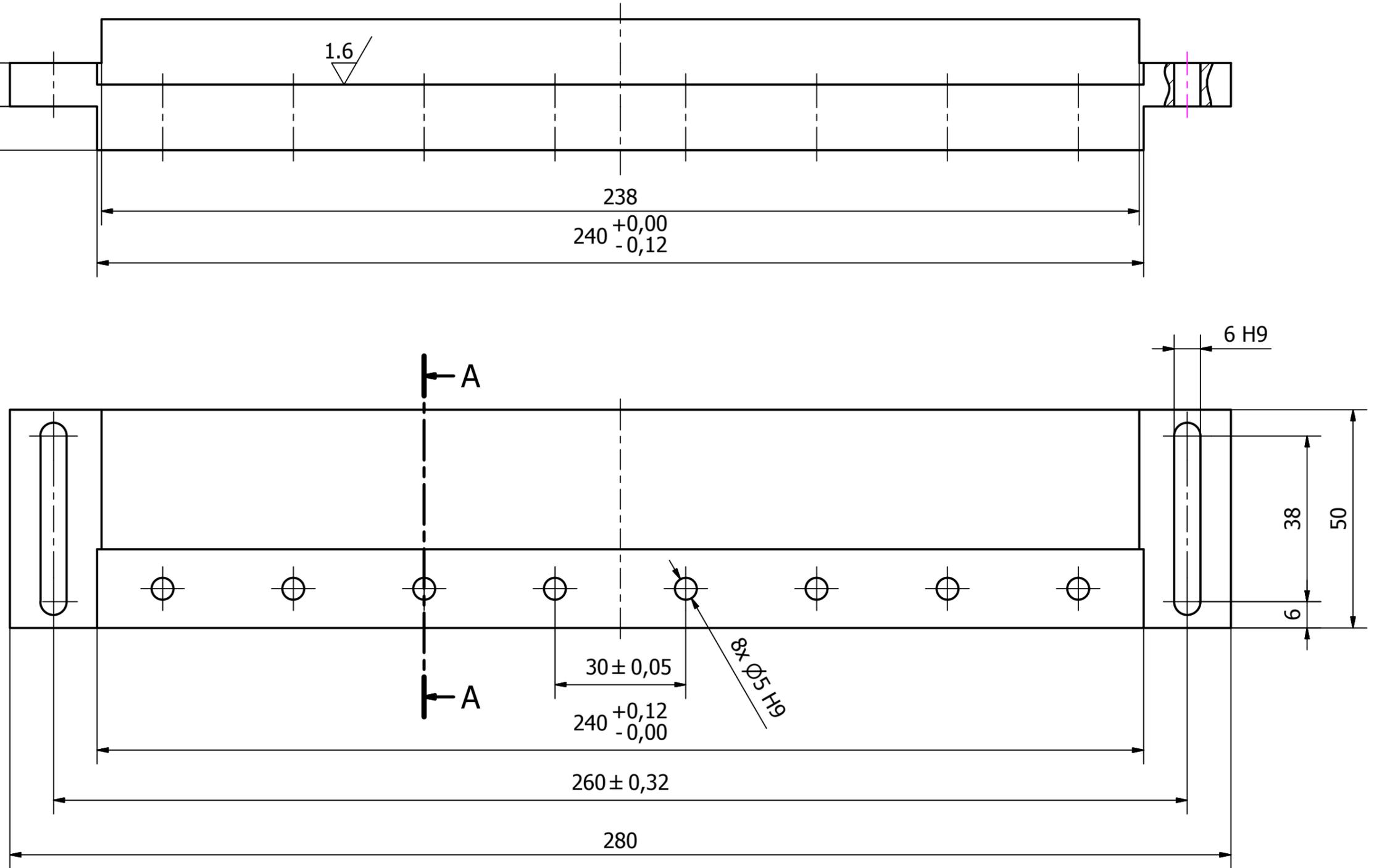
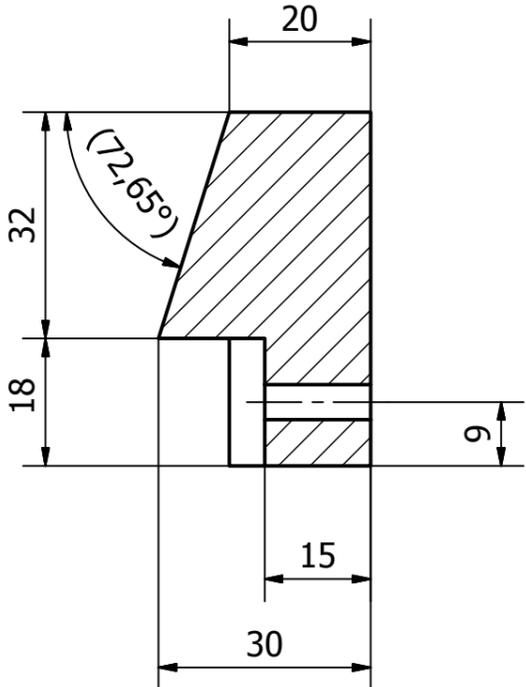
3.2

Material: Al2020

Designed by M. Spedicato	Checked by A. Miccoli	Approved by A. Miccoli	Date 28/01/2014	Scale 1:1	Dimension without tolerance UNI ISO 2768-mH	
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sede di Lecce Servizio Meccanica e Cad			02 - Coperchio di chiusura frame			
			Mu2e Prototype	Size A3	Sheet 1 / 1	

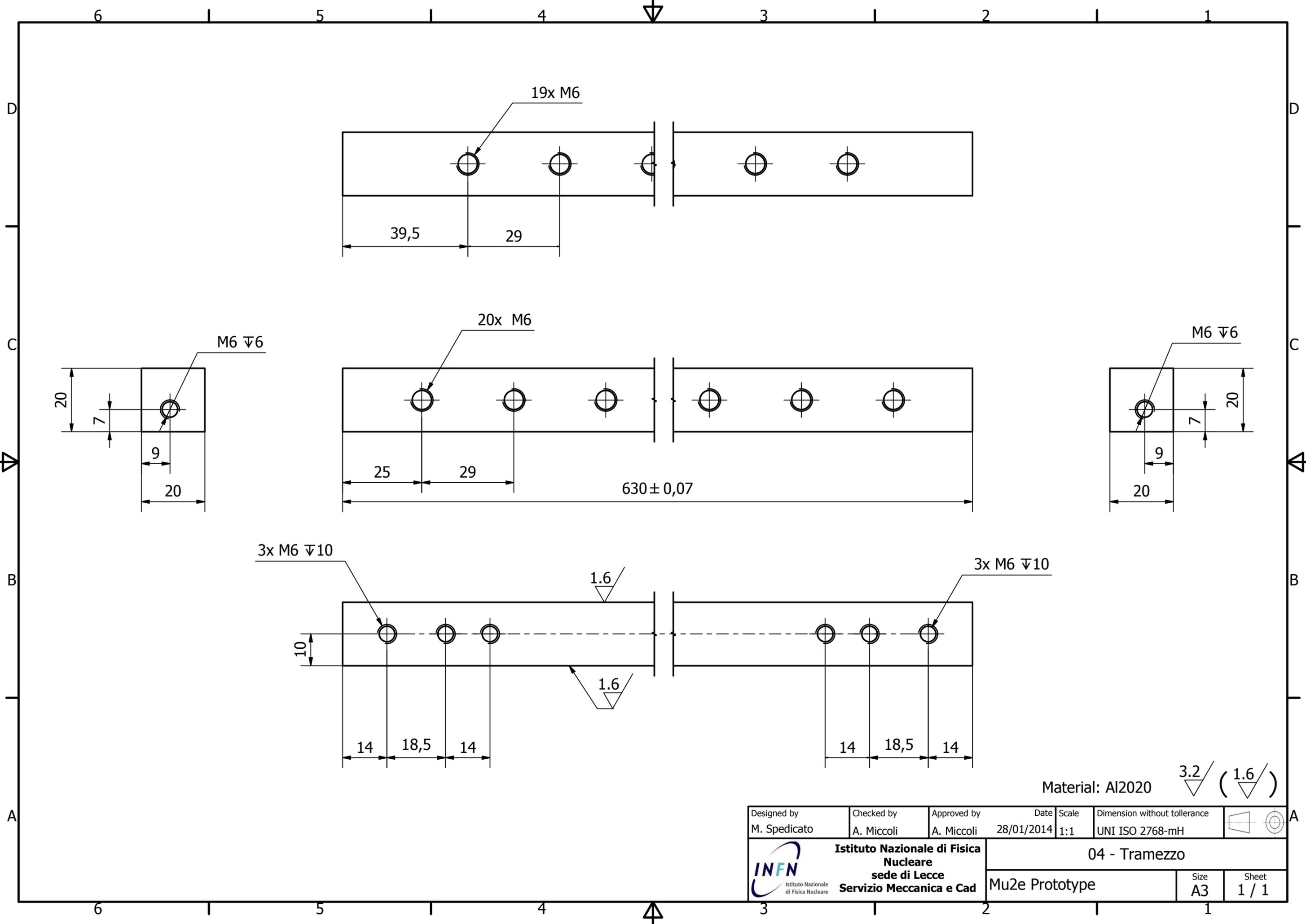


A-A (1:1)

