

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

TESI DI LAUREA

In

Costruzione di Macchine T

**ANALISI SPERIMENTALE E PROGETTAZIONE DI CINEMATISMI ATTI
ALLA MOVIMENTAZIONE DI DEVICES PROTESICI ALL'INTERNO DI
UNA CAMERA DI DEPOSIZIONE PVD**

CANDIDATO:

Emanuele Palazzi

RELATORE:

Chiar.mo Prof. Dario Croccolo

Anno Accademico 2015/2016

Sessione II

Sommario

1. Introduzione	2
2. Tecniche PVD	5
2.1 La tecnica Sputtering e le sue varianti	14
2.2 La tecnica Ion Beam	19
2.3 La tecnica Arco Catodico in Vuoto	22
2.4 La tecnica Pulsed Electron Deposition (PED)	25
3. Progetto	29
3.1 Progettazione di un cinematismo ottimale per la movimentazione di viti da impianto	31
3.2 Progettazione di un cinematismo ottimale per la movimentazione di cateteri	44
3.3 Progettazione di un cinematismo ottimale per la movimentazione di una coppa d'anca	47
4. Considerazioni e Conclusioni	58
5. Bibliografia	59

1. Introduzione

Il lavoro di tesi presentato nelle pagine seguenti è stato svolto presso il laboratorio di NanoBiotecnologie (NaBi) dell'Istituto Ortopedico Rizzoli (IOR) di Bologna.

Il laboratorio NaBi si occupa di valutare le proprietà meccaniche, tribologiche e mediche di film sottili di materiali duri e biocompatibili per le applicazioni ortopediche, come l'ossido di Zirconio (Zirconia, ZrO_2) o di Alluminio (Al_2O_3), depositati tramite un'innovativa tecnica di deposizione PVD (Physical Vapour Deposition) denominata Pulsed Plasma Deposition (PPD).

Il plasma, diffuso nella camera a vuoto, deposita un film sottile sul target costituito da materiali protesici. Il sistema attualmente costituisce lo stato dell'arte nei dispositivi di deposito di film sottili su questo tipo di superfici.

Tale metodologia - come verrà meglio esposto in seguito - consente di depositare materiali dalle ottime proprietà meccaniche, superficiali e strutturali anche a temperatura ambiente, realizzando film nanostrutturati con proprietà innovative rispetto ai sistemi convenzionali di deposizione di film sottili. I film sono caratterizzati da un punto di vista morfologico, chimico, strutturale, meccanico e analizzati mediante modellazione agli elementi finiti (FEA).

In particolare il laboratorio è equipaggiato per una completa caratterizzazione delle proprietà di base dei materiali depositati, disponendo di un nanoindentatore, un microindentatore, un tribometro e un micro-scratch tester, oltre a microscopi ottici, rugosimetro, profilometro.

I sistemi di micro e nanoindentazione in dotazione al laboratorio sono utilizzati per eseguire l'analisi della durezza dei materiali e per la determinazione delle proprietà meccaniche di film sottili e di campioni massivi (bulk).

Con un sistema di indentazione è possibile determinare le proprietà caratteristiche del materiale come la nanodurezza e il modulo elastico; tale caratterizzazione può essere effettuata su qualsiasi tipo di materiale, soffice, duro, fragile o duttile; è possibile determinare inoltre la durezza di inclusioni, segregazioni bordo grano, e così via. Il microindentatore ha range di carichi e profondità di penetrazioni raggiungibili maggiori del nanoindentatore, per cui il loro accoppiamento può consentire una caratterizzazione sulle multiscale dei materiali investigati.

Il sistema di nanoindentazione è inoltre particolarmente adatto per misure di carico e di profondità di penetrazione a scala nanometrica; è possibile pertanto valutare la durezza nell'analisi di film di copertura (coating) organici e inorganici, morbidi e duri.

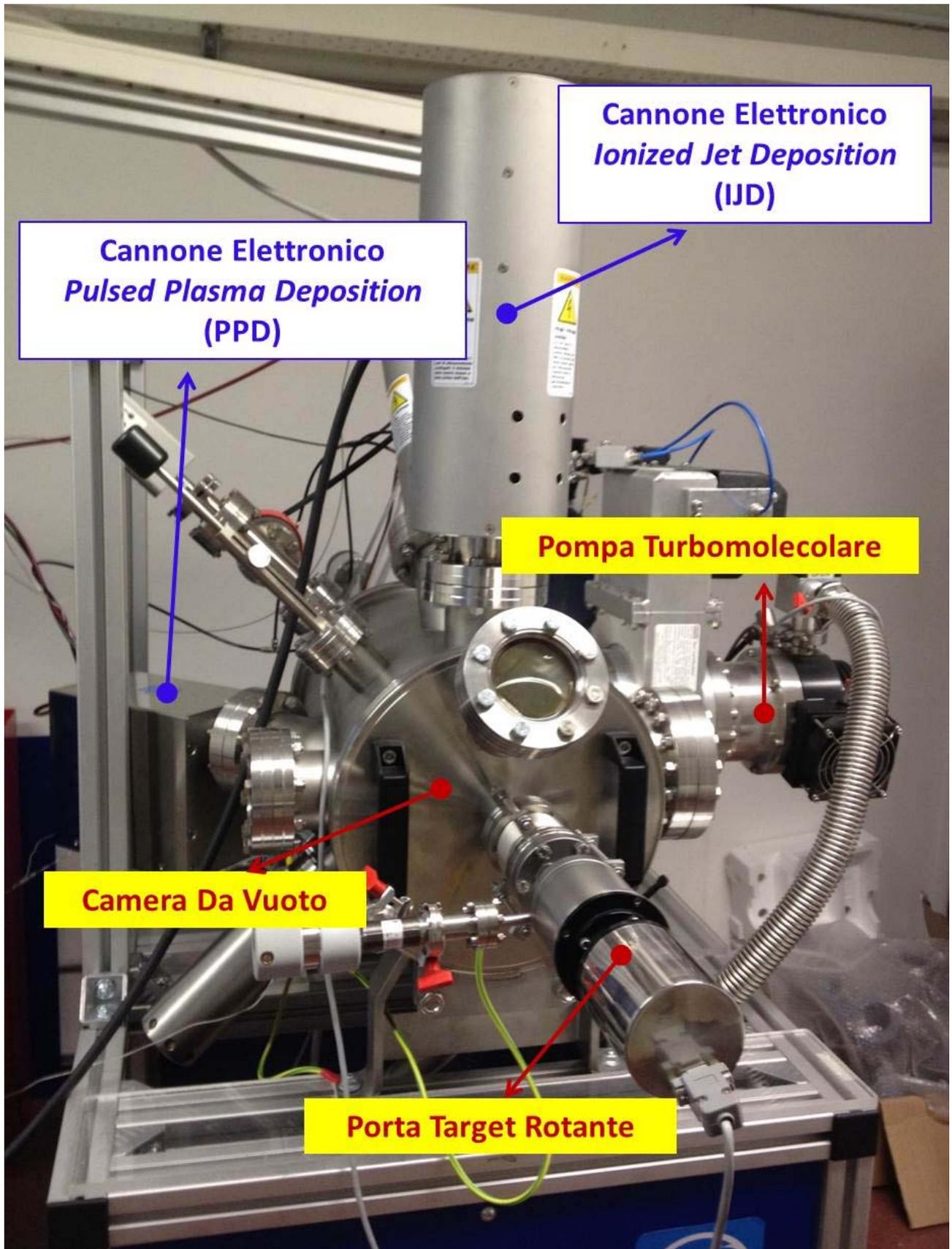
Alcuni esempi sono i PVD sottili e multistrato, vernici, lacche e molti altri tipi di film, che riguardano applicazioni in ottica, microelettronica, decorative e biomedicale. I substrati possono essere morbidi o duri e comprendono le leghe metalliche, i semiconduttori, il vetro e materiali refrattari e organici.

L'attività svolta riguarda il dimensionamento e la progettazione di particolari cinematismi, attuati sui porta campioni del sistema di deposizione PPD in dotazione al laboratorio, al fine di movimentare in modo ottimale all'interno della camera di deposizione provini di polietilene, cateteri vescicali, viti di titanio da impianto e, infine, coppe d'anca protesiche in materiale ceramico.

Non è, infatti, scontato avvalersi del moto rotatorio uniforme del porta campione (fornito da un motore DC) per movimentare al meglio dei devices dalla geometria complessa, come possono essere i target di studio citati precedentemente, i quali hanno bisogno di un cinematismo altrettanto complesso per raggiungere l'omogeneità di ricoprimento desiderata.

Per la modellazione 3D di parti e assiemi, l'analisi cinematica-dinamica, l'analisi delle sollecitazioni, le simulazioni e per la creazione di tavole progettuali mi sono avvalso dell'ausilio del software CAD 3D Autodesk Inventor.

Innanzitutto è necessario, per la comprensione della finalità di tale progetto, dare un breve cenno sulle caratteristiche e sul funzionamento delle tecnologie per la deposizione di film sottili con la quale opera il sistema di deposizione PPD e su cui si è basato il mio lavoro svolto all'interno del centro di ricerca del Rizzoli.



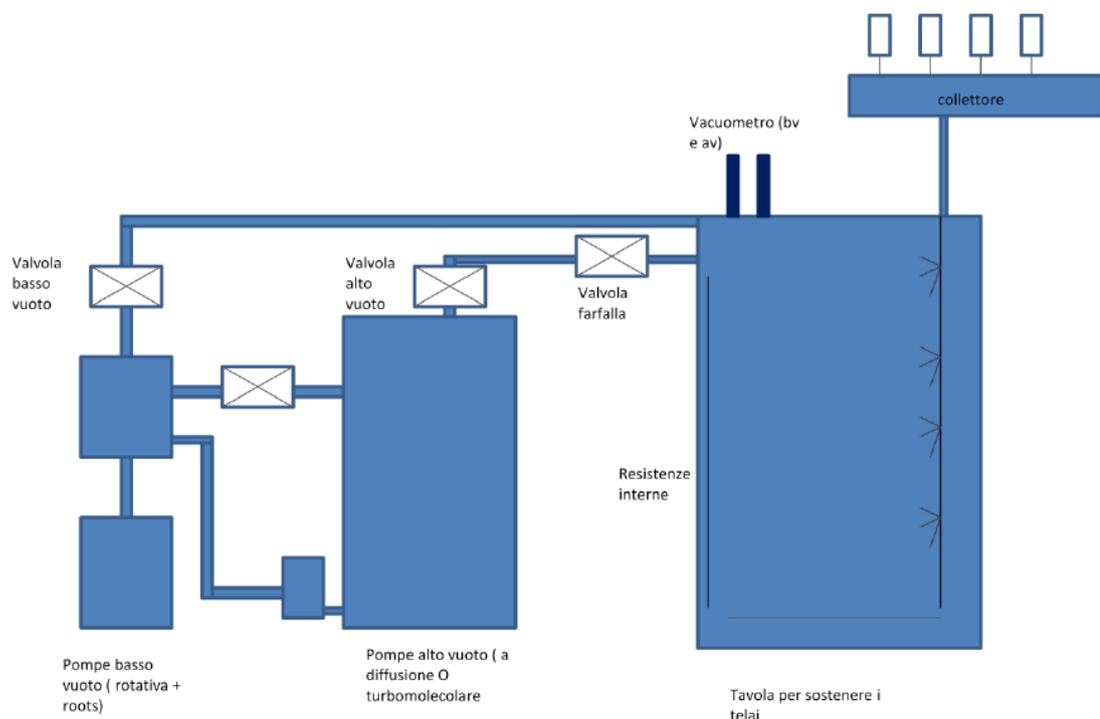
Sistema di deposizione PPD in dotazione allo IOR presente in laboratorio

2. Tecniche PVD

Depositare un film sottile (thin film) significa realizzare su una determinata superficie uno strato di un certo materiale avente uno spessore al più di qualche micron. Oltre questo valore si parla di film spesso (thick film). Molte delle tecniche per ottenere ciò si basano su processi che avvengono «sotto vuoto», ma sarebbe meglio dire «a pressione molto inferiore a quella atmosferica».

Ciò che accomuna la maggior parte di queste tecniche è che si basano su trasformazioni di fase del materiale con cui si vuole realizzare lo strato che coinvolgono la fase vapore. Il materiale di partenza, in forma solida, deve essere «vaporizzato» e successivamente «condensato» su un substrato nella desiderata forma di film sottile. La fase intermedia è quella che, appunto, deve avvenire in ambiente a bassa pressione. La tecnica utilizzata nella camera di deposizione presente in laboratorio utilizza la tecnica di evaporazione a fascio elettronico, detta anche PVD.

L'acronimo PVD – Physical Vapor Deposition - indica la tecnologia di deposizione che prevede l'evaporazione di un metallo solido, in una camera a vuoto, tipicamente in ambito plasma. Gli ioni, a causa dell'energia cinetica posseduta e dalla differenza di potenziale applicata al pezzo da rivestire, sono attratti sulla superficie dell'oggetto, dove condensano e formano il rivestimento desiderato.



Schema generale di un impianto PVD

Un fascio di elettroni viene emesso da un filamento incandescente di tungsteno ed è accelerato da un'opportuna differenza di potenziale (da 4 a 20 kV) che lo guida verso la carica di evaporazione. Nell'impatto contro la carica l'energia termica è trasformata in calore che innalza la temperatura del materiale da evaporare al di sopra del suo punto di fusione. Sono possibili potenze fino a 200 kW, ma potenze di qualche kW si realizzano anche con piccolissimi cannoni elettronici.

Generalmente, un impianto per deposizione PVD può essere semplificato in 4 macro aree:

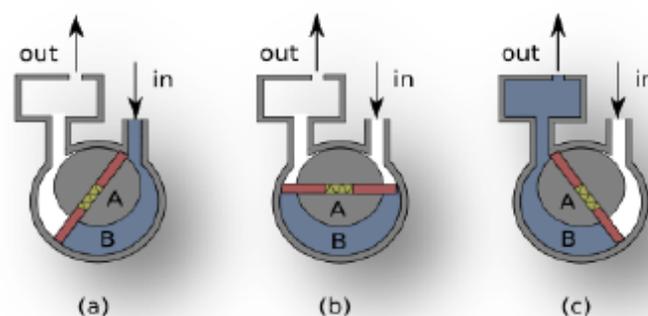
- Il sistema vuoto
- La camera di deposizione, telai e componentistica
- Sistema d'immissione gas
- Il sistema di controllo

IL SISTEMA VUOTO

Il vuoto è prodotto attraverso una combinazione di pompe. Generalmente le pompe per la creazione del vuoto lavorano su 2 step:

A) Basso-Medio vuoto che raggiunge valori di 10^{-2} mbar attraverso due tipologie di pompe:

- **POMPE ROTATIVE:** il gas viene aspirato dalla prima camera (a), compresso nella seconda camera (b) ed, infine, espulso tramite una valvola (c). Queste tipologie di pompe sono dotate di un olio che garantisce una perfetta tenuta.



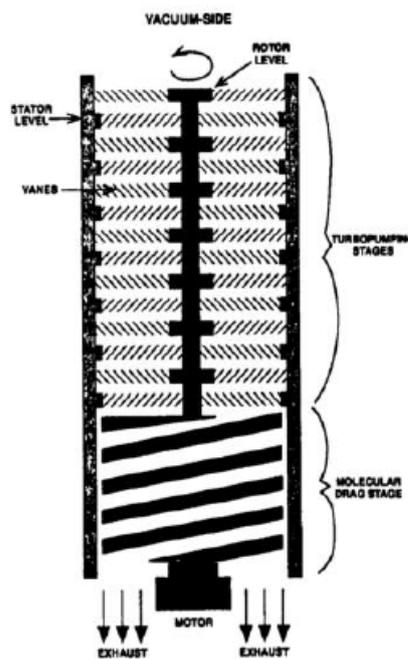
A: eccentrico
B: camera con volume variabile

- POMPE ROOTS: all'interno di una camera ovale una coppia di lobi, comandati da un dispositivo esterno, ruota in maniera sincrona e con senso di rotazione opposto senza mai venire in contatto tra loro né con la parete (1 mm di tolleranza).

B) Alto vuoto, che raggiunge valori di 10^{-5} mbar, raggiunto attraverso due tipologie di pompe:

- POMPE TURBOMOLECOLARI: Il sistema è costituito da diversi dischi contenenti alette inclinate in senso opposto. L'alta velocità di rotazione fa in modo che le molecole d'aria vengano colpite dalle alette e spinte, grazie all'inclinazione alterna, nel rotore sottostante successivo fino all'eliminazione delle stesse.

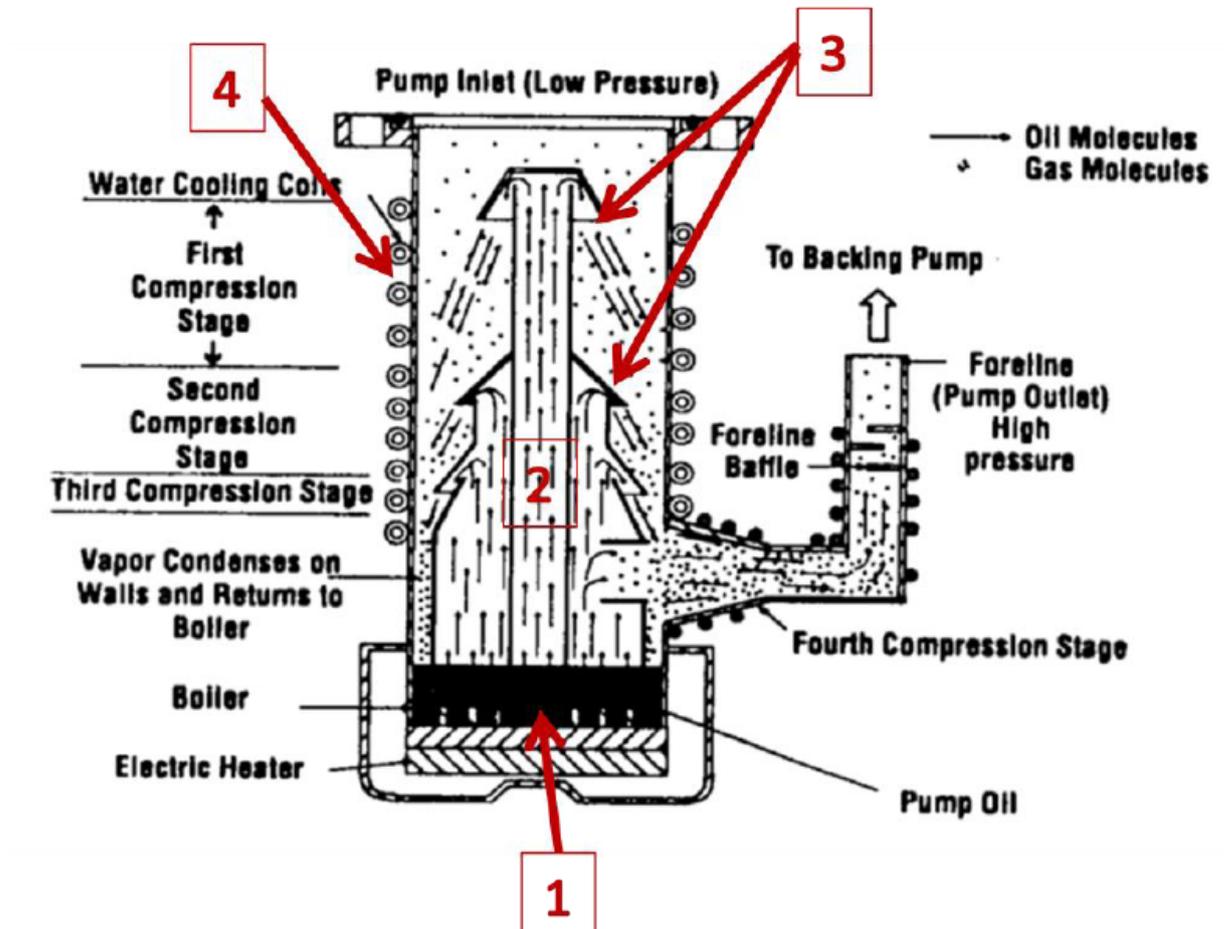
Con tale sistema è possibile raggiungere una pressione pari a 10^{-10} mbar.



- POMPE A DIFFUSIONE: l'utilizzo di questa tipologia di pompe è quasi abbandonato a causa delle scarse prestazioni a confronto con le pompe turbo molecolari. L'olio contenuto all'interno del recipiente inferiore (1) viene riscaldato e fatto risalire all'interno del condotto centrale della pompa (2). L'olio fuoriuscendo dagli ugelli (3) cattura le molecole di gas e le porta verso il basso dove vengono eliminate.

La presenza di un sistema di raffreddamento (4) sui lati permette la non contaminazione da parte dell'olio dell'aria all'interno della camera.

Con tale sistema è possibile raggiungere una pressione pari a 10^{-8} mbar.



CAMERA DI DEPOSIZIONE

La camera di deposizione rappresenta la struttura metallica all'interno della quale vengono posizionati i pezzi da rivestire.

La sua forma è cilindrica e dotata di bocchettoni (di seguito si riporta il progetto della casa madre).

PORTA CAMPIONI

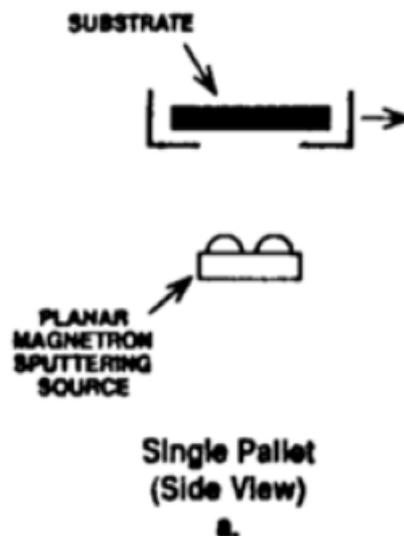
I porta campioni sono le strutture portanti dei prodotti all'interno della camera. Essi vengono avvitati su un corpo filettato solidale ad un motore elettrico a corrente continua che fornisce il movimento rotatorio.

La giusta progettazione dei porta campioni e della loro movimentazione in funzione dell'applicazione è un aspetto fondamentale, in quanto influisce sulla qualità ed uniformità del rivestimento, ma anche sulla produttività del sistema.

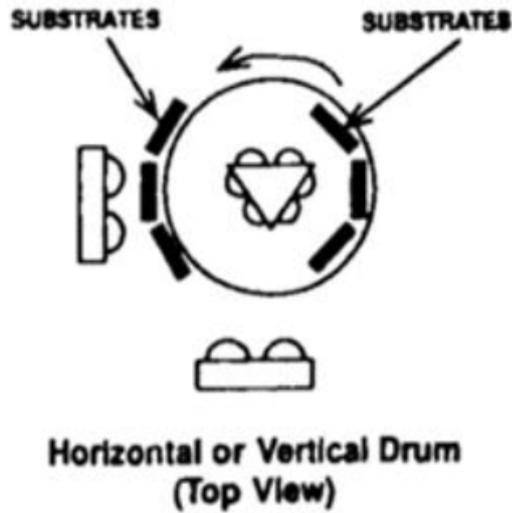
Ai porta campioni, mentre ruotano all'interno della camera, è applicato direttamente un alto voltaggio.

