



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Procedimenti e progettazione di apparecchiature prototipali per la
produzione di precursori per schiume metalliche ed AFS

Giuseppe Barbieri, Francesco Cognini, Giuseppe De Santis

Report RdS/2012/099

PROCEDIMENTI E PROGETTAZIONE DI APPARECCHIATURE PROTOTIPALI PER LA PRODUZIONE DI
PRECURSORI PER SCHIUME METALLICHE ED AFS

Giuseppe Barbieri, Francesco Cognini, Giuseppe De Santis (ENEA)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

Responsabile del Progetto: Giuseppe Barbieri, ENEA

Indice

Sommario.....	4
Introduzione.....	5
CAPITOLO1	6
Possibili processi per compattazione di precursori per schiume di alluminio e per la realizzazione di precursori per Aluminium Foam Sandwich.....	6
<i>Processi di compattazione di precursori</i>	7
<i>Compattazione con pressa uni assiale per lo studio di miscele eutettiche AlSi12</i>	9
<i>Processi di compattazione di precursori per AFS (alluminio-precursore-alluminio)</i>	13
CAPITOLO2	15
Sistema di compattazione uni assiale	16
CAPITOLO 3	21
Modulo Camera Fredda (MCF)	21
Descrizione MCF	22
Conclusioni.....	24
Riferimenti bibliografici	25
Appendice	26
<i>Elenco disegni tecnici esecutivi</i>	26

Sommario

Questo report è suddiviso in tre capitoli.

Il primo capitolo riporta i procedimenti di metallurgia delle polveri utilizzati, da un lato, per la produzione di semplici precursori per l'ottenimento di schiume di alluminio, dall'altra i procedimenti per la realizzazione di compositi pelle-precursore-pelle che sono gli elementi alla base della realizzazione degli Aluminium Foam Sandwich (AFS). Segue un'introduzione allo scale-up delle prove di compattazione, che sono state effettuate su campioni di diametro 5 mm e spessore 1 mm e che hanno permesso di individuare, assieme a dati di letteratura, le prestazioni necessarie per un sistema di compattazione per campioni di diametro da 30 a 50 mm, da applicare sulla pressa da 100 ton acquisita nel corso del PaR 2008-2009. La progettazione del compattatore è descritta nel capitolo 2. Inoltre è riportato il processo individuato per lo studio e la realizzazione di compositi di alluminio pelle-precursore-pelle.

Nel secondo capitolo, come anticipato, è descritto il funzionamento del sistema di compattazione che, in un solo sistema, racchiude la possibilità di testare gli effetti di una compattazione uniassiale su due dimensioni differenti (30 mm e 50 mm) con pressioni fino a 500 MPa, a freddo, e che può essere trasformato semplicemente, per il compattato di maggiore dimensione, in un estrusore da 50 mm a 10 mm di diametro. In appendice sono riportati i disegni esecutivi del sistema.

Nel terzo capitolo è descritto il Modulo Camera Fredda (MCF) da installare in linea al forno VLT descritto nel report RDS/2012/098 che realizza il sistema di carico e scarico automatico del forno indispensabile per il trattamento di componenti di maggiore dimensione e per garantire le ripetibilità degli esperimenti in termini di tempi, modalità di raffreddamento. Tale modulo permetterà inoltre di poter gestire cicli termici più complessi sul forno atti a migliorare i risultati di schiumatura.

Introduzione

Il lavoro è inquadrato nell'ambito delle attività sul Progetto 3.5 "Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto" dell' AdP ENEA-MSE.

In particolare, l'impiego di schiume metalliche come rinforzo, e per lo smorzamento delle vibrazioni nel settore dei trasporti, è in fase di studio da qualche anno ed alcune soluzioni sono state realizzate dal gruppo Ecka Granulate, con la controllata Alulight[®] [1,2]: si possono citare ad esempio, un rinforzo per la Ferrari F430 Spider, o i supporti del copri bagagliaio nell'Audi Q7, che in caso di incidente assorbono energia, riducendo la forza di decelerazione che il copri bagagliaio potrebbe scaricare sugli occupanti del sedile posteriore. Allo stesso tempo, alcuni studi sono stati realizzati per l'impiego degli Aluminum Foam Sandwich (AFS) per la realizzazione di componenti di maggiore dimensione per mezzi di trasporto collettivi e per mezzi operatori, come il veicolo sollevatore leggero della Teupen modello EURO B25T e il frontale del treno ITINO della Bombardier.

I procedimenti per la realizzazione dei precursori per il rinforzo di estrusi o scatolati, e quelli inerenti la produzione di AFS, per quanto abbiano in comune il processo di metallurgia delle polveri (MP), si distinguono nelle fasi. Infatti, nel primo caso il precursore è spesso utilizzato come semplice riempimento di estrusi o scatolati aventi, come funzione principale, l'assorbimento di energia ed in cui non è necessaria la formazione di un intimo legame metallurgico pelle core per funzionare allo scopo. La realizzazione di un intimo legame metallurgico, per migliorare le caratteristiche è invece indispensabile per elementi strutturali, ed è oggetto di studio dei report RdS/2012/097 e RdS/2012/098, in cui è analizzato l'accoppiamento con materiali differenti (rame, acciaio) e con estrusi commerciali (AA6060).

In questo caso infatti l'espansione del precursore e l'accoppiamento con l'involucro, avvengono nella successiva fase di schiumatura in forno in cui è richiesto il controllo adeguato dei parametri e l'impiego di eventuali procedure per la promozione del legame metallurgico.

Nel caso della produzione di AFS di grandi dimensioni, il processo prevede una fase di compattazione mediante laminazione [1]. Attualmente le specifiche di tale processo sono gelosamente custodite dalla Alulight[®].

Possiamo tuttavia supporre due differenti procedimenti:

- da un lato la colaminazione di due pelli, assieme a precursori già formati, che tuttavia potrebbe non garantire la formazione di un adeguato legame metallurgico fra precursore (ad alta densità ma anche fragile) e pelli;
- dall'altra, l'ipotesi da noi formulata, è che in funzione degli spessori finali delle pelli e del core, sia necessario riempire degli estrusi di adeguate dimensioni, ottenendo la compattazione e la riduzione di spessore desiderata e la promozione del legame metallurgico, già a freddo, realizzando un composito pelle-precursore-verde da sottoporre successivamente a schiumatura.

Quindi, da un lato, si stanno sviluppando le attrezzature per la produzione dei soli precursori, dall'altro sono state individuate le attrezzature e uno schema di processo per la realizzazione dei compositi pelle-precursore-pelle, in un'unica soluzione.

In tutti i casi, la fase finale di realizzazione del prodotto finito passa attraverso la schiumatura in forno. Il carico e lo scarico dei campioni nel corso di questa annualità è stato effettuato manualmente. Come riportato nel rapporto RdS/2012/098, il tempo complessivo fra apertura e chiusura è di circa 30 secondi e considerato il tempo medio di schiumatura fra i 15 ed i 20 minuti dopo la chiusura della porta, le possibili piccole variazioni nel tempo di carico e scarico sono del tutto ininfluenti. Tuttavia, il carico manuale è possibile con opportuni indumenti Dpl e rende possibile l'introduzione dei campioni solo mediante crogiuoli freddi e con cicli termici standard elementari.

E' stata per questo acquistata il sistema di carico e scarico sul forno VLT che permette di programmare cicli termici più complessi e manipolare campioni fino a 400 x 200 x 50 mm.

CAPITOLO1

Possibili processi per compattazione di precursori per schiume di alluminio e per la realizzazione di precursori per Aluminium Foam Sandwich

Processi di compattazione di precursori

Come descritto nel report Rds/2011/201 la realizzazione dei precursori di schiume di alluminio avviene per compattazione mediante pressatura di un'appropriata miscela di polveri, costituita da lega di alluminio, idruro di titanio (o altro agente schiumante) e carburo di silicio (o altro modificatore delle viscosità del fuso), ovviamente tutto sotto forma di polveri di adeguata granulometria ed omogeneamente disperse. Esistono in letterature differenti metodi di compattazione:

- Pressatura uni assiale;
- Pressatura uni assiale + estrusione a caldo;
- CIP (Cold Isostatic Pressing)
- HIP (Hot Isostatic Pressing)
- Impatto

Le pressatura isostatica, sia essa a caldo o a freddo, permette di raggiungere certamente il miglior grado di compattazione e la maggiore densità. Con la CIP si utilizzano pressioni nell'ordine di 2000-3000 bar [2] ed è il metodo di compattazione usualmente utilizzato prima dell'estrusione a caldo per i prodotti commerciali [3,4].

Tuttavia, la riduzione dei costi per lo sviluppo di questi materiali va indirizzata all'impiego di tecnologie ed apparecchiature più economiche. In particolare, oltre alla pressatura uni assiale si stanno proponendo tecniche di compattazione che riducono ancora le forze in gioco rispetto all'estrusione come la Equal Channel Angular Pressing – ECAP che sfrutta le forze di taglio per ottenere la compattazione senza passare tramite una riduzione di sezione [2].

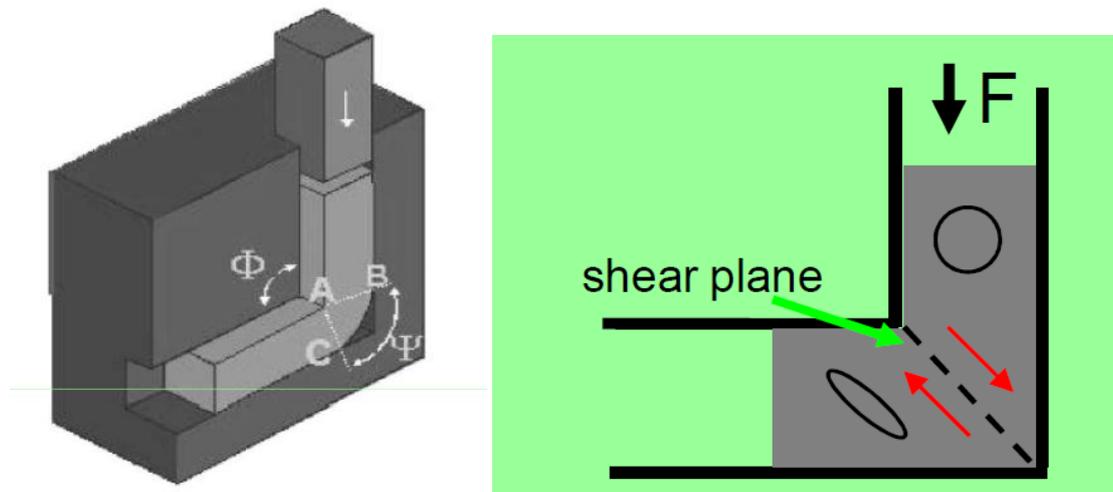


Figura 1: schema di funzionamento della compattazione ECAP [3]

Altra tecnica relativamente nuova è la compattazione ad impatto [5]: in questo caso, utilizzando una macchina per la compattazione High Velocity - Densification (HVC), una pre compattazione ottenuta per pressatura di pochi secondi della miscela di polveri, viene seguita da una compattazione ad impatto mediante impulsi intensivi successivi, creati da un martello a comando idraulico, che trasferisce l'energia attraverso lo strumento di compattazione della polvere. La massa del martello e la sua velocità al momento dell'impatto determinano l'energia di compattazione e di conseguenza il grado di densificazione. La Figura 2 mostra uno schema della compattazione ad impatto ad elevata densità che in generale, con impulsi successivi, riesce a garantire densità estremamente elevate del precursore.

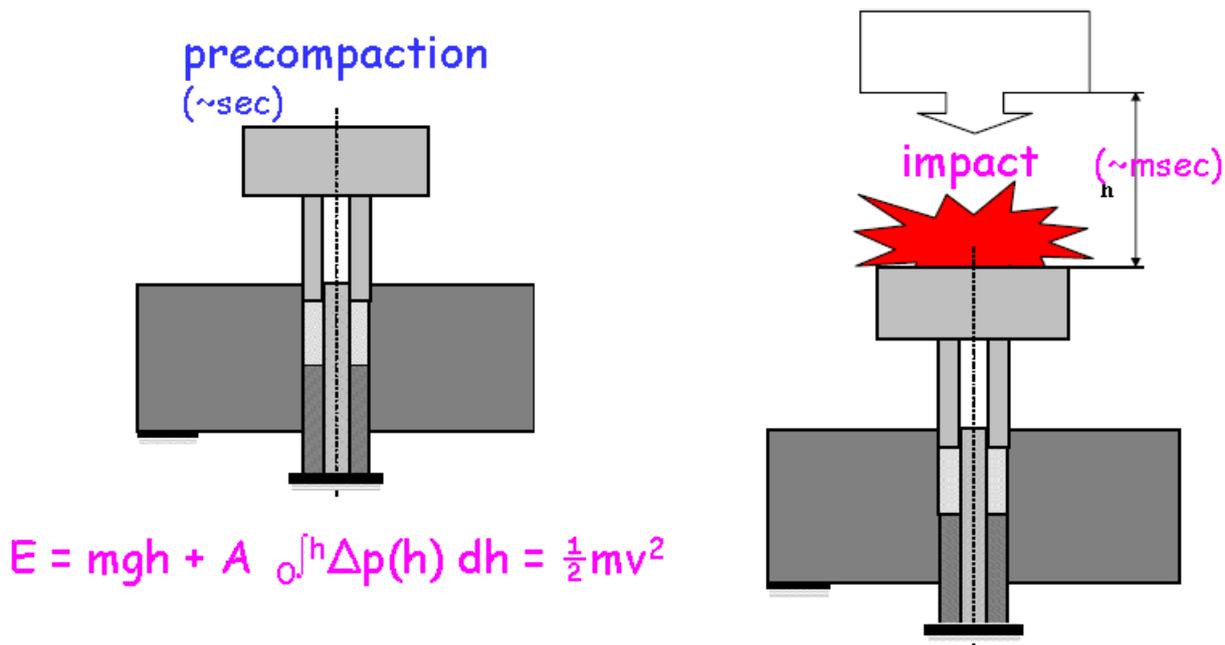


Figura 2: schema di funzionamento della compattazione HVC [5]

Un ulteriore metodo di compattazione che promette un risparmio nella realizzazione del prodotto finito, evitando la fase di pre compattazione, è il sistema ad estrusione diretta Conform™ che è eseguito direttamente sulle polveri. Uno schema delle differenti fasi di compattazione con estrusione tradizionale e con questo nuovo metodo è mostrato in Figura 3.