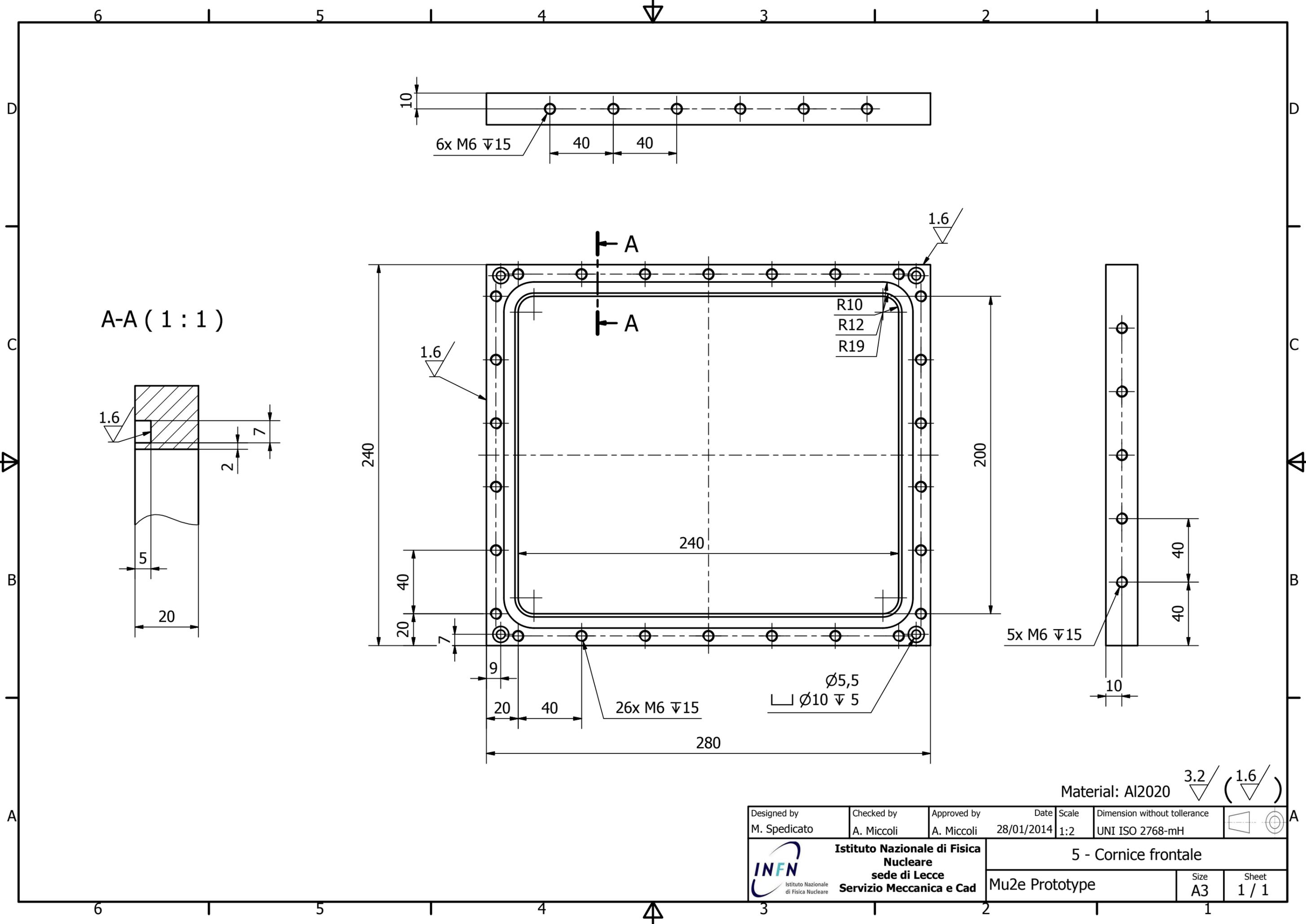


Material: Al 2020 $3.2 / (1.6)$

Designed by M. Spedicato	Checked by A. Miccoli	Approved by A. Miccoli	Date 28/01/2014	Scale 1:1	Dimension without tolerance UNI ISO 2768-mH	
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sede di Lecce Servizio Meccanica e Cad					03 - Guida	
Mu2e Prototype					Size A3	Sheet 1 / 1



Designed by M. Spedicato	Checked by A. Miccoli	Approved by A. Miccoli	Date 28/01/2014	Scale 1:1	Dimension without tolerance UNI ISO 2768-mH	
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sede di Lecce Servizio Meccanica e Cad			04 - Tramezzo		Size A3	



A-A (1:1)

