



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Progettazione di un porta campioni e relativo sistema di chiusura per la
missione VENOM

Relatore: Giacomo Colombatti

Costa Giovanni (2053759)

Anno Accademico 2023/2024

Indice

1	Introduzione	5
2	Architettura del sistema VENOM	8
2.1	Main frame	8
2.2	Modulo di campionamento	9
2.3	Linea fluidica	12
2.4	Detection Module	12
2.5	Altri sottosistemi	13
2.6	Controllo termico	13
2.7	Protezione Planetaria	14
3	Stato dell'arte	15
3.1	Hayabusa 2	16
3.2	OSIRIS-REx	20
3.3	Martian Moon Explorer	24
3.4	MARS 2020	26
4	Sistema di miscelazione	30
4.1	Apparato per la miscelazione	30
4.2	Fisica del vortice	32
5	Dimensionamento del canister	35
5.1	Sezione inferiore	35
5.2	Sezione superiore	37
6	Sistema di chiusura	39

7	Analisi e sviluppi futuri	47
7.1	Analisi statiche	47
7.1.1	Configurazione aperta	47
7.1.2	Configurazione chiusa	49
7.2	Sviluppi futuri	52

Abstract

Il presente lavoro è stato redatto per VENOM (Venture the ExtractioN of Organic Molecules), missione spaziale concepita dall'ASI (Agenzia Spaziale Italiana) e realizzata in collaborazione con l'Università degli Studi di Padova. Lo scopo della missione prevede l'invio su Marte di una sonda contenente un laboratorio per l'analisi del terreno allo scopo di identificare l'eventuale presenza di molecole organiche.

Oggetto di tesi è la progettazione di un recipiente, e del relativo sistema di chiusura che dovrà essere in grado di mantenere il sistema a tenuta stagna ad una pressione fino a 1 atmosfera, atto a contenere una piccola quantità di suolo marziano insieme a del reagente. Il sistema inoltre prevede la presenza di un apparato di riscaldamento che dovrà portare la soluzione a circa 80°C, un meccanismo di miscelazione concepito emulando gli agitatori magnetici comunemente usati in ambito chimico, un sistema di input per il reagente e il gas pressurizzante e di uno di output che dovrà trasportare la soluzione verso un lab-on-chip in grado di identificare le molecole organiche sfruttando la chemiluminescenza e di separarle dal resto della soluzione mediante l'uso di micro biglie magnetiche.

Verranno infine descritti gli sviluppi futuri, al fine di verificare la validità del dimensionamento effettuato, l'efficacia delle scelte di design prese e di determinare le caratteristiche migliori di alcune componenti presenti nel sistema. Di seguito si dedicheranno i capitoli 1 e 2 alla spiegazione della missione, mentre al capitolo 3 verrà esposto lo stato dell'arte dei porta-campioni usando alcune missioni già lanciate e altre in programma. Successivamente i capitoli 4, 5 e 6 verranno dedicati rispettivamente al design del sistema di miscelazione ideato per il porta-campioni, del container e del sistema di chiusura, mentre il capitolo 7 verterà sugli sviluppi futuri per migliorare il design concepito.

Capitolo 1

Introduzione

La ricerca della vita al di fuori della biosfera terrestre è uno degli obiettivi primari del programma spaziale internazionale. L'importanza di tale ricerca risiede non soltanto nella mera identificazione di vita organica nel sistema solare, ma anche nello stabilire l'abitabilità di un corpo celeste, mediante osservazione di tracce di vita attuale o estinta, e nel capire come la presenza di vita su determinati corpi celesti del sistema solare possa essere collegata alla sua formazione ed evoluzione, nonché alla composizione chimica della nebulosa da cui ha avuto origine.

Alcune missioni spaziali odierne, tra cui la presente VENOM, incentrate nel campo dell'astrobiologia si prefiggono come scopo l'identificazione di molecole organiche in un ampio range di dimensioni, dalla semplice molecola alla cellula e si concentrano quindi nell'individuazione di molecole solubili, polari e chirali come:

- Amminoacidi
- Nucleobasi
- Acidi grassi

in quanto principali componenti della vita organica a base di carbonio.

Con la missione VENOM, tuttavia, si vuole allargare il numero di bio marcatori analizzabili, includendo, nello specifico:

- Adenosina Monofosfato
- Adenosina Trifosfato

- DNA
- RNA
- Lipopolisaccaridi
- Acido lipoteicoico
- Nicotinammide
- Fosfoenolpiruvato
- Acidi grassi
- Amminoacidi L- e D-
- Pigmenti
- Idrocarburi

Dal momento che tali molecole devono essere estratte, separate, concentrate, processate e analizzate è necessario progettare e sviluppare un apparato ad hoc avente molteplici funzioni. In primis deve essere in grado di preparare il campione alla successiva analisi, quindi il terreno verrà liquefatto, filtrato per rimuovere le particelle di suolo più solide, desalinizzato e concentrato. Una preparazione di questo tipo permette di avere dei vantaggi: rispetto ad altri sistemi di analisi che sfruttano la fase gassosa, in questo apparato viene sfruttata la fase liquida, che quindi permette l'analisi anche di componenti non volatili, aumentando la probabilità di individuazione. L'uso della fase liquida comporta inoltre una minor quantità di campione da utilizzare (attorno ai 100 mg).