La configurazione dei telai varia a seconda delle applicazioni, ad esempio:

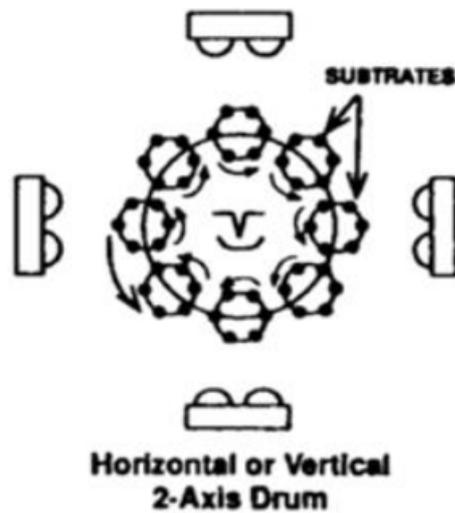
- SINGLE PALLET: tipico per deposizione su lastre (impianti in line)



- HORIZONTAL o VERTICAL DRUM: quando il substrato è montato sulla superficie esterna o interna del telaio e fatto ruotare di fronte alla sorgente



- **HORIZONTAL OR VERTICAL 2-AXIS DRUM:** Per deposizioni tridimensionali. Consente un deposito uniforme in tutte le sue parti

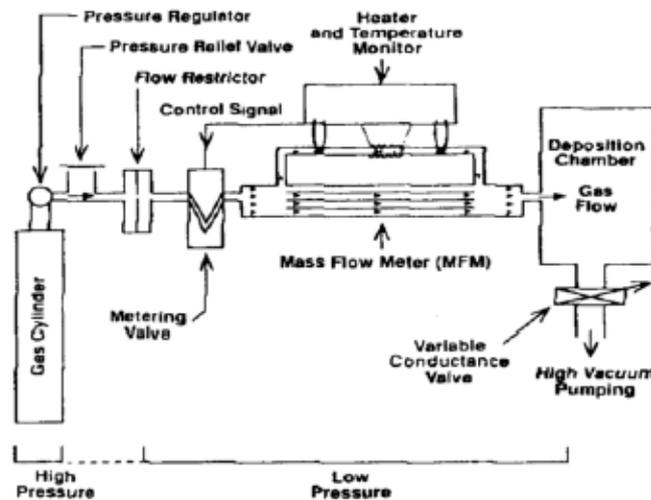


SISTEMA IMMISSIONE GAS

L'immissione gas può avvenire durante fasi di processo con diversi obiettivi:

A) Durante la fase di creazione del vuoto l'immissione gas ha lo scopo di stabilizzare la pressione all'interno della camera;

B) Un'altra fase di immissione gas può avvenire prima della fase di coating per ottenere, attraverso una reazione chimica con gli ioni evaporati, la formazione del composto che si vuole depositare (colori reattivi). I gas introdotti in camera sono Argon, Azoto e Ossigeno. Le proporzioni tra i diversi gas e le quantità sono di estrema importanza per la realizzazione dei diversi depositi.



Sistema d'immissione gas

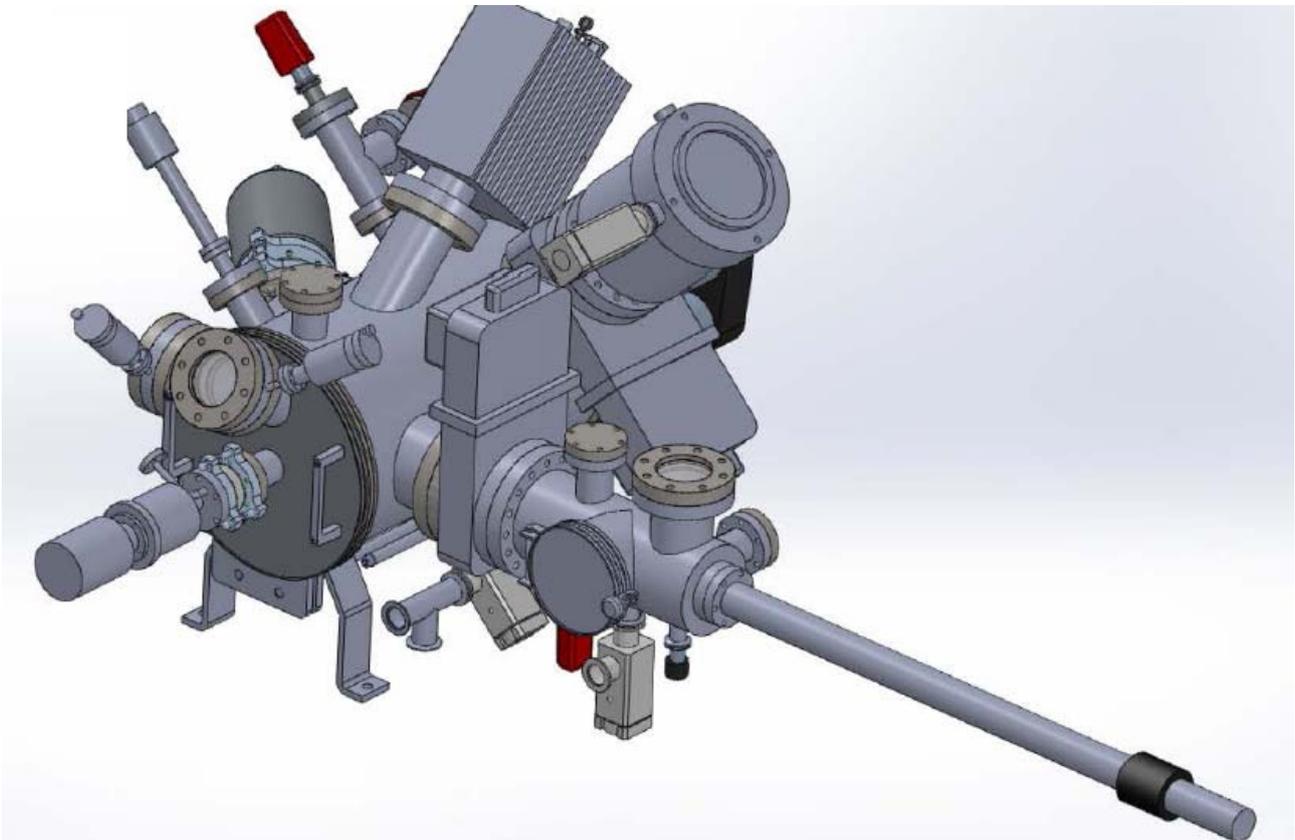
SISTEMA DI CONTROLLO

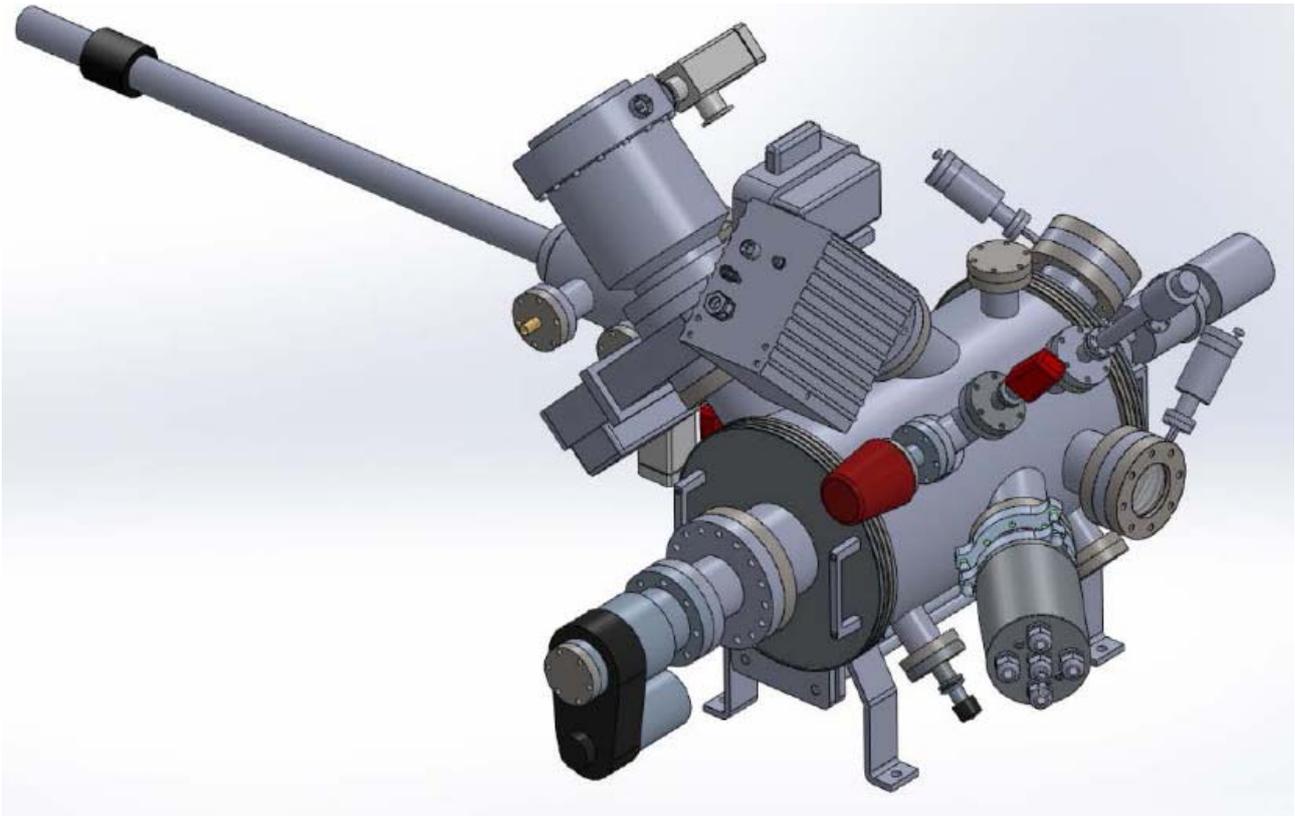
Durante il processo diversi sono i parametri da controllare. Quelli fondamentali sono LA TEMPERATURA (utilizzando una termocoppia o un sistema a raggi infrarossi), LA PRESSIONE (attraverso vacuometri si controlla sia il basso-medio vuoto sia l'alto vuoto), IL FLUSSO DI GAS (diversi flussimetri controllano le quantità di gas immessi nell'unità di tempo) e BIAS (la differenza di potenziale tra il substrato e la camera di deposizione).

ALTRA COMPONENTISTICA

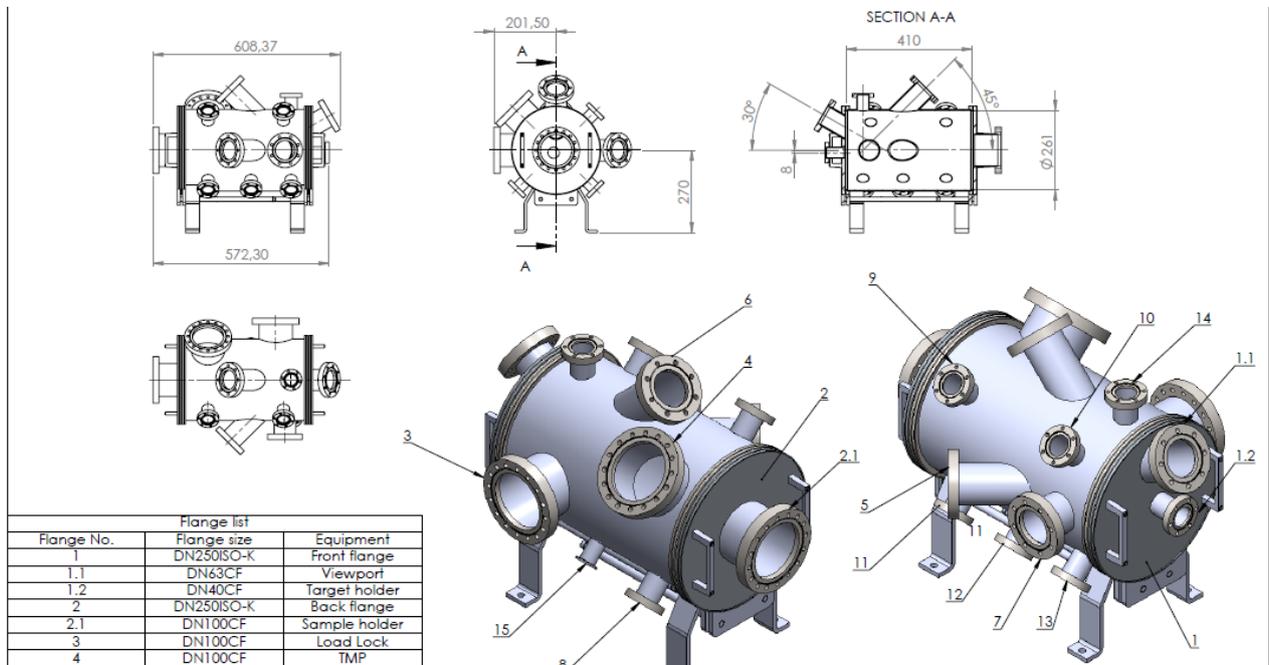
Numerosi sono gli accessori che compongono l'intero impianto. Da ricordare sicuramente sono il sistema di riscaldamento e quello di raffreddamento.

- **SISTEMA DI RISCALDAMENTO:** la camera di deposizione viene riscaldata nelle fasi iniziali del processo tramite l'utilizzo di resistenze (centrali o posizionate sulle pareti) oppure con il metodo del bombardamento ionico attraverso l'immissione di un gas.
- **SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO:** Tutta la struttura – camera di deposizione, struttura portante delle sorgenti, pompa a diffusione – è collegata ad un sistema di raffreddamento, costantemente monitorato dal sistema di controllo.





Visione d'insieme della camera di deposizione



Progetto della camera di deposizione

Le principali tra le tecniche di deposizione PVD sono:

- Tecnica Magnetron Sputtering;
- Tecnica Ion Beam o Ion Gun;
- Tecnica Arco Catodico in Vuoto;
- Tecnica Pulsed Electron Deposition (PED);

2.1: la tecnica Sputtering e le sue varianti

La realizzazione di ricoprimenti PVD (Physical Vapour Deposition) mediante la tecnica sputtering prevede l'accensione di una scarica elettrica in continua di tipo a bagliore tra un catodo costituito del materiale da evaporare e un anodo (il substrato), collegato elettricamente alla camera di deposizione stessa e posto a massa per ragioni di sicurezza. Gli ioni del gas nel quale avviene la scarica collidono col catodo costituito del materiale da evaporare, causando l'eiezione di atomi o molecole.

Le particelle eiettate dal catodo sono a tutti gli effetti dei vapori del materiale costituente il target e migrano verso la camera ed il substrato da depositare, dove condensano realizzando il rivestimento. Per quanto riguarda lo sputtering è particolarmente interessante la classificazione dello sputtering in funzione del metodo con cui si fornisce energia alle particelle: accelerando ioni con un campo elettrico costante nel tempo si ha la versione detta sputtering DC, impiegando invece un campo rapidamente variabile nel tempo si ha lo sputtering a radiofrequenza (RF).

Esiste inoltre una particolare configurazione dello sputtering che prevede l'intrappolamento degli elettroni in prossimità del catodo modificandone la traiettoria con un magnete, chiamato magnetron sputtering (DC o RF). Un sistema da sputtering consiste in una camera da vuoto, che possa essere svuotata fino a pressioni inferiori a 10^{-6} mbar, in cui vengono disposte orizzontalmente due piastre, generalmente a forma di disco, affacciate a qualche cm di distanza tra loro, delle quali una è costituita del materiale che si vuole depositare (target), l'altra è il porta substrati. Nella camera viene immesso, attraverso una valvola a spillo (all metal), un gas (tipicamente Argon) di elevata purezza (almeno 99.99%) fino ad una pressione nell'intervallo 10^{-4} e 10^{-2} mbar, che opportunamente ionizzato permette l'erosione del catodo.

Il target è raffreddato per smaltire l'energia ceduta dagli ioni che potrebbe danneggiarlo, fonderlo o distaccarlo dal suo supporto. Anche il porta substrati, nel caso di substrati delicati come polimeri, può essere raffreddato, in modo da dissipare l'energia derivante dalla condensazione degli atomi e quella derivante dagli elettroni in arrivo dal plasma: in caso contrario si potrebbero avere aumenti di temperatura anche fino a varie centinaia di gradi centigradi a seconda della potenza applicata. Tuttavia

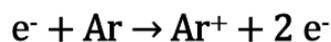
in molti apparati il substrato può invece essere volutamente riscaldato per migliorare la qualità del film depositato.

Nello sputtering DC il polo negativo dell'alimentatore ad alta tensione è elettricamente collegato al target (catodo), mentre il polo positivo è collegato a massa alle parti metalliche della camera e quindi anche alla piastra porta substrati (anodo).

L'applicazione di una forte ddp continua (fino a 5000 V) tra anodo e catodo produce una scarica a bagliore (glow discharge) costituita da un denso plasma di ioni Argon (Ar^+) e di elettroni, molto conduttivo.

Il bagliore è dovuto essenzialmente ai processi di ricombinazione radiativa tra ioni Ar^+ ed elettroni, ed è localizzato nello spazio tra i due elettrodi. Tuttavia una zona, spesso da qualche mm a circa 20 mm, più vicina al target appare oscura, denotando una scarsa concentrazione di ioni ed elettroni e quindi una bassa conducibilità elettrica (zona nota con il nome di cathode dark space).

Pertanto la caduta di tensione avviene principalmente attraverso questa zona, in cui gli ioni e gli elettroni presenti vengono fortemente accelerati, gli uni verso il target e gli altri verso la regione di plasma. Questi elettroni producono ioni per urto contro atomi neutri, secondo la reazione:



Gli ioni che bombardano il target estraggono atomi, gruppi di atomi o molecole che, dopo aver attraversato la regione di scarica, si depositano sui substrati.

Tenendo conto della densità di ioni incidenti e della loro velocità media si può calcolare una densità di corrente ionica dell'ordine del mA/cm².

Dal target vengono inoltre emessi altri elettroni (secondari), che accelerati attraverso la zona oscura, contribuiscono a sostenere la ionizzazione del gas. Molti altri processi chimici e fisici possono avvenire alla superficie del target (impiantazione degli ioni, emissione di fotoni, adsorbimenti e reazioni chimiche) e nella regione di plasma (eccitazione, dissociazione, cattura di elettroni, scambio di carica, ecc.), ma rivestono un'importanza secondaria e non vengono approfonditi in questo lavoro. La pressione del gas immesso nella camera ha notevole influenza sulla velocità di deposizione: se la pressione è troppo bassa l'efficienza di ionizzazione è insufficiente e la scarica non si autosostiene; viceversa, se la pressione è troppo alta, gli atomi estratti dal target possono essere diffusi per urto dal gas e non depositarsi efficientemente. Il processo può quindi svolgersi in maniera ottimale in un ristretto intervallo di pressioni.

Lo sputtering RF è una tecnica che permette di superare alcune limitazioni dello sputtering DC. Infatti, in un sistema da sputtering DC, in cui il catodo è un target di quarzo (SiO_2) molto sottile (supponiamo 10 mm) e con un'elevata resistività ($\rho = 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$), al quale si impone una corrente

costante di 0,1 A, la corrente ionica genera una caduta di potenziale attraverso il target di 1012 V. In altri termini, sui target dei materiali isolanti gli ioni che bombardano la superficie apportano una carica positiva che non può essere neutralizzata da un'adeguata corrente di elettroni provenienti dal circuito esterno. Si crea quindi una differenza di potenziale che neutralizza quella applicata dall'esterno per cui il bombardamento cessa.

Con la tecnica dello sputtering a radiofrequenza è invece possibile utilizzare anche materiali non conduttori e la scarica a bagliore si innesca anche a pressioni inferiori rispetto al caso DC. Consideriamo quanto avviene in un sistema da sputtering se si applica una differenza di potenziale alternata a bassa frequenza, con valore di picco di qualche kV, ai due elettrodi metallici.

Durante ogni semiciclo un elettrodo si comporta da catodo e quindi viene bombardato dagli ioni, l'altro da anodo e viene bombardato dagli elettroni, la corrente media è pertanto nulla. Se però la frequenza è sufficientemente alta (circa 10 MHz) gli ioni (meno mobili degli elettroni) non fanno in tempo a passare dalla regione di plasma agli elettrodi, a differenza degli elettroni.

Pertanto gli elettrodi assumono, dopo un periodo transitorio, un potenziale medio negativo rispetto al potenziale del plasma, in modulo pari a circa il valore di picco della tensione alternata. Per gran parte del ciclo gli ioni vengono accelerati verso gli elettrodi, mentre per la rimanente breve parte (< 1%) gli elettrodi sono leggermente positivi rispetto al plasma ed attirano elettroni in modo che la corrente media sull'intero ciclo sia nulla.

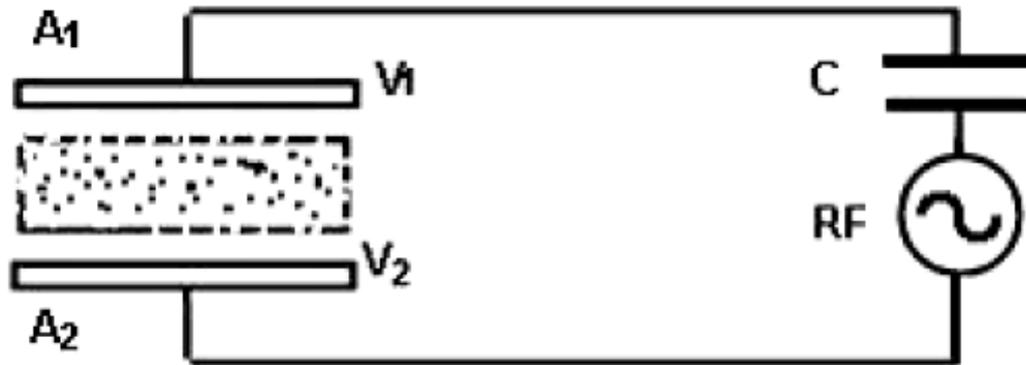
Ovviamente in un sistema funzionante in alternata la presenza di elementi ad alta resistività o isolanti (dielettrici) non impedisce l'applicazione della tensione, appare però evidente che i due elettrodi descritti come sopra svolgono un ruolo simmetrico, per cui questo sistema non consentirebbe un efficace processo di deposizione.

Possiamo, infatti, schematizzare il sistema come un circuito formato da due condensatori 1 e 2 a piastre piane (gli elettrodi e il plasma), separati dalla zona scura non conduttiva, in serie tra loro. Se indichiamo con A1, A2 le aree e con V1, V2 le ddp ai capi di ciascun condensatore, queste grandezze sono legate fra loro dalla relazione:

$$V1/V2 = (A2/A1)^4$$

Il sistema può perciò essere reso asimmetrico rendendo diverse le superfici dei due elettrodi, in modo che al target corrisponda la superficie minore e quindi una ddp rispetto al plasma molto grande. L'elettrodo a grande area sarà invece formato dal porta substrati e da tutta la camera (metallica) da vuoto e presenterà una piccolissima ddp (pochi V) rispetto al plasma, insufficiente a produrre lo sputtering da parte degli ioni. In questa situazione tra i due elettrodi si stabilisce una differenza di potenziale continua di alcuni kV, che deve essere disaccoppiata dal generatore di radiofrequenza

mediante un condensatore inserito nel circuito esterno tra l'elettrodo con il target e il generatore di RF.



Schema di un circuito elettrico rappresentante un sistema da sputtering RF

Ulteriori condensatori e induttanze vengono introdotti nel circuito RF per adattare l'impedenza della camera di sputtering (che dipende in ultima analisi dalla geometria degli elettrodi e dalla pressione e natura del gas di scarica) alla impedenza di uscita del generatore di RF ed evitare dannose riflessioni del segnale a RF.