6x M6 ∇ 15

R10
R12
R19

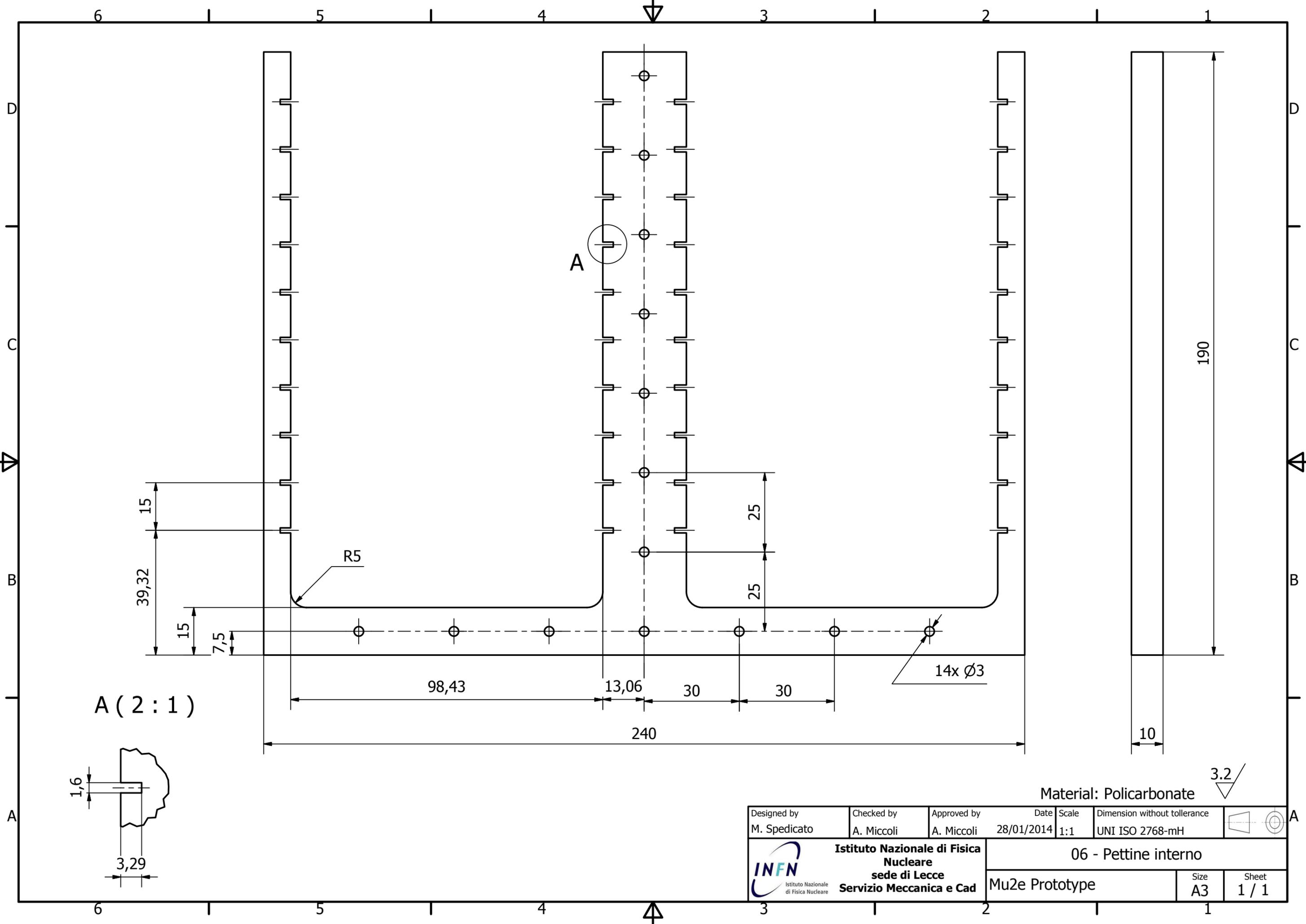
5x M6 ∇ 15

26x M6 ∇ 15

\square ϕ 5,5
 \square ϕ 10 ∇ 5

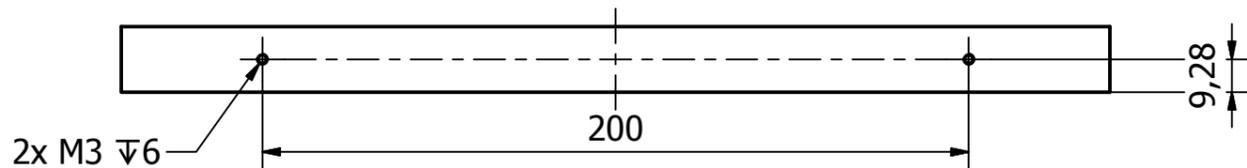
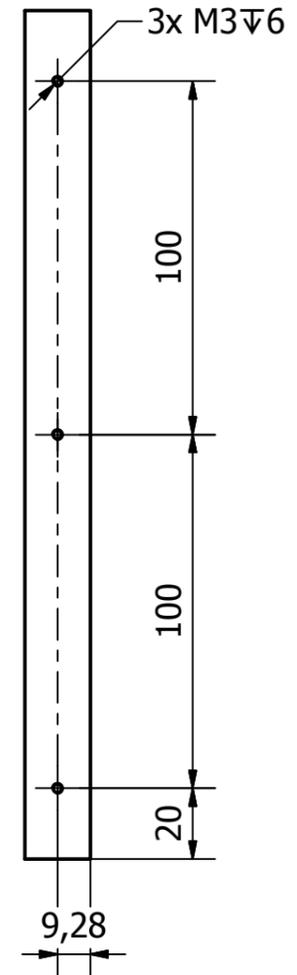
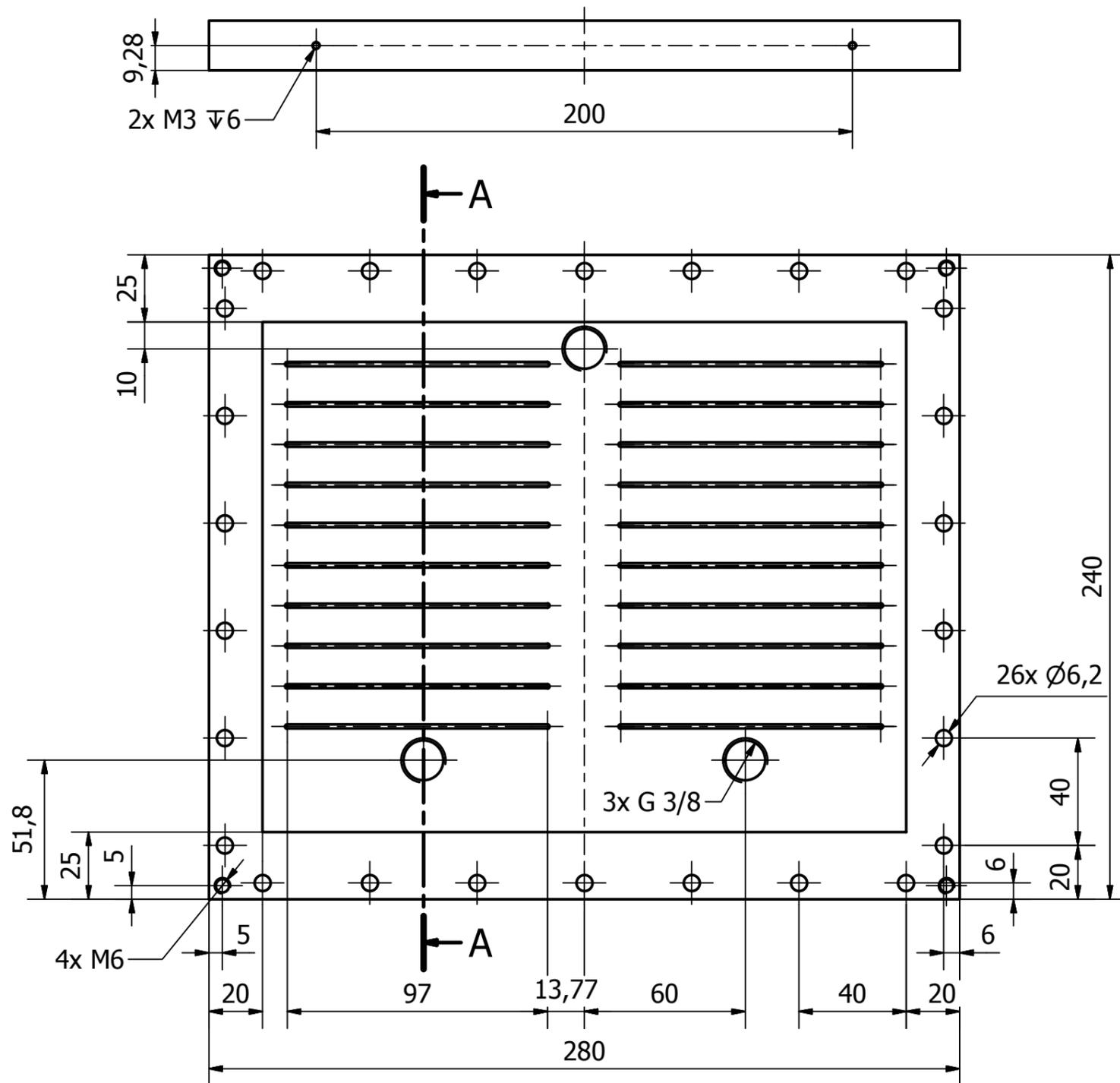
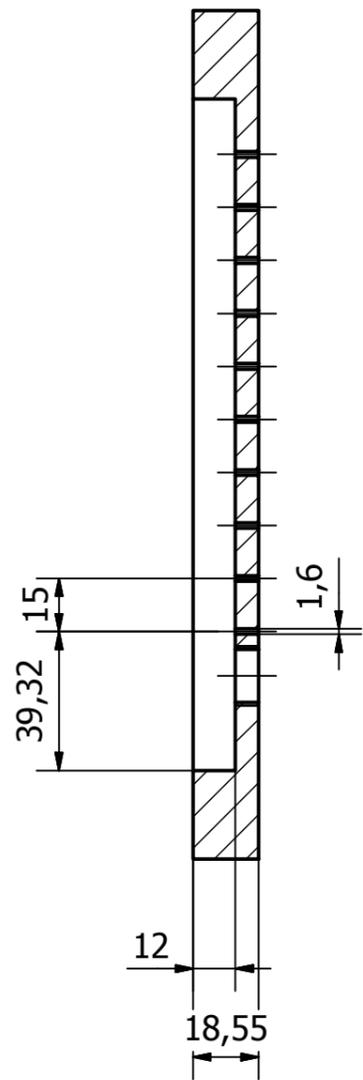
Material: Al2020 $\frac{3.2}{\nabla}$ ($\frac{1.6}{\nabla}$)

Designed by M. Spedicato	Checked by A. Miccoli	Approved by A. Miccoli	Date 28/01/2014	Scale 1:2	Dimension without tolerance UNI ISO 2768-mH	
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sede di Lecce Servizio Meccanica e Cad			5 - Cornice frontale		Size A3	Sheet 1 / 1
			Mu2e Prototype			



Designed by M. Spedicato	Checked by A. Miccoli	Approved by A. Miccoli	Date 28/01/2014	Scale 1:1	Dimension without tolerance UNI ISO 2768-mH	
INFN Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sede di Lecce Servizio Meccanica e Cad			06 - Pettine interno Mu2e Prototype		Size A3	

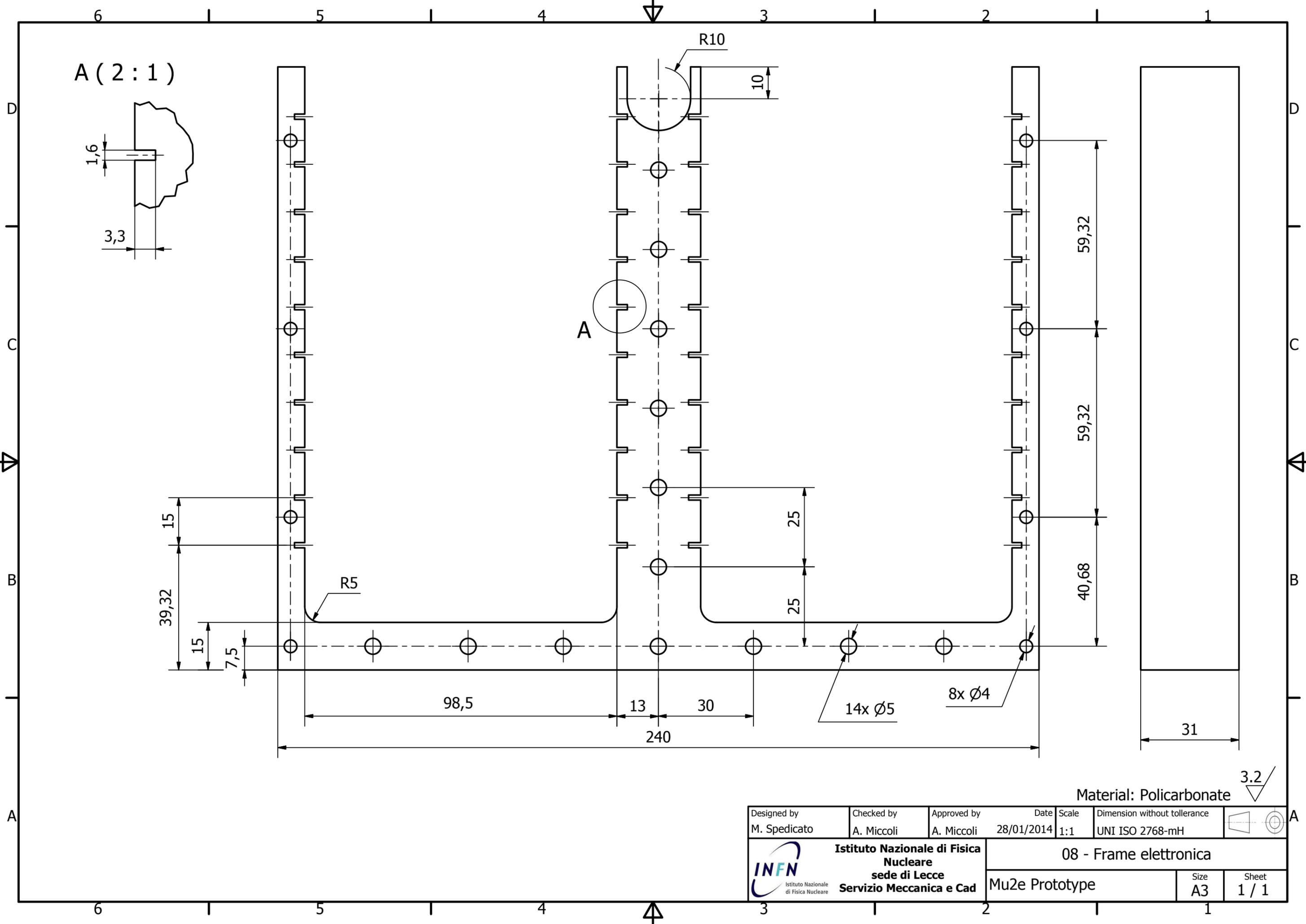
A-A (1 : 2)