In secondo luogo, il sistema deve essere in grado di portare il campione (sempre in fase di pre-analisi) a temperature non troppo elevate. I moderni metodi di analisi si basano sulla pirolisi, con la quale il campione viene portato oltre i 500°C, degradandone i componenti; quindi, per poter identificare la presenza di composti organici è necessario portare il campione a temperature elevate, ma non al punto da danneggiarlo, preservandone così le informazioni. La temperatura ottimale è stata stimata essere attorno agli 80°C.

L'apparato dovrà poi essere fornito di un metodo di estrazione delle molecole solubili tramite solventi; pertanto, è imperativa la conoscenza non soltanto degli aspetti termici di adsorbimento e desorbimento dei composti organici, ma anche delle proprietà del fluido e dell'analita, quali:

- Peso molecolare
- Idrofobicità
- Dissociazione acida
- Tensione di vapore
- Solubilità

Infine, è prevista la presenza di un lab-on-chip in grado di effettuare l'analisi in situ del preparato utilizzando la tecnica dell'immunodosaggio e del dosaggio enzimatico per rilevare, identificare e valutare i composti organici eventualmente presenti nel terreno con una sensibilità dell'ordine delle parti per miliardo (ppb). Si tratta infatti di molecole che, sulla base di studi svolti in ambiente terrestre, sono presenti a livello della parte per miliardo (97.5 ppb nel fondale oceanico, 0.18 ppb nel lago Vostok e 0.1 ppb nel deserto di Atacama), pertanto è necessario dotare l'apparato di sistemi di analisi con sensibilità adeguata.

Capitolo 2

Architettura del sistema VENOM

2.1 Main frame

Il sistema è dotato prima di tutto di un main frame, vale a dire la “capsula” in cui è contenuto tutto l’apparato di raccolta e analisi, concepito per avere un ingombro di 10x10x20 cm, ossia pari a un cubesat 2U, ma le dimensioni sono soggette a modifiche a seguito della progettazione e, allo stato attuale risultano essere pari a quelle di un cubesat 4U, quindi 20x20x10 cm. Il main frame consiste in una scatola in alluminio al cui interno dovranno essere mantenute le condizioni ambiente, sia in termini di temperatura sia in termini di pressione per consentire un corretto funzionamento della microfluidica e avente come unici punti di accesso all’ambiente esterno le zone in cui sono presenti i meccanismi di chiusura del contenitore o dei contenitori, nel caso di più porta campioni. La camera dovrà poi essere dotata di un sistema di pressurizzazione per compensare eventuali perdite di gas. Per quanto concerne i porta-campioni, questi potranno essere collocati o internamente o esternamente alla camera

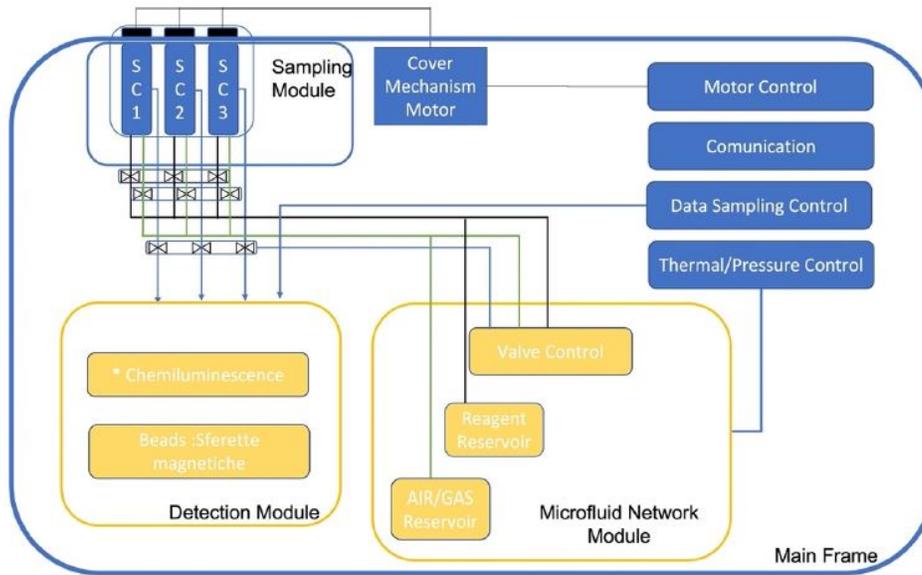


Figura 2.1: Schema del main frame di VENOM

2.2 Modulo di campionamento

Consiste in un sistema atto alla raccolta del campione da analizzare ed è stato concepito per essere dotato di uno o più porta-campioni, un sistema di chiusura per i porta-campioni e un carosello.