Esiste infine una configurazione molto interessante della tecnica sputtering detta Magnetron Sputtering, ampiamente utilizzata nel settore industriale.

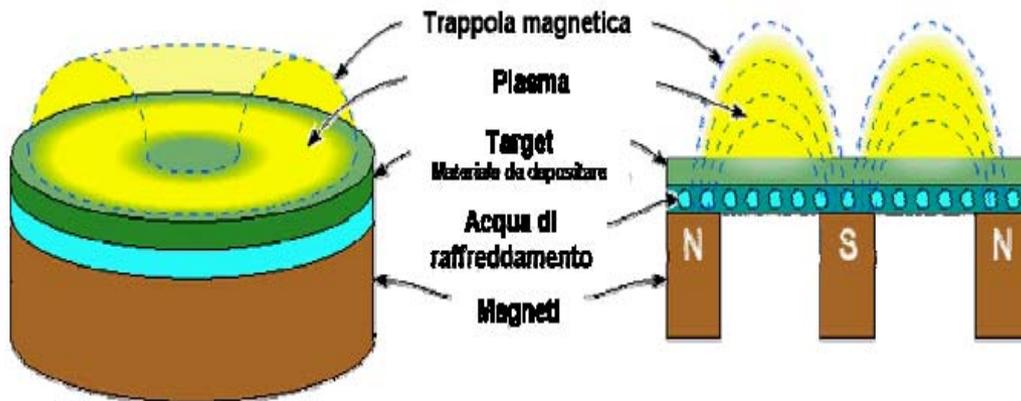
Nella variante Magnetron, dietro al target è montato un magnete permanente con i poli disposti in modo tale da produrre un campo magnetico parallelo alla superficie del catodo. Pertanto nella regione di carica spaziale adiacente al target gli elettroni secondari (emessi dal target) sotto l'effetto combinato del campo elettrico e di quello magnetico (Forza di Lorentz) subiscono una deflessione tale per cui effettuano traiettorie elicoidali. All'interno del plasma il campo elettrico è trascurabile, e sotto l'effetto del solo campo magnetico gli elettroni descrivono orbite circolari, senza riuscire più a raggiungere l'anodo e i substrati.

In tal modo si ha un duplice effetto: da un lato diminuisce il riscaldamento del substrato, dall'altro il vero e proprio intrappolamento degli elettroni nel plasma aumenta grandemente la probabilità di ionizzazione del gas, con conseguente notevole aumento della velocità di deposizione. Inoltre, la pressione del gas inerte necessaria è molto inferiore a un tradizionale sistema a diodo. Anche di questa variante esistono diverse versioni, a seconda del tipo di magnete (permanente o elettromagnete) e della forma del target, che deve adattarsi al tipo di substrati da ricoprire.

La pressione tipica a cui avviene un processo PVD con la tecnica magnetron sputtering è dell'ordine di 10^{-3} mbar e le tensioni tipiche necessarie ad innescare la scarica a bagliore sono inferiori a 1000 Volt.

Infine nell'immagine riportata sotto è possibile apprezzare una sezione della sorgente magnetron utilizzata in questo lavoro di tesi, in cui si vedono i componenti fondamentali del magnetron e la sua versatilità di utilizzo.

La sorgente in questione può funzionare sia in DC che in RF sostituendo facilmente la connessione elettrica posizionata nella zona posteriore dello strumento.



2.2: La tecnica Ion Beam

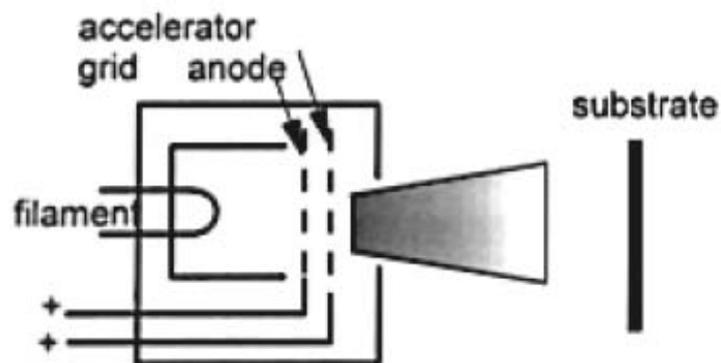
Le sorgenti a fascio ionico possono essere classificate in due tipologie a seconda che presentino o meno una griglia acceleratrice di ioni. Quelle che utilizzano la griglia vengono denominate gridded sorgenti di tipo Kaufman, mentre le altre sono dette gridless.

La sorgente Kaufman, riportata in figura, è costituita da una semplice camera di ionizzazione contenente il filamento emettitore di elettroni e due griglie a potenziale positivo grazie alle quali gli ioni vengono accelerati a formare il fascio ionico uscente.

Eventualmente, subito dopo l'estrattore, può essere presente un neutralizzatore del fascio costituito da un secondo filamento emettitore di elettroni che vanno a ricombinarsi con gli ioni del fascio.

La neutralizzazione del fascio è utile a limitare effetti di defocalizzazione o allargamento del fascio a causa della repulsione intrinseca degli ioni.

Gli svantaggi delle sorgenti gridded sono la necessità di sostituire ciclicamente la griglia a causa della loro normale usura e la necessità di utilizzare tre differenti alimentatori: uno per il filamento emettitore, uno per le griglie acceleratrici e l'ultimo per il filamento neutralizzatore.



Schematizzazione di una sorgente ion beam di tipo Kaufman

La sorgente gridless (Ion Gun) presenta alcune differenze strutturali dalla sorgente Kaufman precedentemente descritta.

La sorgente Ion Gun riportata in figura qui di seguito consta di tre unità fondamentali: un anodo (potenziale positivo) anulare in acciaio inox, un catodo (messo a terra) in ferro ARMCO e una bobina in rame.

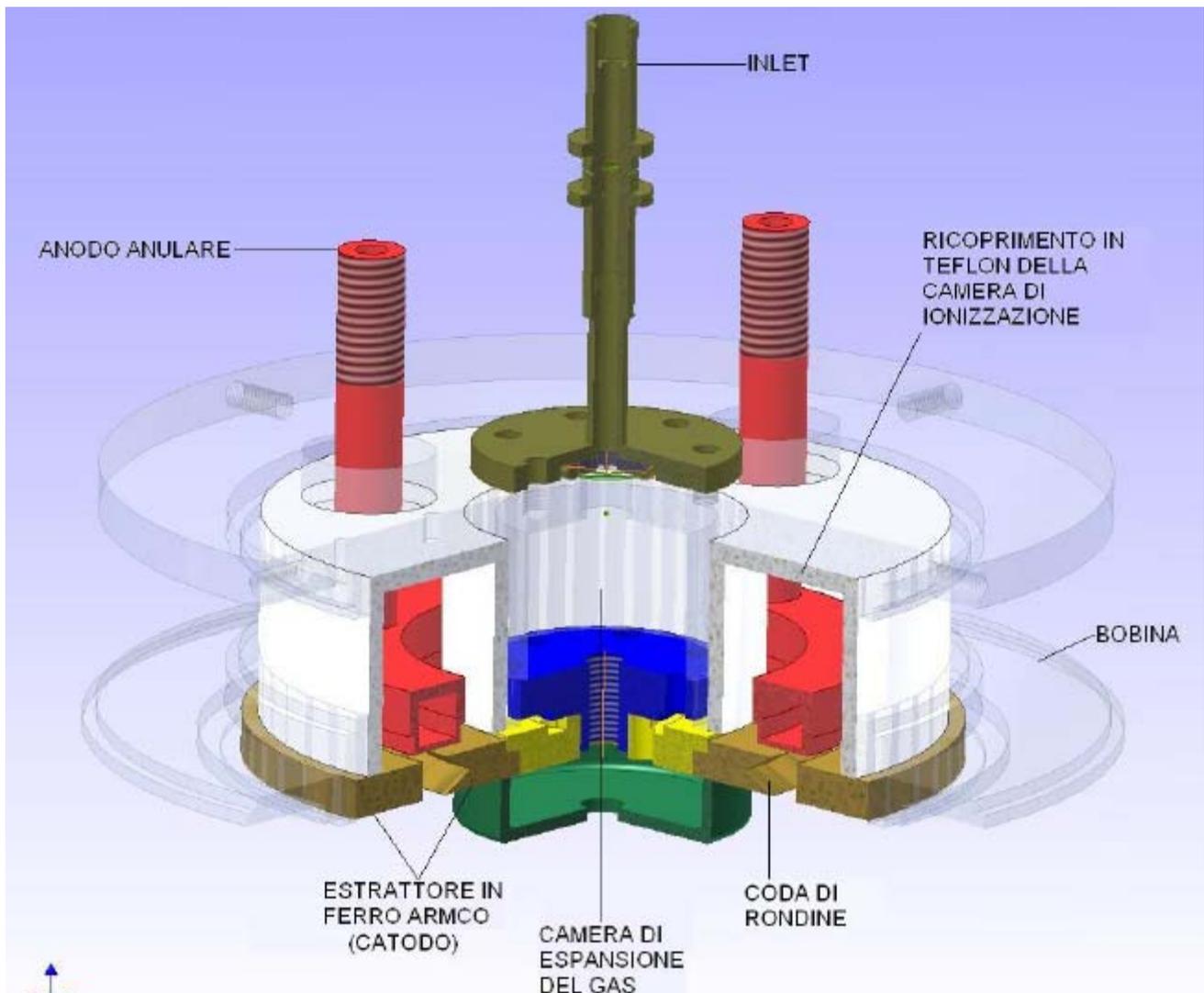
Differentemente dalla sorgente gridded, lo Ion Gun necessita di due soli alimentatori: uno per l'anodo che ha la funzione di innescare la scarica e di sparare gli ioni del fascio e uno per la bobina che ha la funzione di estrarre e focalizzare il fascio ionico. L'anodo viene inoltre raffreddato per evitare effetti di surriscaldamento dovuti al bombardamento elettronico.

Entrando più nel particolare, consideriamo una singola molecola di gas. Essa entra in movimento attraverso l'inlet per la differenza di pressione instauratasi tra il contenitore dove è raccolta e la camera da vuoto. Successivamente entra nella camera di espansione dell'idrocarburo che ha la funzione di stabilizzare la pressione dello stesso in modo da garantire un flusso costante di molecole nella camera di ionizzazione. A questo punto la molecola di gas entra nella camera di accensione rivestita in teflon, per evitare che il plasma si inneschi in zone indesiderate, infatti l'unica zona scoperta è quella del catodo e cioè l'estrattore in ferro ARMCO. La molecola a questo punto si trova in un campo elettrico molto intenso, dovuto alla differenza di potenziale tra l'anodo e il catodo. Gli elettroni liberi presenti attirati dall'anodo compiono il loro percorso formando orbite circolari a causa del campo magnetico generato dalla bobina e urtando altre molecole di gas le ionizza in un processo a cascata.

Lo ione positivo invece viene sparato all'esterno a causa della repulsione elettrostatica che ha per l'anodo e il suo percorso è pressoché rettilineo non risentendo del campo magnetico generato dalla bobina, gli ioni infatti sono troppo pesanti per essere deviati da campi dell'ordine delle centinaia di Gauss.

Per garantire una ionizzazione molto efficiente la sorgente Ion Gun prevede un estrattore magnetico a coda di rondine in ferro ARMCO, che per la sua specifica geometria intensifica le linee di campo nella zona di estrazione del fascio.

Riassumendo, se il potenziale applicato all'anodo determina la specie ionizzata e l'energia dello ione, il campo magnetico generato dalla bobina determina il grado di ionizzazione del fascio: infatti aumentando la corrente che passa nella bobina, e quindi il campo magnetico, l'elettrone compie orbite circolari più fitte ionizzando così più molecole di gas.

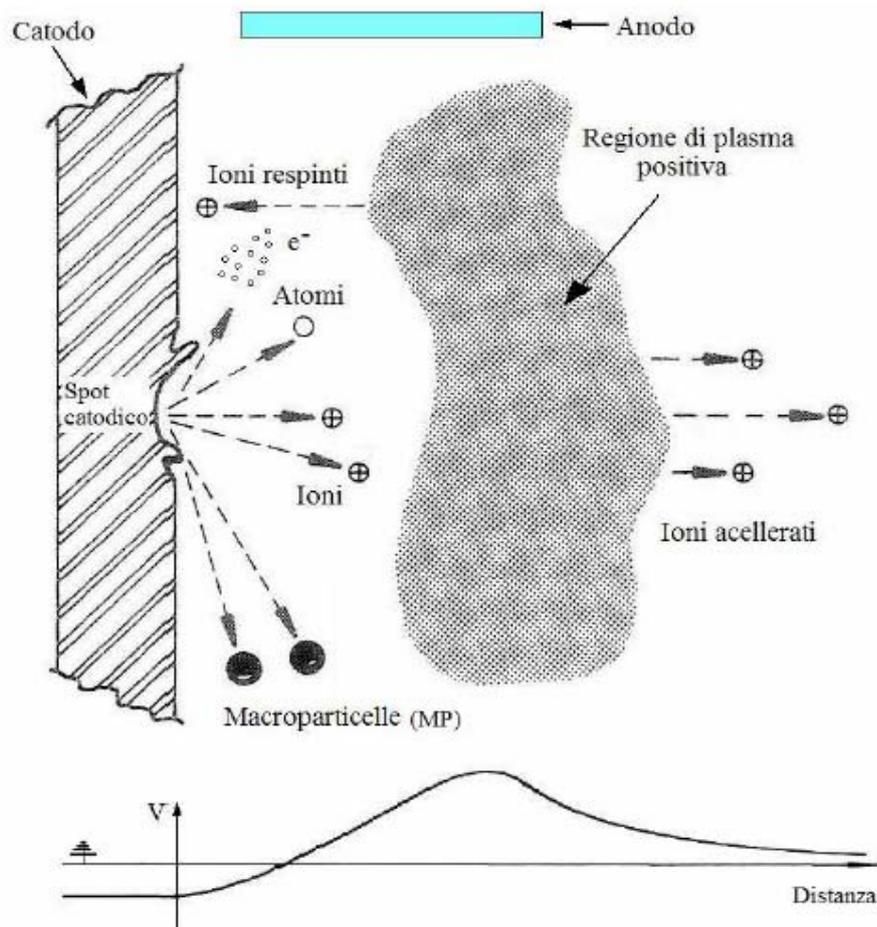


Sezione della sorgente Ion Gun

2.3: La tecnica Arco Catodico in vuoto

Questa tecnica consiste nell'innescare una scarica ad arco in vuoto tra un catodo (sorgente degli ioni) e le pareti della camera (anodo), mantenute a massa per ragioni di sicurezza.

Il flusso ionico della corrente di scarica, tipicamente dell'ordine di 50 - 100 A, si localizza su una regione molto piccola della superficie del catodo (alcuni micron quadrati) detta "spot catodico".



Schema delle emissioni provenienti dallo spot catodico e diagramma della distribuzione del potenziale in funzione della distanza dal catodo

All'interno dello spot si realizzano pertanto densità di corrente dell'ordine del milione di Ampère al millimetro quadrato.

Gli ioni hanno una profondità di penetrazione nel materiale del catodo molto modesta e dissipano pertanto tutta la loro energia in un volume estremamente ridotto intorno allo spot.

L'elevatissima densità di corrente che si realizza all'interno di questo piccolo volume causa una intensa evaporazione unita a ionizzazione del materiale in esso contenuto.

Per questo motivo i rate di deposizione sui substrati sono per questa tecnica molto più alti rispetto alle altre tecniche PVD.

La temperatura dello spot è stata stimata dell'ordine dei 7000 K e la ionizzazione media dei vapori è molto elevata.

Una conseguenza di questa localizzazione della scarica su un'area molto piccola è che il catodo nel suo complesso rimane ben al di sotto della propria temperatura di fusione.

Lo spot si muove molto rapidamente sulla superficie del catodo, erodendolo in maniera abbastanza uniforme e consentendo un adeguato sfruttamento del materiale che lo costituisce.

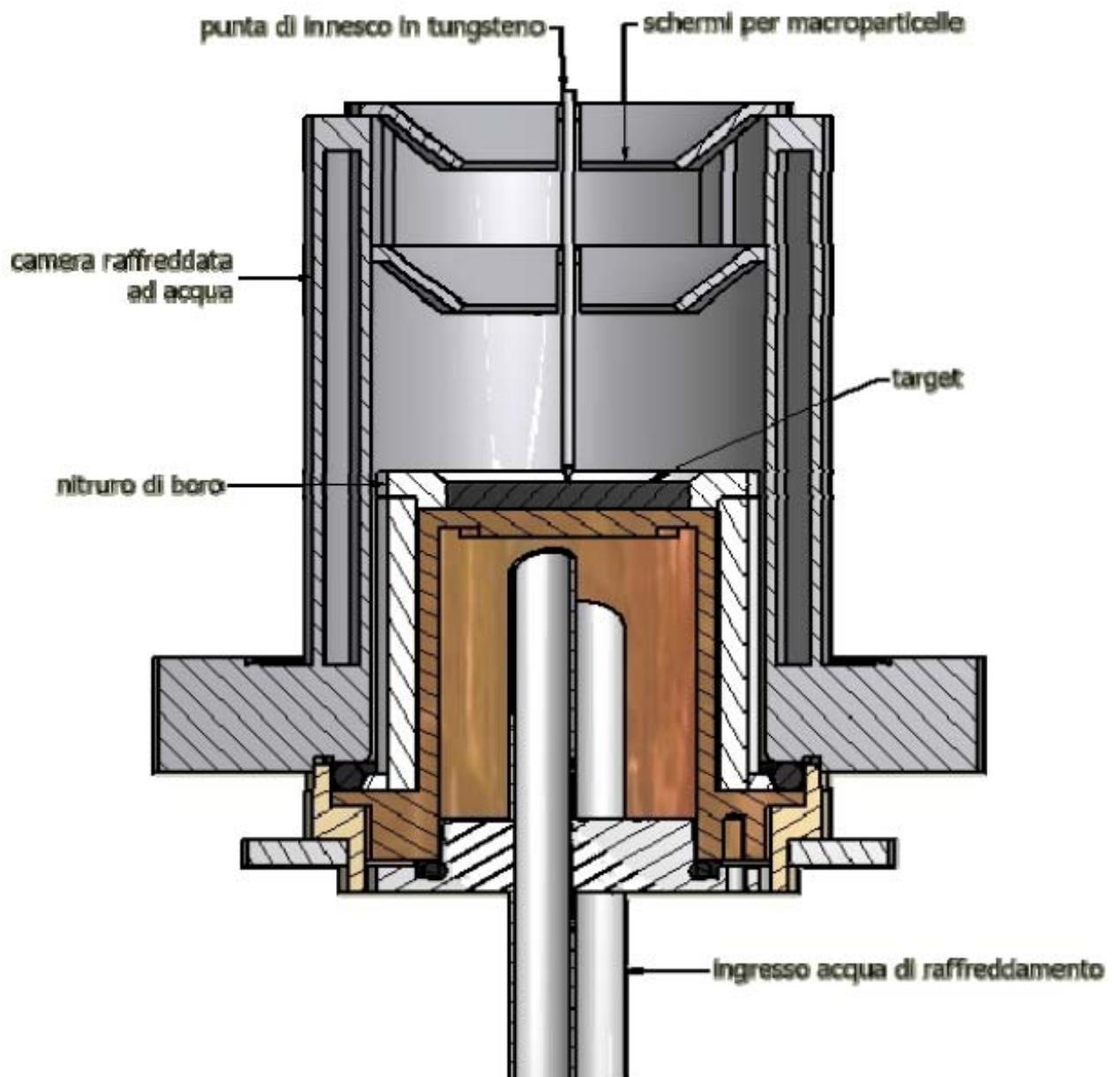
Il rapido moto dello spot è probabilmente dovuto al fatto che, nella regione dello spot, il materiale si scalda notevolmente aumentando la propria resistività; la scarica cerca quindi spontaneamente un cammino a resistività minore, spostandosi su zone adiacenti a temperatura inferiore.

I substrati da rivestire vengono mantenuti a tensione negativa ed attirano pertanto i vapori ionizzati, accelerandoli e realizzando così condizioni di intenso bombardamento ionico.

L'effetto di "richiamo" esercitato dai substrati polarizzati nei confronti dei vapori ionizzati è così intenso da consentire inoltre un efficace rivestimento anche di aree non direttamente affacciate alla sorgente ionica.

Il problema principale di questa tecnica PVD è la formazione di macroparticelle dovute all'innalzamento locale della temperatura nella zona dello spot catodico.

Queste macroparticelle vanno a inficiare le proprietà fisiche del film sottile per cui si sono messe a punto diverse tecniche di "purificazione" del plasma che vengono identificate con il nome di filtri per arco catodico.



Sezione della sorgente ad arco catodico

2.4 La tecnica Pulsed Electron Deposition (PED)

La deposizione da elettroni pulsati (PED, Pulsed Electron Deposition) è una tecnica proprietaria di deposizione della famiglia PVD di tipo fisico per la realizzazione di strati sottili di materiali conduttivi e dielettrici (spessore compreso tra qualche decimo e qualche decina di micron). Tale tecnica si basa sulla generazione di un fascio pulsato di elettroni ad alta energia (1-25 keV), e la successiva collimazione di quest'ultimo verso un materiale target multi-elementale con una determinata stechiometria.

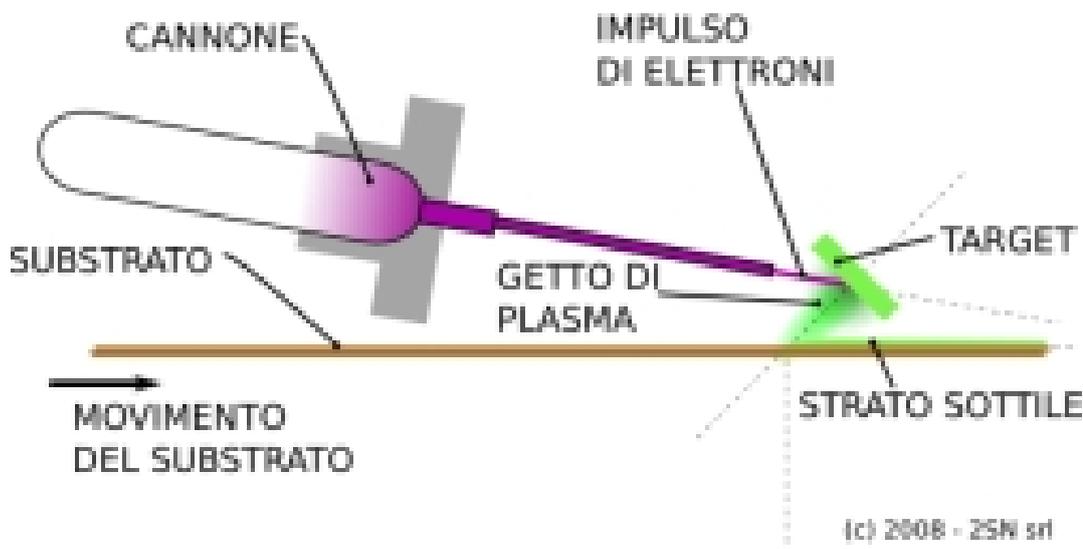
L'interazione tra il fascio e il target dà origine all'evaporazione del materiale dal target verso un substrato posto parallelamente alla superficie del target stesso ad alcuni centimetri di distanza. La stechiometria del target si trasferisce completamente nei vapori prodotti solo se questi ultimi sono prodotti in condizioni lontane dall'equilibrio termodinamico. Questa condizione si ottiene se il transiente di riscaldamento prodotto sulla superficie del materiale target dall'interazione con il fascio elettronico è il più alto possibile. Il transiente termico superficiale dipende dalla potenza del fascio elettronico, quindi dal voltaggio di estrazione e dalla corrente elettronica.