Material: Polycarbonate

3.2

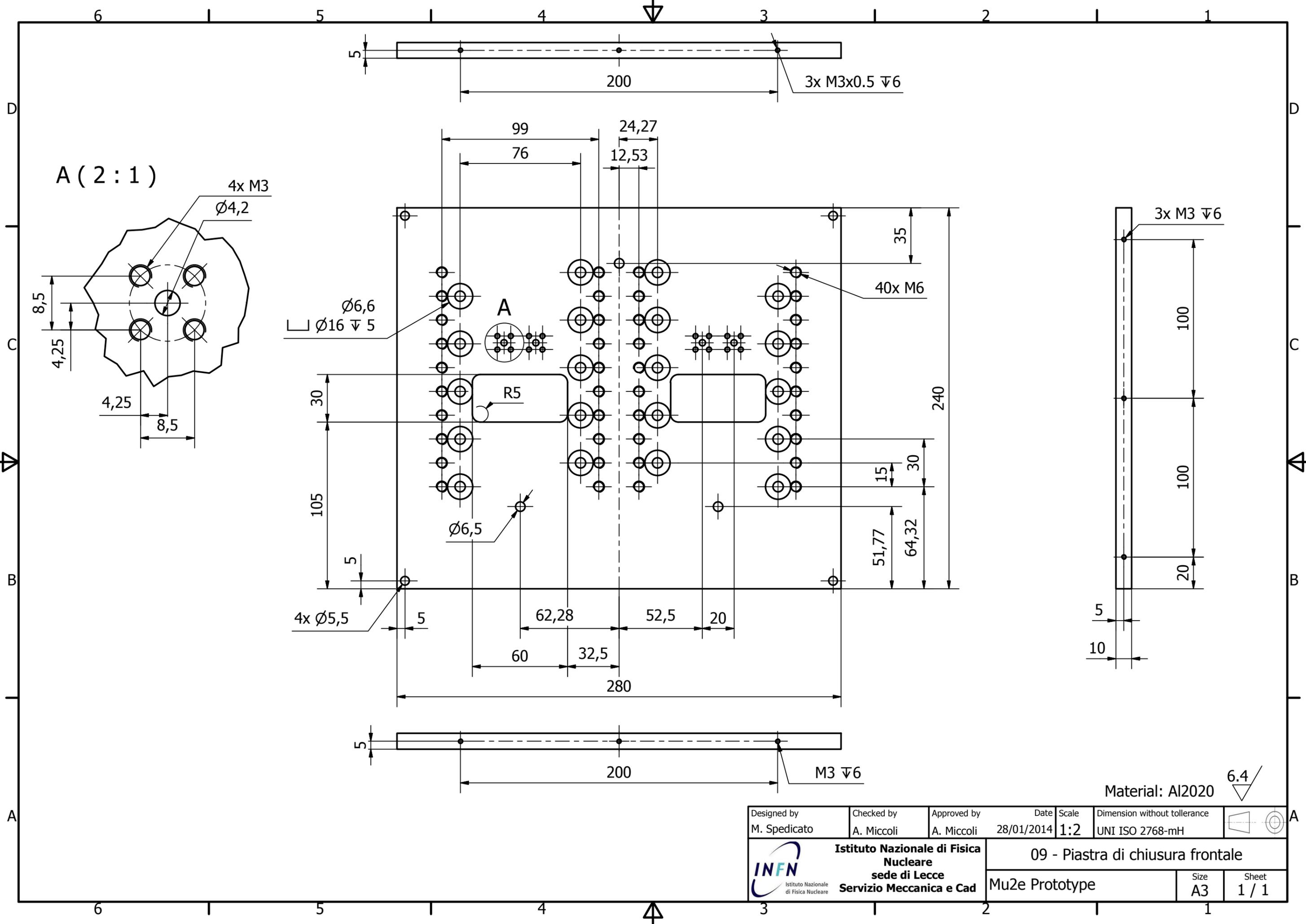
Designed by M. Spedicato	Checked by A. Miccoli	Approved by A. Miccoli	Date 28/01/2014	Scale 1:2	Dimension without tolerance UNI ISO 2768-mH	
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sede di Lecce Servizio Meccanica e Cad			07 - Tappo frontale Mu2e Prototype		Size A3	



Material: Polycarbonate

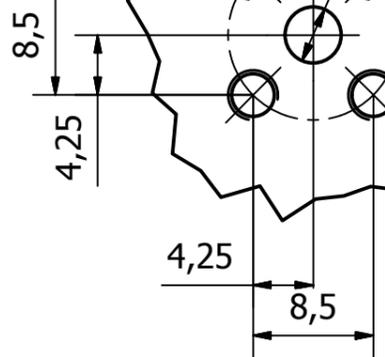
3.2

Designed by M. Spedicato	Checked by A. Miccoli	Approved by A. Miccoli	Date 28/01/2014	Scale 1:1	Dimension without tolerance UNI ISO 2768-mH	
			08 - Frame elettronica		Size A3	
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sede di Lecce Servizio Meccanica e Cad			Mu2e Prototype		Sheet 1 / 1	



A (2:1)

4x M3
 $\varnothing 4,2$



$\varnothing 6,6$
 $\varnothing 16 \nabla 5$

A

R5

$\varnothing 6,5$

4x $\varnothing 5,5$

3x M3x0.5 $\nabla 6$

40x M6

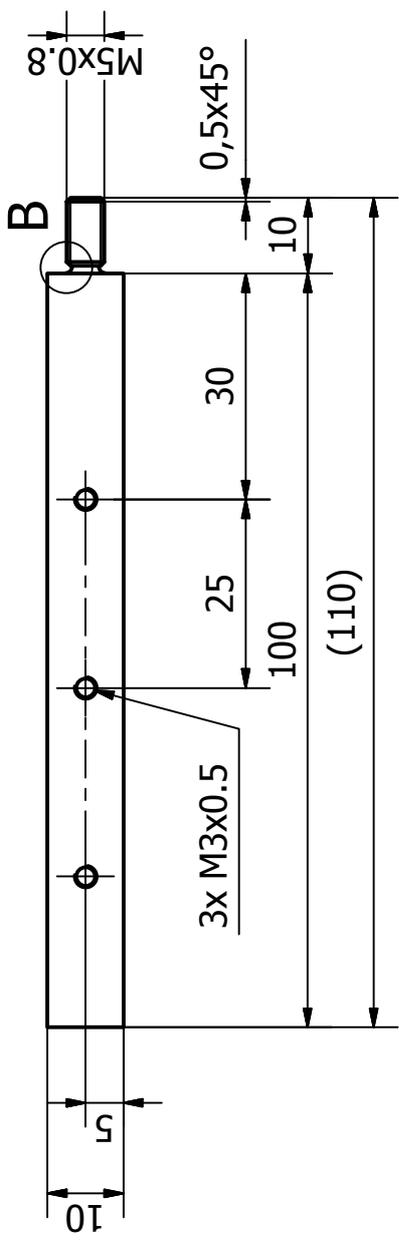
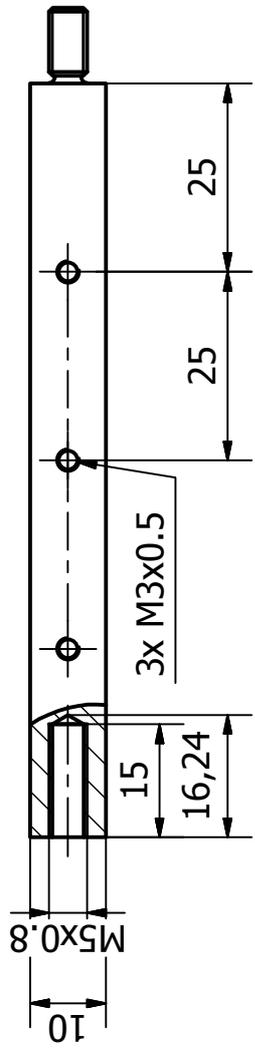
3x M3 $\nabla 6$