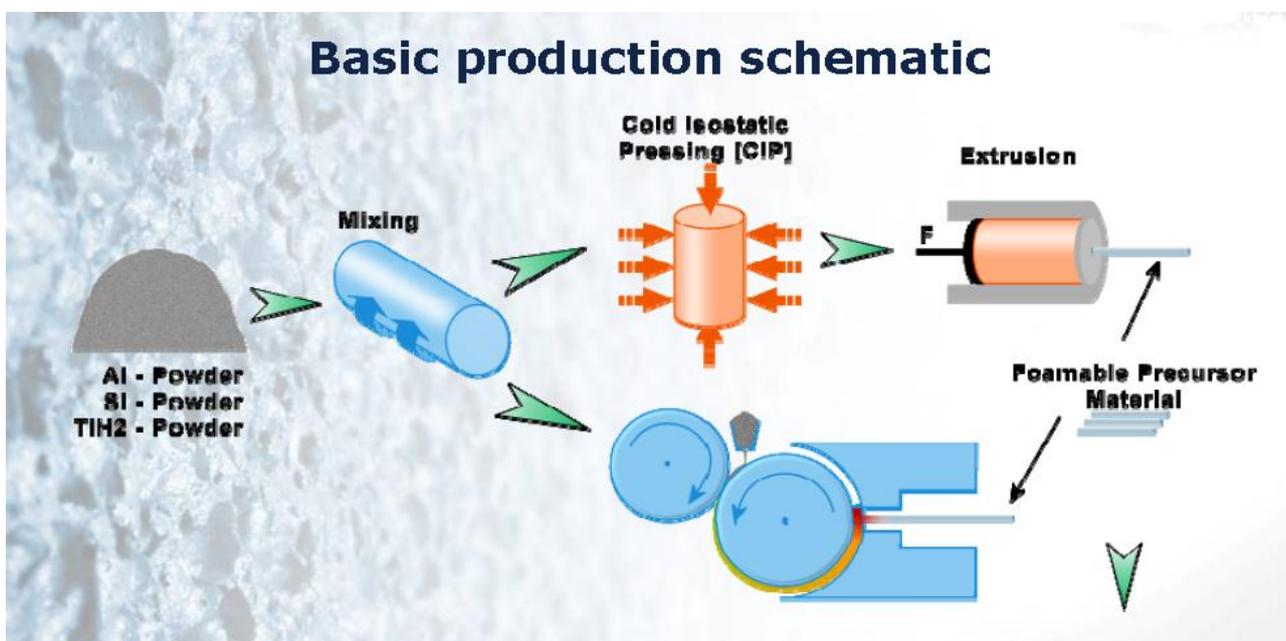


Figura 3: Differenza fra metodo industriale di compattazione tradizionale e metodo di produzione per compattazione diretta delle polveri Conform™ [4]

La figura successiva mostra la foto dell’impianto di produzione del leader del mercato di precursori di schiume metalliche di alluminio che è MEPURA.

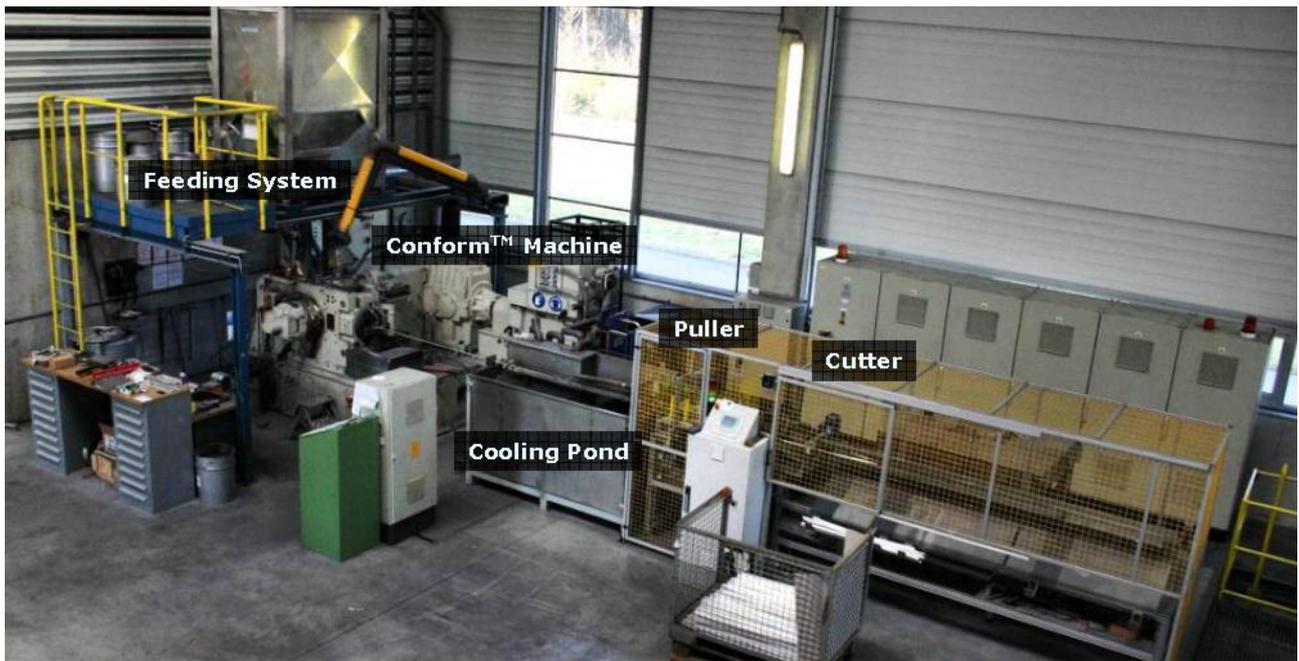


Figura 4: Impianto di produzione di Precursori presso MEPURA gruppo ECKA gralules che detiene il marchio ALulight™ [4]

Compattazione con pressa uni assiale per lo studio di miscele eutettiche AlSi12

Per lo studio in laboratorio del processo di compattazione la strada seguita ha riguardato la compattazione monoassiale che, pur essendo lontana dalla configurazioni di produzione industriale, permette lo studio dei principali parametri che influenzano l'omogeneità del prodotto finale; granulometria, modalità e tempi di miscelazione, agente schiumante etc.

Lo studio sulla compattazione con pressatura monoassiale è stato effettuato sia con polveri di alluminio che polveri di lega AlSi12 con una pressa da laboratorio con portata fino a 20 ton e con matrice di pressatura di diametro 5 mm. La dimensione della matrice è stata scelta per poter effettuare i successivi test di schiumatura in calorimetro differenziale a scansione (DSC).



Figura 5: Pressa da laboratorio da 20 ton utilizzata per la realizzazione delle pasticche con relativa matrice epunzione con "incudini" di 5 mm di diametro

Le prove di compattazione sono state effettuate sia con polveri di alluminio, in analogia con quanto fatto presso l'Università di Roma Tor Vergata, sia su una miscela di polveri eutettica, che è di maggiore interesse per lo sviluppo di un precursore applicabile alla realizzazione di estrusi di alluminio rinforzati con schiuma. I campioni sono stati preparati utilizzando polveri di AlSi12 con diametro medio di 44 µm, SiC con dimensione media di 31 µm, TiH₂ con dimensione media di 44 µm. La miscela di polveri per i campioni prevede una composizione fissa contenente il 2.8 (wt.%) di SiC e lo 0.4 (wt.%) di TiH₂ questo valore è la metà di quanto utilizzato nei precursori commerciali ed è stato scelto in relazione ai risultati del report RdS/2011/201 con l'intento di ridurre i costi di produzione di questi materiali in cui il TiH₂ incide maggiormente.

Le immagini SEM delle polveri utilizzate per la miscela eutettica in fase di sviluppo sono mostrate in Figura 6.

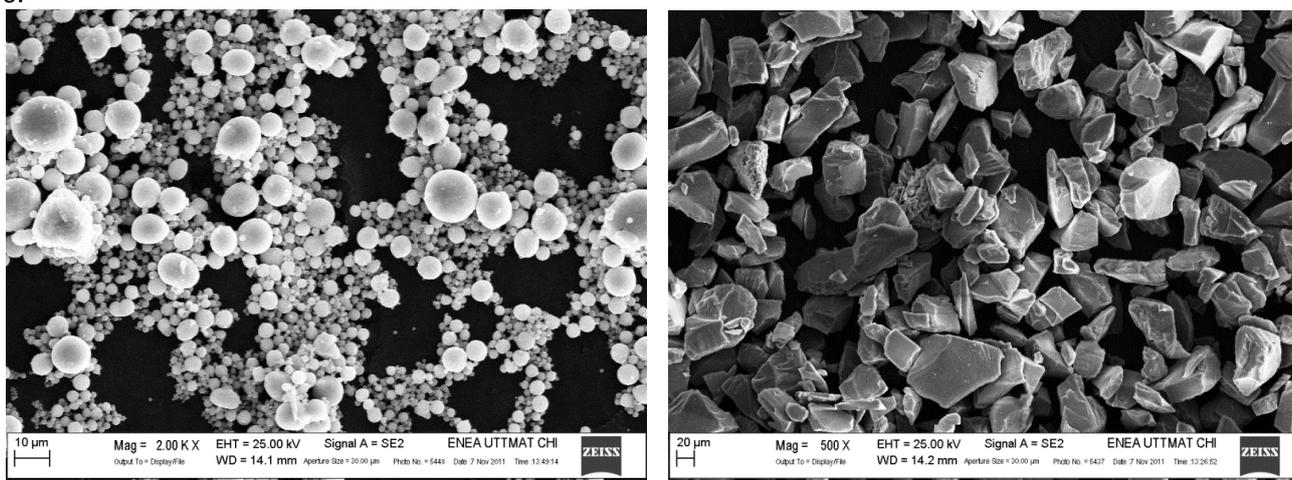


Figura 6: Immagine SEM della polvere di AlSi12 (SX) e della polvere di SiC (DX) utilizzata per la realizzazione dei campioni

Per valutare il comportamento nella decomposizione delle polveri di TiH₂ acquistate, sono state effettuate delle prove di termogravimetria. La Figura 7 mostra come la decomposizione delle polveri di TiH₂ sia funzione della temperatura. In questo caso è stata applicata una velocità di riscaldamento di 10°C/min. In accordo con quanto mostrato da Matijasevic *et al.* [6] dalla curva termogravimetrica ottenuta mediante TGA e dall'analisi della derivata si nota come il rilascio di idrogeno avviene a circa 440°C.

La compattazione delle polveri è avvenuta a temperatura ambiente, con pressioni crescenti fino a 450 MPa. Il grafico di Figura 8 mostra come, per le polveri di alluminio, il raggiungimento di una densità relativa superiore al 95% avviene già a 350 MPa, mentre per le polveri Al Si12, più dure e meno duttili pur portando la pressione a 450 MPa, la densità relativa è solo di poco superiore all'87%.

E' stata effettuata una prova in DSC alla temperatura di 700° per 90 secondi, ed è stata osservata una schiumatura estremamente ridotta, se comparata con i precursori commerciali, ad indicare che è necessaria una maggiore compattazione, circostanza che, per questo tipo di leghe, impone l'impiego di una estrusione post compattazione (Figura 9).

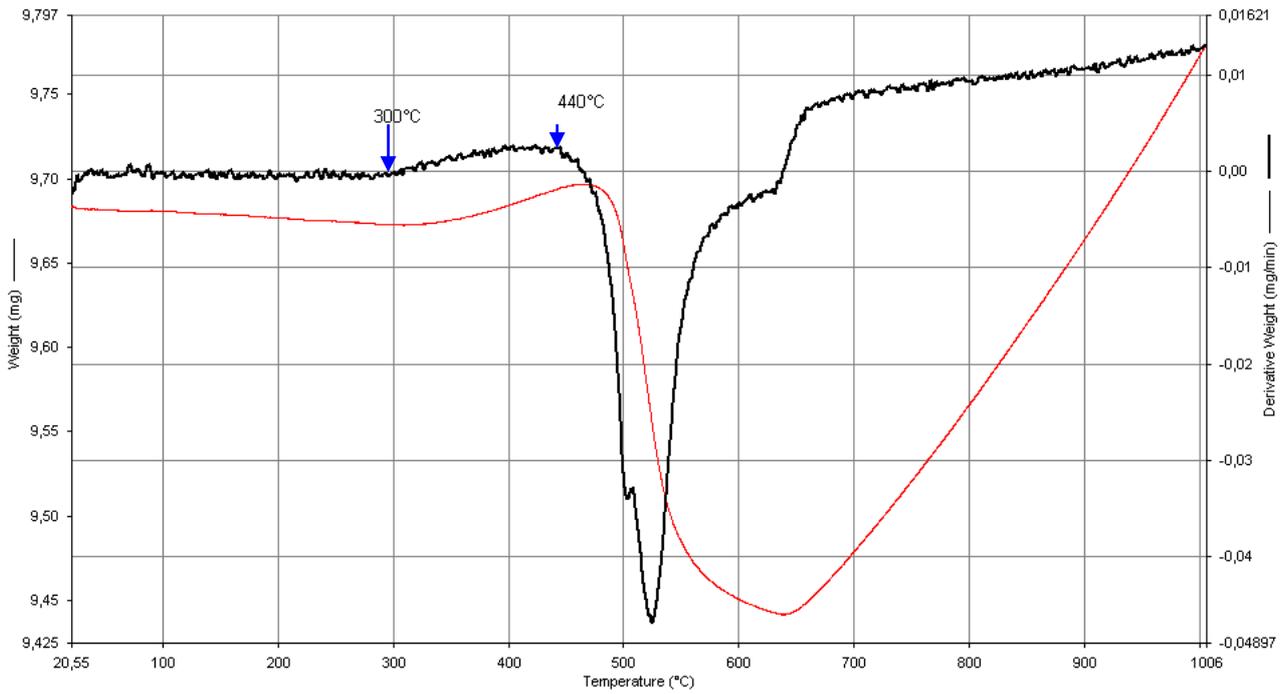


Figura 7: Analisi TGA per polveri di TiH₂ scaldate da 25°C a 1000°C a 10°C al minuto

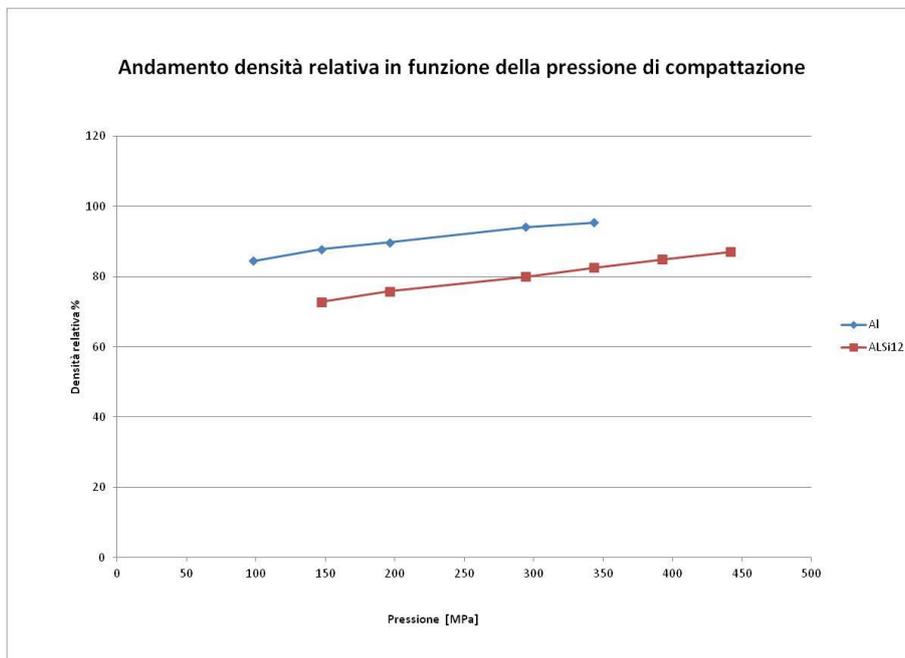


Figura 8: Andamento della densità con compressione monoassiale con due differenti tipi di polveri