Il porta-campioni è formato da un contenitore cilindrico aperto a un'estremità per poter inserire il campione e avente dei collegamenti sulla superficie laterale per il reagente, il gas che dovrà pressurizzare il sistema e un terzo collegamento per l'output del miscuglio che verrà convogliato all'interno del lab-on-chip per le successive analisi. Il porta-campioni, dovendo simulare le condizioni di pressione in cui le molecole target si trovano in ambiente terrestre, verrà portato a una pressione fino a 1 atm; inoltre, per i motivi già discussi, il porta-campioni verrà soggetto a riscaldamento, in modo da portare l'oggetto delle analisi a una temperatura di circa 80°C. La missione era stata concepita per contenere 3 porta-campioni, ma a seguito di considerazioni successive su ingombri e volume da contenere, oltre al passaggio da una missione su Encelado a una missione con target Marte, il laboratorio può contenere al massimo un contenitore.

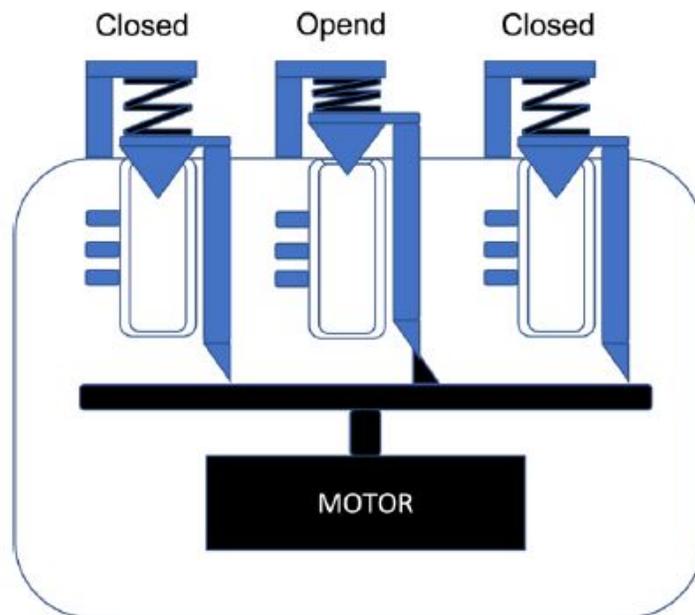


Figura 2.2: Early concept del modulo di campionamento

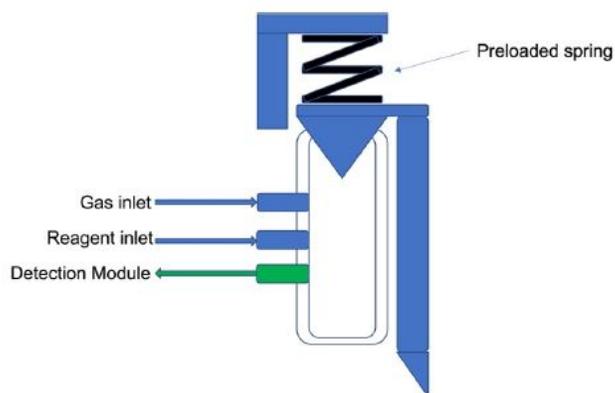


Figura 2.3: Early concept del singolo porta-campioni

Il meccanismo di chiusura ha il compito di operare una separazione degli ambienti, dal momento che il contenitore, così come tutto il resto del laboratorio, viene esposto all'ambiente marziano, quindi a un ambiente che

presenta una pressione sotto 1 atm e una temperatura molto bassa, di minimo -80°C . Dovrà quindi non soltanto chiudere il porta-campioni per evitare che vi siano perdite di pressione, ma dovrà anche chiudere l'unico accesso che il laboratorio ha con l'ambiente esterno.

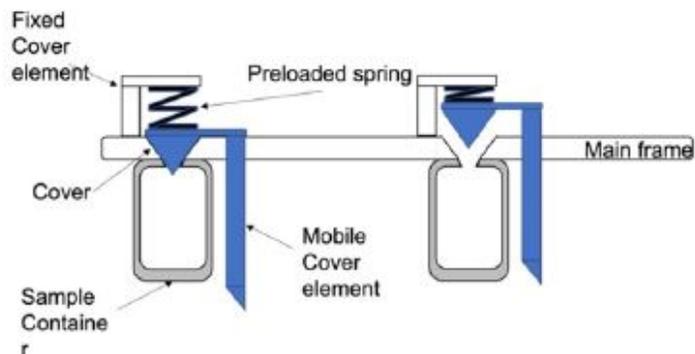


Figura 2.4: Early concept del sistema di chiusura a molla precaricata

Il carosello è stato concepito come una ruota, sulla quale vi sono tutti i porta-campioni, collegata ad un motore elettrico. L'azionamento del motore attiva un meccanismo che, a causa della rotazione della ruota, apre i diversi contenitori, permettendo l'inserimento del materiale, per poi richiuderli. Allo stato attuale è stato scartato per le stesse motivazioni che hanno portato all'identificazione di un solo contenitore come soluzione più opportuna.