M3 $\nabla 6$

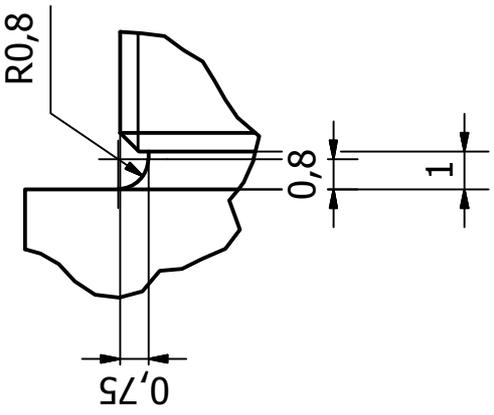
Material: Al2020

6.4

Designed by M. Spedicato	Checked by A. Miccoli	Approved by A. Miccoli	Date 28/01/2014	Scale 1:2	Dimension without tolerance UNI ISO 2768-mH		
			Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sede di Lecce Servizio Meccanica e Cad		09 - Piastra di chiusura frontale Mu2e Prototype		Size A3



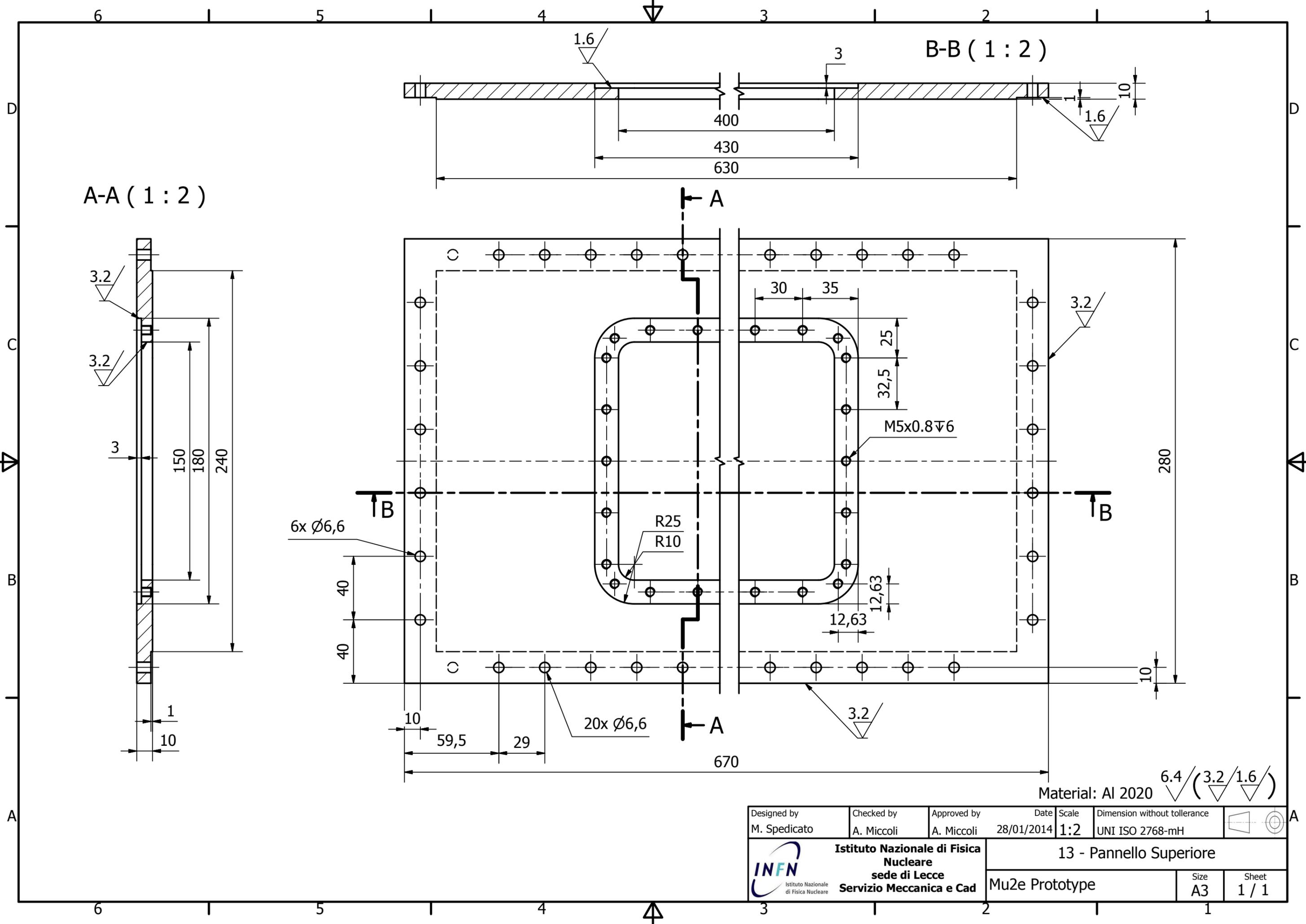
B (5 : 1)



6.4

Material: Brass

Designed by M. Spedicato	Checked by A. Miccoli	Approved by A. Miccoli	Date 28/01/2014	Scale 1:1	Dimension without tolerance UNI ISO 2768-mH	
12 - Distanziale						
Mu2e Prototype						

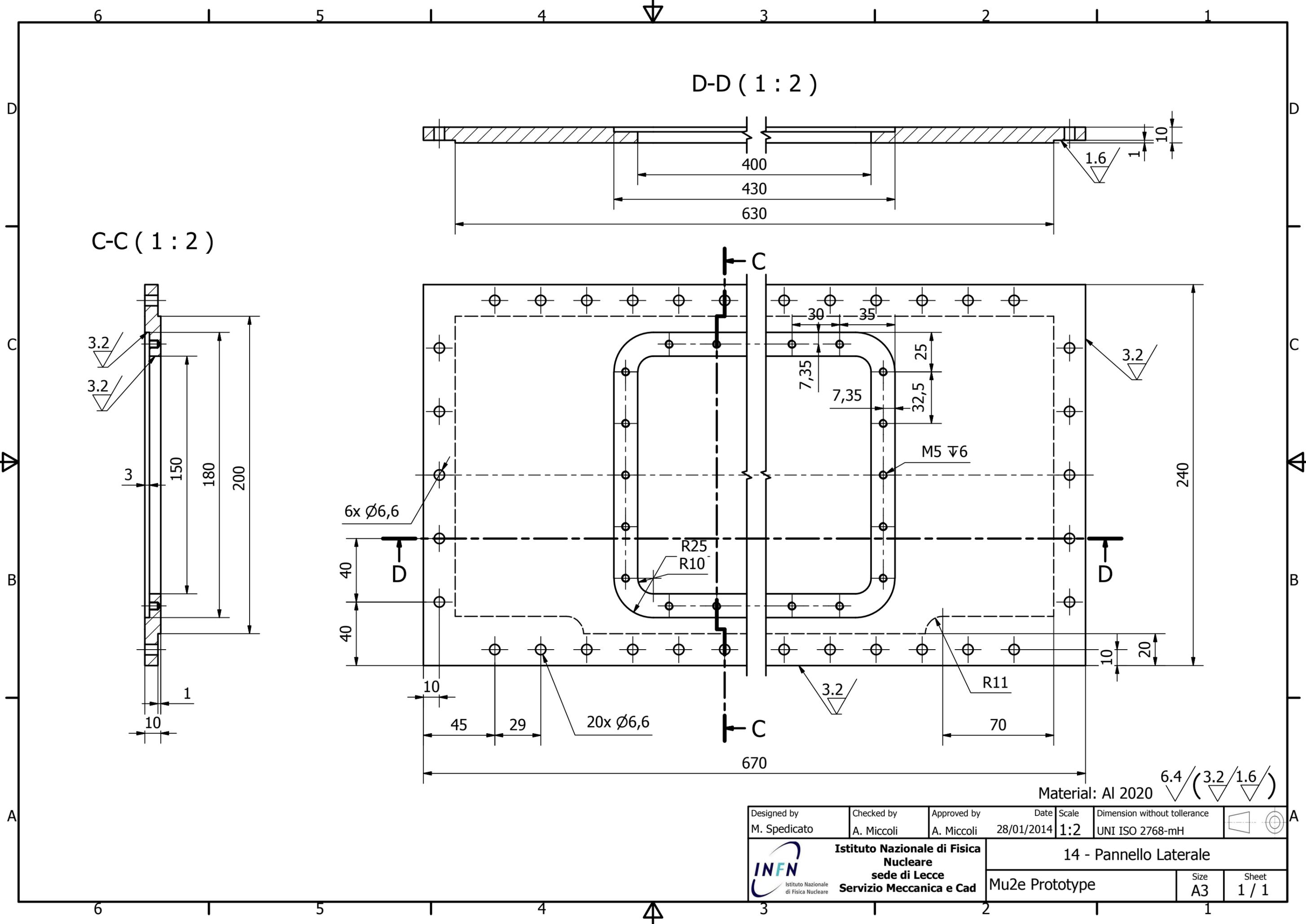


A-A (1 : 2)