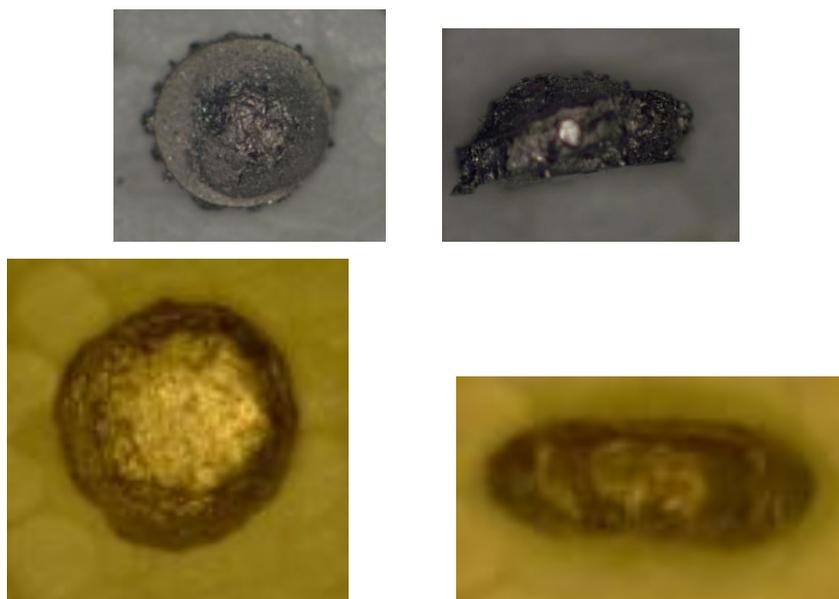


Figura 9: Il alto il precursore realizzato in ENEA con densità relativa 87%in basso un precursore commerciale similare con densità relativa > 95%

Processi di compattazione di precursori per AFS (alluminio-precursore-alluminio)

Come anticipato nell'introduzione, per quanto riguarda la realizzazione dei precursori per AFS con legame metallurgico pelle-core, se è vero essi che sono realizzati sempre tramite metallurgia delle polveri, cambia la modalità di compattazione. La Figura 10 mostra lo schema industriale di Alulight®

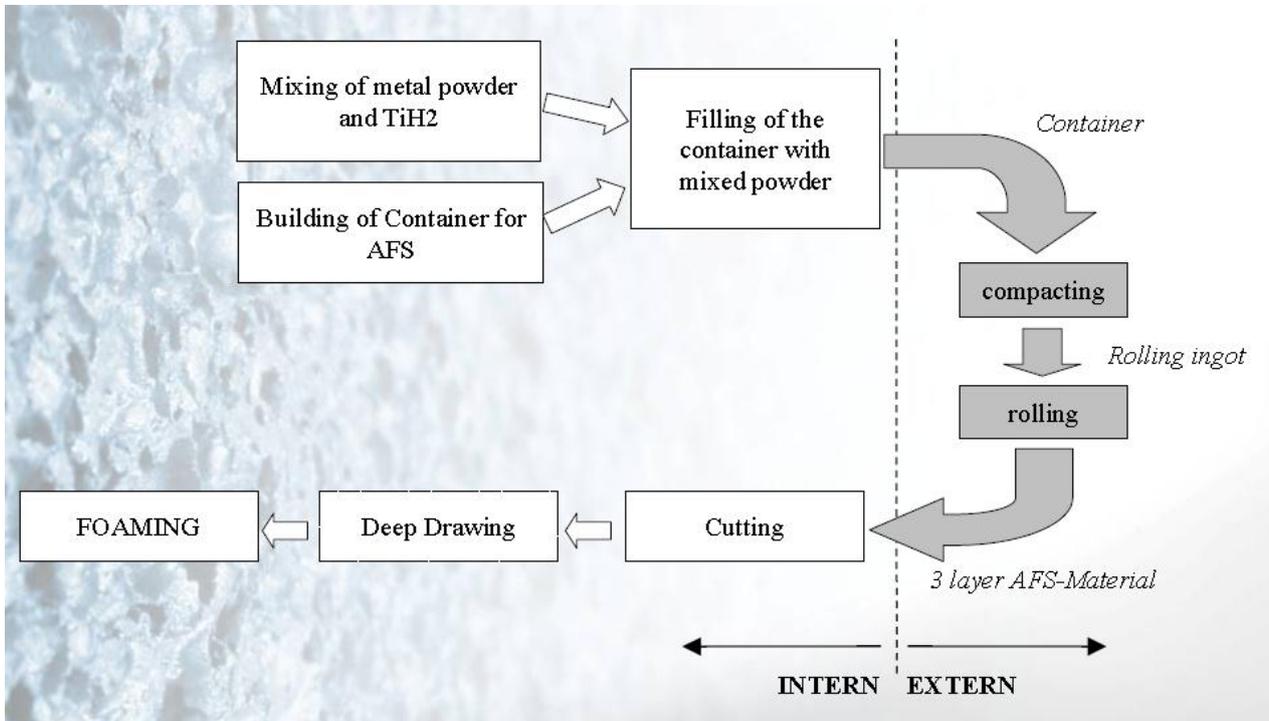


Figura 10: Schema di produzione industriale Alulight® [4]

Com'è evidente la compattazione del composito alluminio-polveri-alluminio viene esternalizzata in impianti di laminazione industriale (Figura 11) per la produzione dei prodotti la cui dimensione massima in larghezza rimane di 1100 mm (Figura 12).



Figura 11: Laminazione in impianti industriali del contenitore per AFS [4]

Il core della ricerca per la produzione degli AFS risiede quindi nell'ottimizzazione di due fasi successive.

La prima fase riguarda la compattazione ed è influenzata dai seguenti fattori:

- Miscela di polveri ed agente schiumante;
- Geometria del container delle polveri, metodi di sigillature;
- Parametri di laminazione per promuovere la compattazione e la giunzione metallurgica.

La seconda fase che riguarda la formatura e la schiumatura influenzata da:

- Formatura con stampi di forma a geometria complessa;
- Temperatura e tempo di schiumatura;
- Raffreddamento e controllo della geometria.

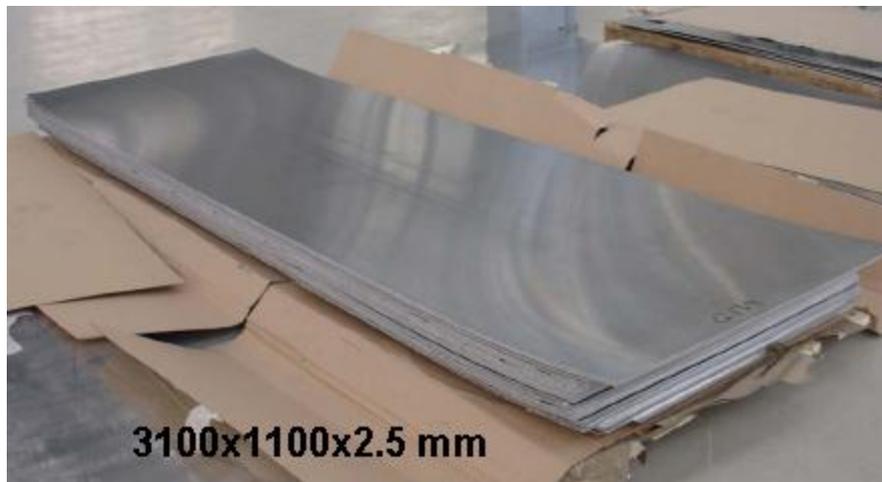


Figura 12: Dimensione standard dei precursori per AFS [4]

La produzione dei precursori di AFS porta a notevoli costi sia per le fasi di lavorazione sia per gli sfridi. Da un lato è necessario, in base alle esigenze, realizzare un apposito container chiuso per trattenere la miscela di polveri. Dall'altra il laminato così prodotto avrebbe le estremità di alluminio Bulk che devono essere rimosse per lasciare libero il precursore di espandersi e formare l'AFS.

Se da un lato, per realizzare estrusi rinforzati con schiuma metallica, possiamo usare precursori formati separatamente, ottenendo già in questo modo un buon legame pelle-core (vedi report RdS/2012/98), dall'altra parte la realizzazione di AFS deve forzatamente passare dalla colaminazione.

Nelle attività ipotizzate nella prosecuzione del lavoro si possono fare due ipotesi da confrontare:

1. riempimento di estrusi di AA 6060 o AA6082, che hanno la temperatura di fusione maggiore, con una miscela eutettica (che in prima ipotesi può essere la classica AlSi12) e successiva laminazione;
2. co laminazione di precursori già compattati con semplici pelli di alluminio, eventualmente con l'impiego di promotori di aderenza.

E' necessario tuttavia l'acquisizione di un laminatoio da laboratorio specifico per effettuare lo studio e l'ottimizzazione dei parametri.

CAPITOLO2

Progettazione di apparecchiature per la compattazione uni assiale e
l'estrusione di precursori

Sistema di compattazione uni assiale

La compattazione uniassiale è certamente il metodo più semplice da implementare per la realizzazione della compattazione della miscela di polveri. Come evidenziato nel capitolo 1 le pressioni in gioco dipendono dal tipo di polveri utilizzate e dalla temperatura considerata. Il progetto dell'attrezzatura ha preso in considerazione da un lato la pressione massima utilizzata a freddo per la compattazione dei precursori per DSC di miscela AlSi12, dall'altra la possibilità di ridurre queste pressioni lavorando a caldo. L'apparecchiatura è stata sviluppata per essere applicata alla pressa OMCN da 100 ton di portata. Per il controllo della pressione è stata acquisita una cella di carico della GEFRAN di tipo torico con fondo scala 100 ton.



Figura 13: Cella di carico GEFRAN CT-C-KN1M con portata nominale 1000 kN

La configurazione toroidale della cella di carico ha permesso di sviluppare l'attrezzatura con il doppio funzionamento:

- Pressatura mono assiale;
- Estrusore.

La possibile applicazione di un riscaldatore MST, esterno al mantello del cilindro di pressione, ha reso necessario prevedere un sistema di raffreddamento, per evitare il danneggiamento della cella di carico o una sua deriva nella misurazione del carico.

L'attrezzatura si presta ad Up scaling applicando sulla stessa base due differenti mantelli e cilindri di pressatura: ciò permette di studiare come la dimensione (diametro ed altezza) del cilindro di compattazione influenzi il grado di compattazione del precursore cioè la sua densità relativa e omogeneità. In particolare, sono stati definiti mantelli con cilindro di pressatura in acciaio da utensili da 30 mm e 50 mm di diametro. La compattazione della miscela di polveri a freddo, considerata una pressione di 500 MPa, nel caso del cilindro da 30 mm comporta un carico di 353,5 kN contro i 981 kN di portata della pressa, mentre si raggiunge la saturazione della portata della pressa nel caso si vogliono raggiungere i 500 MPa di pressione per campioni di diametro di 50 mm.

La Figura 14 mostra la sezione del sistema di pressione con mantello e cilindro di pressatura di diametro interno 30 mm.

Sia il cilindro di pressatura che le “incudini” di altezza 50 mm sono in acciaio da utensili e rettificate. Questo consente l’impiego sia a freddo, con pressioni molto elevate, sia a caldo (fino a 300 °C) senza avere deformazioni apprezzabili. Il cilindro di pressatura è inserito con una leggera interferenza nel mantello esterno, sia per permettere una elevata resistenza a spanciamento laterale, tipica della configurazione delle condotte forzate, sia per una buona trasmissione di calore dal mantello al cilindro di pressatura.

Il blocco inferiore costituito da:

- piastra di supporto con alloggiamento cella di carico;
- gruppo di refrigerazione interno;
- porta slitta che associa il cilindro esterno del gruppo di refrigerazione;
- slitta;
- “pressore”;
- anello di trasmissione del carico.

È in comune sia nella configurazione per precursori da 30 mm sia per i precursori da 50 mm di diametro.

Il pressore e l’anello di trasmissione del carico sono liberi di muoversi verticalmente con il movimento del punzone e quindi la pressione delle incudini viene trasmessa direttamente alla cella di carico.

Per l’estrazione del precursore dopo compattazione, si solleva il punzone e si sposta la slitta da sinistra a destra. Il materiale del pressore estraibile è un AISI 410 bonificato ad elevata resistenza che quindi ha una resistenza allo snervamento superiore a 800 MPa, di conseguenza una volta eliminato il carico resta indeformato. Inoltre, la catena di tolleranze fra la slitta e l’anello di trasmissione del carico e la configurazione geometrica fa sì che venga trascinato assieme alla slitta.

In tal modo la slitta si posiziona con il foro concentrico alla linea di pressatura. L’applicazione nuovamente di forza sul pistone permette l’estrazione delle incudini assieme al precursore senza bisogno di smontare l’attrezzatura.

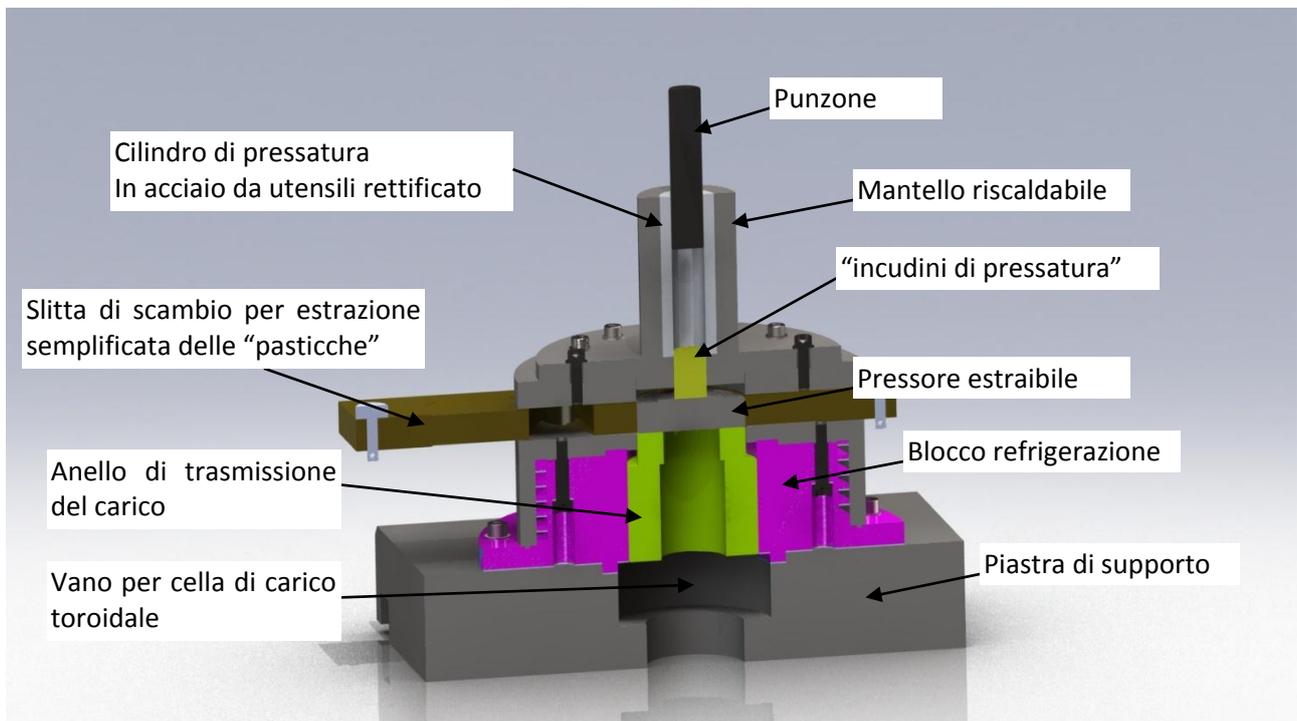


Figura 14: rendering della sezione del sistema di compattazione per precursori di diametro 30 mm

In Figura 15 è mostrato il rendering dell'intera attrezzatura nella configurazione di compattazione per precursori di diametro 50 mm con specifico punzone auto allineante, sempre in acciaio bonificato e con un diametro di 49 mm in modo da permettere la pressione sulle incudini da 50 mm liberamente e senza attriti o problemi di grippaggio. Anche in questo caso il cilindro di pressatura è realizzato in acciaio da utensili.