Questa dipendenza è lineare nel caso di target conduttivi, mentre nel caso dei dielettrici il transiente raggiunge un valore massimo per un dato valore di corrente. Il trovato consiste in un metodo ed un'apparecchiatura per misurare in situ la corrente di fascio, consentendo di massimizzare il processo di ablazione e di aumentare la riproducibilità dell'interazione tra elettroni e target, quindi della stechiometria del film.

Il trovato è originale e innovativo, in quanto introduce un nuovo sistema non distruttivo di diagnostica in situ del processo di deposizione di film sottili ad elettroni pulsati (PED), conosciuto anche come PPD (Pulsed Plasma Deposition) o CSA (Channel Spark Ablation).

I vantaggi del metodo diagnostico ideato sono: 1) non influisce sul processo di deposizione, e 2) consente di conoscere in tempo reale la corrente del fascio, 3) dando la possibilità di controllare tutte le grandezze connesse con quest'ultima (velocità di deposizione, area di deposizione, energia del materiale evaporato, etc.), 4) migliorando così la riproducibilità del processo.

L'apparecchiatura descritta si presta per essere utilizzata anche nel campo del settore della fisica dei materiali, in particolare nel campo della crescita di materiali per applicazioni in elettronica, sensoristica, magnetismo e fotovoltaico, in presenza di una tecnica di deposizione di film sottili basata sull'utilizzo di fasci elettronici.



Schema di un sistema di deposizione PPD

I materiali cresciuti con questa tecnica presentano eccellenti caratteristiche di compattezza, uniformità e composizione che non sono ottenibili con altri processi utilizzati nella produzione di film industriali.

La PPD permette inoltre di depositare film potenzialmente su qualsiasi materiale, è adatta ad essere applicata su grandi superfici, ha un'ottima velocità di deposizione e produce film cristallini anche su substrati con struttura non ordinata (vetro, plastica). Di seguito le principali caratteristiche:

Velocità - La PPD ha un'alta produttività, da dieci a cento volte superiore alle tecniche convenzionali. Questo permette di utilizzare impianti più ridotti, riducendo gli investimenti ed il costo del prodotto finito. Ad esempio la deposizione di uno strato finestra in CdS, tipicamente utilizzato nei moduli a film sottile viene depositato per mezzo della PPD oltre 10 volte più velocemente che mediante tecnica chimica CBD e senza la necessità della gestione dei reflui pericolosi che quest'ultima tecnica comporta.

Semplicità - La PPD è una tecnica che utilizza componenti poco costosi ed ha un grande potenziale in termini di riduzione dei costi di ammortamento degli impianti che oggi rappresentano una delle principali voci di costo di pannelli solari a film sottile.

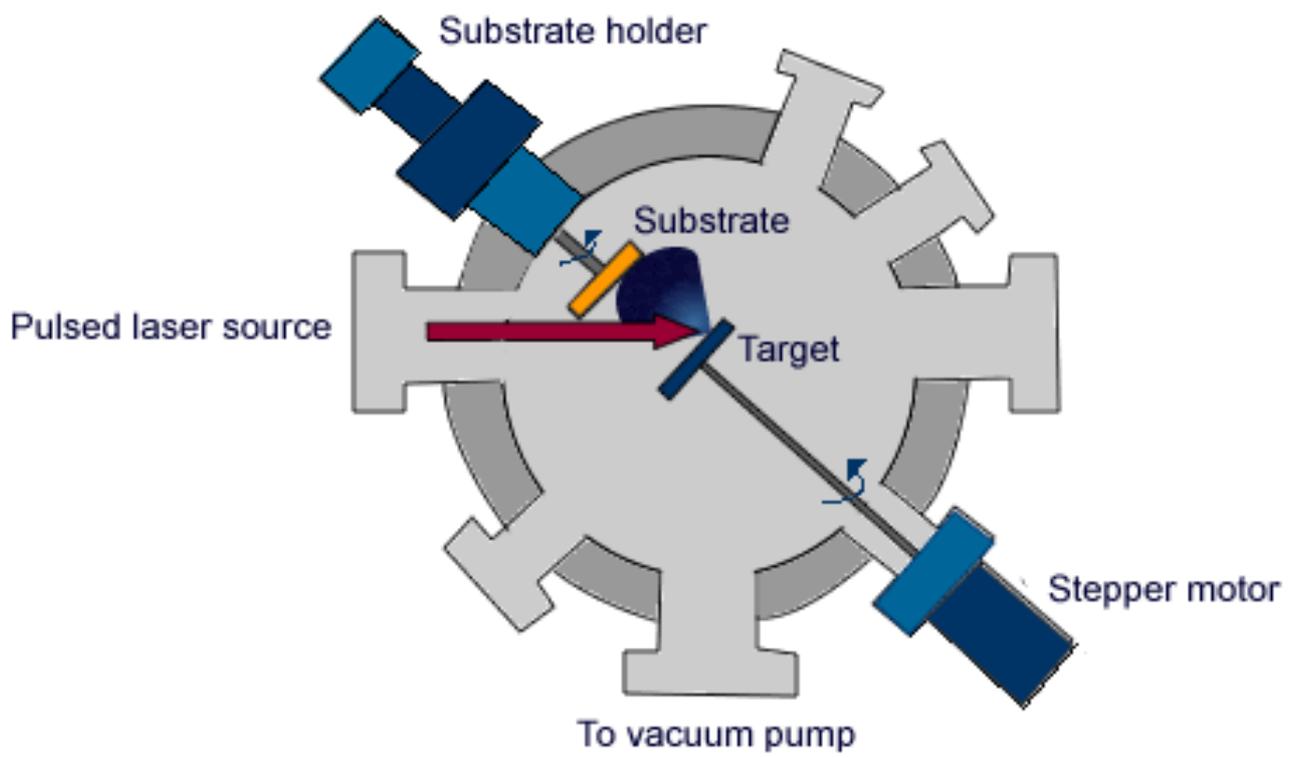
Bassa temperatura - La PPD produce film di qualità senza la necessità di utilizzare alte temperature. Uno strato in CdTe può infatti essere depositato ad una temperatura molto inferiore (circa 200°C) rispetto alle tecniche CSS e VTD, oggi maggiormente diffuse in ambito industriale. La riduzione della temperatura riduce drasticamente i costi di energia dell'impianto.

Controllo e resa - La PPD permette di mantenere un ottimo controllo sulle qualità dei film depositati incrementando la resa dei processi e riducendo il numero dei prodotti difettosi. L'approccio multi-sorgente della PPD permette di ottenere una retroazione controllata in diverse regioni del supporto abilitando quindi un controllo fine delle caratteristiche morfologiche del film anche su grandi superfici.

La modifica superficiale dei comuni materiali impiantabili rappresenta una strategia vincente quando si vuole aggiungere funzionalità a un materiale senza variarne le ottimali proprietà bulk.

Nel Laboratorio NaBi vengono studiati nuovi ricoprimenti nanostrutturati per tre scopi principali:

- **Antibatterici:** in grado di disincentivare l'adesione e proliferazione batterica. A tale scopo sono studiati ricoprimenti nanostrutturati a base di Zirconia/Argento e ricoprimenti di idrossiapatite magnetica;
- **Antiusura:** diminuire l'usura degli impianti protesici, depositando film duri a base di Zirconia e Zirconia/Allumina e a basso attrito sia sulle componenti plastiche che metalliche di un impianto;
- **Biomimetici:** aumentare la capacità del dispositivo di integrarsi con il tessuto osseo circostante (osteointegrazione) in breve tempo, contribuendo alla stabilità primaria e secondaria degli impianti. A tal fine sono allo studio ricoprimenti a base di calcio fosfato biomimetici simili all'apatite biologica dell'osso, ricoprimenti in grado di riequilibrare l'equilibrio tra l'attività degli osteoblasti (deposizione di tessuto osseo) e degli osteoclasti (riassorbimento di tessuto osseo), compromesso nei soggetti osteoporotici.



Sistema di Deposizione al Plasma Pulsato

3. Il Progetto

Mentre per normali provini da test meccanici è sufficiente, durante la deposizione, un altrettanto semplice cinematismo (generalmente si sfrutta il meccanismo rotatorio di default del porta campione), per devices dalla geometria complessa di cui si voglia ricoprire la superficie non è così.

È necessario, allora, sviluppare un sistema di movimentazione adatto ad ogni superficie complessa che ne permetta l'omogeneo e lineare ricoprimento in maniera più semplice e meno costosa possibile.

Il mio lavoro di tesi si sviluppa su tre punti fondamentali:

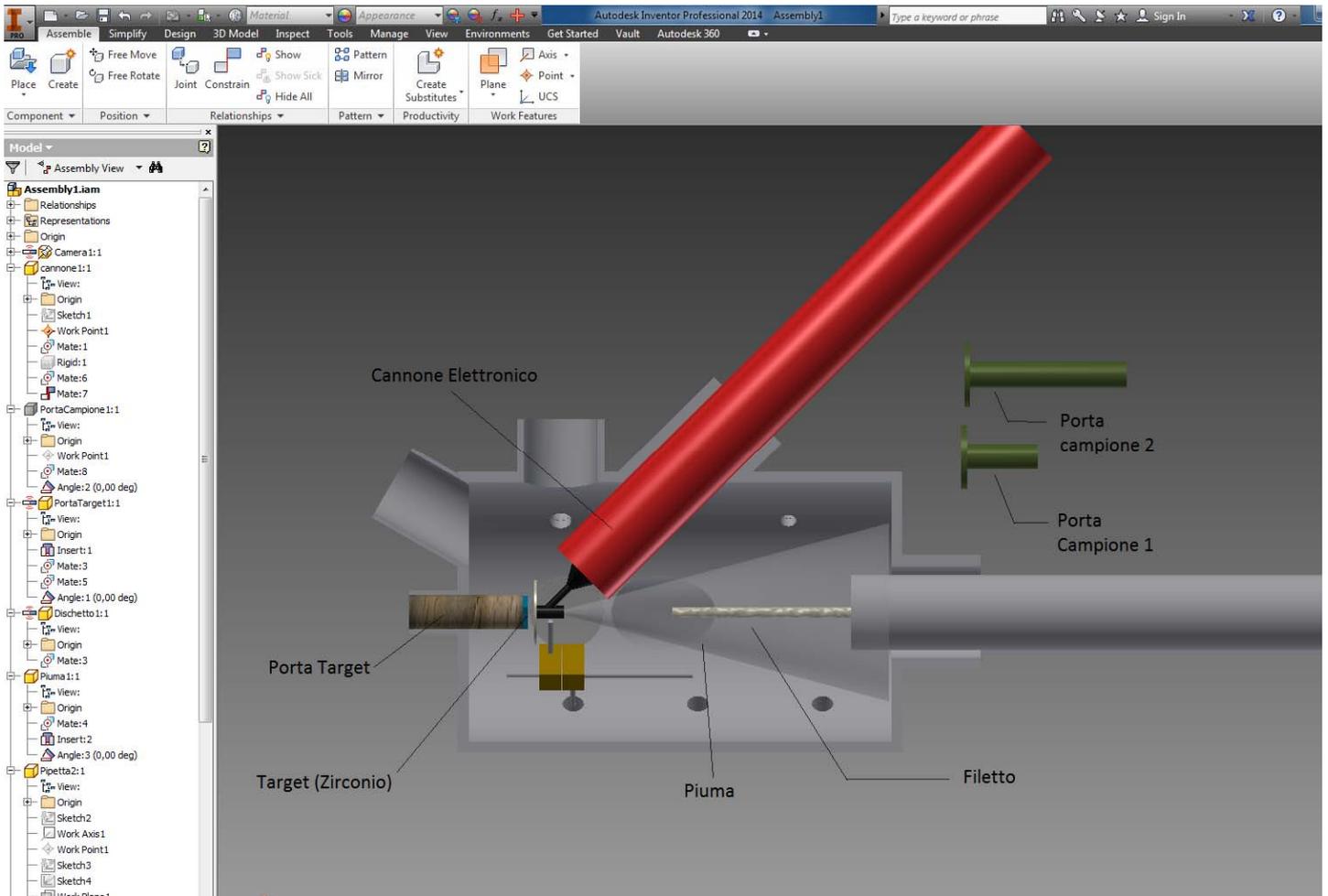
- A) Progettazione di un cinematismo ottimale per la movimentazione di viti da impianto;

- B) Progettazione di un cinematismo ottimale per la movimentazione di un catetere;

- C) Progettazione di un cinematismo ottimale per la movimentazione di una coppa d'anca.

Poiché per ragioni logistiche e costruttive la camera di deposizione non può essere aperta e richiusa spesso, innanzitutto è bene rendersi conto di quella che è la situazione al suo interno; per far ciò ho ricreato grazie al CAD 3D un fotogramma che esemplifica ciò che avviene durante il funzionamento della stessa.

Questo Assembly verrà poi utilizzato come vera e propria sostituzione simulativa della camera reale.



Assembly di simulazione del sistema di deposizione PPD (in sezione) con i suoi componenti

Si possono notare i componenti principali (e quindi i principali ingombri) all'interno:

- IL PORTA TARGET sul quale è attaccata la Zirconia (ZrO_2): è collegato ad un motorino elettrico il quale permette al materiale target di ruotare uniformemente e di essere dunque vaporizzato omogeneamente;
- IL FILETTO (M12): collegato solidalmente ad un motore a corrente continua per mezzo di una cinghia, trasferisce il movimento rotatorio al porta campione che vi viene avvitato sopra;
- LA “PIUMA” conica di materiale vaporizzato (Plasma) a seguito del bombardamento elettronico che va a depositarsi sul campione;
- IL CANNONE A FASCIO ELETTRONICO di cui si è già parlato in precedenza.

Progettazione di un cinematismo ottimale per la movimentazione di viti da impianto

Il target dello studio di tale movimentazione sono viti da impianto ortopediche M3 x 8mm testa piana a V cava esagonale TiTPSEIM3x8.

Come si può ben notare anche dalla figura questi oggetti risultano alquanto problematici qualora si voglia ricoprirne omogeneamente la superficie tramite la tecnica PVD a causa della loro naturale irregolarità (filetti inclinati, spallamenti, gole, etc...).

È chiaro che utilizzare esclusivamente un semplice cinematismo di tipo rotatorio (che sia verticale o inclinato) è escluso.



Viti TiTPSEIM3x8

Si vuole allora fare in modo che la superficie cilindrica della singola vite sia rivolta perpendicolarmente al fascio di materiale vaporizzato (“piuma”) e che essa venga esposta interamente a tale fascio: unire, cioè, un movimento rotatorio della vite con asse perpendicolare all’asse del porta campione (e quindi del filetto) ad un movimento rotatorio attorno all’asse della vite stessa.

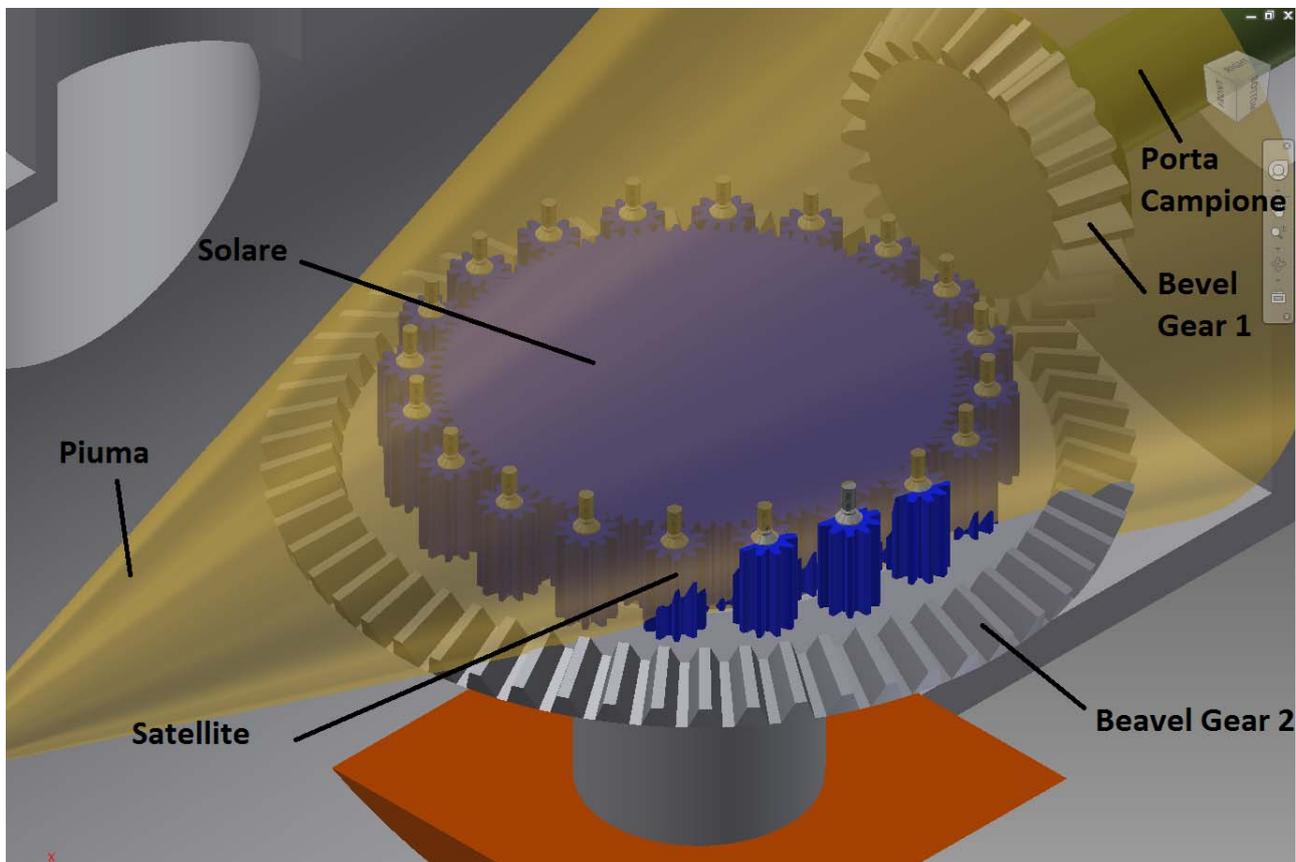
In tal modo si ottiene un cinematismo ottimale per l’omogeneo rivestimento del pezzo.

L’idea è quella di dimensionare un rotismo ibrido (un rotismo a ruote dentate coniche più un rotismo epicicloidale): attraverso un ingranaggio a ruote coniche viene trasmesso il moto rotatorio del motore

ad un asse ad esso perpendicolare, movimentando una ruota conica secondaria collegata a degli ingranaggi satelliti che ingranano con un solare centrale, fisso: una prima ruota conica (Bevel Gear 1), solidale al porta campioni, e quindi al motore, trasferisce il moto rotatorio ad una seconda ruota conica (Bevel Gear 2) perpendicolare alla prima.

Questa, su cui vengono aperti un grande foro centrale passante e altri venti più piccoli filettati, fa ruotare solidalmente 20 ingranaggi “satelliti” (sui quali vengono fissate altrettante viti) che ingranano su un più grande solare centrale, fisso.

Attraverso l'utilizzo di perni cilindrici, filettati nella metà inferiore ma lisci in quella superiore, che vengono avvitati sulla Bevel Gear 2 e incastrati nell'ingranaggio satellite, si riesce a fare in modo che ogni singola vite abbia una composizione di moti rotatori.



Simulazione del cinematismo per la movimentazione di 20 viti

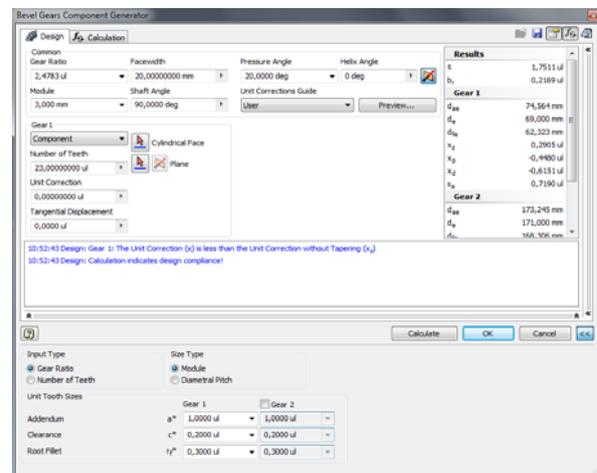
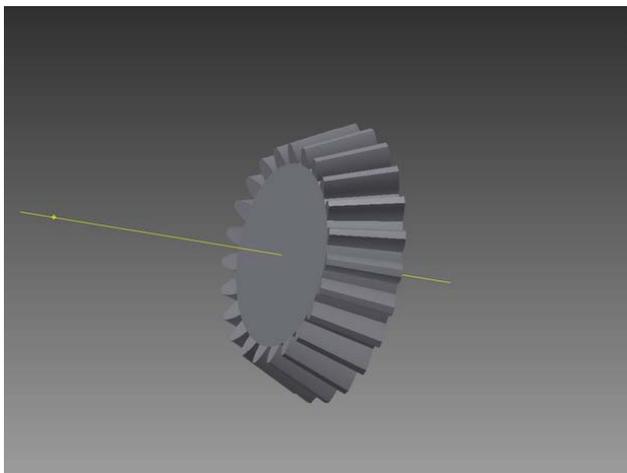
Quindi il moto rotatorio della Bevel Gear 2 permette di movimentare i venti ingranaggi SATELLITI i quali ingranano, come detto precedentemente, con l'ingranaggio SOLARE, rendendo possibile l'idea della combinazione dei due moti rotatori principali del cinematismo.

Una volta capito il movimento generale entriamo più nel dettaglio analizzando ogni singolo componente.