B-B (1 : 2)

Material: Al 2020 $\sqrt{6.4 / (3.2 / 1.6)}$

Designed by M. Spedicato	Checked by A. Miccoli	Approved by A. Miccoli	Date 28/01/2014	Scale 1:2	Dimension without tolerance UNI ISO 2768-mH		
INFN Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sede di Lecce Servizio Meccanica e Cad					13 - Pannello Superiore Mu2e Prototype		Size A3

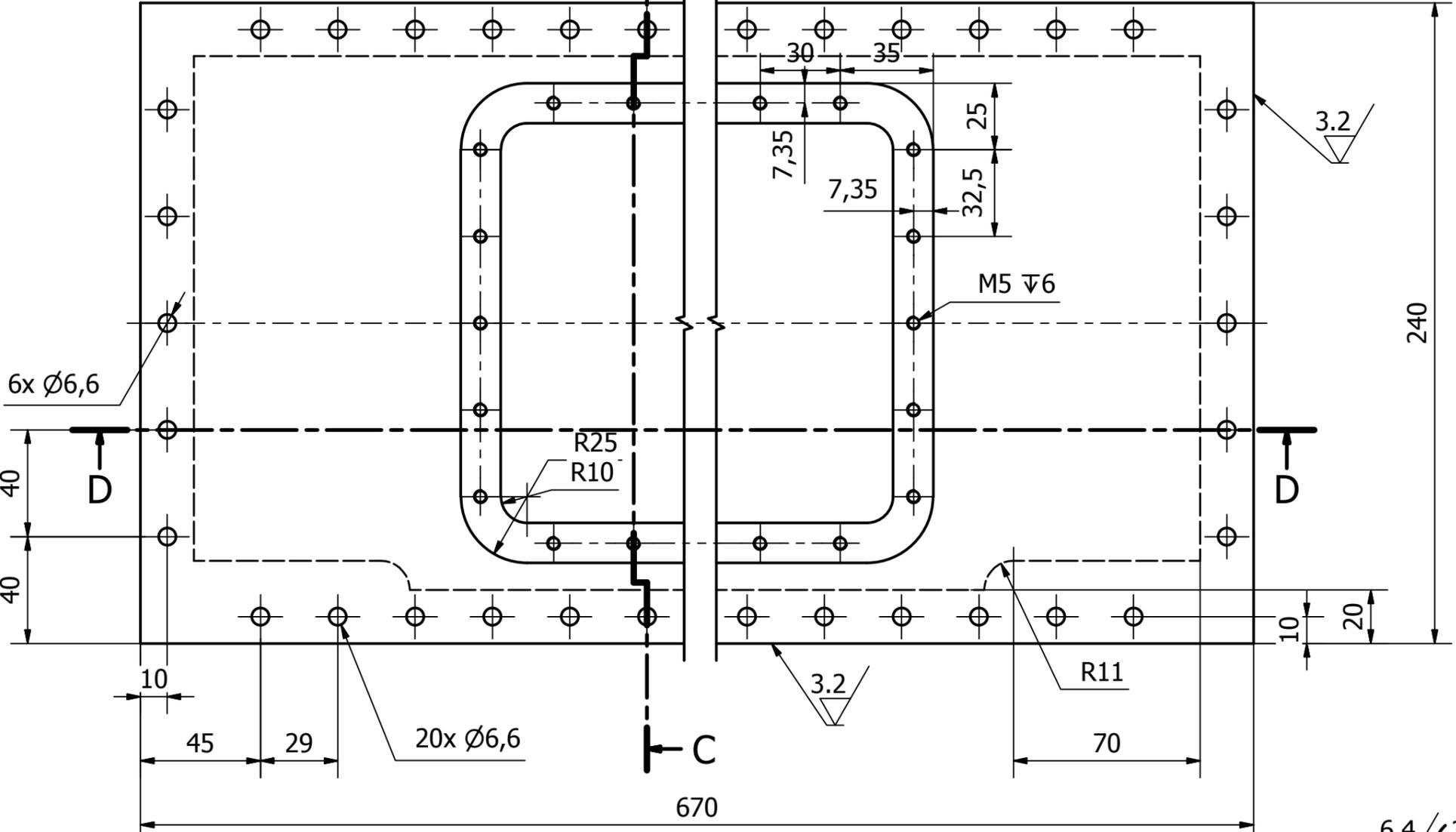


D-D (1 : 2)

C-C (1 : 2)

400
430
630

3.2
3.2
3
150
180
200
10
10



6x Ø6,6

40

40

10

45

29

20x Ø6,6

670

240

7,35

7,35

30

35

25

32,5

M5 ∇6

3.2

3.2

R11

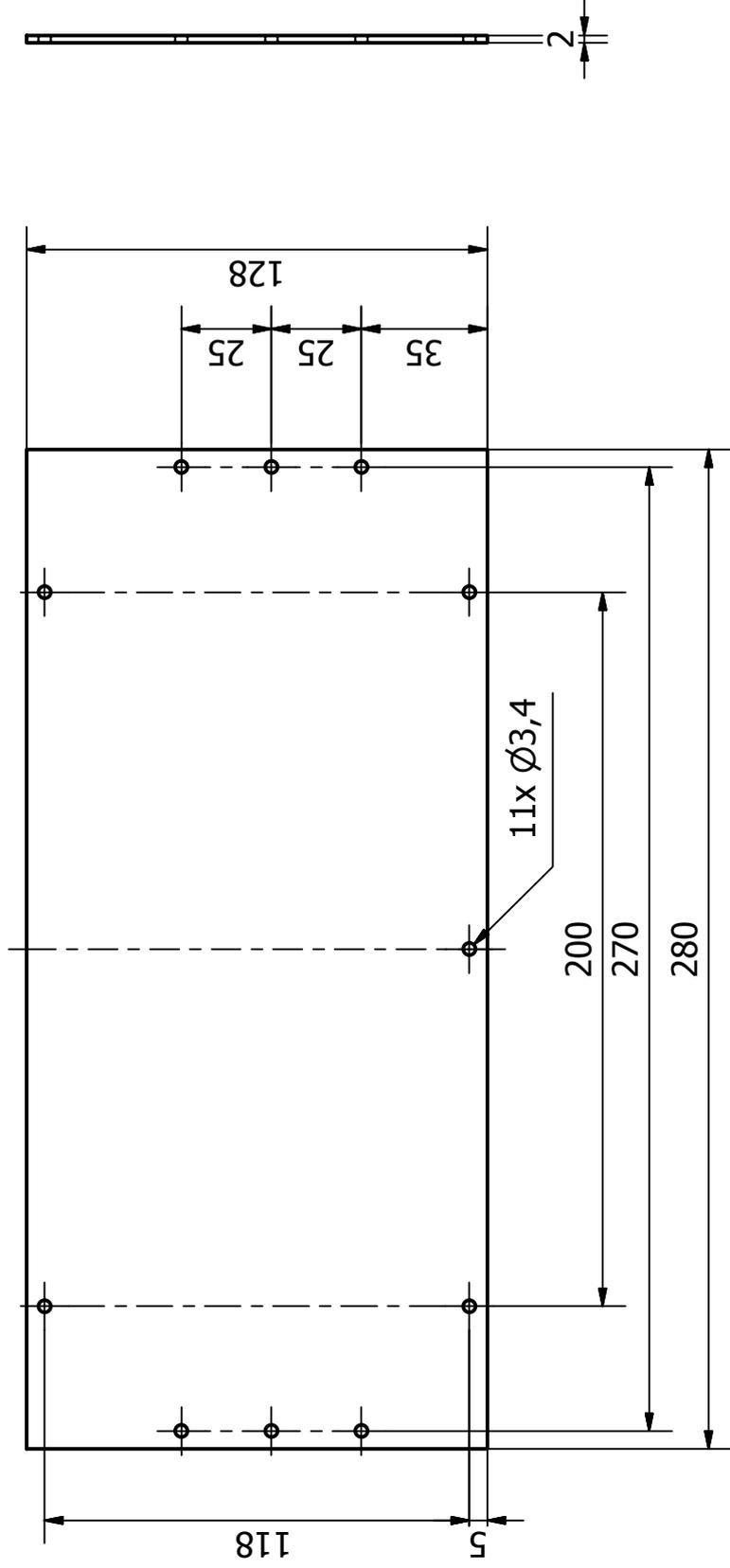
70

10

20

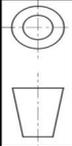
Material: Al 2020 $\sqrt{6.4 / (3.2 / 1.6)}$