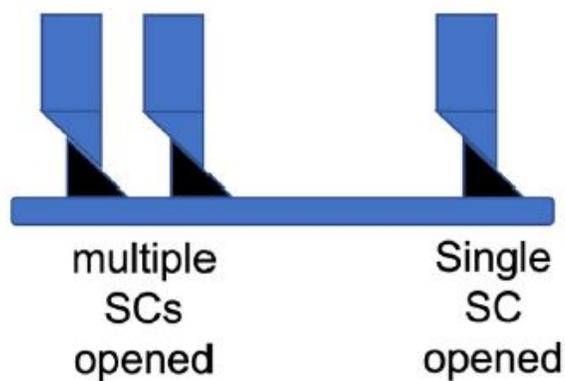


Figura 2.5: Early concept del carosello

2.3 Linea fluidica

Il sistema della fluidica prevede l'impiego di una rete di mini-fluidica coadiuvata da attuatori, valvole, pompe e un compartimento per la miscelazione del reagente per l'input/output al/dal contenitore, nello specifico campione da analizzare e reagente saranno movimentati da pompe peristaltiche, mentre per il lab-on-chip è prevista una rete di micro-fluidica alimentata da un sistema di pompe. Tutti gli attuatori presenti sono bi-direzionali, quindi possono sia spingere che aspirare il fluido ed è prevista la presenza di flussimetri per fare in modo che in tutta la linea circoli un fluido a una portata quanto più possibile costante. Una volta effettuata l'analisi, tutto il fluido utilizzato viene raccolto in una vasca per gli scarti il cui volume è variabile per evitare che vi siano ingressi o fuoriuscite di aria quando il liquido viene estratto o inserito nella vasca. È presente inoltre un serbatoio contenente del solvente che verrà utilizzato per la pulizia delle linee, per prepararle alla successiva analisi evitando contaminazioni e il cui volume si aggira intorno alle decine di millilitri.

2.4 Detection Module

Ha il compito di individuare ed isolare le molecole bersaglio discusse in precedenza. Per farlo vengono sfruttate sia la tecnica della chemiluminescenza, sia delle micro-biglie magnetiche.

Le micro-biglie sono realizzate con piccole particelle di ossido di ferro (Es. magnetite Fe_3O_4) di diametro inferiore al micrometro che conferisce loro proprietà super paramagnetiche, il che significa che le micro-biglie manifesteranno magnetismo solo in presenza di un campo magnetico esterno, permettendo quindi la separazione delle stesse dal resto del fluido. Il comportamento magnetico dipende dalle dimensioni delle micro-biglie e, dal momento che fuori dal campo esterno non si attraggono, non vi sono rischi di accumuli che possano intasare le linee. Le biglie possono essere usate per legare diverse molecole in base al loro rivestimento superficiale.

Per ogni molecola d'interesse viene sviluppato un sistema di immunodosaggio [1] e dosaggio enzimatico in cui essa compete con un analita immobilizzato per legarsi a degli anticorpi che però sono presenti in numero limitato. Successivamente un altro tipo di anticorpi legato alle biglie magnetiche e legato a un enzima catalizza una reazione di chemiluminescenza (nel caso di alcune

molecole è prevista una reazione accoppiata, in cui il prodotto della prima reazione enzimatica è il substrato della successiva). Gli enzimi sono immobilizzati su micro-biglie magnetiche.

Le biglie vengono inserite nella linea della micro-fluidica e fissate nei siti di reazione tramite campi magnetici, poi vengono miscelate insieme a 100 μL di campione e ai reagenti. Qualora dovesse essere prodotta della chemiluminescenza, il sistema rileva la reazione tramite un array di fotodiodi (non influenzati dal campo esterno) depositato tramite fotolitografia. Infine, le biglie vengono riversate nella vasca di scarico e il solvente viene fatto passare nelle linee per pulirle in vista della successiva analisi.

L'utilizzo di questa tecnologia non solo è vantaggioso per la sua capacità di individuare molecole in un mezzo non volatile, ma anche perché ne preserva la struttura. Inoltre, l'uso delle biglie magnetiche come superficie solida permette di riutilizzare il chip e incrementare la sensibilità del dosaggio dato che aumenta l'area superficiale e il trasporto di massa risulta più efficiente. Per aumentare ulteriormente l'efficienza del chip il layout può essere modificato variando il numero e la posizione dei siti di reazione, migliorando le caratteristiche dei sensori nonché la forma e la topologia della rete micro-fluidica.

2.5 Altri sottosistemi

L'intero laboratorio sarà poi dotato di sensori per il monitoraggio di parametri quali temperatura e pressione, dell'elettronica di potenza e di controllo necessaria al corretto funzionamento dell'impianto, microprocessori, attuatori, strumenti di autodiagnostica e tutto il software necessario al monitoraggio interno e alla raccolta ed elaborazione dei dati, il quale è posto in comunicazione con il software di volo, incaricato di trasmettere i dati verso la Terra e connesso al sistema di potenza elettrica del lander.