LE RUOTE CONICHE

Sono due (Bevel Gear 1 e Bevel Gear 2) e servono per trasmettere il moto rotatorio del porta campioni, parallelo e coincidente con l'asse della camera di deposizione, ad un asse a questo perpendicolare:

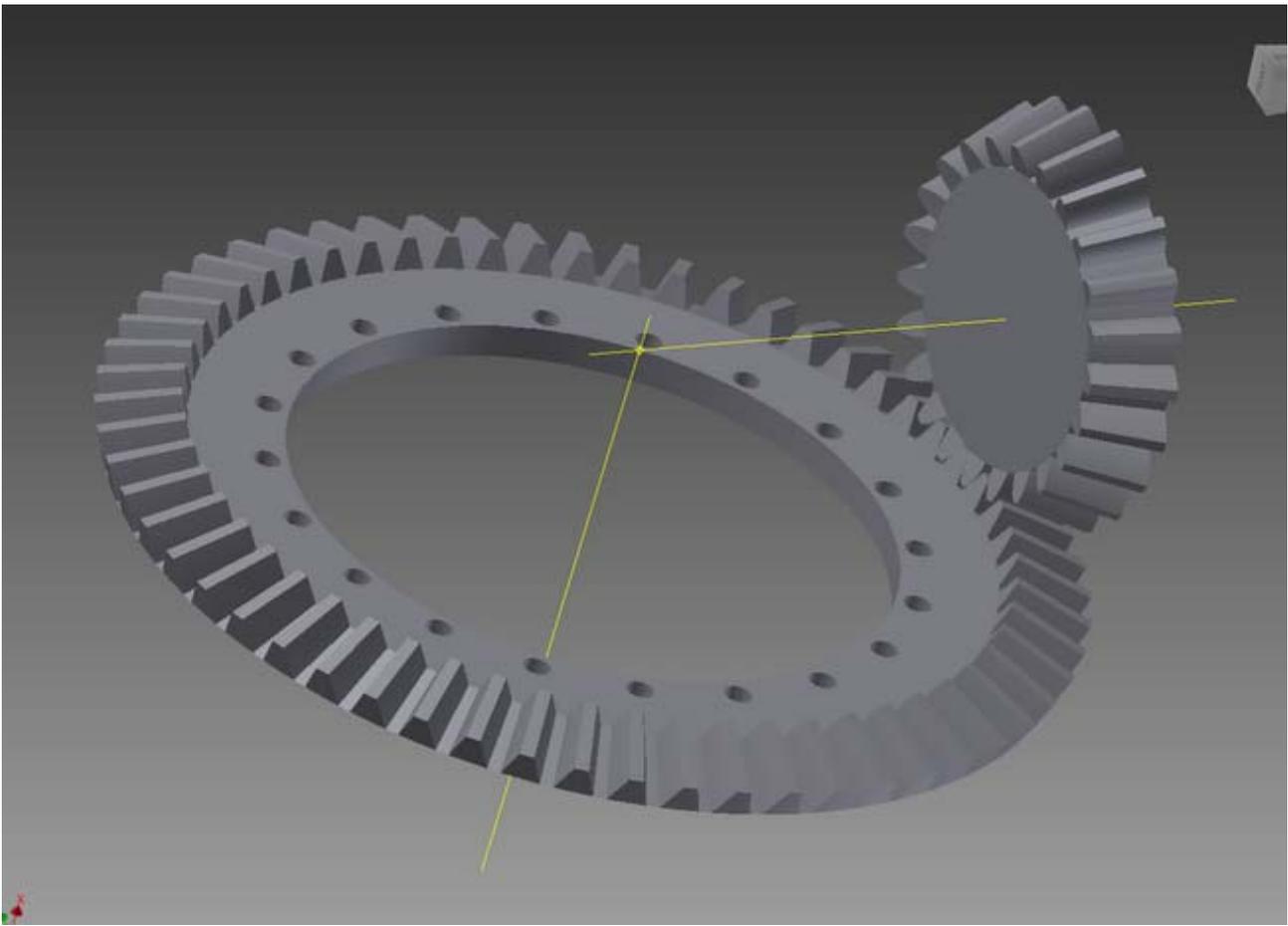
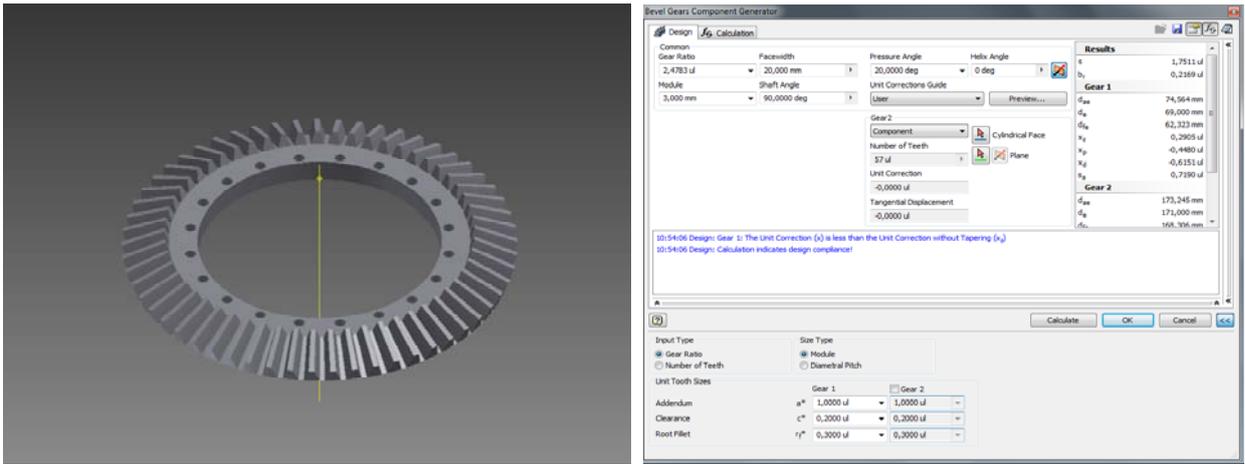
- Bevel Gear 1: viene fissata al porta campioni e le sue specifiche di progetto sono riportate nella figura di cui sotto.



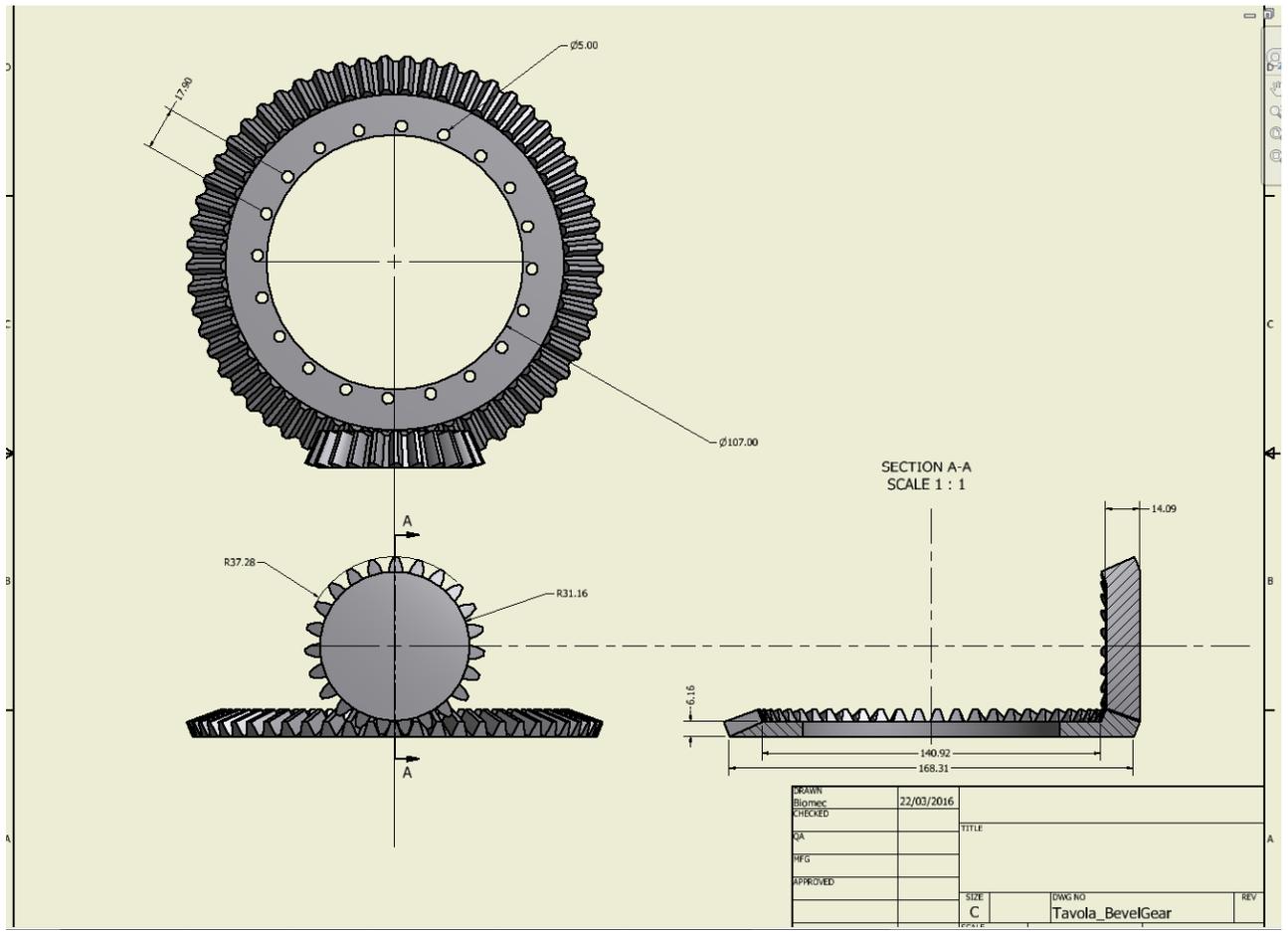
- Bevel Gear 2: vengono ricavati un foro passante centrale grande poco più del SOLARE e 20 altri fori filettati passanti in cui verranno avvitati i rispettivi perni.

Le sue specifiche di progetto vengono riportate nelle figure sottostanti.

Viene fissata attraverso un'asta (di cui si parlerà in seguito) che le permetta la rotazione lungo il suo asse ma nessun altro movimento.

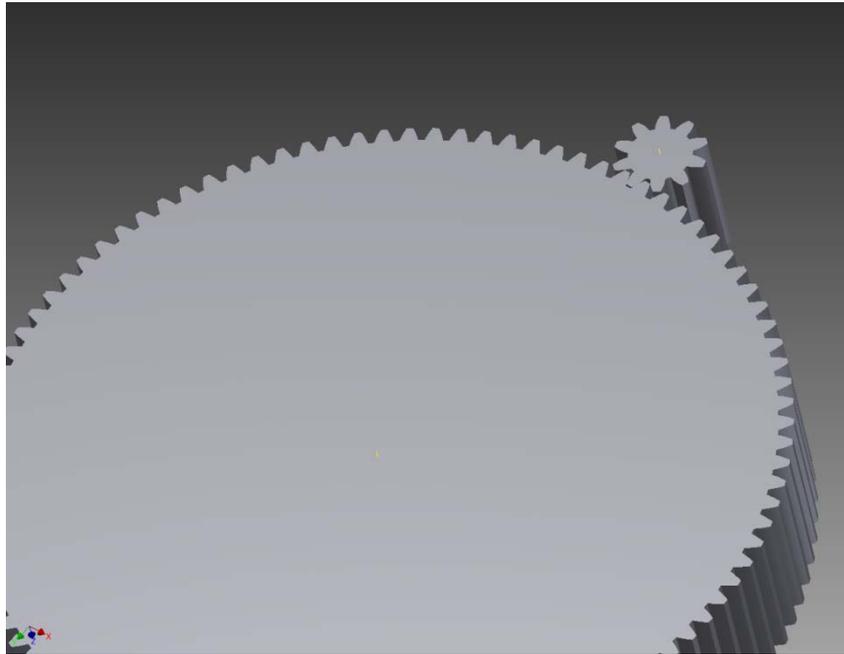


Gruppo rotativo delle ruote coniche



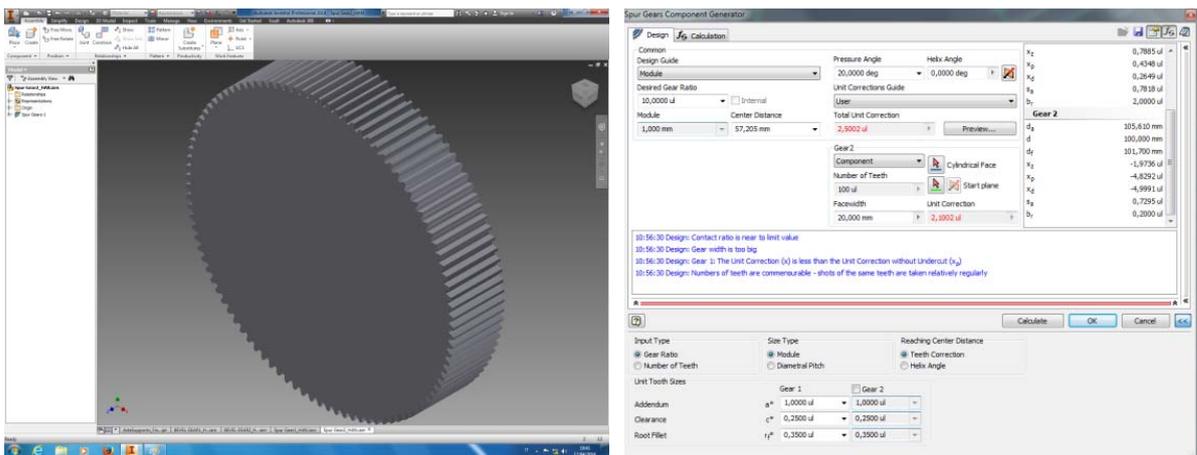
Specifiche di progetto dell'Assembly del gruppo Ruote Coniche

RUOTE CILINDRICHE



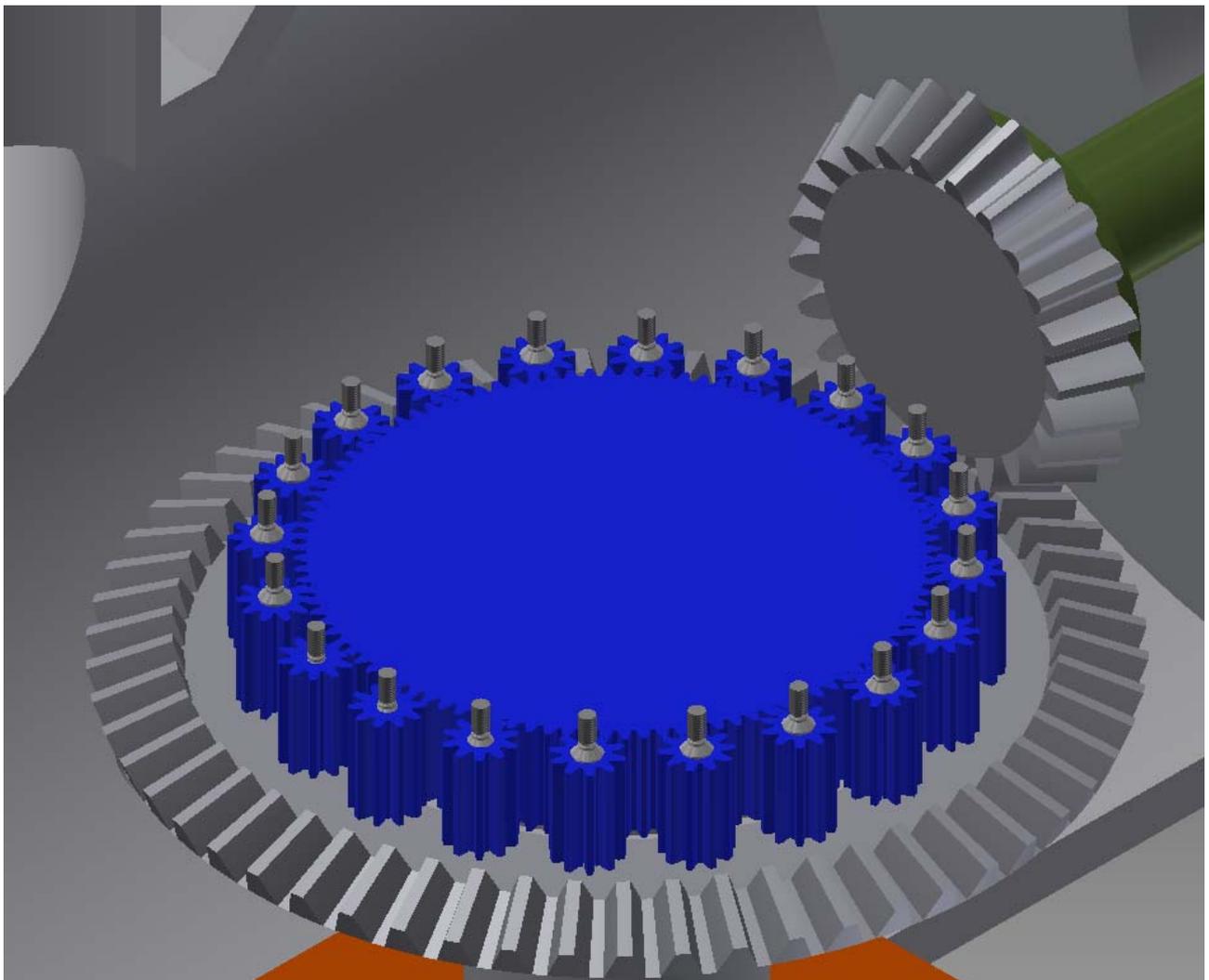
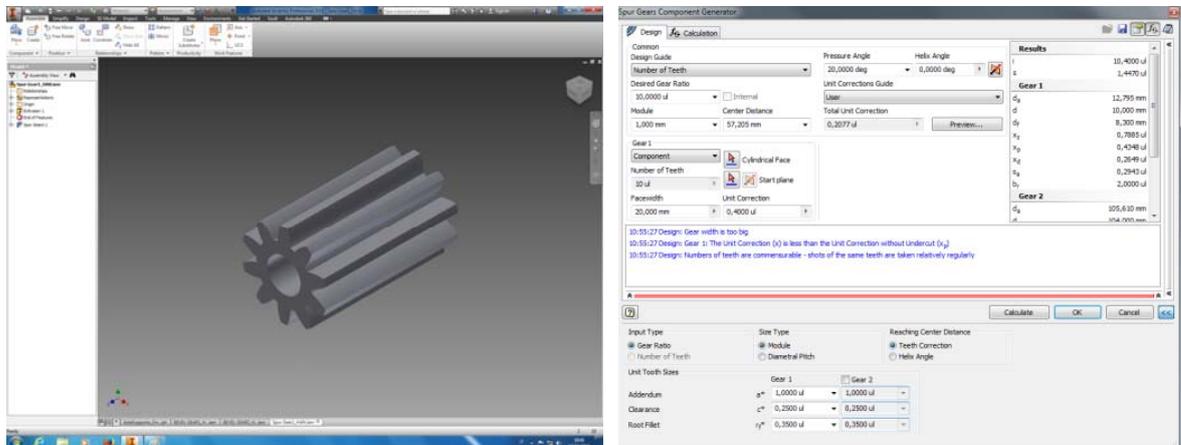
Sono di due tipologie:

- **RUOTA SOLARE** fissata all'asta di supporto: ruota cilindrica a denti dritti che non deve muoversi. Le sue specifiche sono riportate di seguito.



- **RUOTA SATELLITE**: viene resa solidale alla Bevel Gear 2 attraverso il perno di giunzione avvitato in uno dei venti fori filettati di quest'ultima. È libera di ruotare attorno al suo asse grazie alla parte liscia e non filettata del perno che s'impegna in un foro liscio e non passante ricavato nella ruota dentata. Ingrana col solare per acquisire moto rotatorio attorno al proprio

asse mentre contemporaneamente ruota con velocità angolare uguale a quella della Bevel Gear 2 (su di essa è fissata la vite da ricoprire). Le specifiche di progetto sono riportate di seguito.

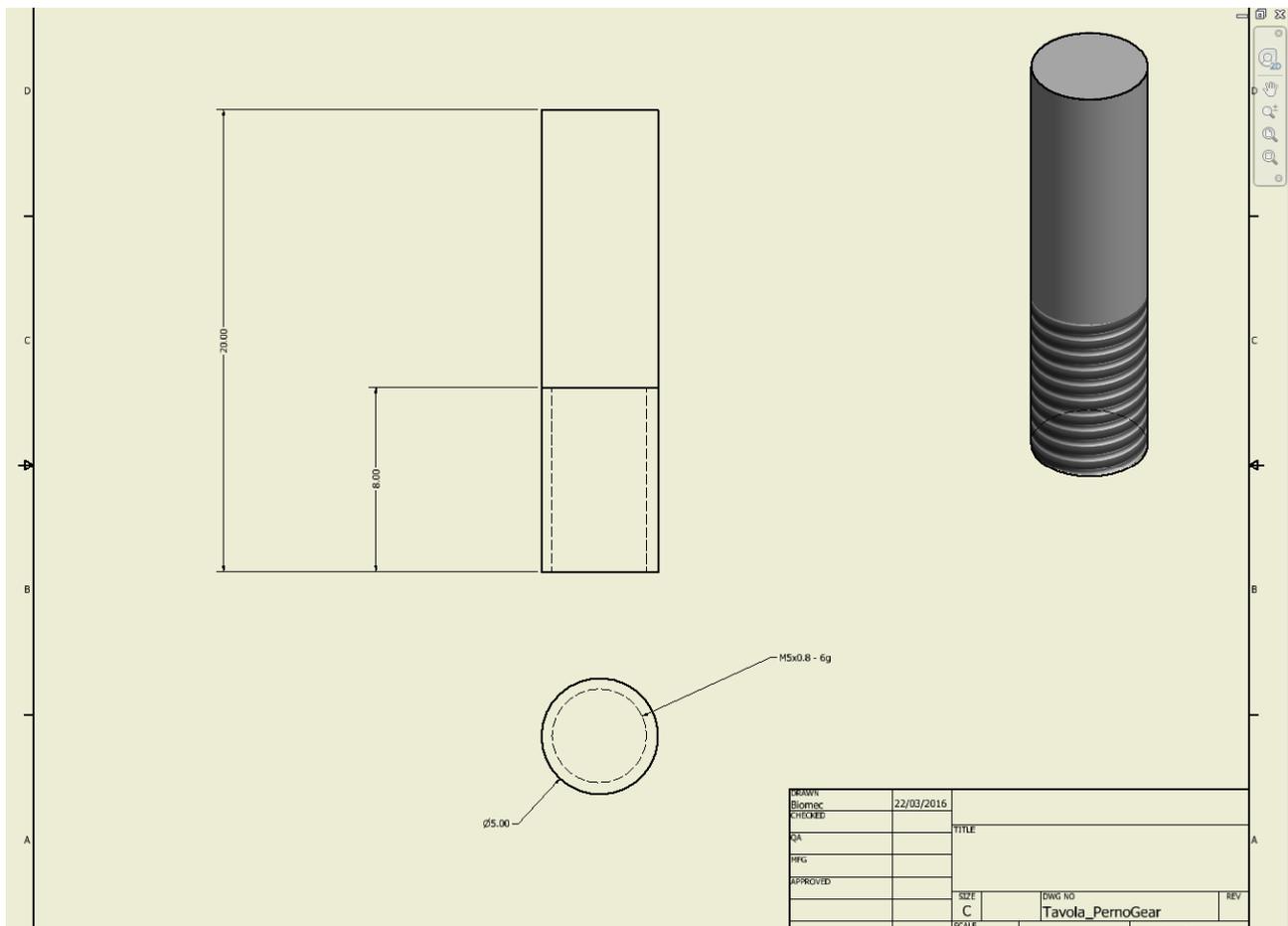


Assieme dei due gruppi di ruote dentate in camera di deposizione con le viti fissate sui satelliti

Di conseguenza all'ingombro geometrico della Bevel Gear 2 all'interno della camera di deposizione e all'ingombro delle ruote satellite sulla ruota conica che li supporta, si è scelto di non superare il numero limite di 20 ruote dentate satellite e, quindi, di un numero massimo di 20 viti per ciclo di deposizione (il quale è un ottimo risultato dal momento che il laboratorio si occupa di test su campioni sotto richiesta di terzi e non di deposizioni intensive ad un livello industriale).