La Figura 16 mostra la sezione del sistema, ad eccezione del punzone. Il sistema è del tutto analogo al sistema di compattazione per i precursori di diametro 30 mm ma si differenzia per il fatto che sono utilizzati lo stesso mantello e cilindro di pressione, sostituendo solo due componenti, ovvero il "pressore", con un pressore forato, ed una incudine con la matrice di estrusione. Il tutto realizza un piccolo estrusore in grado di portare il diametro dei precursori da 50 mm a 20 mm di diametro (Figura 18).

Con lo stesso sistema utilizzato nella configurazione di compattazione, una volta terminata la lavorazione di estrusione, applicando una forza maggiore alla slitta (sempre da sinistra a destra), il pressore forato è in grado di tagliare il precursore (di 10 mm di diametro) portando il sistema nella configurazione di estrazione della matrice di estrusione e del residuo non estruso.

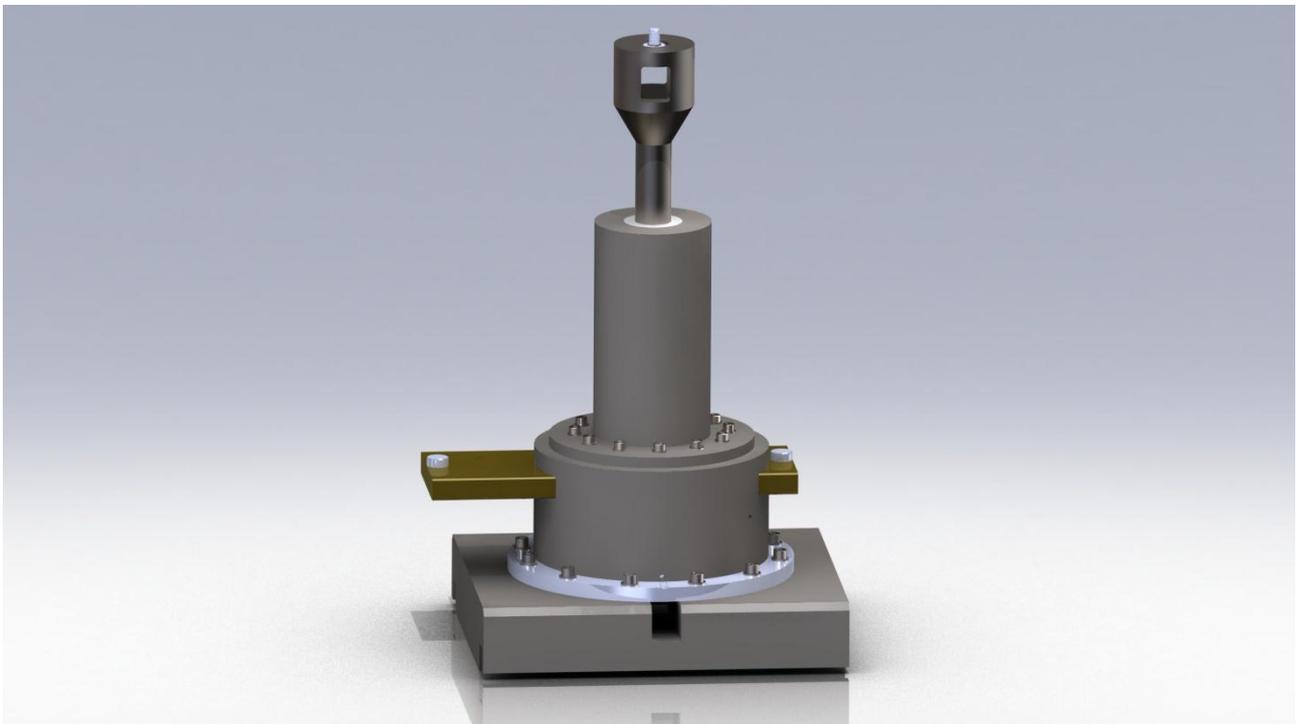


Figura 15: rendering del sistema di compattazione/estrusione per precursori di diametro 50 mm

La Figura 17 mostra l'apparecchiatura in fase di collaudo presso il fornitore (CECOM). Tutti i componenti ad eccezione della slitta sono in acciaio da bonifica martensitico AISI 410 che garantisce la resistenza meccanica mentre i componenti di compattazione sono in acciaio 88Mn V8 UNI 4957 che garantisce una durezza estremamente elevata per la lavorazione sia a caldo sia a freddo.

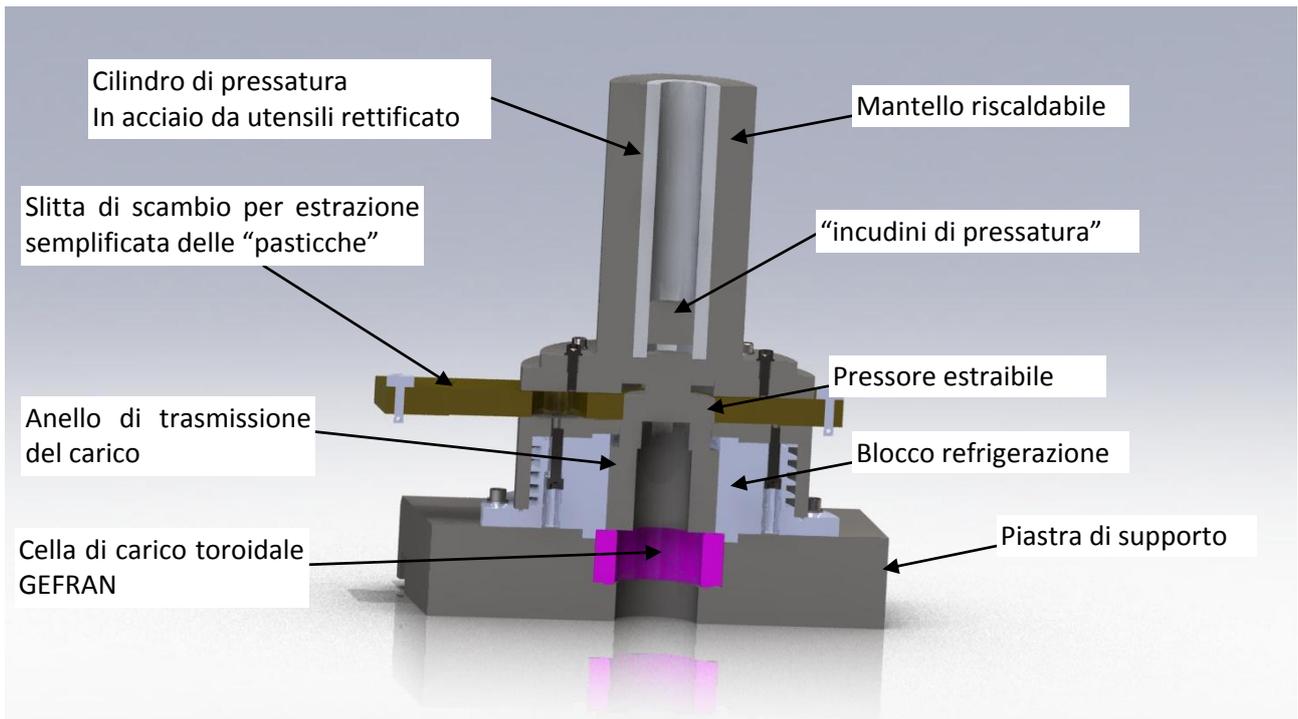


Figura 16: rendereng della sezione del sistema di compattazione per precursori di diametro 50 mm



Figura 17: Attrezzature completa nella configurazione di compattazione 50 mm con tutte l parti per adattarsi a compattazione a caldo da 30 mm e d estrusione 10 mm

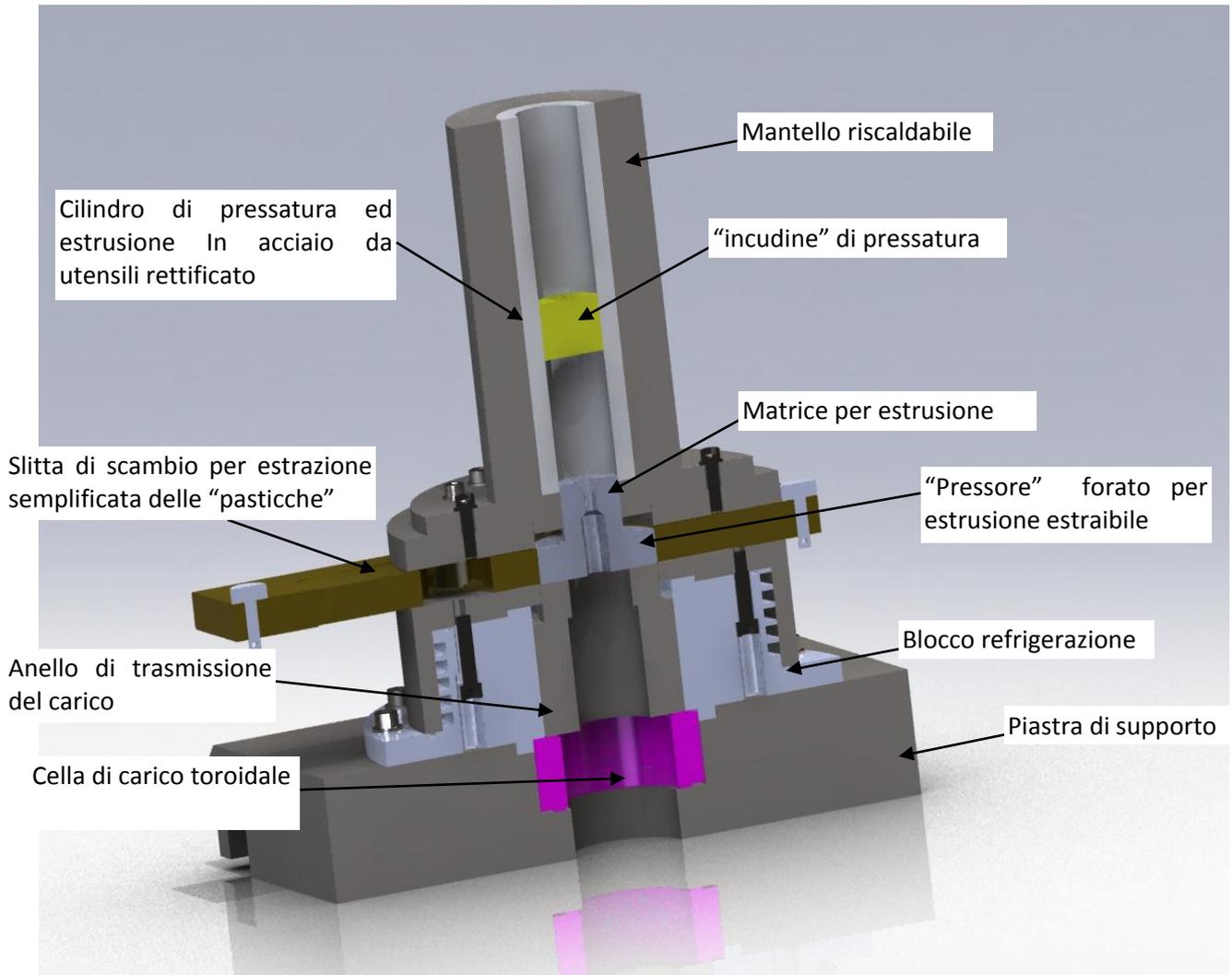


Figura 18: rendereng della sezione del sistema di compattazione in configurazione estrusione per precursori di diametro 50 mm

CAPITOLO 3

Modulo Camera Fredda (MCF)

Descrizione MCF

La realizzazione di componenti in schiuma di dimensioni superiori ai campioni di ricerca ha imposto l'acquisto del Modulo Camera Fredda del forno di schiumatura. La manipolazione di crogioli o componenti di dimensione maggiori ai campioni standard di ricerca (diametro 30 mm, altezza 30mm e peso max 200g) non è infatti possibile effettuarla con sistemi manuali.

Il sistema oltre ad effettuare il carico e lo scarico automatico permette di scegliere il tipo di raffreddamento in tutta sicurezza per gli operatori in quanto sia che si scelga il raffreddamento in aria sia ad acqua il campione resta chiuso in un apposito box.

Il Modulo automatico Camera Fredda (MCF) del forno ha le seguenti caratteristiche:

- zona fredda completamente chiusa, dotata di:
 - o sportello per caricamento campione con adeguata finestra trasparente per osservazione e/o ripresa video e sistema interlock di sicurezza;
 - o raffreddamento campione costituito da 2 o più collettori e relativi tubazioni e ugelli per aria e acqua/azoto;
 - o punto di drenaggio;
- predisposizione di tutti gli attacchi per flussaggio gas, aria e acqua (e del relativo scarico)
- Avvio ciclo, mediante comando manuale o automatico (generato dal controllore Nanodac),
- realizzare il carico e lo scarico del campione, sia esso sotto forma di una o più pasticche di precursore oppure di pannello (dimensione massima 400×200 mm).