2.6 Controllo termico

Il sistema conta due modalità di controllo termico, attiva e passiva. La passiva è la preferita in quanto permette di non gravare troppo sul sistema in quanto a richieste di potenza e viene realizzata sfruttando MLI, thermal wa-

shers, materiali con proprietà termo-ottiche adatte e opportune interfacce meccaniche dedicate. Considerato il range di temperature a cui è esposto il sistema non è richiesta la presenza di un sistema di raffreddamento (sarà comunque necessario prevedere il calore da asportare mediante analisi), mentre è invece necessario avere un riscaldatore per fare in modo che l'elettronica possa raggiungere la temperatura operativa per funzionare correttamente. È prevista inoltre la presenza di un controllo termico attivo qualora il passivo non riesca a proteggere i reagenti e le varie sostanze chimiche durante il viaggio (temperatura di stoccaggio: $< 10^{\circ}\text{C}$) e durante l'attività su suolo planetario (20°C)

2.7 Protezione Planetaria

Il sistema deve soddisfare determinati requisiti in termini di protezione planetaria (ad esempio dalle radiazioni), quindi è necessario utilizzare componenti e materiali qualificati per il volo, ma anche effettuare delle procedure di robustezza alla sterilizzazione, oltre a verificare la compatibilità con le condizioni operative e gestione dei prodotti delle procedure di analisi.

Capitolo 3

Stato dell'arte

Ad oggi esistono già (o sono in programma) missioni spaziali per la raccolta di campioni di terreno/gas da altri corpi celesti e molte di queste prevedono il ritorno sulla Terra della capsula di raccolta per effettuare analisi sul materiale prelevato [10].

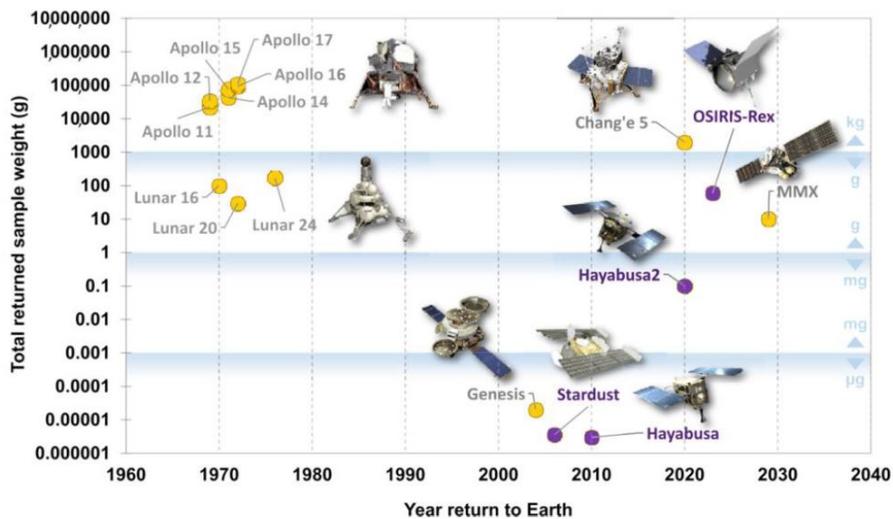


Figura 3.1: Grafico delle varie missioni con porta-campioni nel corso degli anni

3.1 Hayabusa 2

Erede della precedente missione Hayabusa, Hayabusa 2 [15] ha come scopo l'avvicinamento a un asteroide C-type near-Earth noto come Ryugu (1999 JU3) per osservarlo, esplorarlo e raccogliere campioni di materiale da rimandare sulla Terra per successive analisi per di ottenere informazioni circa la storia e l'evoluzione del sistema solare, con particolare interesse per l'acqua e la materia organica che poi sono state trasferite sulla terra a seguito di impatti con diversi asteroidi.

La missione è stata realizzata dalla JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) ed è stata lanciata il 3 dicembre 2014, con arrivo programmato per giugno o luglio 2018. Al suo interno, oltre alla strumentazione scientifica necessaria al successo della missione è presente un portacampioni [11], un componente detto "Small Carry-on Impactor" (SCI), ossia un dispositivo che viene rilasciato sull'asteroide e fatto detonare (non in presenza della sonda per ovvi motivi) per generare detriti da raccogliere e anche un sistema di campionamento costituito da un corno flessibile che viene esteso per raccogliere i detriti generati dall'esplosione prima dell'accensione dei razzi per la risalita. Una volta raccolti i detriti, questi vengono inviati in un portacampioni nella capsula di rientro; questo viene poi sigillato tramite un sigillo in alluminio per preservare eventuali componenti volatili e inviato verso la Terra. Il porta-campioni contiene almeno 100 mg di materiale ed è dotato di camere per la separazione dei materiali raccolti, una per particelle di diametro dell'ordine di qualche millimetro e una per particelle con diametro di circa 100 micrometri.