PERNI DI GIUNZIONE

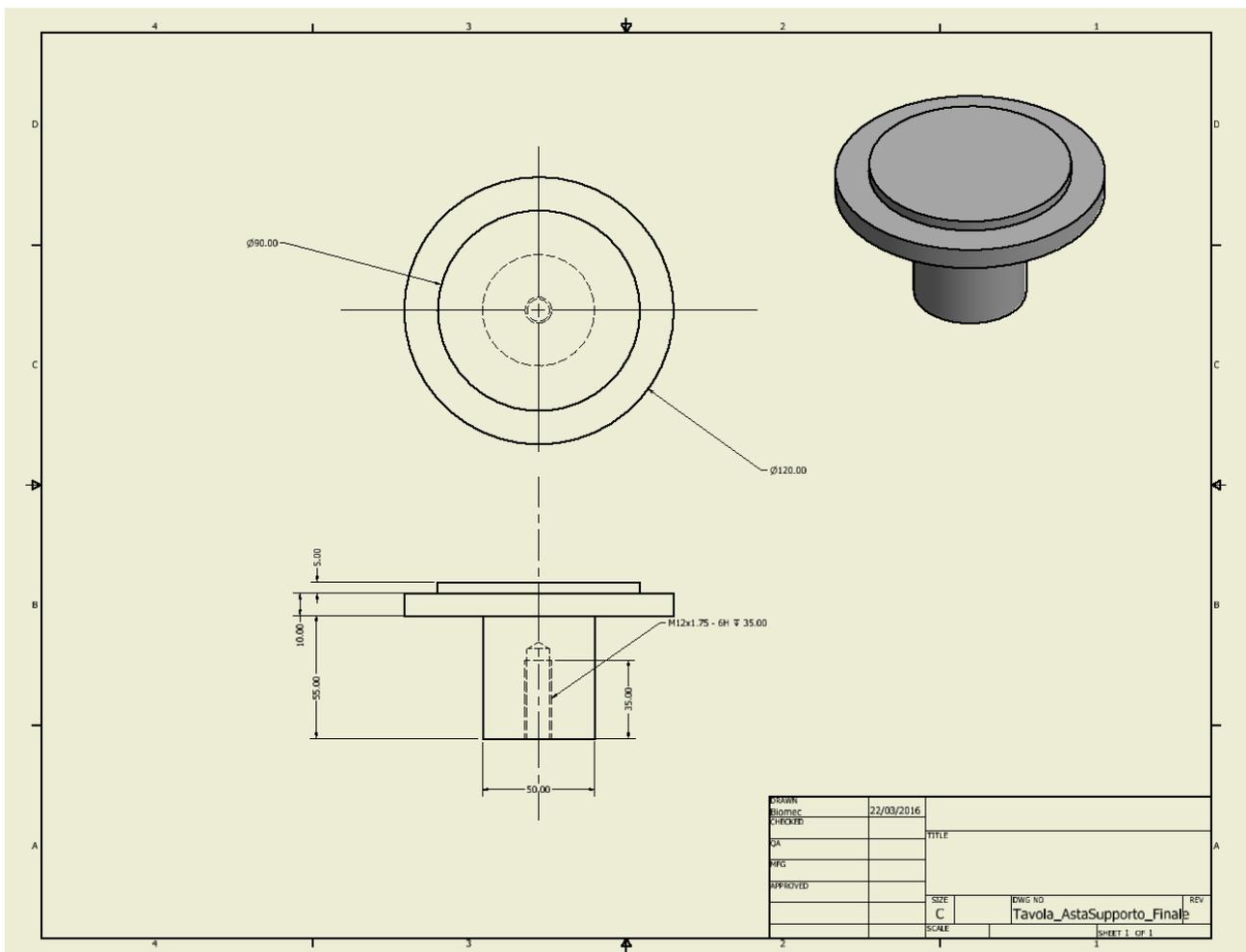
Per metà filettati e per metà lisci, vengono avvitati nella parte inferiore nella grande ruota conica e nella parte superiore si impegnano nel foro della ruota dentata satellite, come già spiegato in precedenza.



Perno di giunzione

ASTA DI SUPPORTO

Per sostenere la Bevel Gear 2 permettendole il moto rotatorio attorno al suo asse e, contemporaneamente, sostenere la ruota dentata Solare in posizione fissa, si è pensato di costruire un semplice pezzo cilindrico con tre diametri principali e un foro filettato alla base.



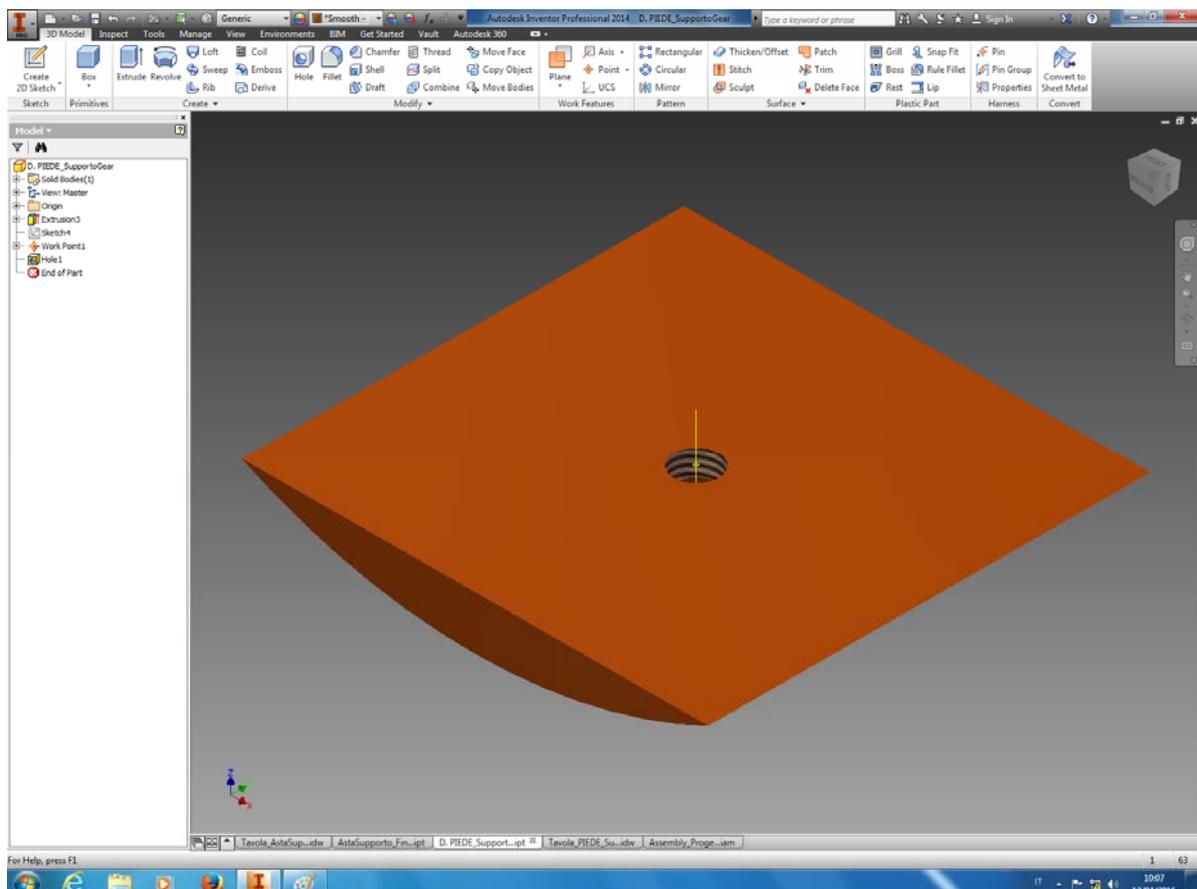
Il foro filettato permette la regolazione in altezza del gruppo cinematico qualora si desiderasse una posizione diversa da quella coassiale alla camera di deposizione.

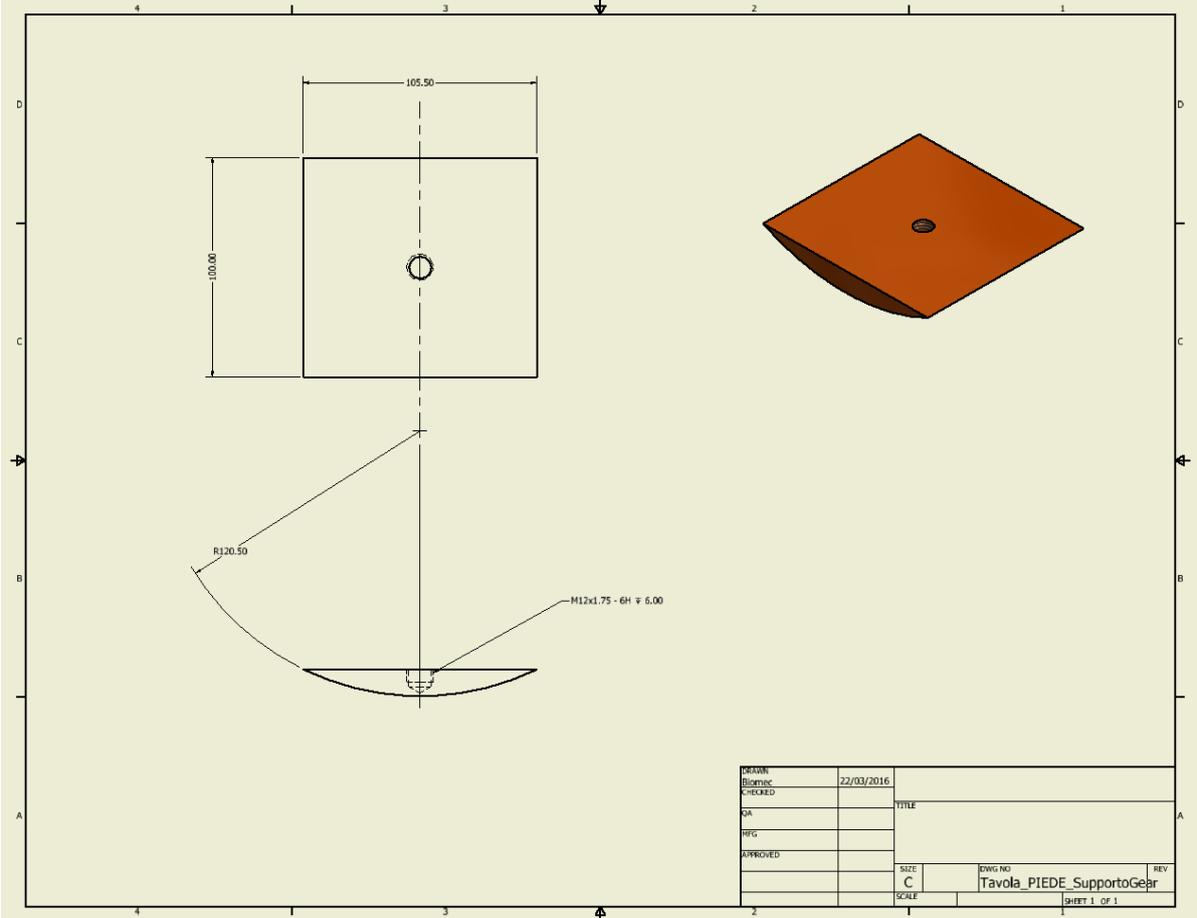
Il pezzo è realizzato al tornio in alluminio così da garantire il minimo attrito tra la Bevel Gear 2 e la superficie su cui striscerà (superficie dal diametro maggiore).

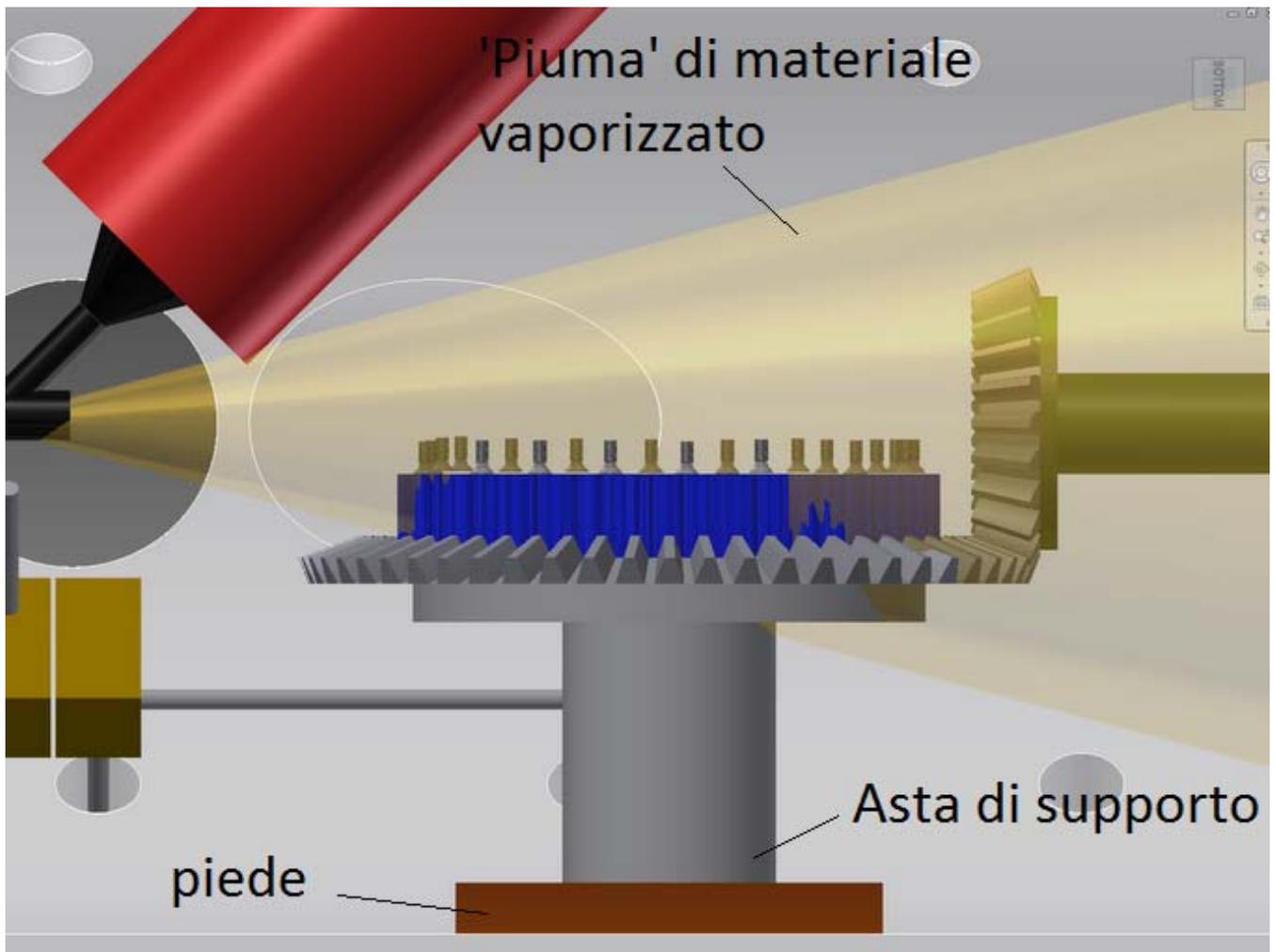
PIEDE DI SUPPORTO

Qualora si desiderasse, invece, uno spostamento trasversale lungo l'asse della camera, si è pensato di appoggiare il tutto su un basamento la cui superficie inferiore è curvata con un raggio di curvatura coincidente con il raggio della camera e le due superfici curve vengono temporaneamente unite: in tal modo il gruppo appoggia saldamente alla camera senza bisogno di saldature e, eventualmente, è possibile spostare il gruppo cinematico più lontano o più vicino al fondo camera.

Tale pezzo presenta un foro filettato di modo da collegarsi con il pezzo "Asta Di Supporto" e consentendo, dunque, la regolazione verticale.





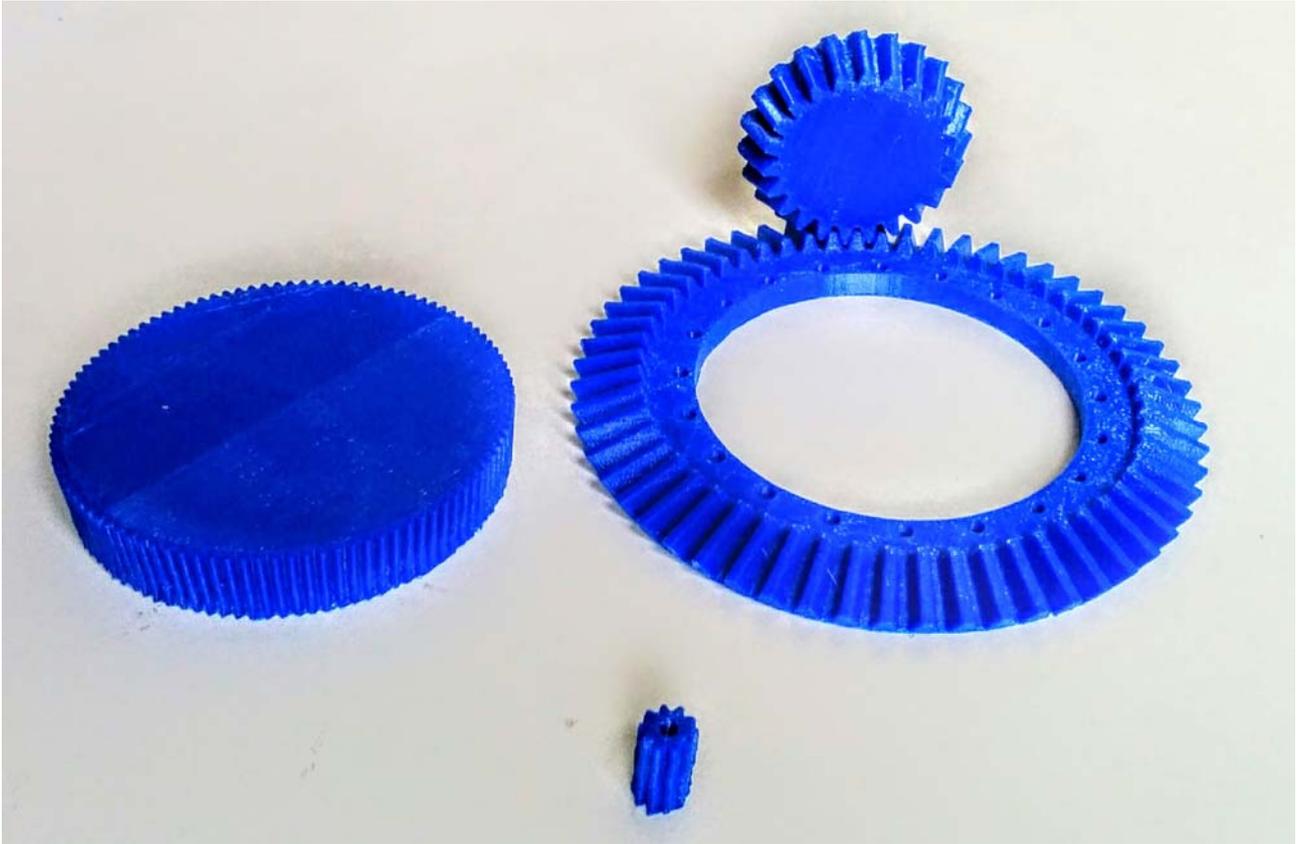


Vista frontale della simulazione

Mentre i membri atti al supporto saranno realizzati in alluminio per mezzo del tornio in dotazione all'officina del laboratorio di ricerca dello IOR, le ruote dentate, sia coniche sia a denti dritti, saranno realizzate mediante l'utilizzo di una stampante 3D; saranno realizzate, pertanto, in materiale polimerico che conferirà loro sufficiente resistenza strutturale e ad usura e una buona tolleranza dimensionale: la stampante 3D lavora con tolleranze dell'ordine di 0,2 – 0,3 mm.

Un meccanismo dunque complesso nella sua struttura ma, in compenso, molto facile da realizzare, in poco tempo (per le 4 ruote dentate sono state necessarie una decina di ore di lavoro della stampante) e a basso costo.

Inoltre, in virtù di ciò, sarà facile la rapida sostituzione eventuale delle ruote qualora, dopo reiterate deposizioni di materiale, inizino a non funzionare più correttamente.



Ruote Dentate realizzate con la stampante 3D

Progettazione di un cinematismo ottimale per la movimentazione di un catetere

Una volta progettato il cinematismo per le viti, si vuole ideare un modello di cinematismo ottimale che permetta di movimentare al meglio un catetere vescicale al fine di depositarvi sulla superficie esterna il materiale target – duro, resistente all'usura e biocompatibile – uniformemente (Il catetere in oggetto misura 300 mm in lunghezza, diametro esterno di 3 mm e diametro interno di 1,5 mm).



Catetere vescicale

Per far ciò è necessario che il catetere, durante il suo moto rotatorio, non sia troppo stressato: all'atto di piegare, curvare o storcere il catetere, le fibre che lo compongono si comprimono o si trazionano (a seconda del raggio di curvatura) causando una deposizione superficiale per nulla omogenea.

Al fine di evitare questo inconveniente, si è pensato, come soluzione da adottare, a un sistema particolare in cui, sostanzialmente, il catetere in oggetto fa da cinghia tra due pulegge.

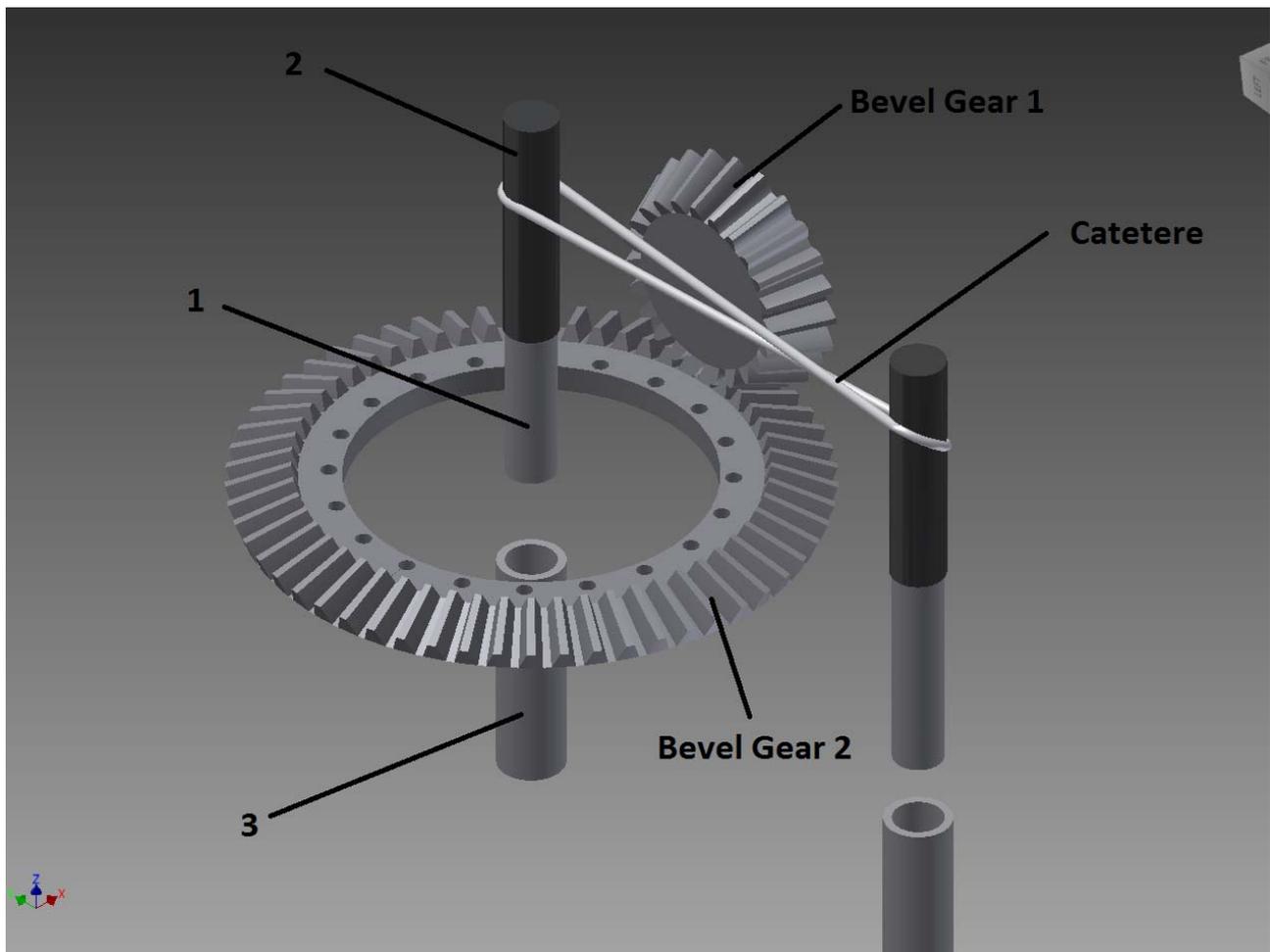
Inoltre, per minimizzare il lavoro di produzione di pezzi, s'intende utilizzare le due ruote coniche dentate già prodotte per il cinematismo delle viti da impianto.