Di seguito lo schema e la logica di funzionamento del modulo di carico scarico e raffreddamento automatico del forno:

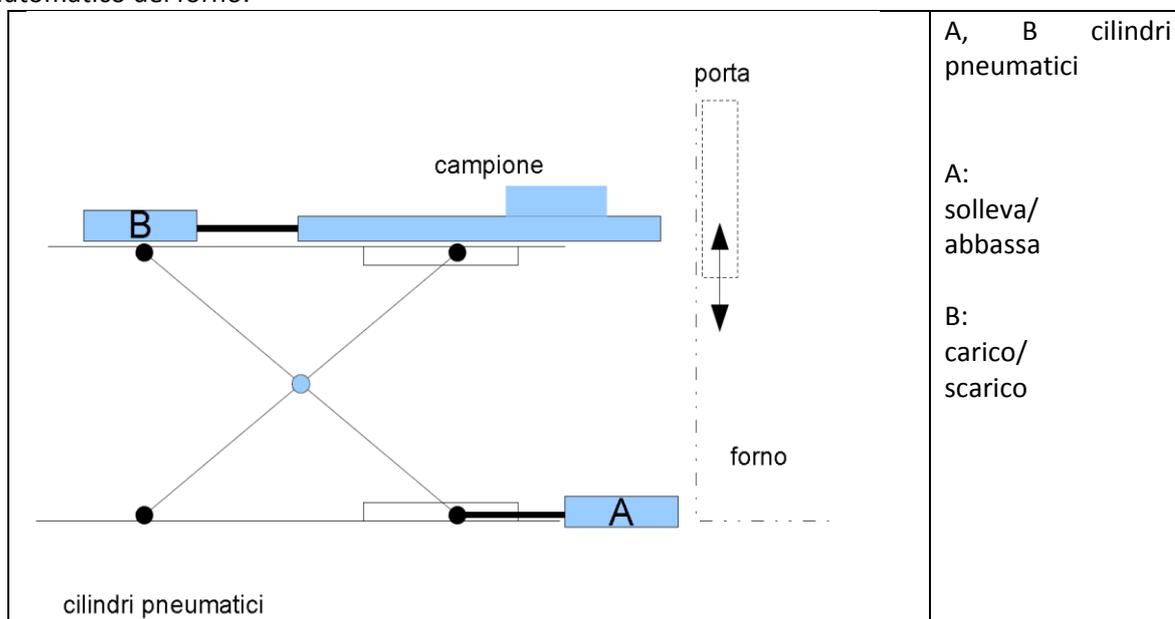


Figura 19: Schema di massima del funzionamento del MCF

- Il campione è posizionato su di un piano metallico che viene introdotto nel forno mediante forche mobili e depositato sulla struttura di appoggio fissa del forno.
- I due attuatori A e B sono cilindri pneumatici a doppio effetto alimentati da valvole distributrici bistabili a comando elettrico.
- Il terzo attuttore è il motore di apertura della porta (già presente sul forno)

Il ciclo di carico è il seguente

P+/A+/B+/A-/B-/P-

Le lettere e i segni indicano le fasi successive che sono realizzate dal movimento degli attuatori:

P+: apertura porta forno;
A+: sollevamento forche (e campione);
B+: ingresso nel forno;
A-: abbassamento (con deposito campione)
B-: uscita;
P-: chiusura porta.

Il ciclo di scarico e raffreddamento è il seguente:

P+/A-/B+/A+/B-/P-/F

Le fasi sono:

P+: apertura porta forno;
A-: abbassamento forche;
B+: ingresso nel forno;
A-: sollevamento (con prelievo campione)
B-: uscita;
P-: chiusura porta;

F: Partenza fluido (acqua/aria/azoto) di raffreddamento temporizzato.

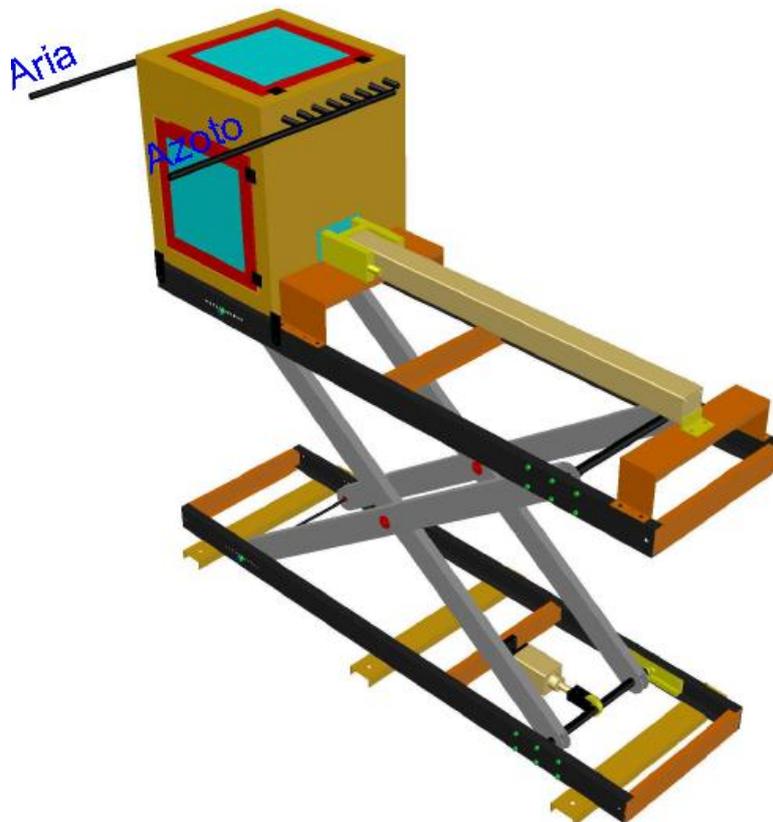


Figura 20: Il sistema munito di tre finestre trasparenti e sistema di raffreddamento aria/acqua/azoto



Figura 21: Fasi di collaudo dei movimenti di carico e scarico

Conclusioni

Lo studio ha permesso di identificare le principali tecnologie di compattazione che vengono utilizzate industrialmente per la produzione di precursori. Tali informazioni sono di difficile reperimento, per ovvie ragioni di riservatezza, tuttavia, grazie al contatto diretto con le aziende produttrici e ad alcune indicazioni ricavate dalle ultime pubblicazioni appare ormai chiaro che, per la produzione di precursori, la metodologia consolidata è l'impiego della Cold Isostatic Pressing per la prima compattazione che realizza dei lingotti da sottoporre a successiva estrusione a caldo. L'estrusione aumenta ulteriormente la compattazione, realizza la frantumazione dell'allumina intorno ai grani di polvere e omogeneizza la distribuzione degli agenti schiumanti e nucleanti.

Questo processo può essere semplificato utilizzando un sistema di estrusione Conform™ adattato direttamente all'impiego delle polveri evitando la fase di pressatura isostatica.

Nuovi approcci alternativi riguardano la realizzazione della compattazione con lo sfruttamento principalmente di forze di taglio, con il processo Equal Channel Angular Pressing method – ECAP o la compattazione ad impatto HVC.

D'altro lato per la compattazione dei precursori pelle-precursore-pelle per pannelli AFS è necessario effettuare una laminazione di un involucro sigillato con la miscela di polveri all'interno. La compattazione avviene per step successivi di laminazione, che introducono stress di taglio in grado di frantumare le particelle garantendo l'ottenimento di un precursore interno ben compattato ed omogeneo.

I test di compattazione con apparecchiature di laboratorio hanno mostrato i limiti di applicabilità anche su pastiglie di piccola dimensione, della sola compattazione uni assiale. E' stata quindi sviluppata un'apposita apparecchiatura da applicare alla pressa OMCN da 100 ton, acquisita nel corso del PaR 2008-2009 in grado di performare sia la compattazione monoassiale sia l'estrusione successiva.

Anche in questo caso l'apparecchiatura sviluppata in fase di collaudo ha portato ad un Upscaling a partire da pastiglie di 5 mm di diametro e 1 mm di altezza a compattati fino a 50 mm di diametro e 50 mm di altezza.

Il completamento del sistema del forno di schiumatura con il Modulo Camera Fredda, adattato alle esigenze di progetto permetterà di testare campioni di dimensione maggiore permettendo una maggiore ripetibilità, l'impiego di crogioli caldi e cicli termici complessi e controllati che permetteranno il miglioramento ulteriore in termini di qualità anche su campioni di dimensione maggiore ai 30-40 mm trattati nel corso di questo anno.

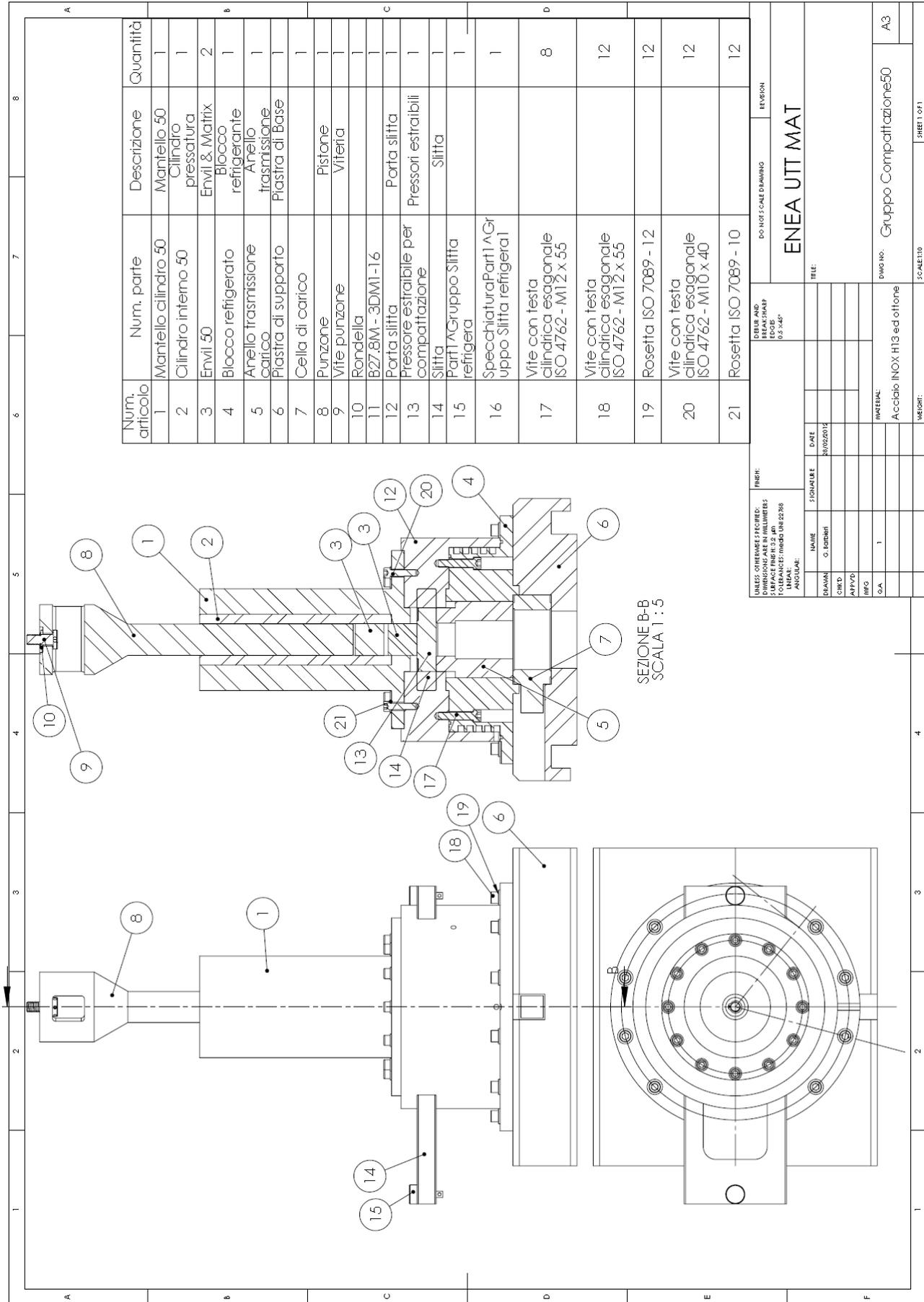
Riferimenti bibliografici

1. J. Vogel et al., "Characterisation of strength behaviour of aluminium foam sandwiches under static load," *Strain* vol. 47, June 2011
2. C. Umashankar, Kaushal Jha and K.N. Mahule, " Aluminium Foam Fabrication by Powder Metallurgy Route", *Barc Newsletter*, ottobre 2011, pp 39-43.
3. E. Wolfsguber, A . Gandin "Schiume di alluminio prodotte con al metallurgia delle polveri: produzione, proprietà, applicazioni" Giornata di Studio Schiume metalliche: Produzione ed applicazioni Associazione Italiana Metallurgia , Milano 24 maggio 2012
4. Fero Simančik & all, " NEW TRENDS IN MANUFACTURING OF NEW PM ALUMINIUM FOAMS", *Materials and Technologies for Lightweight Design, WORKSHOP ON RECENT DEVELOPMENTS IN THE WORLD OF ENGINEERING MATERIALS*, Smolenice, 13–14.12. 2011
5. S. Vezzu, "Un nuovo approccio per la sintesi di materiali cellulari a base alluminio" Giornata di Studio Schiume metalliche: Produzione ed applicazioni Associazione Italiana Metallurgia , Milano 24 maggio 2012
6. Matijasevic, Biljana "Characterisation and Optimisation of Blowing Agent for Making Improved Metal Foams" , *Institut für Werkstoffwissenschaften und –technologien*, Dissertation 08.03.(2006)

Appendice

Elenco disegni tecnici esecutivi

Descrizione		Materiale Note
Complessivo gruppo compattatore 50	DIS UTTMAT(2012)01	
Mantello cilindrico 50 Mantello cilindrico 30	DIS UTTMAT(2012)01_(1_21) DIS UTTMAT(2012)01_(1b_21)	AISI 410 bonificato, componenti intercambiabili
Cilindro interno 50 Cilindro interno 30	DIS UTTMAT(2012)01_(2_21) DIS UTTMAT(2012)01_(2b_21)	Acciaio 88MnV8 UNI 4957 o acciaio ad elevate resistenza all'usura con temperature di esercizio fino a 500°
Envil 50 & Matrix 50 Envil 30	DIS UTTMAT(2012)01_(3& 3b_21)	
Blocco refrigerato	DIS UTTMAT(2012)01_(4_21)	AISI 410 in alternativa Inox austenitico
Anello trasmissione del carico	DIS UTTMAT(2012)01_(5_21)	AISI 410 bonificato
Piastra di supporto	DIS UTTMAT(2012)01_(6_21)	AISI 410 in alternativa Inox austenitico
Cella di Carico	GEFRAN Toroidale 1000kN	CT-C-KN1M con elemento sensibile in INOX
Punzone	DIS UTTMAT(2012)01_(8_21)	AISI 410 bonificato
Viteria	DIS UTTMAT(2012)01_(9_10_15_21)	Acciaio INOX
O-ring	S= 3.53 Designazione inglese 41200	
O-ring	S= 3.53 Designazione inglese 41050	
Viteria	Viti con testa a brugola M12 e rondelle	INOX