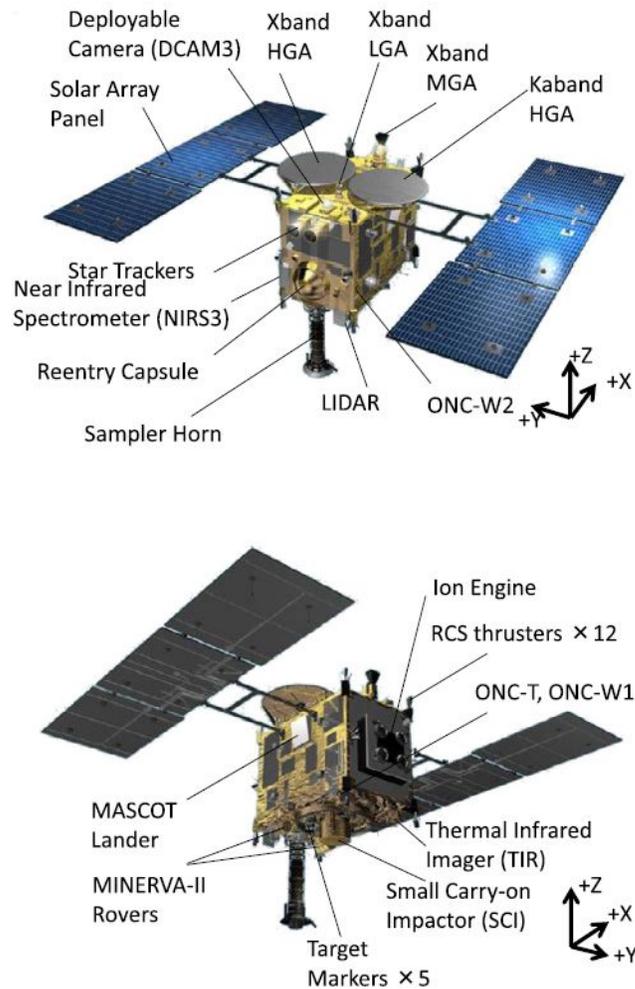


Figura 3.2: Vista esterna della sonda Hayabusa 2

Il porta-campioni della sonda è stato progettato per poter immagazzinare 100 mg di campione in aree separate, in base alla dimensione delle particelle, per prevenire effetti termici durante l'acquisizione del campione causati dalla decomposizione o deidratazione di minerali contenenti acqua e dalla perdita di materiali volatili dai detriti raccolti e per ridurre al minimo la contaminazione causata da materiali terrestri naturali o artificiali.

Il design è simile a quello della precedente missione Hayabusa, ma le dimensioni sono state cambiate notevolmente e il tempo di acquisizione si è ridotto

a circa 1 secondo essendo un sistema “touch and go”. Per quanto concerne le contaminazioni è stato deciso che le contaminazioni da penetrazione dell’atmosfera terrestre nel porta-campioni dovevano essere eliminate il più possibile e che i gas rilasciati dai materiali dovevano essere in quantità molto basse; quindi, per ottemperare a tali requisiti è stato stabilito che il contenitore dovesse essere accuratamente sigillato e le superfici dovevano essere levigate, oltre che pulite con ultrasuoni prima del montaggio.

Il sistema di raccolta è costituito da un “sample catcher” che raccoglie i campioni prelevati direttamente dal cono posto a contatto con l’asteroide e da un “sample container”. Il primo viene inserito nel secondo tramite una molla ottenendo un carico applicato al catcher, post spostamento, di 29 N. Il container e il catcher vengono poi posti a contatto attraverso altre due molle che esercitano un carico totale di 2683 N creando un sigillo metallico tra due leghe di alluminio (A-1070 e A-6061). Sono inoltre presenti dei fogli di alluminio che servono a trascinare via l’eventuale polvere che si deposita sulla zona del sigillo, in modo da evitare perdite. Il container è dotato di un’interfaccia per il gas che ha la funzione di raccogliere qualsiasi gas venga a formarsi all’interno del contenitore e di un filtro con pori di diametro pari a 0.5 micrometri, posizionato nel lato interno dell’interfaccia, che impedisce l’ingresso di particelle solide nella zona del gas.