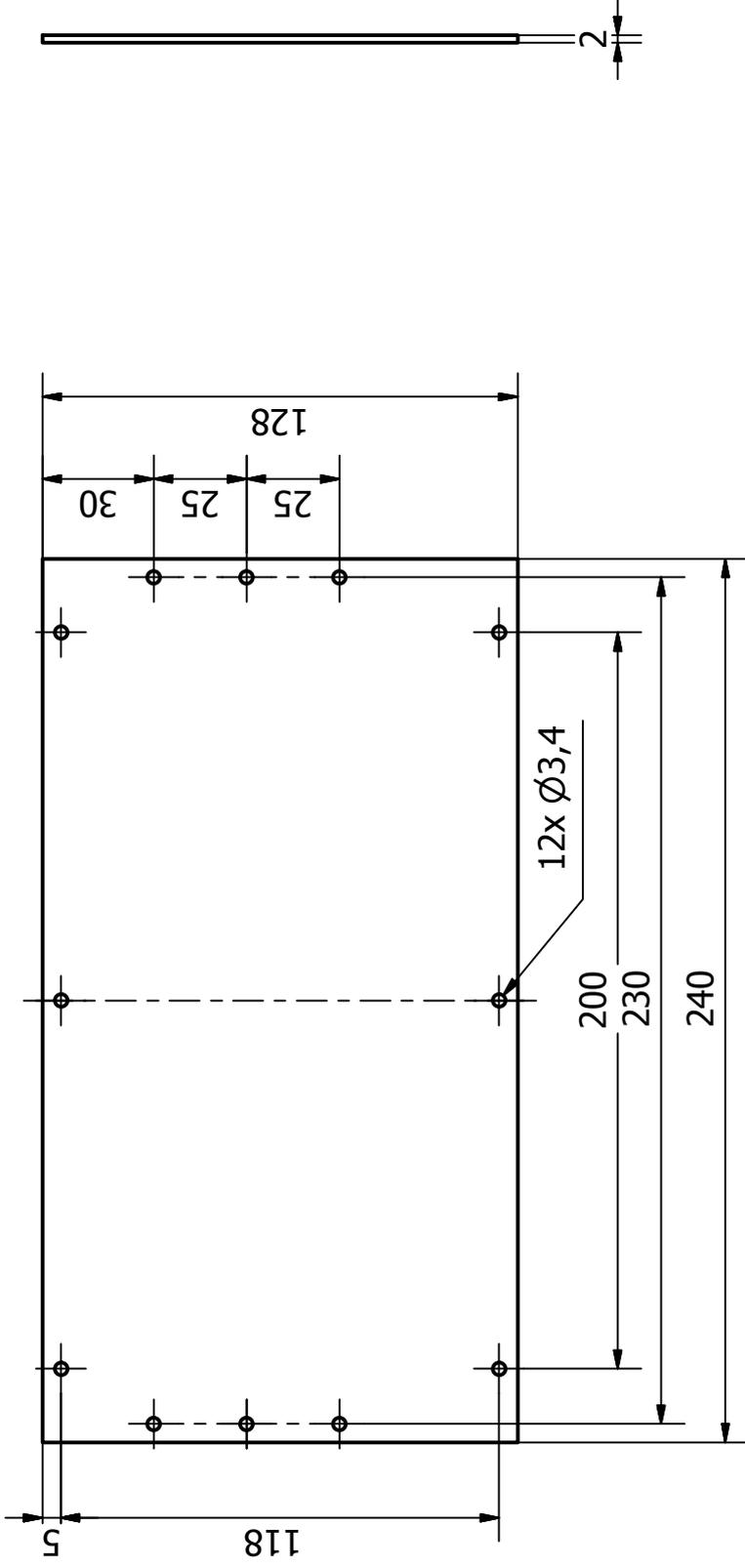
Designed by M. Spedicato	Checked by A. Miccoli	Approved by A. Miccoli	Date 28/01/2014	Scale 1:2	Dimension without tolerance UNI ISO 2768-mH		
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sede di Lecce Servizio Meccanica e Cad					14 - Pannello Laterale Mu2e Prototype		Size A3



12.5

Material: Al 2020

 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sede di Lecce Servizio Meccanica e Cad	Designed by	Checked by	Approved by	Date	Scale	Dimension without tolerance	 Sheet 1 / 1
	M. Spedicato	A. Miccoli	A. Miccoli	28/01/2014	1:2	UNI ISO 2768-mH	
20 - Carter Pannello superiore						Size	A4
Mu2e Prototype						Sheet	



12.5

Material: Al 2020

Designed by M. Spedicato	Checked by A. Miccoli	Approved by A. Miccoli	Date 28/01/2014	Scale 1:2	Dimension without tolerance UNI ISO 2768-mH	
 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sede di Lecce Servizio Meccanica e Cad			21 - Carter Pannello Laterale		Size A4	Sheet 1 / 1
Mu2e Prototype						

Appendice B

Tabelle

Tabella B.1: Parametri geometrici delle PC-Board di tipo S e di tipo F, in riferimento alla Figura2.4

Sublayer	Layer	N° of Wires	Type	Bord offset inner wire [mm]	Bord offset outer wire [mm]	Wire Pitch [mm]
1	0	21	-up b. field	17,309	22,376	2,956
2	1	21	+dw b. field	17,305	22,373	2,956
3	1		filler			
4	1	11	+up c. field	17,078	22,145	5,957
5	1	10	+up sense	20,116	25,184	5,957
6	1		filler			
7	1	21	+up b. field	16,850	21,917	3,001
8	2	21	-dw b. field	16,847	21,914	3,001
9	2		filler			
10	2	11	-up c. field	16,615	21,683	6,047
11	2	10	-up sense	19,700	24,768	6,047
12	2		filler			
13	2	21	-up b. field	16,384	21,451	3,046
14	3	21	+dw b. field	16,381	21,448	3,047
15	3		filler			
16	3	11	+up c. field	16,145	21,213	6,139

Sublayer	Layer	N° of Wires	Type	Bord offset inner wire [mm]	Bord offset outer wire [mm]	Wire Pitch [mm]
17	3	10	+up sense	19,277	24,345	6,139
18	3		filler			
19	3	21	+up b. field	15,910	20,978	3,093
20	4	21	-dw b. field	15,907	20,975	3,093
21	4		filler			
22	4	11	-up c. field	15,668	20,736	6,233
23	4	10	-up sense	18,848	23,916	6,233
24	4		filler			
25	4	21	-up b. field	15,429	20,497	3,140
26	5	21	+dw b. field	15,426	20,494	3,140
27	5		filler			
28	5	11	+up c. field	15,183	20,251	6,328
29	5	10	+up sense	18,412	23,479	6,328
30	5		filler			
31	5	21	+up b. field	14,941	20,008	3,188
32	6	21	-dw b. field	14,937	20,005	3,188
33	6		filler			
34	6	11	-up c. field	14,691	19,759	6,424
35	6	10	-up sense	17,968	23,036	6,424
36	6		filler			
37	6	21	-up b. field	14,444	19,512	3,236
38	7	21	+dw b. field	14,441	19,509	3,237
39	7		filler			
40	7	11	+up c. field	14,191	19,258	6,522
41	7	10	+up sense	17,518	22,586	6,522
42	7		filler			
43	7	21	+up b. field	13,940	19,008	3,286
44	8	21	-dw b. field	13,937	19,005	3,286
45	8		filler			
46	8	11	-up c. field	13,683	18,750	6,622

Sublayer	Layer	N° of Wires	Type	Bord offset inner wire [mm]	Bord offset outer wire [mm]	Wire Pitch [mm]
47	8	10	-up sense	17,061	22,129	6,622
48	8		filler			
49	8	21	-up b. field	13,428	18,496	3,336
50	9	21	+dw b. field	13,425	18,493	3,336
51	9		filler			
52	9	11	+up c. field	13,166	18,234	6,723
53	9	10	+up sense	16,596	21,664	6,723
54	9		filler			
55	9	21	+up b. field	12,908	17,976	3,387
56	10	21	-dw b. field	12,905	17,972	3,387
57	10		filler			
58	10	11	-up c. field	12,642	17,710	6,826
59	10	10	-up sense	16,125	21,192	6,826
60	10		filler			
61	10	21	-up b. field	12,379	17,447	3,439
62	11	21	+dw b. field	12,376	17,444	3,439
63	11		filler			
64	11	11	+up c. field	12,110	17,177	6,930
65	11	10	+up sense	15,645	20,713	6,930
66	11		filler			
67	11	21	+up b. field	11,843	16,910	3,491
68	12	21	-dw b. field	11,840	16,907	3,492
69	12		filler			
70	12	11	-up c. field	11,569	16,636	7,036
71	12	10	-up sense	15,158	20,226	7,036
72	12		filler			
73	12	21	-up b. field	11,298	16,365	3,545
74	13	21	+dw b. field	11,295	16,362	3,545
75	13		filler			
76	13	11	+up c. field	11,019	16,087	7,144

Sublayer	Layer	N° of Wires	Type	Bord offset inner wire [mm]	Bord offset outer wire [mm]	Wire Pitch [mm]
77	13	10	+up sense	14,664	19,732	7,144
78	13		filler			
79	13	21	+up b. field	10,744	15,812	3,599
80	14	21	-dw b. field	10,741	15,809	3,599
81	14		filler			
82	14	11	-up c. field	10,461	15,529	7,253
83	14	10	-up sense	14,162	19,229	7,253
84	14		filler			
85	14	21	-up b. field	10,181	15,249	3,654
86	15	21	+dw b. field	10,178	15,246	3,654
87	15		filler			
88	15	11	+up c. field	9,894	14,962	7,365
89	15	10	+up sense	13,652	18,719	7,365
90	15		filler			
91	15	21	+up b. field	9,610	14,678	3,710
92	16	21	-dw b. field	9,607	14,675	3,710
93	16		filler			
94	16	11	-up c. field	9,319	14,386	7,477
95	16	10	-up sense	13,133	18,201	7,477
96	16		filler			
97	16	21	-up b. field	9,030	14,098	3,767
98	17	21	+dw b. field	9,027	14,095	3,767
99	17		filler			
100	17	11	+up c. field	8,734	13,802	7,592
101	17	10	+up sense	12,607	17,675	7,592
102	17		filler			
103	17	21	+up b. field	8,441	13,508	3,825
104	18	21	-dw b. field	8,438	13,505	3,825
105	18		filler			
106	18	11	-up c. field	8,140	13,208	7,708