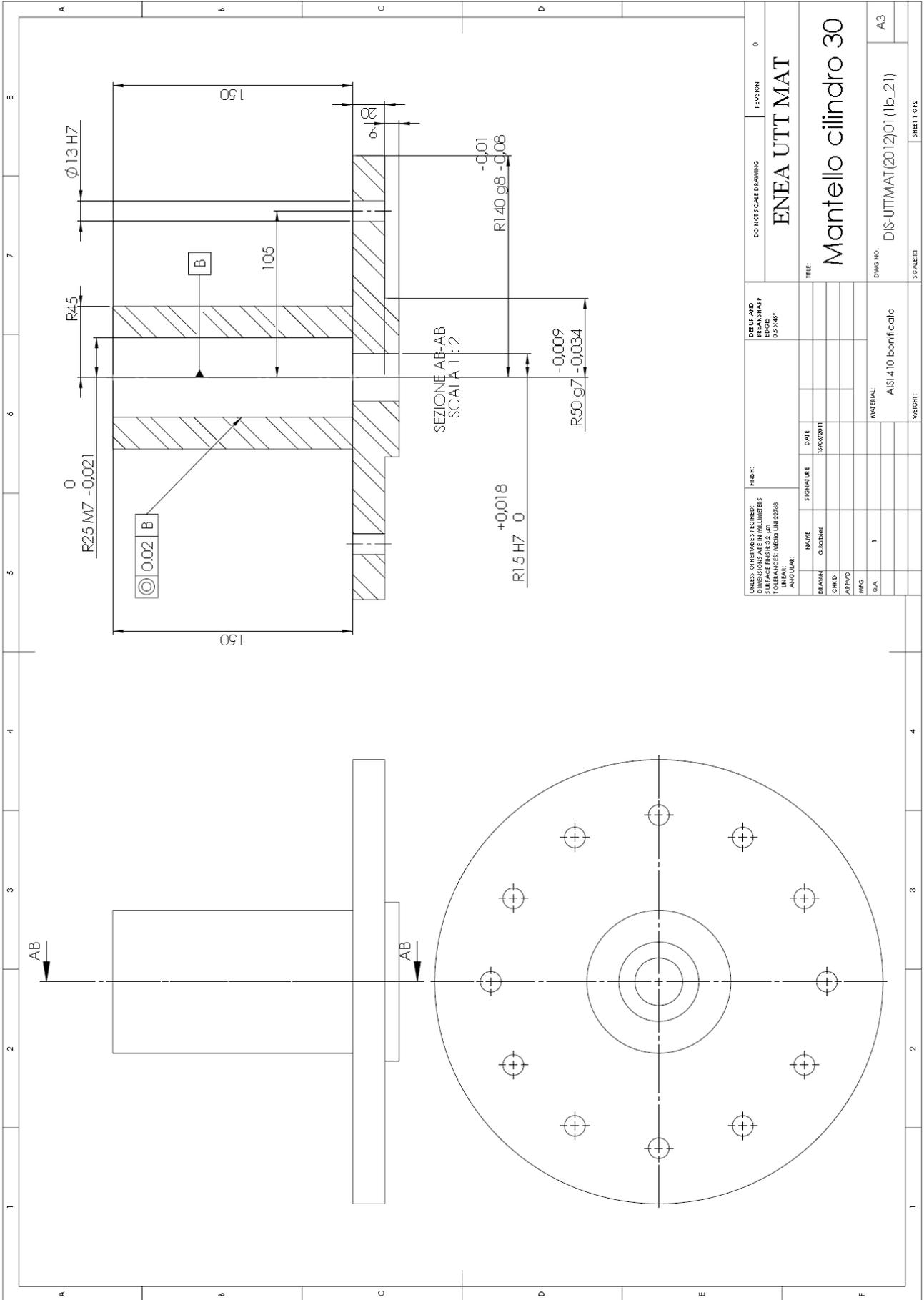
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH IS 3.2 μm
TOLERANCES: FRACTIONS UNITS
ANGLES:

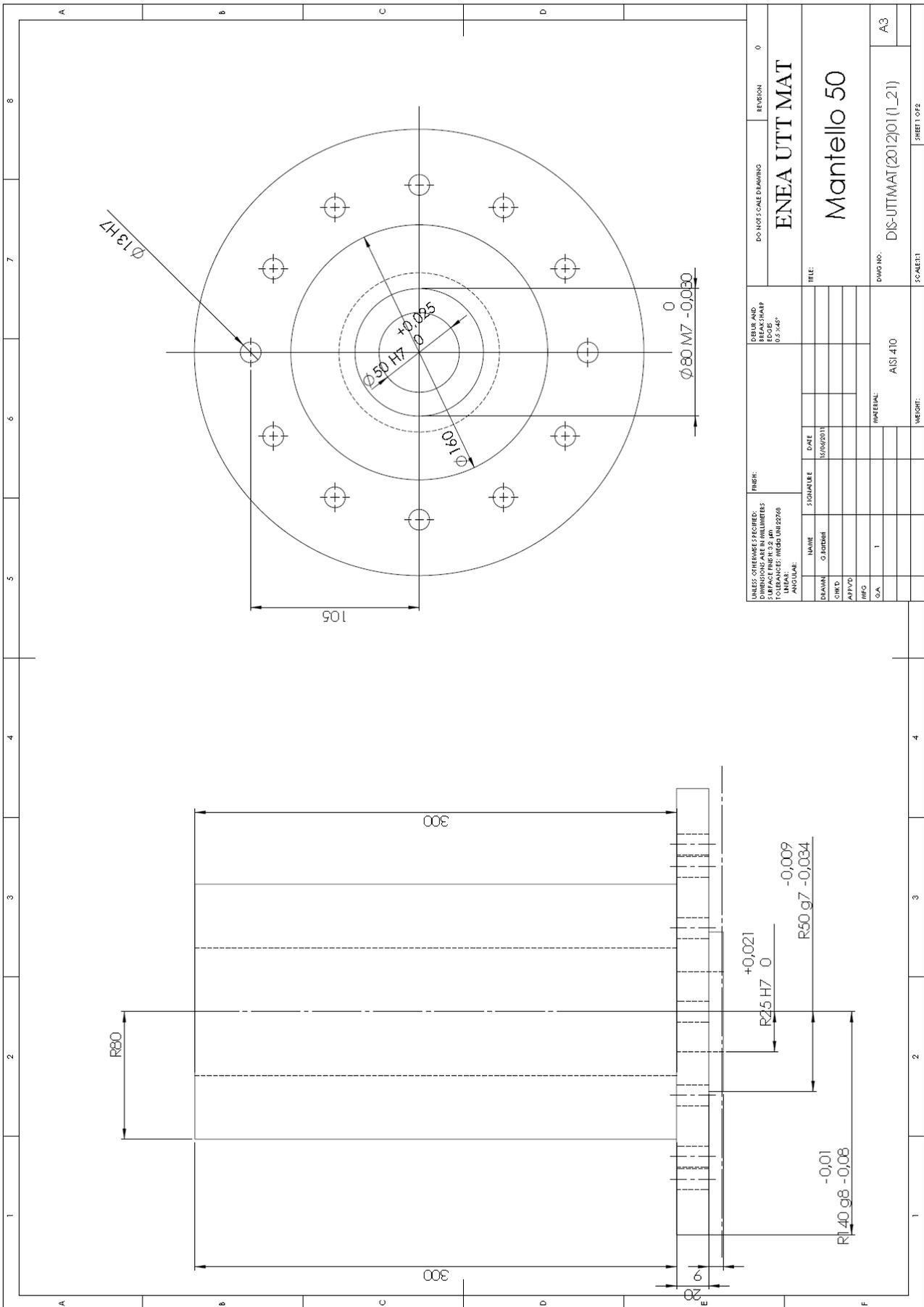
DESIGN AND DRAWING	REVISION
ENEA UTT MAT	

DATE	BY	DATE	BY

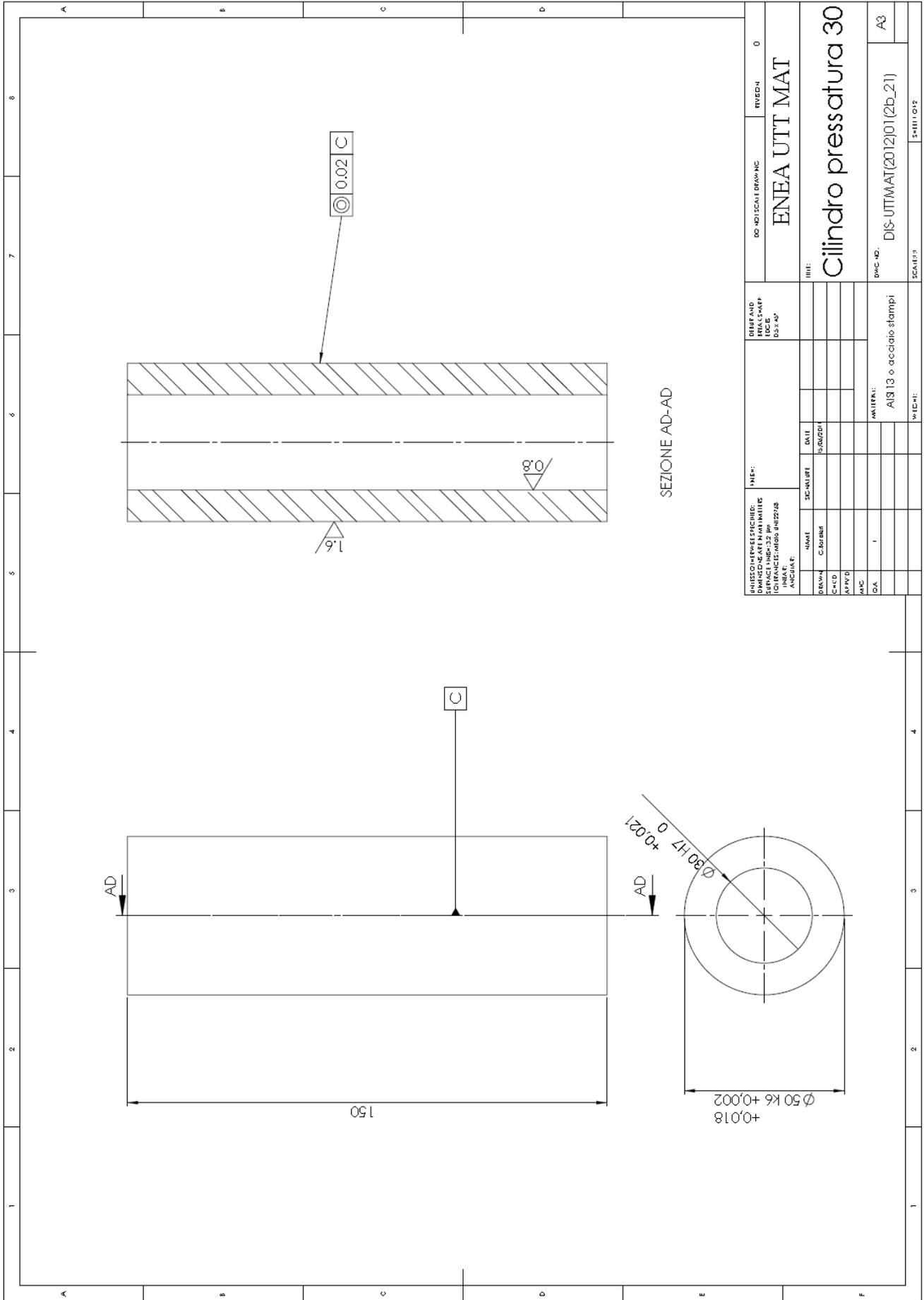
MATERIAL:
A acciaio INOX H13 ed ottone

DWG NO: Gruppo Compattazione50
SCALE:1:5
SHEET 1 OF 1

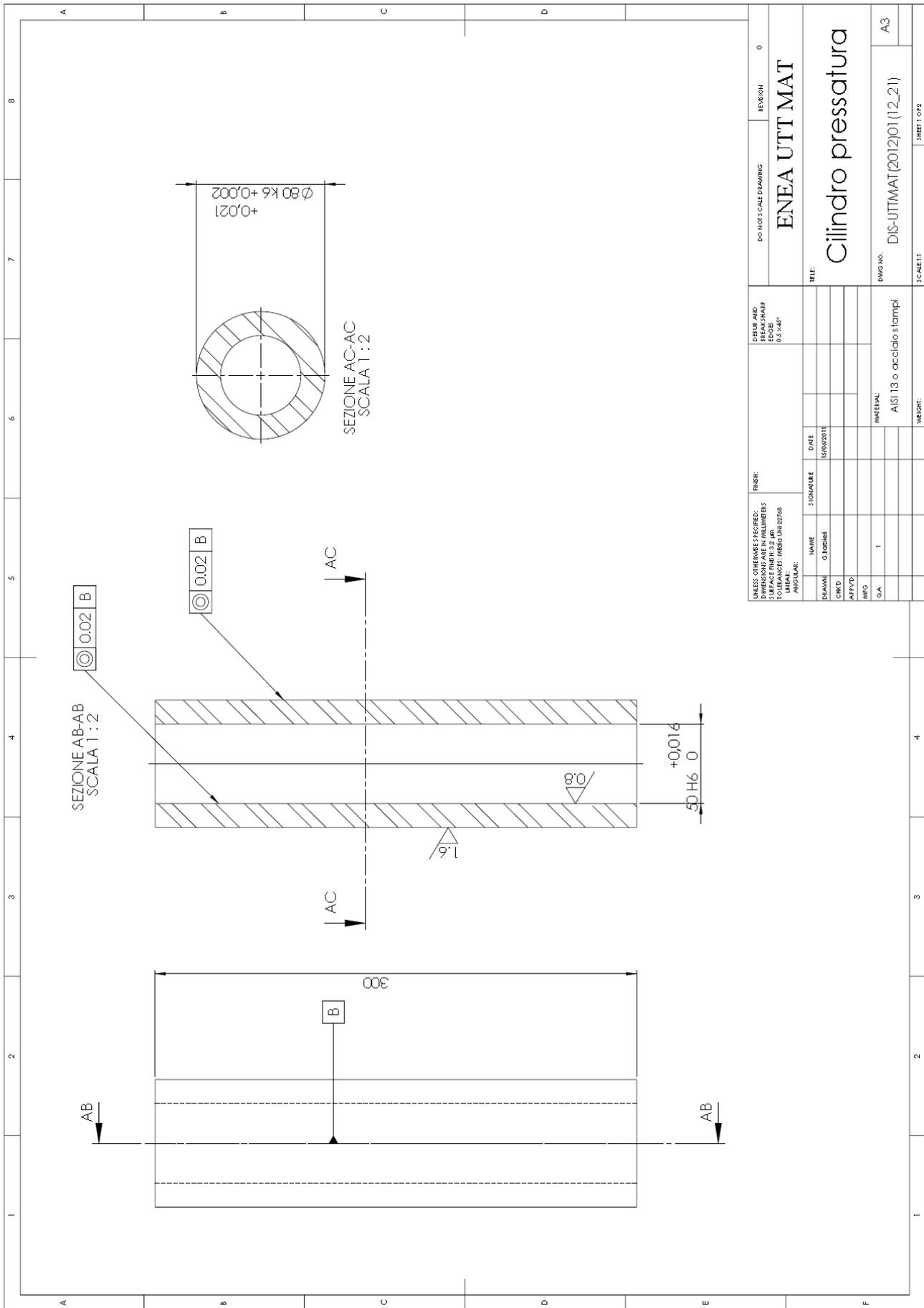




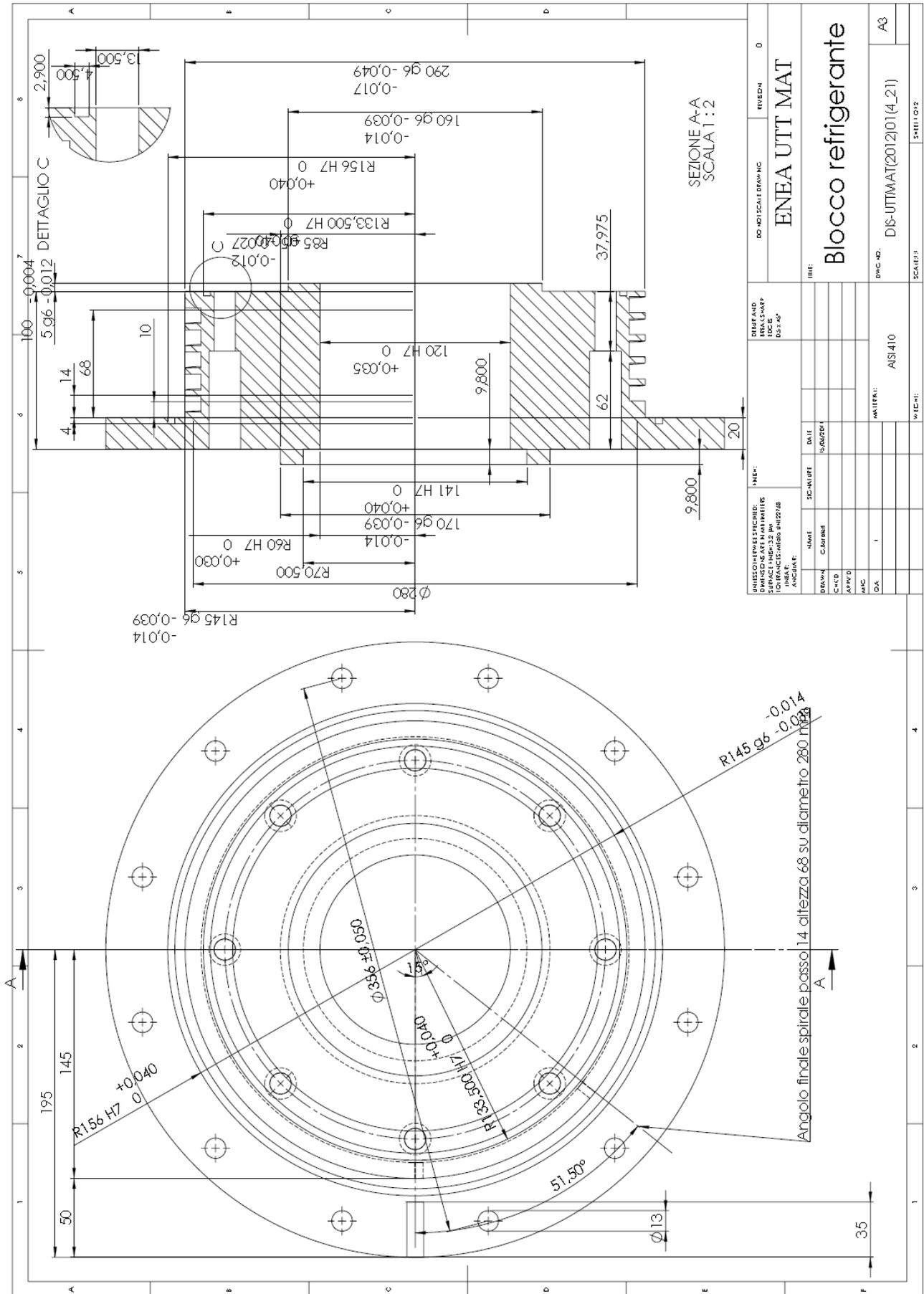
FRIBR:		FRIBR: 0	
DESIGN NAME:		DESIGN NAME: ENEA UT'T MAT	
DRAWING NO.:		DRAWING NO.:	
DATE:		DATE:	
SIGNATURE:		SIGNATURE:	
NAME:		NAME:	
ID:		ID:	
AN/PD:		AN/PD:	
MFG:		MFG:	
Q.A.:		Q.A.:	
MATERIAL:		MATERIAL: AISI 410	
DWG NO.:		DWG NO. DIS-UTTMAT(2012)01(1_21)	
SHEET:		SHEET 012	
REV.:		REV.:	
TITLE:		TITLE: Mantello 50	
SCALE:		SCALE:	
SHEET NO.:		SHEET NO.:	
TOTAL SHEETS:		TOTAL SHEETS:	

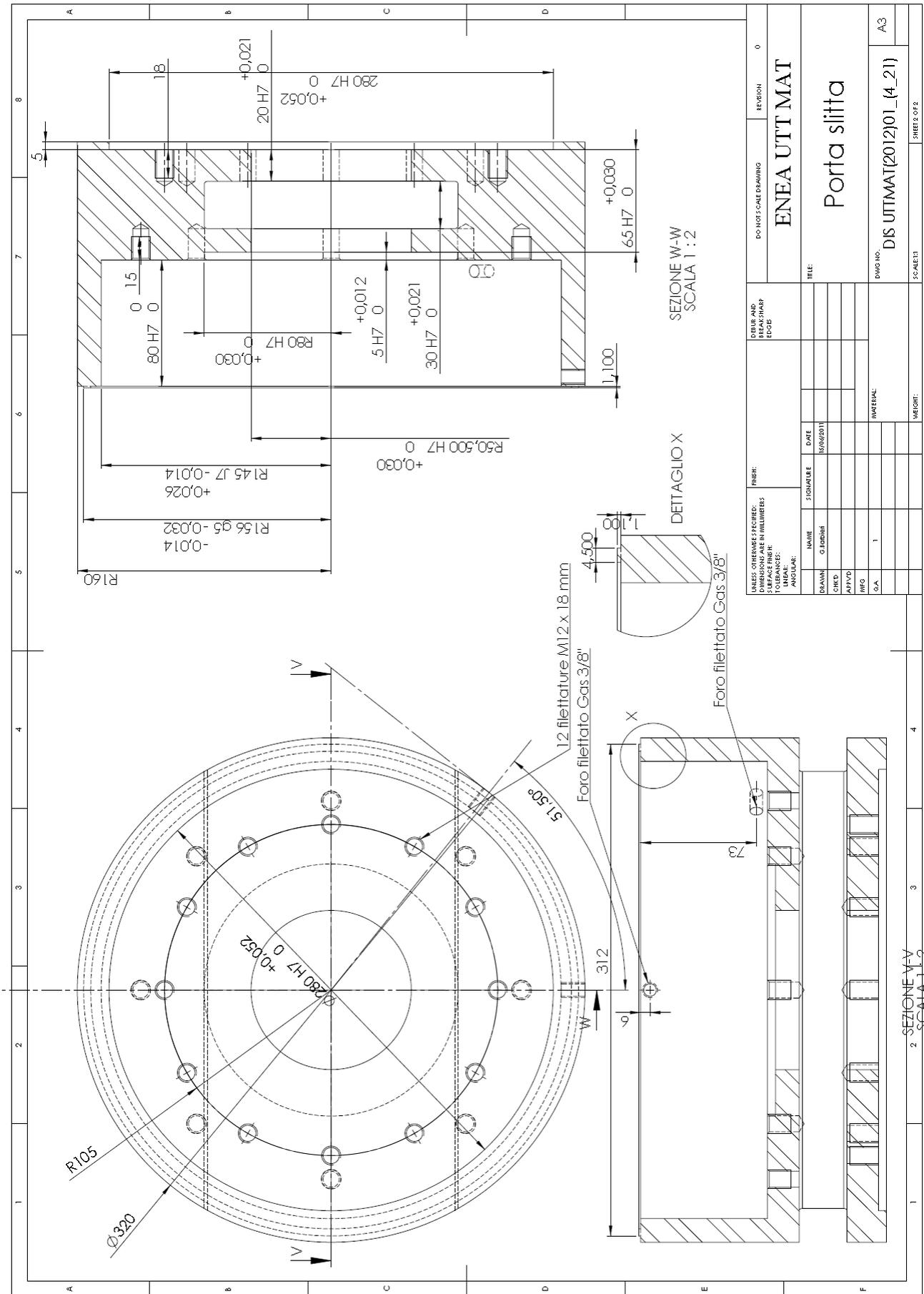


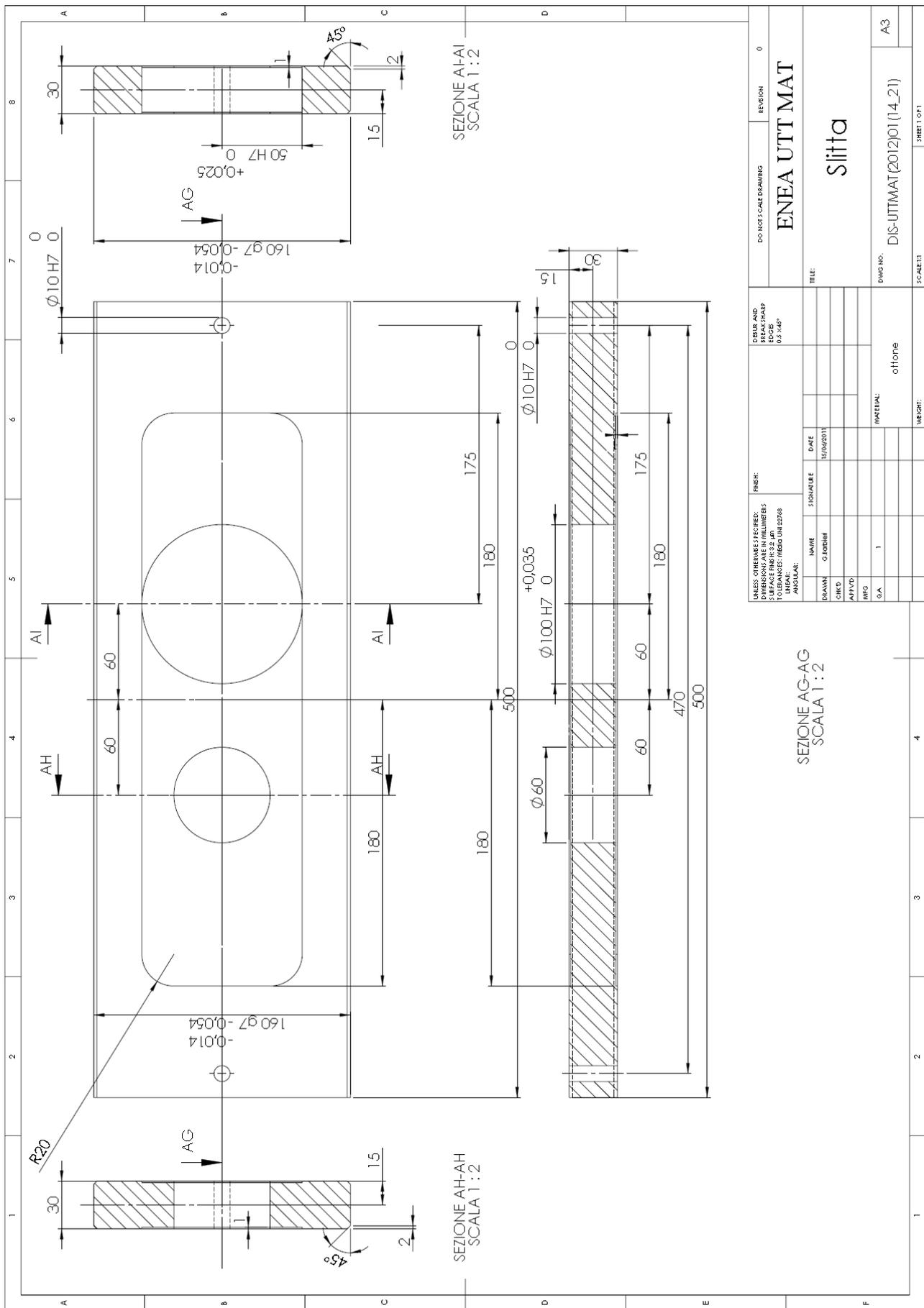
DIREZIONE/PROF. SPECIFICHE: DIMENSIONI IN MM/INCHES SUPERFICIE FINITURA: R32 RPP TOLLERANZE: ISO 25548 ANICHIARE:		MATR.: SE-NATURE DATA:		DIMENSIONI: PERI. ESTERNA EDGE 033.40°		DO: 01 SCALE DRAWING REV: 0	
DESIGN: CHECK: APPR: MFC: DATA:	C:\orini APPR MFC	SE-NATURE DATA:	MATR.: AISI 304 acciaio stampi		INFO: ENEA UTT MAT Cilindro pressatura 30		SHEET 012
BUC. NO.: DIS-UTTMAT(2012)01(2b_21)						A3	



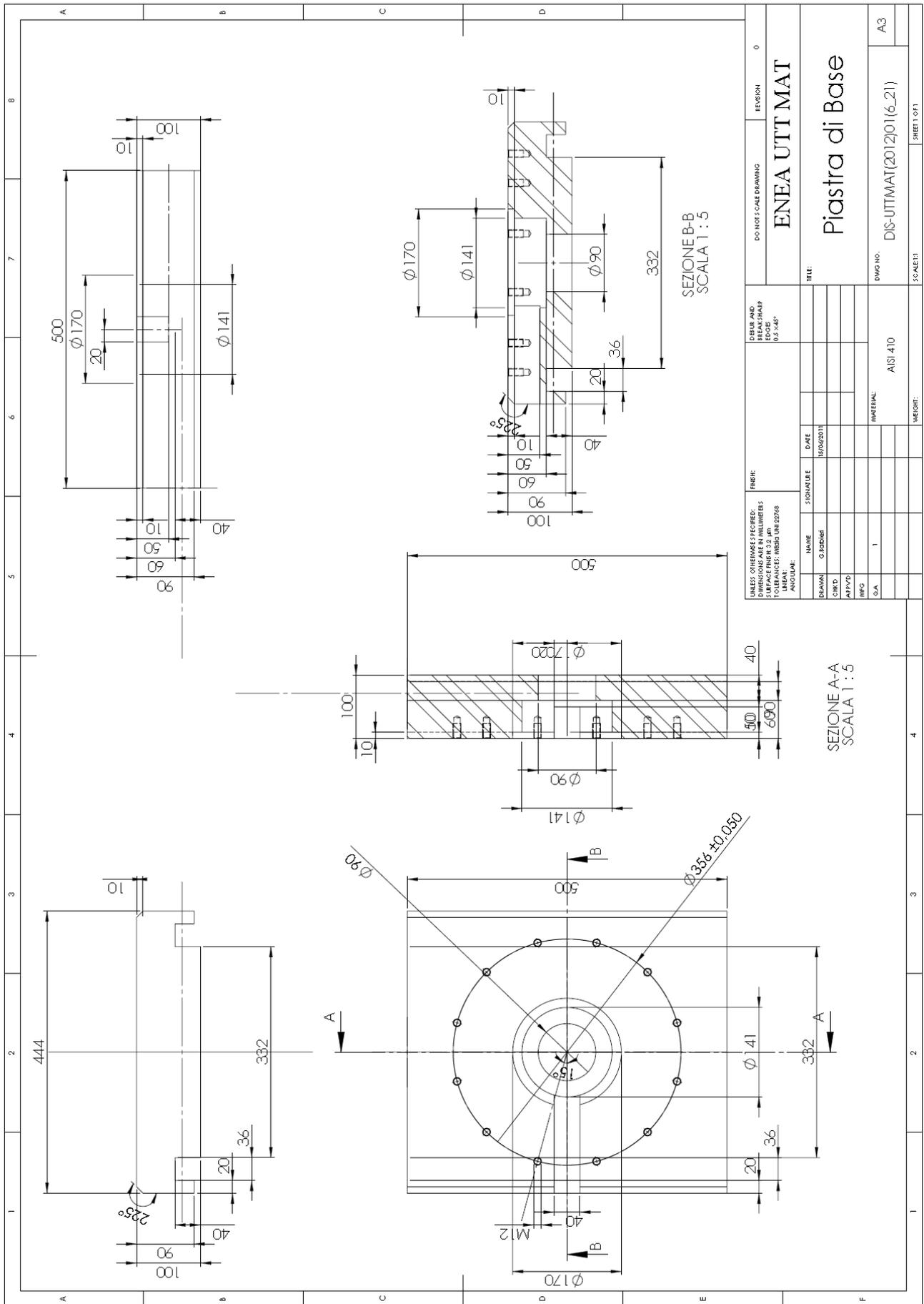
FINISH: SURFACE FINISH: 3.2 µm TOLERANCES: ISO UN 2276 ANGULAR:		FINISH: EDGES: 0.3 x 45°		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	0
TITLE: ENEA UT T MAT Cilindro pressatura		DATE		DATE		DRAWING NO.	
DESIGN	DATE	DESIGN	DATE	DRAWING NO.		DRAWING NO.	
CHECK	DATE	CHECK	DATE	DRAWING NO.		DRAWING NO.	
APP'D	DATE	APP'D	DATE	DRAWING NO.		DRAWING NO.	
REV	DATE	REV	DATE	DRAWING NO.		DRAWING NO.	
Q.A.	DATE	Q.A.	DATE	DRAWING NO.		DRAWING NO.	
MATERIAL: AISI 13 o acciaio stampi				SCALE: 1:1			
WEIGHT:				SHEET 012			