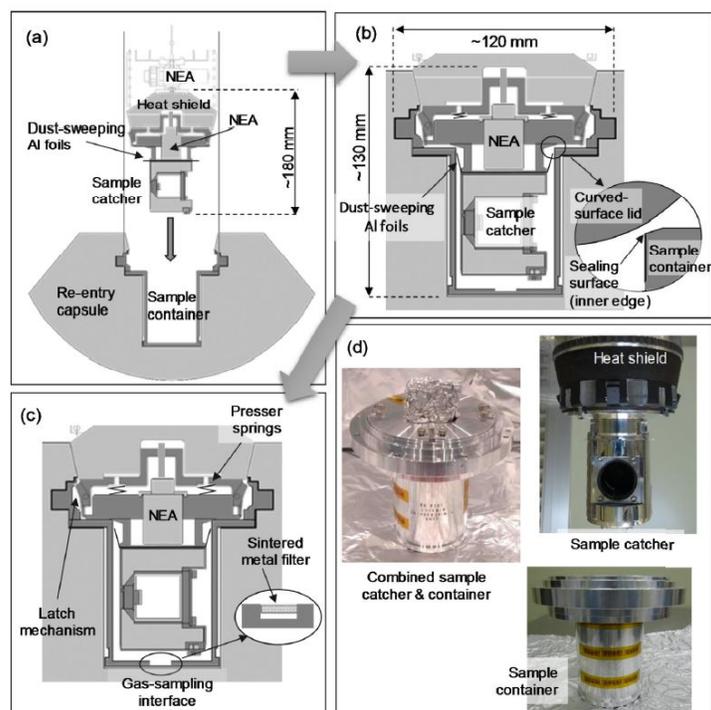


Figura 3.3: Vista in sezione del porta-campioni

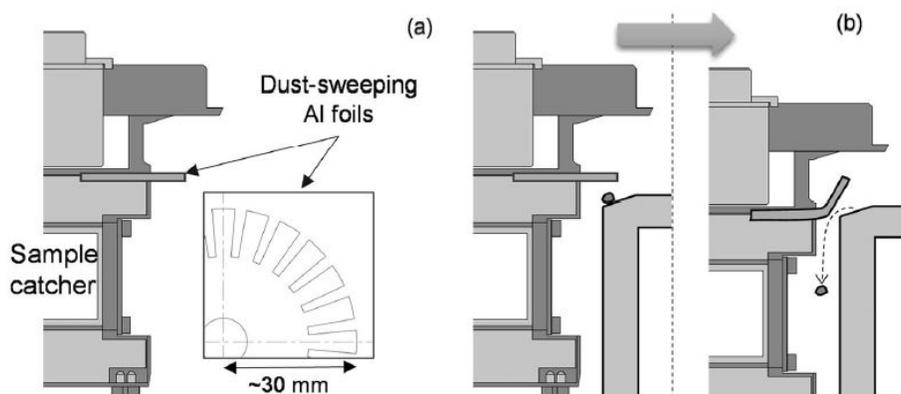


Figura 3.4: Vista in sezione del porta-campioni, particolare dei fogli di alluminio

3.2 OSIRIS-REx

La missione OSIRIS-REx [9] è stata concepita con l'obiettivo di raggiungere l'asteroide di classe B Bennu per:

- Migliorare la conoscenza allora disponibile sugli asteroidi
- Studiare l'effetto Yarkovsky
- Raccogliere campioni di terreno da riportare a Terra
- Analizzare il sito di campionamento
- Studiare le proprietà dell'asteroide

e fu lanciata l'8 settembre 2016 per fare ritorno nel settembre 2023. Il sistema di campionamento (TAGSAM) [6] proposto per questa missione aveva il compito di riportare a terra almeno 60 g di materiale analizzabile, quindi, per soddisfare il requisito di missione, il sistema di campionamento avrebbe dovuto raccogliere almeno 150 g di terreno, che doveva essere posto al riparo da contaminazioni e da temperature sopra i 75°C.

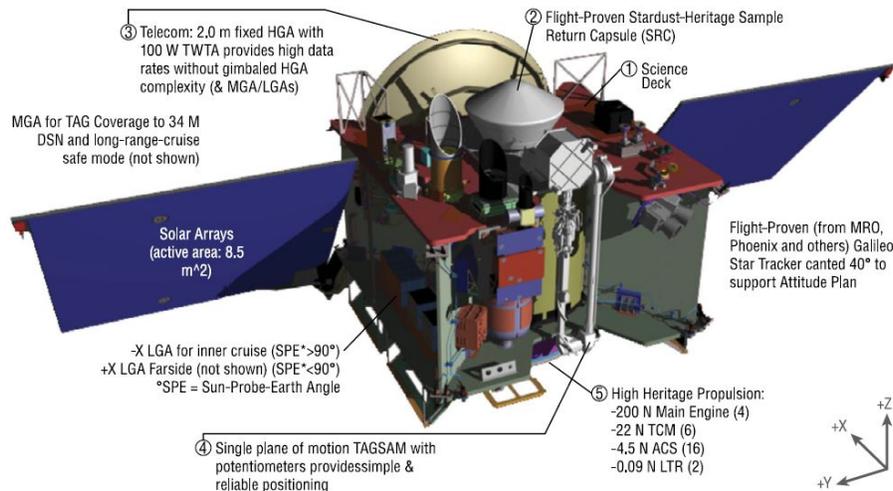
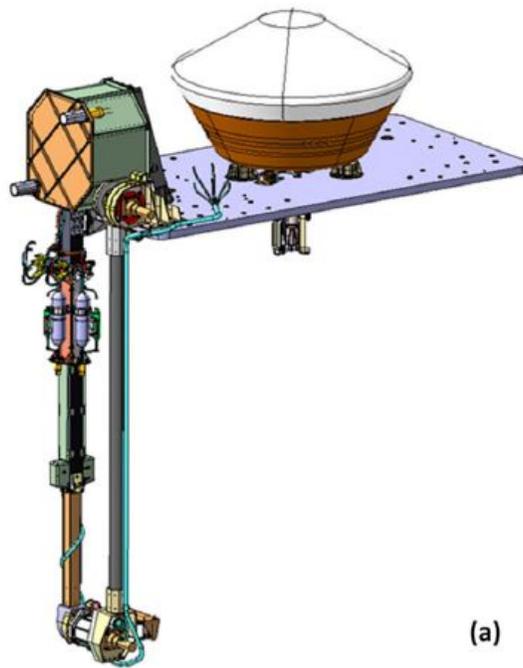