Sublayer	Layer	N° of Wires	Type	Bord offset inner wire [mm]	Bord offset outer wire [mm]	Wire Pitch [mm]
107	18	10	-up sense	12,073	17,140	7,708
108	18		filler			
109	18	21	-up b. field	7,842	12,910	3,883
110	19	21	+dw b. field	7,839	12,907	3,884
111	19		filler			
112	19	11	+up c. field	7,537	12,604	7,827
113	19	10	+up sense	11,530	16,597	7,827
114	19		filler			
115	19	21	+up b. field	7,234	12,302	3,943
116	20	21	-dw b. field	7,231	12,299	3,943
117	20		filler			
118	20	11	-up c. field	6,924	11,992	7,947
119	20	10	-up sense	10,978	16,046	7,947
120	20		filler			
121	20	21	-up b. field	6,617	11,685	4,004
122	21	21	-dw b. field	6,614	11,682	4,004

Tabella B.2: Coordinate degli spigoli delle PC-Board rispetto a un sistema di riferimento ortonormale, con origine coincidente all'asse camera e asse delle ordinate coincidente con l'asse di simmetria del prototipo.

Sublay	Layer	Y inner edge bord [mm]	X inner edge bord [mm]	Y outer edge bord [mm]	X outer edge bord [mm]
1	0	391,436	13,190	375,415	111,624
2	1	-391,476	-13,190	-375,456	-111,624
3	1				
4	1	-394,437	-13,173	-378,540	-111,631
5	1	-394,437	-13,173	-378,540	-111,631
6	1				
7	1	-397,399	-13,156	-381,623	-111,637
8	2	397,439	13,156	381,664	111,638
9	2				
10	2	400,447	13,140	384,794	111,644
11	2	400,447	13,140	384,794	111,644
12	2				
13	2	403,457	13,124	387,922	111,651
14	3	-403,496	-13,123	-387,963	-111,651
15	3				
16	3	-406,553	-13,107	-391,139	-111,658
17	3	-406,553	-13,107	-391,139	-111,658
18	3				
19	3	-409,610	-13,092	-394,313	-111,664
20	4	409,650	13,092	394,354	111,664
21	4				
22	4	412,755	13,076	397,577	111,671
23	4	412,755	13,076	397,577	111,671
24	4				
25	4	415,861	13,061	400,798	111,677
26	5	-415,900	-13,061	-400,839	-111,677

Sublay	Layer	Y inner edge bord [mm]	X inner edge bord [mm]	Y outer edge bord [mm]	X outer edge bord [mm]
27	5				
28	5	-419,055	-13,046	-404,109	-111,683
29	5	-419,055	-13,046	-404,109	-111,683
30	5				
31	5	-422,210	-13,031	-407,378	-111,689
32	6	422,250	13,031	407,419	111,689
33	6				
34	6	425,454	13,017	410,737	111,695
35	6	425,454	13,017	410,737	111,695
36	6				
37	6	428,660	13,002	414,054	111,701
38	7	-428,699	-13,002	-414,095	-111,701
39	7				
40	7	-431,955	-12,988	-417,463	-111,707
41	7	-431,955	-12,988	-417,463	-111,707
42	7				
43	7	-435,211	-12,974	-420,829	-111,713
44	8	435,250	12,974	420,870	111,713
45	8				
46	8	438,558	12,961	424,287	111,719
47	8	438,558	12,961	424,287	111,719
48	8				
49	8	441,865	12,947	427,704	111,724
50	9	-441,905	-12,947	-427,744	-111,724
51	9				
52	9	-445,264	-12,934	-431,212	-111,730
53	9	-445,264	-12,934	-431,212	-111,730
54	9				
55	9	-448,625	-12,921	-434,679	-111,735
56	10	448,664	12,921	434,720	111,735

Sublay	Layer	Y inner edge bord [mm]	X inner edge bord [mm]	Y outer edge bord [mm]	X outer edge bord [mm]
57	10				
58	10	452,077	12,908	438,240	111,741
59	10	452,077	12,908	438,240	111,741
60	10				
61	10	455,490	12,896	441,758	111,746
62	11	-455,530	-12,896	-441,799	-111,746
63	11				
64	11	-458,996	-12,883	-445,371	-111,751
65	11	-458,996	-12,883	-445,371	-111,751
66	11				
67	11	-462,464	-12,871	-448,942	-111,757
68	12	462,503	12,871	448,983	111,757
69	12				
70	12	466,025	12,859	452,608	111,762
71	12	466,025	12,859	452,608	111,762
72	12				
73	12	469,547	12,848	456,232	111,767
74	13	-469,586	-12,847	-456,272	-111,767
75	13				
76	13	-473,163	-12,836	-459,952	-111,772
77	13	-473,163	-12,836	-459,952	-111,772
78	13				
79	13	-476,741	-12,825	-463,630	-111,777
80	14	476,781	12,824	463,670	111,777
81	14				
82	14	480,414	12,813	467,404	111,781
83	14	480,414	12,813	467,404	111,781
84	14				
85	14	484,048	12,802	471,137	111,786
86	15	-484,088	-12,802	-471,178	-111,786

Sublay	Layer	Y inner edge bord [mm]	X inner edge bord [mm]	Y outer edge bord [mm]	X outer edge bord [mm]
87	15				
88	15	-487,779	-12,791	-474,968	-111,791
89	15	-487,779	-12,791	-474,968	-111,791
90	15				
91	15	-491,470	-12,781	-478,757	-111,795
92	16	491,510	12,781	478,797	111,796
93	16				
94	16	495,259	12,770	482,644	111,800
95	16	495,259	12,770	482,644	111,800
96	16				
97	16	499,008	12,760	486,489	111,805
98	17	-499,048	-12,760	-486,530	-111,805
99	17				
100	17	-502,856	-12,749	-490,434	-111,809
101	17	-502,856	-12,749	-490,434	-111,809
102	17				
103	17	-506,664	-12,739	-494,337	-111,813
104	18	506,704	12,739	494,378	111,813
105	18				
106	18	510,572	12,729	498,340	111,818
107	18	510,572	12,729	498,340	111,818
108	18				
109	18	514,441	12,720	502,302	111,822
110	19	-514,480	-12,720	-502,342	-111,822
111	19				
112	19	-518,409	-12,710	-506,364	-111,826
113	19	-518,409	-12,710	-506,364	-111,826
114	19				
115	19	-522,339	-12,701	-510,385	-111,830
116	20	522,378	12,701	510,426	111,830

Sublay	Layer	Y inner edge bord [mm]	X inner edge bord [mm]	Y outer edge bord [mm]	X outer edge bord [mm]
117	20				
118	20	526,369	12,691	514,508	111,834
119	20	526,369	12,691	514,508	111,834
120	20				
121	20	530,360	12,682	518,589	111,838
122	21	-530,400	-12,682	-518,630	-111,838

Bibliografia

- [1] Fermilab, editor. *Proposal to Search for $\mu^- N \rightarrow e^- N$ with a Single Event Sensitivity Below 10^{-16}* , October 2008.
- [2] Francesco Grancagnolo. The i-tracker. Technical report, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, sede di Lecce, Ottobre 2012.
- [3] Emilio Segrè. *Nuclei e particelle: introduzione alla fisica nucleare e subnucleare*. Zannichelli, 2nd edition, 1982.
- [4] Bogdan Povh. *Particles and Nuclei: An introduction to the Physical Concepts*. Springer, 6th edition, August 5, 2008.
- [5] W. Noel Cottingham e Derek A. Greenwood. *An Introduction to the Standard Model of Particle Physics*. Cambridge University Press, 1999.
- [6] the KLOE Collaboration. The kloe detector, technical proposal. Technical Report d002, LNF-93/002 (IR), 1993.
- [7] Ing. Simona Rella. *Studio e caratterizzazione della struttura meccanica del rivelatore tracciante di Mu2e*. PhD thesis, Università del Salento, Dipartimento di Ingegneria dell' Innovazione, 2013.
- [8] ASTM D 3379-75 “Standard Test Method for Tensile Strength and Young’s Modulus for High-Modulus Single-Filament Materials”, 1989.
- [9] L. Cappelli. Drift chambers readout electronics & cluster timing algorithm for mu2e experiment at fermilab. Master’s thesis, Università di Cassino, Facoltà di Ingegneria Elettrica, a.a. 2010/2011.
- [10] *Norme per il disegno tecnico*, volume 1. Ente nazionale italiano di unificazione, 5 edition, 1990.
- [11] *Norme per il disegno tecnico*, volume 2. Ente nazionale italiano di unificazione, 5 edition, 1990.