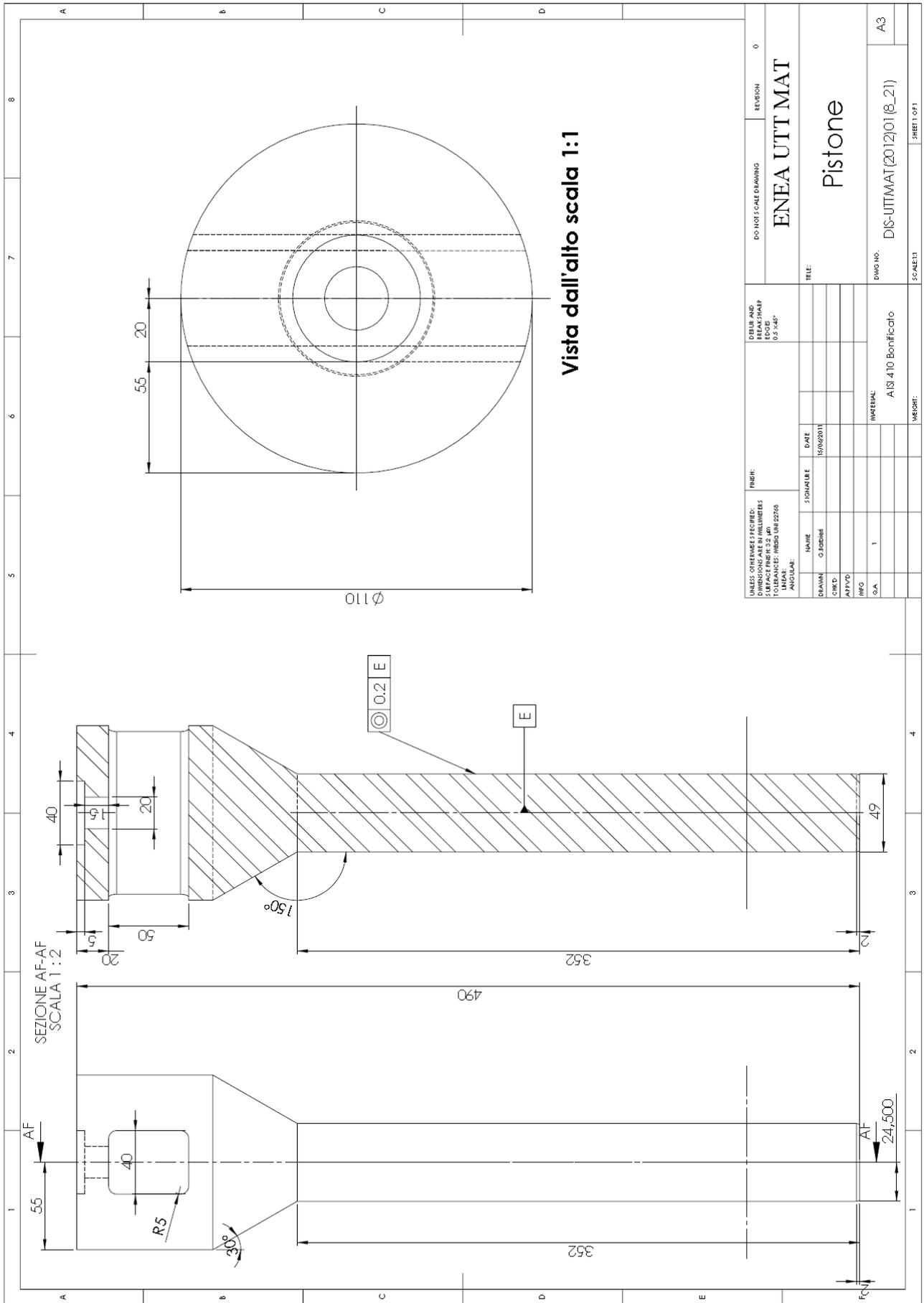


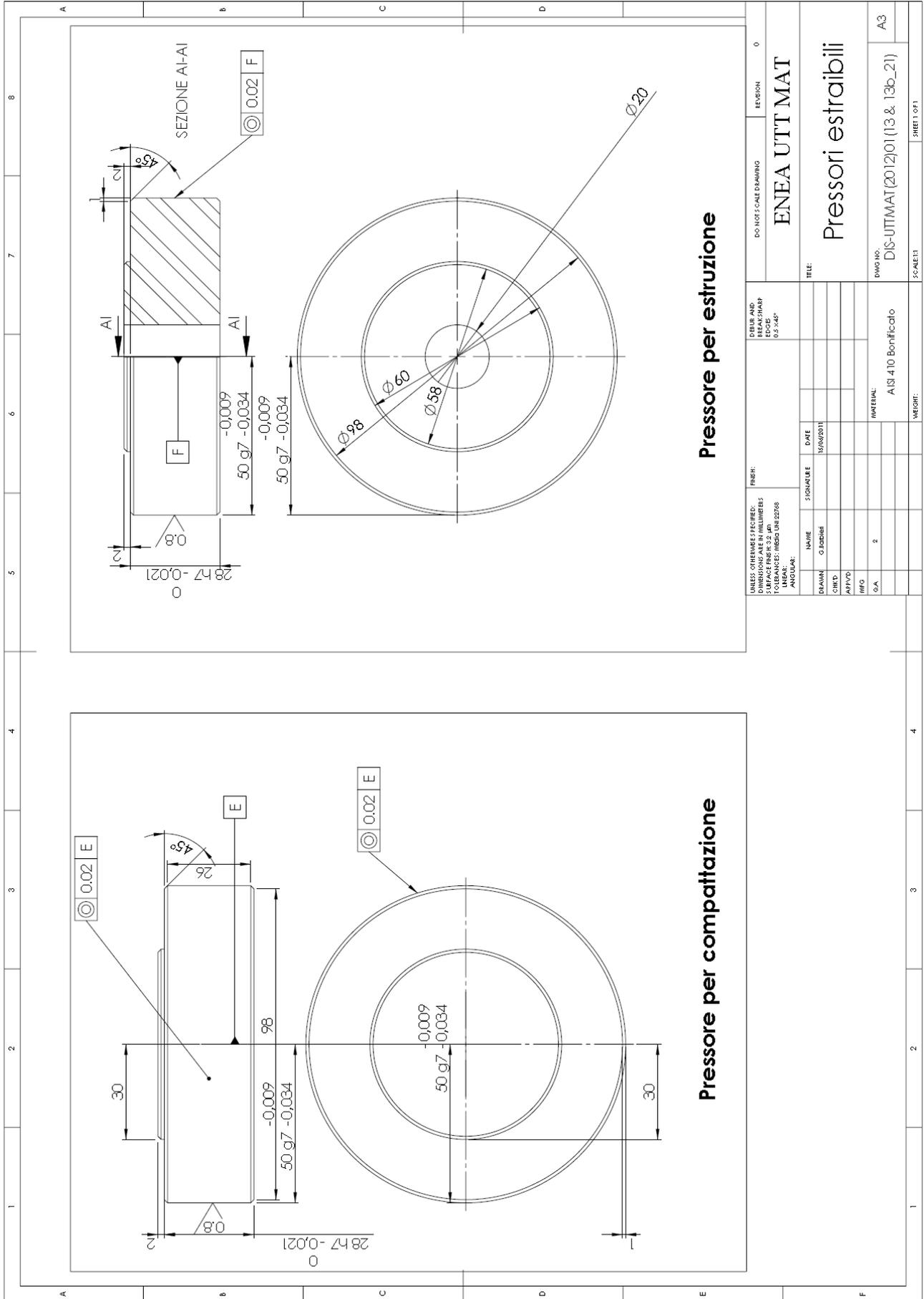


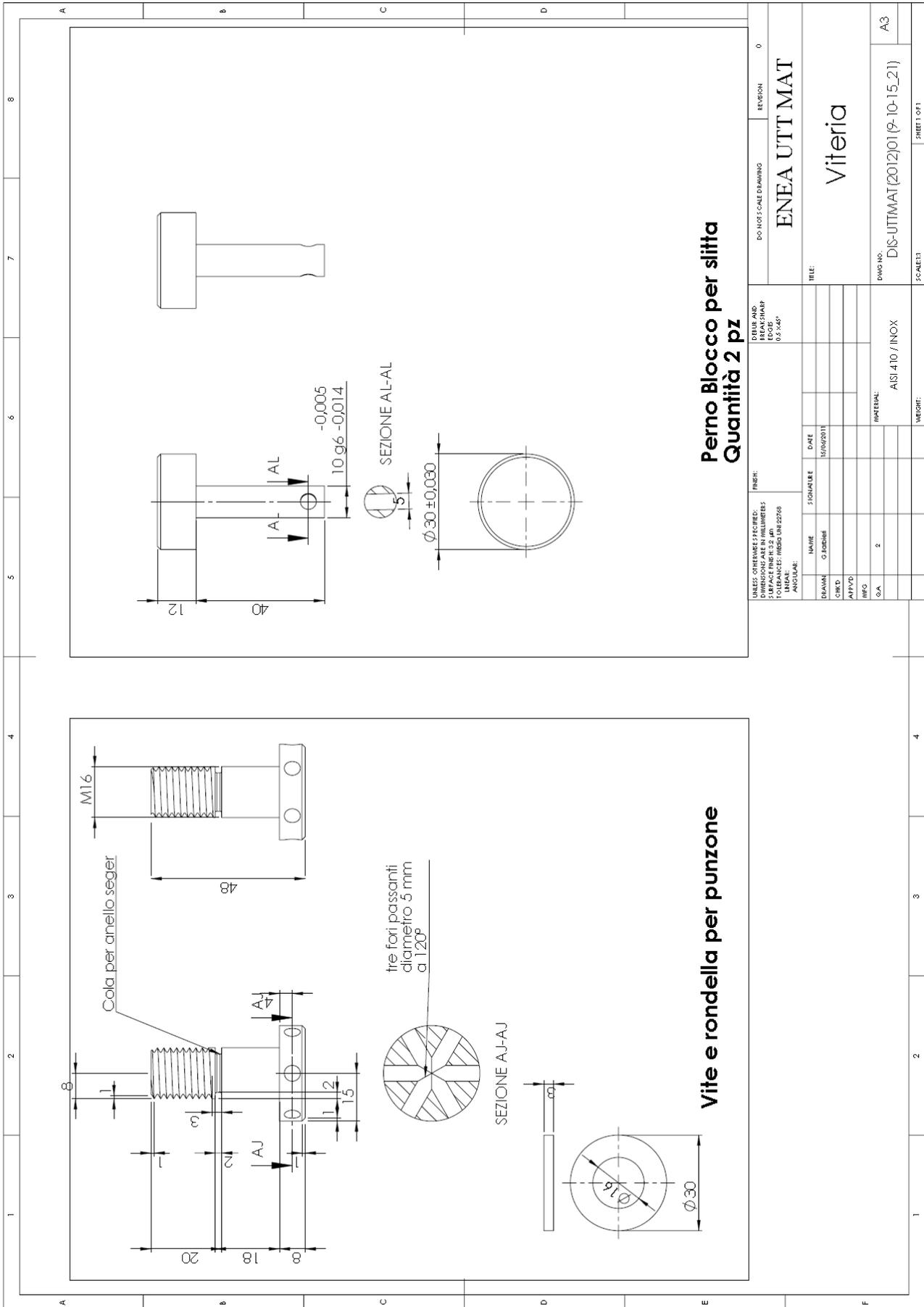


UNDES. OTHERS SPECIFIED: FINISH: 0.5 μm RMP SURFACE FINISH: 0.5 μm		FINISH:		DEBUR AND CHAMFER EDGES 0.5 $\times 45^\circ$		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION 0	
TOLERANCES: ISO UN 2768 ANGULAR:		NAME: C. Bordini		SIGNATURE:		DATE: 15/06/2011		FILE:	
DRAWN:		CHECKED:		APPROVED:		MFG:		Q/A:	
MATERIAL: ottone		MATERIAL:		WEIGHT:		SCALE: 1:1		SHEET 1 OF 1	
DWG NO. DIS-UTTMAT(2012)01(14_21)		PROJECT NO. A3		TITLE: Slitta		<p style="text-align: center;">ENEA UTT MAT</p>			









UNITS: OTTENGERE I REQUISITI: FINISH: RAL 9005 SURFACE FINISH: 3.2 µm TOLERANCES: ISO UN 22768 ANGLE:	FINISH: RAL 9005 BREAK FINISH: 0.5 x 45°	DO NOT SCALE DRAWING REVISION: 0	ENEA UTT MAT Viteria
DRAWN: G. LORDBI CHECK: APT/VD REVISION: 2 DATE: 10/09/2011	NAME: F. SCARFONE MATERIAL: AISI 410 / INOX	TITLE:	DWG. NO.: DIS-UTTMAT(2012)01 (9-10-15-21) SCALE: 1:1 SHEET 1 OF 1