Il moto rotatorio, come visto in precedenza, è trasmesso a un asse perpendicolare a quello della camera; la Bevel Gear 2 mette poi in rotazione attorno al proprio asse il membro 1 sul quale è fissato un gommino in materiale con alto coefficiente d'attrito (membro 2) il quale fungerà da puleggia del meccanismo.

Il membro 1 ha un grado di libertà: può ruotare attorno al proprio asse ma non può avere ulteriori movimenti; gli altri gradi di libertà sono vincolati da una camicia fissata alla camera (membro 3) in cui tale membro risiede.

Viene poi montato il catetere il quale, soggetto ad un precarico iniziale, collega il gruppo membro 1- membro 2 ad un altro gruppo del tutto identico, analogamente ad un meccanismo cinghia-pulegge. Il precarico iniziale cui è soggetto il catetere e l'attrito dei gommini assicurano la stabilità del pezzo che vogliamo rivestire.

Nella figura seguente, che rappresenta un esploso del cinematismo in questione, si può notare quanto esposto finora.

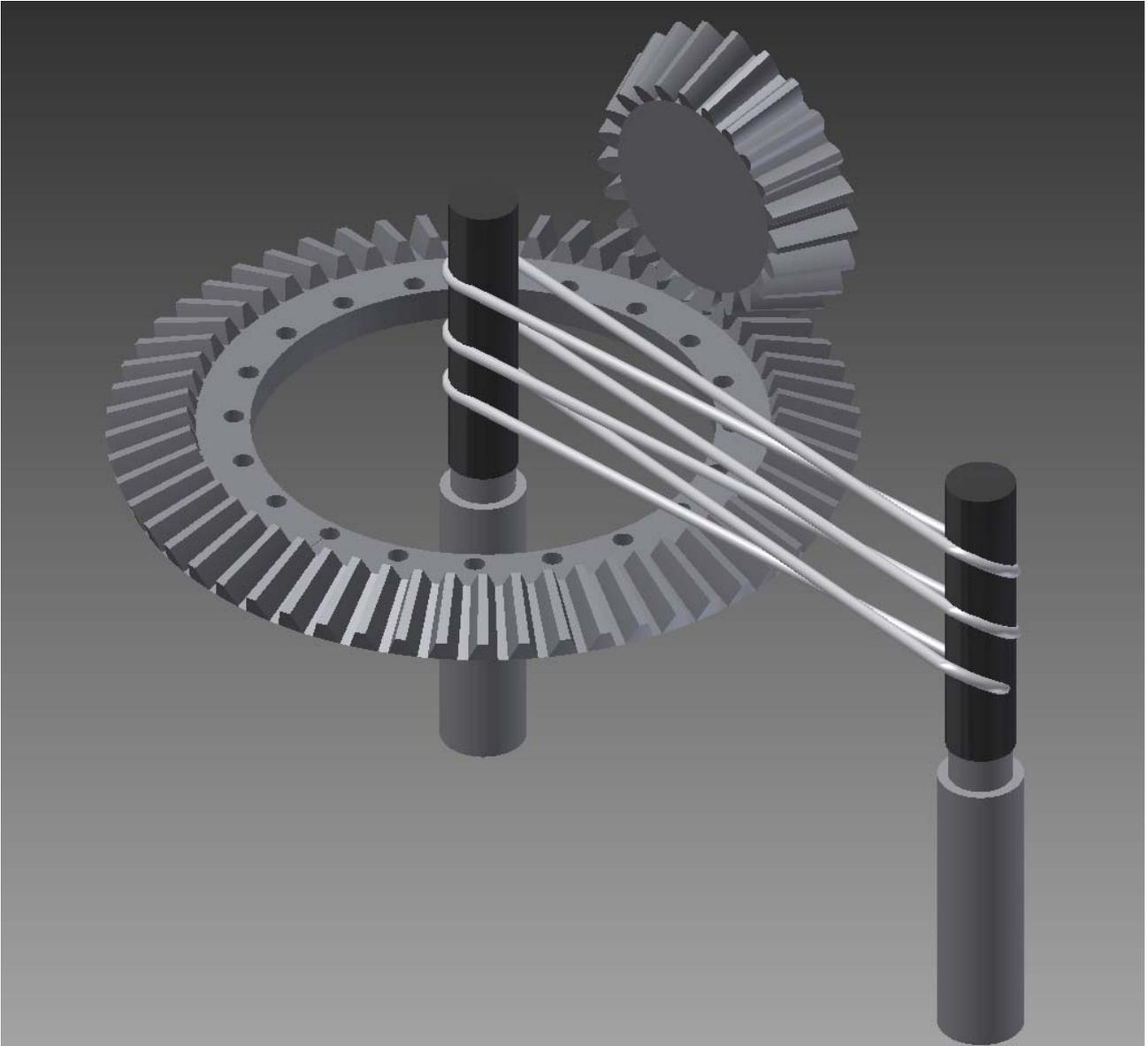


Simulazione del cinematismo

Così facendo, la piuma di materiale vaporizzato va ad impattare la superficie del catetere (che in questo modo è perfettamente distesa, senza curvature) su entrambi i lati, grazie alla movimentazione 'a otto rovesciato': è, pertanto, necessario un solo ciclo di deposizione dentro la camera PVD.

Il collegamento tra la Bevel Gear 2 e il membro 1 è discrezionale, così come il fissaggio dei membri 3 in camera.

La versatilità di questo modello di cinematismo consente, oltre ai pregi visti finora, anche di posizionare più di un catetere alla volta per ciclo di deposizione, com'è stato esemplificato nella figura di cui sotto.



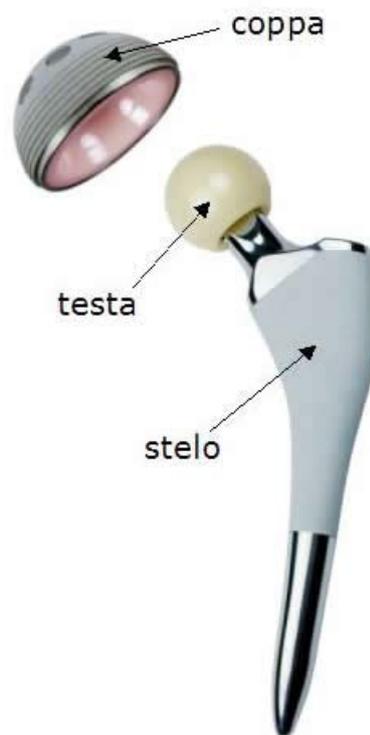
Simulazione del cinematismo di deposizione con tre cateteri

Progettazione di un cinematismo ottimale per la movimentazione di una coppa d'anca

L'ultima fase del progetto si propone di ideare un sistema che riesca a movimentare ottimamente una coppa d'anca protesica.

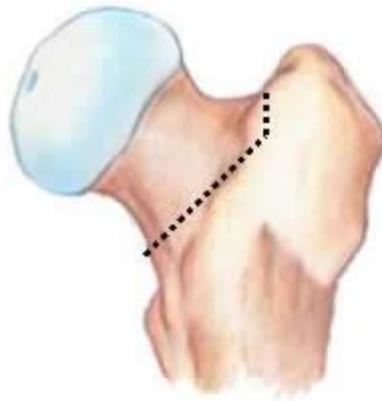
L'artroprotesi d'anca (o protesi totale d'anca) è un'**articolazione artificiale** realizzata in leghe metalliche, materiali plastici e/o ceramiche, che sostituisce l'anca ammalata, eliminando la fonte del dolore in modo efficace e permanente.

La protesi d'anca è costituita da una **coppa** e da uno **stelo**, che vengono inseriti rispettivamente nell'acetabolo e nel femore. Sullo stelo viene assemblata una testa protesica, in metallo o ceramica, che si articolerà con la superficie interna della coppa.



(immagine concessa da Lima-Lto Sp.A.)

Durante l'intervento di protesizzazione il collo e la testa del femore vengono asportati in una protesi standard, perché questa sostituirà entrambi. Nella figura seguente la linea punteggiata indica la resezione necessaria per l'impianto.



Lo stelo viene così posizionato all'interno del canale midollare del femore, dopo un'apposita preparazione dello stesso.

Analogamente la coppa viene inserita nell'acetabolo dopo la rimozione del rivestimento cartilagineo residuo. In genere nelle protesi non cementate si impianta una coppa leggermente più grande della sede acetabolare preparata, ottenendo così un "incastro a pressione" (press-fit) che garantisce la stabilità. Se l'osso non è sufficientemente resistente, come capita nell'osteoporosi severa, può essere indispensabile ricorrere ad alcune viti accessorie.



Sono accoppiamenti a bassissima usura - interfacce articolari che liberano quantità minime di detriti. Le interfacce tradizionali sono dette metallo-polietilene o ceramica-polietilene in base alla composizione della testa protesica e dell'inserto acetabolare (la parte interna della coppa).

Sebbene il polietilene attuale sia capace di eccellenti prestazioni di durata (al punto che è considerato ideale nel paziente over-60), esso può liberare quantità di detriti considerevoli nei pazienti molto giovani e attivi. Per questo oggi tali pazienti sono spesso protesizzati con accoppiamenti metallo-metallo o ceramica-ceramica (o persino metallo-ceramica).

In particolare, le coppe d'anca in oggetto sono realizzate in materiale ceramico.

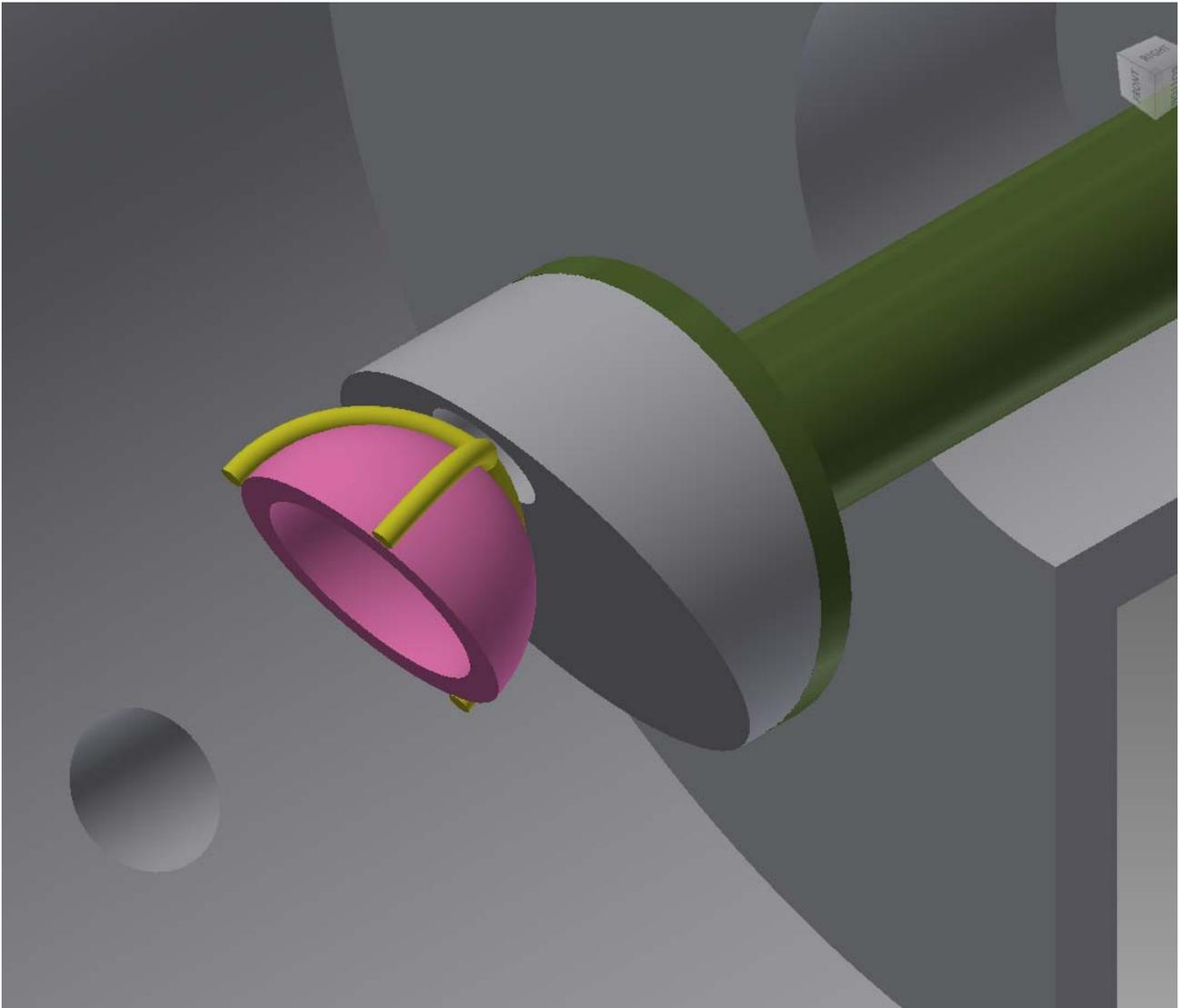
Per ottenere un ulteriore incremento di performance all'interfaccia di accoppiamento (superficie concava) in termini di azione usurante, si desidera rivestire quest'ultima con un sottile film di Zirconia (ZrO_2) per poi studiarne le particolarità meccaniche e tribologiche.



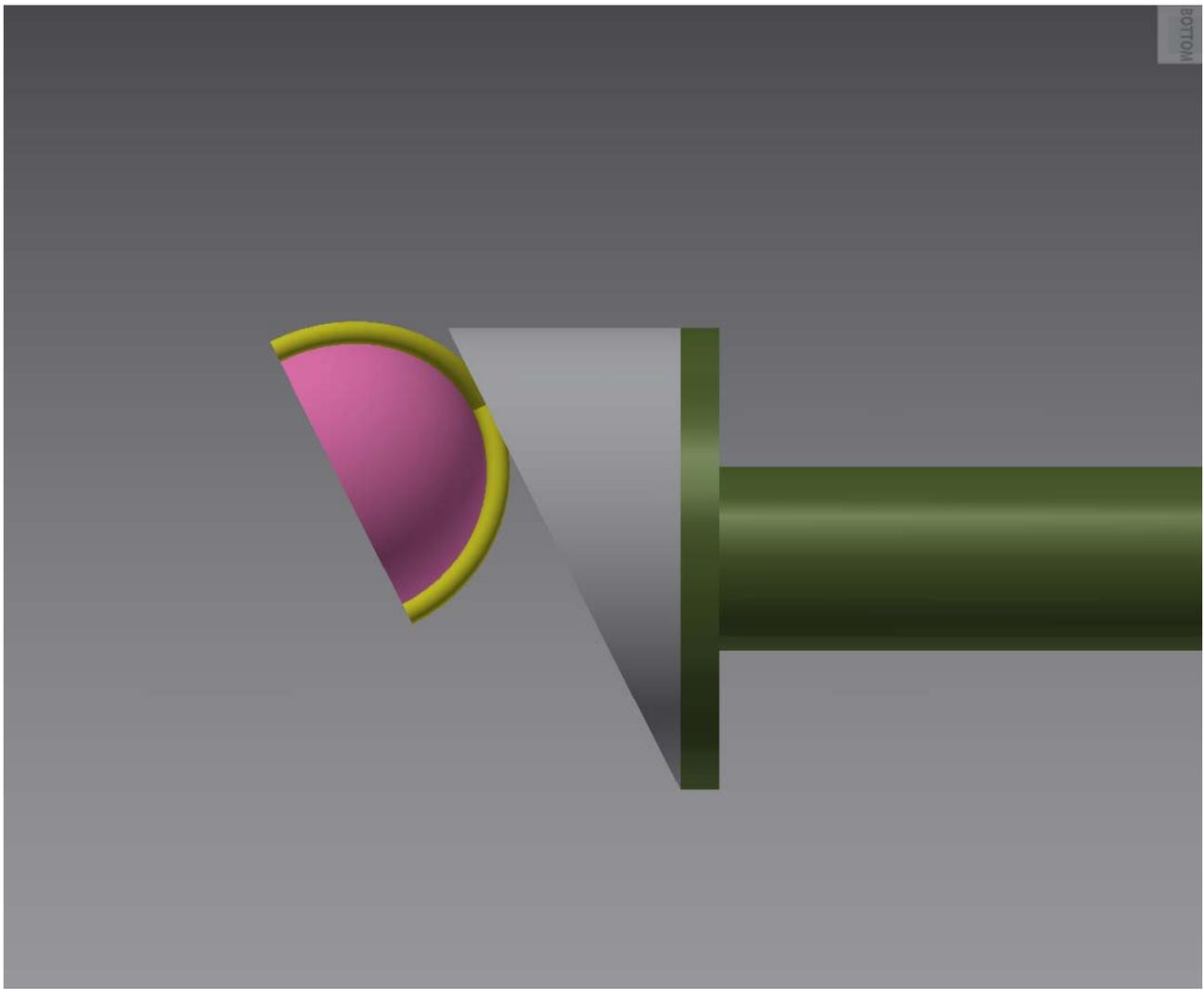
Coppa d'anca e parte superiore della protesi femorale che va ad impegnarsi e a sfregare sulla superficie in oggetto di studio

Per ricoprire la superficie interna di un device medico dalla geometria di questo tipo è necessario, per avere un film omogeneo, unire al solito movimento rotatorio anche un movimento rotatorio attorno all'asse della stessa coppa d'anca ed uno TILTANTE.

Nella figura sottostante viene rappresentata la simulazione di questo cinematismo creata con Autodesk Inventor.



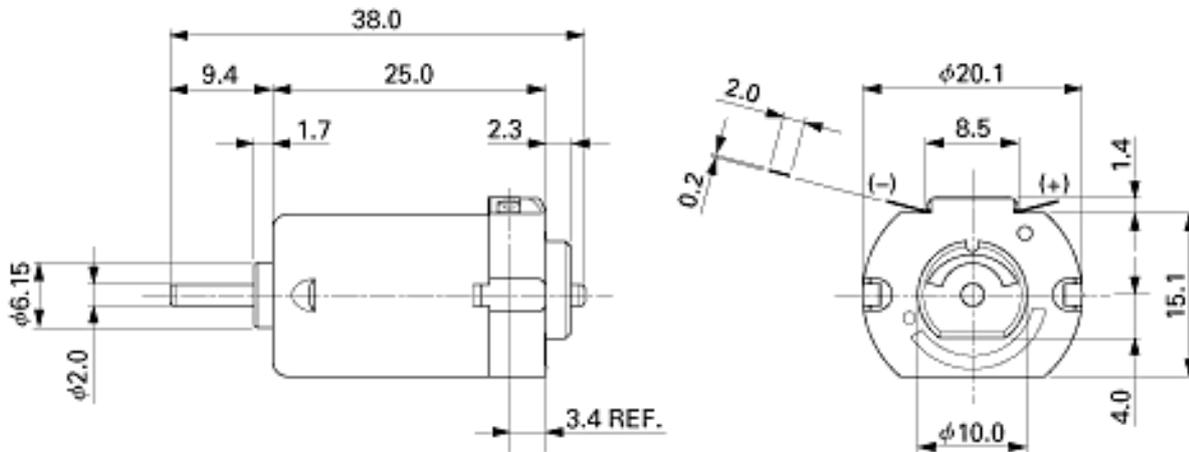
Vista in isometria



Vista frontale

La coppa è sostenuta per mezzo di un membro a tre braccia (di colore giallo) il quale è imperniato sull'albero di un piccolo motore elettrico collegato ad una batteria da 1,5 V (che verrà fissata nel retro del porta campione).

Il tutto è alloggiato su un pezzo di alluminio fresato che fornisce un'angolazione alla coppa di circa 30° e che è solidale al porta campione.



Dimensioni progettuali del motore elettrico, in commercio

Mentre la coppa ruota con la medesima velocità angolare del porta campione, essa ruota su se stessa grazie al collegamento con l'albero del motore elettrico e, contestualmente, assume un importante movimento tiltante offerto dalla geometria del pezzo fresato che permette un omogenea deposizione del film sulla superficie interna della coppa.

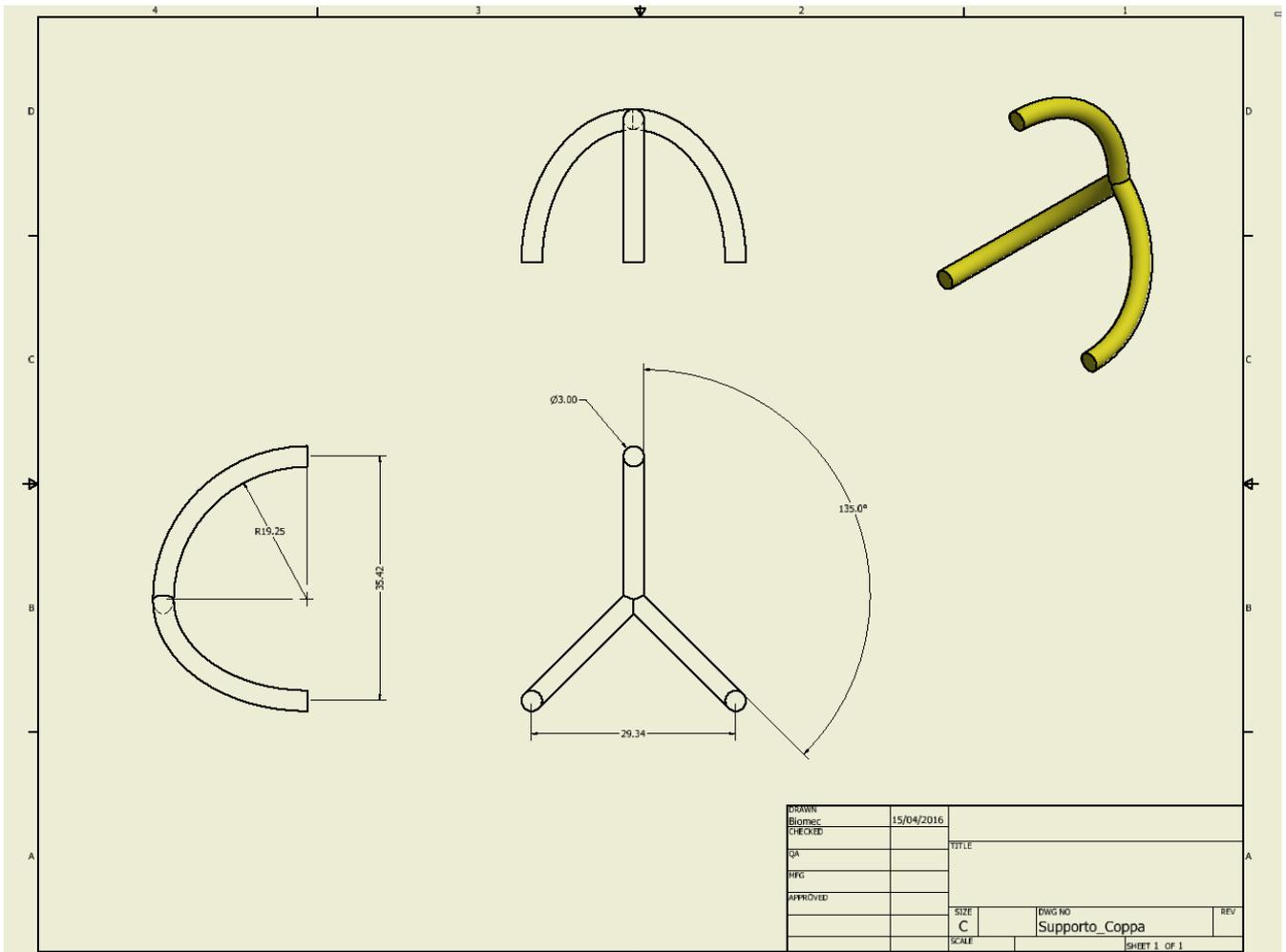
Vediamo ora più nel dettaglio i membri partecipanti al cinematismo.

SUPPORTO A TRE BRACCI

Realizzato mediante la stampante 3D in materiale tenero, polimerico, al fine di non rovinare la protesi, il supporto è formato da tre bracci avente raggio di curvatura pari al raggio esterno della coppa in oggetto affinché possa afferrarla e sostenerla nel moto.

Viene poi collegato all'albero rotante del motore elettrico affinché sia il supporto stesso a girare e non la coppa d'anca direttamente.

La tavola di progetto di questo membro è riportata nella figura seguente.



Progetto del supporto per la coppa d'anca protesica

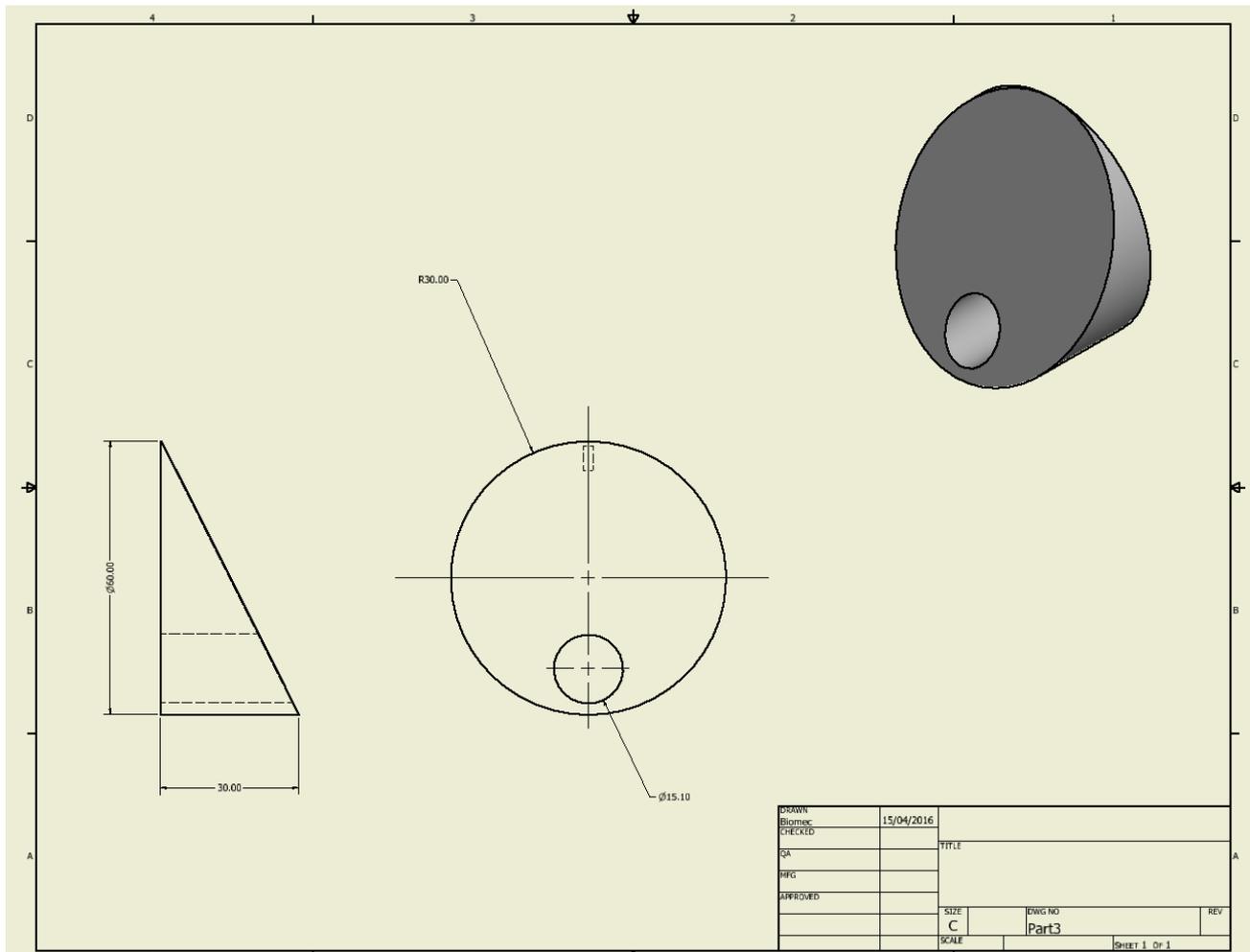
MEMBRO FRESATO

È il pezzo che garantisce il movimento tiltante alla coppa grazie alla sua geometria.

È realizzato in Alluminio e le caratteristiche progettuali sono riportate nella figura di cui sotto.

Presenta un foro in cui alloggerà il motore elettrico: è dimensionato sulla base dell'ingombro del motore elettrico stesso.

Tale pezzo verrà poi centrato coassialmente e fissato al porta campione laddove la superficie è piana e non angolata.



Progetto del membro la cui superficie angolata favorisce il tiltaggio della coppa

Una volta consolidato il cinematismo di base è possibile implementarlo e renderlo più complesso al fine di depositare materiale, in un singolo ciclo di rivestimento in camera, su più coppe d'anca protesiche contemporaneamente.

A causa degli ingombri geometrici (prevalentemente dati dal membro inclinato di alluminio) e del peso (di 4 coppe, i relativi supporti, i motori e del membro dalla superficie inclinata), si è arrivati alla conclusione che è possibile sostenere e rivestire al più 4 protesi contemporaneamente.

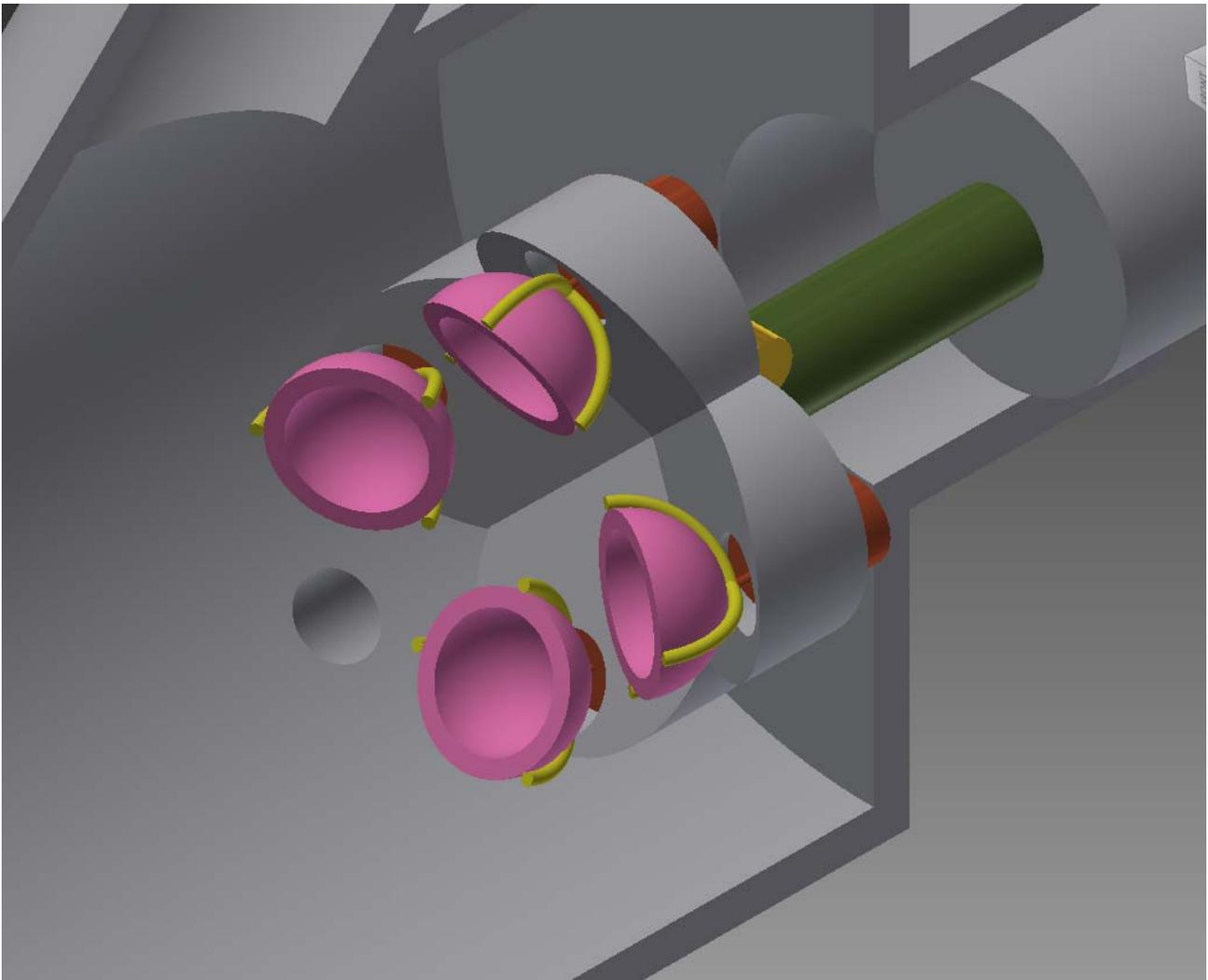
Il nuovo gruppo è allora costituito da 4 coppe sorrette dai relativi 4 supporti a tre bracci e collegati ai rispettivi 4 motorini elettrici (che ricordiamo essere in commercio); questi ultimi sono inseriti nei rispettivi fori ricavati all'interno di un membro (grigio in figura) equivalente alla fusione di 4 dei membri in alluminio visti precedentemente: un pezzo convesso, sempre in alluminio, che viene fissato coassialmente al porta campione e ruota assieme a lui con la medesima velocità angolare.

Analogamente al cinematismo di base, questo pezzo è fondamentale per conferire alle 4 protesi, contemporaneamente, il movimento di tiltaggio che rende possibile l'omogeneo ricoprimento della superficie interna protagonista dell'azione usurante una volta impiantata.

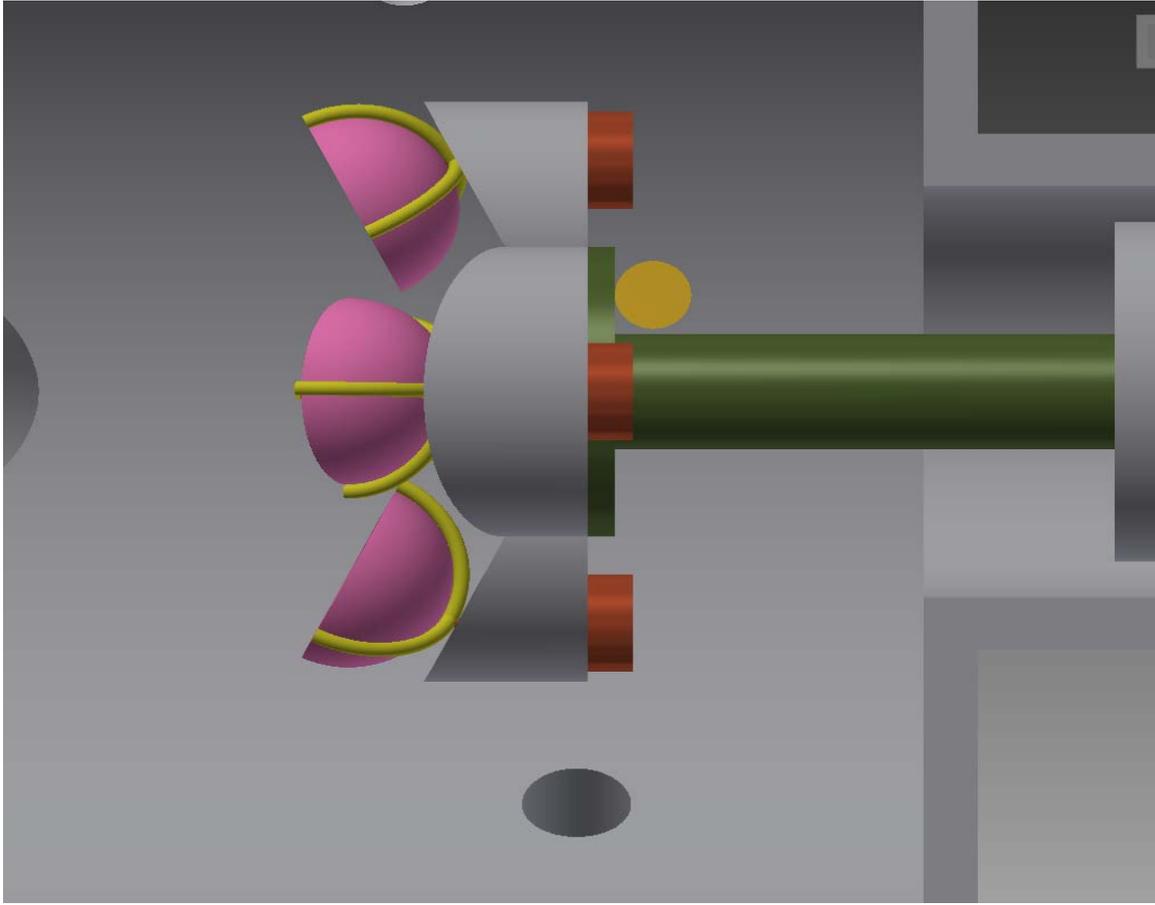
Questa è una soluzione possibile ma che non è stata effettivamente messa in pratica nel laboratorio NaBi.

Per la non necessità di ricoprire contemporaneamente molti devices contemporaneamente, si è scelto di realizzare un cinematismo funzionale al ricoprimento di una sola protesi per ciclo di deposizione.

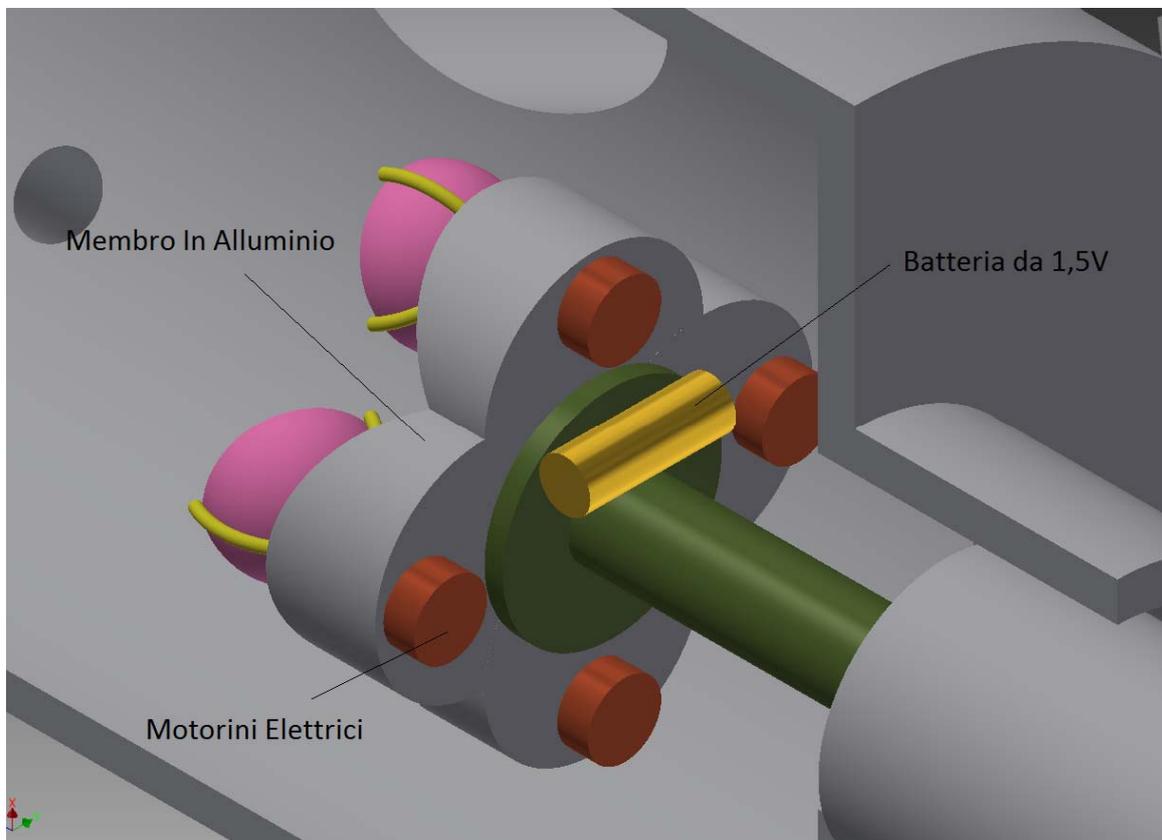
Qui di seguito si riporta la simulazione creata al CAD 3D della movimentazione di 4 coppe d'anca in più viste.



Vista in Isometria

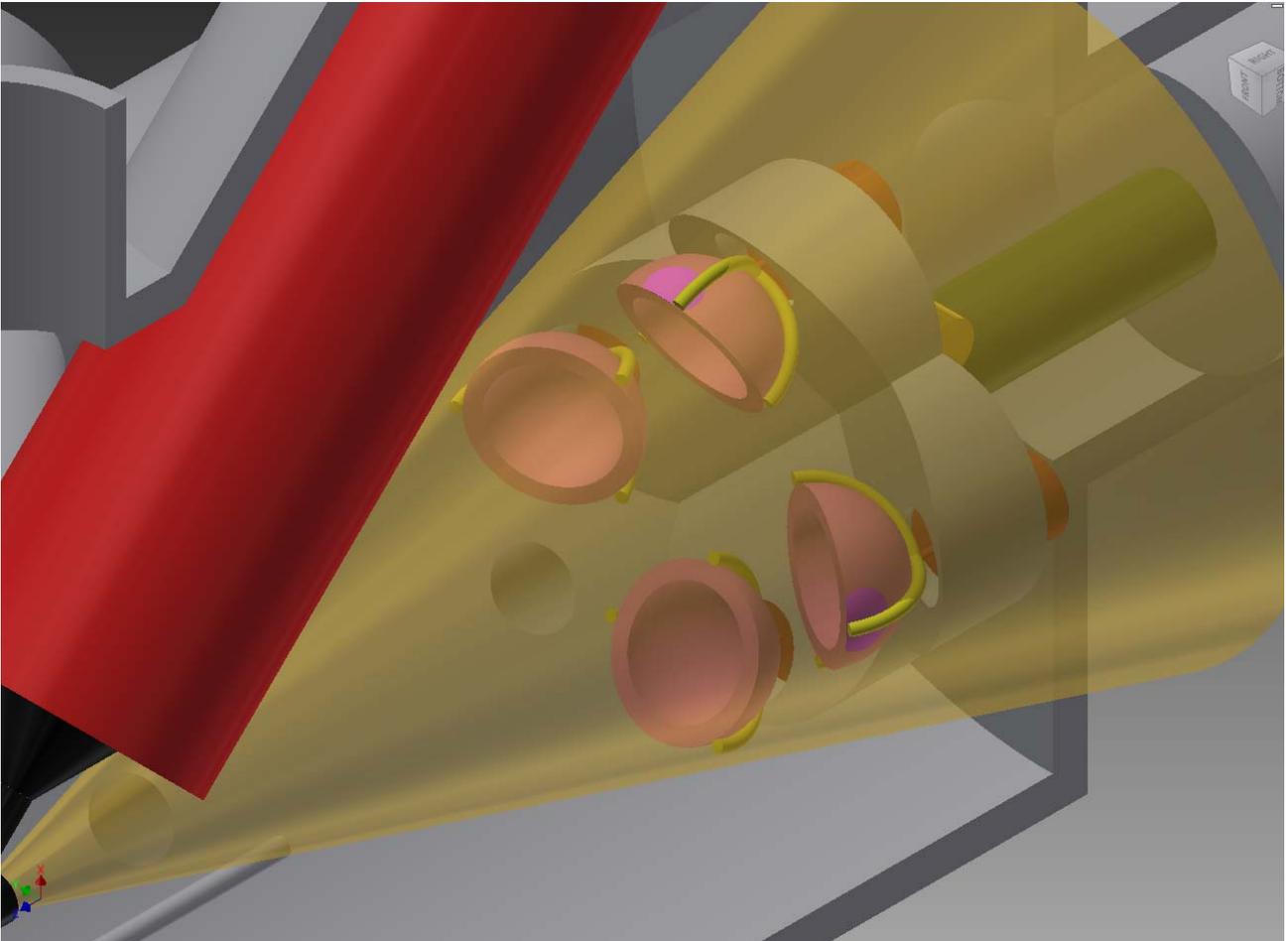


Vista Frontale



Vista dal retro

Si riporta anche la simulazione in cui è ben evidente il fascio conico di materiale che va ad impattare e ricoprire la superficie di studio.



Considerazioni e Conclusioni

Queste le principali considerazioni del lavoro:

- La qualità della deposizione di film sottili di determinati materiali dipende sia dalla tecnica utilizzata sia dal modo in cui i campioni, di cui si vuole rivestire la superficie, vengono movimentati nel sistema;
- I cinematismi dedotti e progettati, qui presentati, si sono rivelati di sufficiente semplicità realizzativa e, contestualmente, caratterizzati da buona versatilità e funzionalità relativamente a quelli che erano gli obiettivi di partenza;
- Tali movimentazioni possono essere altresì implementate e migliorate al fine di raggiungere, volendo, una capacità produttiva più elevata, di livello industriale, la quale esula dal contesto di laboratorio;
- La PED nella versione PPD, è una tecnica innovativa nel campo delle nanobiotecnologie che rappresenta una strategia vincente quando si vuole aggiungere funzionalità a un materiale senza variarne le ottimali proprietà bulk;
- La PED, nella versione PPD, è una tecnica molto versatile che si presta a importanti studi riguardanti le proprietà antiusura, antibatteriche e biomimetiche dei rivestimenti;

In conclusione può essere affermato che le soluzioni descritte in questo lavoro necessiteranno ulteriori upgrade, come ad esempio considerare la movimentazione di altri devices medici dalle differenti geometrie.

Bibliografia

- Massimo Di Giulio, Tecniche fisiche di deposizione di film sottili; articoli tecnici online, www.aiv.it
- www.wikipedia.com
- www.webelements.com
- www.p-pholding.com