Figura 3.5: Vista esterna della sonda OSIRIS-REx

Il campionamento dell'asteroide è stato fatto con un metodo “toccata e fuga” per ridurre al minimo il tempo di contatto e la complessità di gestione

del ricavato, oltre a eliminare la necessità di una comunicazione costante con la Terra. Il TAGSAM è dunque formato da un braccio robotico con molla telescopica avente 3 giunti articolati su “spalla”, “gomito” e “polso”. È poi presente una testa di forma cilindrica, adibita alla raccolta dei campioni, un giunto ad U tra braccio e testa per rendere quest’ultima quanto più possibile parallela alla superficie da campionare e delle capsule di azoto con aggiunta di elio (per verificare le perdite) che, attivandosi e liberando il gas dopo il contatto con la superficie, provocano la risalita di materiale che viene raccolta dalla testa. Le bombolette vengono attivate indipendentemente l’una dall’altra in quanto il sistema supporta fino a 3 campionature. Il tutto realizzato in lega di alluminio, con una mesh in acciaio inossidabile e avente fori di 38 micron che ha il compito di trattenere la regolite e del flap in Mylar che hanno la funzione di impedire la fuoriuscita del campione una volta raccolto. Vi è inoltre una linea per il gas che ha il compito di trasportare l’azoto fino alla testa del TAGSAM. Sul bordo esterno della superficie di contatto sono presenti poi 24 “contact pads” in velcro metallico e di area complessiva pari a 57.42 cm² che servono a raccogliere il materiale sulla superficie al momento del contatto. I pads raccolgono solo le particelle più piccole per evitare che vi siano problemi nella fase di aggancio alla Sample Return Capsule (SRC), situata in cima allo spacecraft. La SRC rimane chiusa durante il volo per poi aprirsi ad acquisizione terminata. Il braccio robotico inserisce la testa nella capsula facendola combaciare con un capture ring, la testa viene fissata alla capsula e poi il braccio si sgancia da quest’ultima. Infine, il sistema è dotato di “witness plates” che hanno la funzione di isolare le sostanze contaminanti presenti nel campione prima dell’acquisizione, nel tempo tra l’acquisizione e lo stoccaggio nella capsula e durante lo stoccaggio.



(a)

Figura 3.6: Modello 3D del sistema TAGSAM

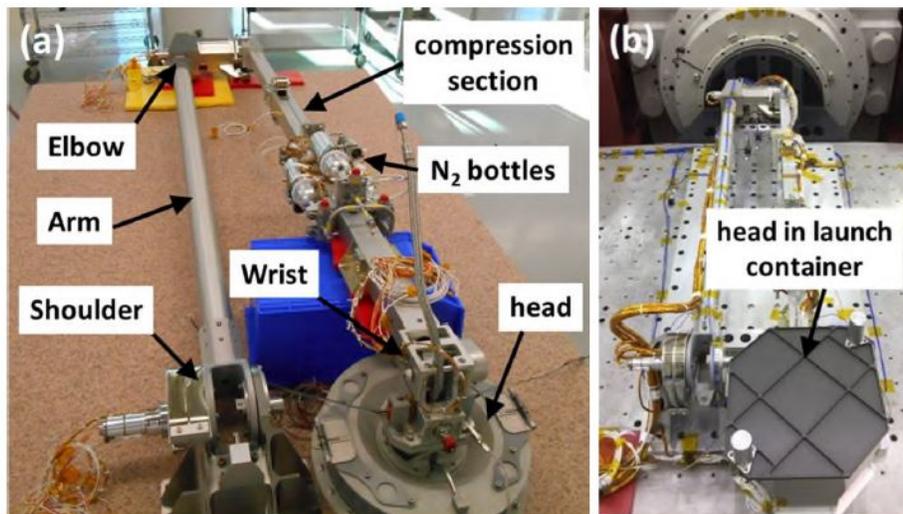


Figura 3.7: Sistema TAGSAM realizzato

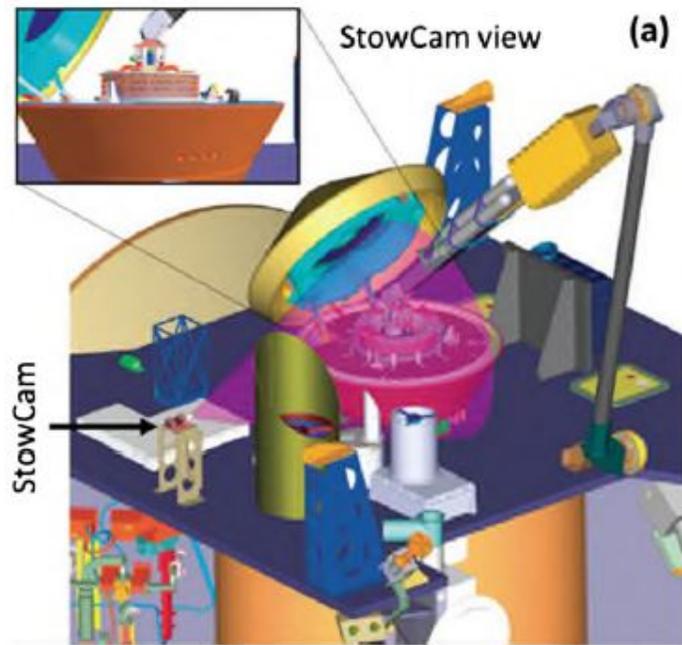


Figura 3.8: Modello 3D della capsula di rientro (SRC) aperta

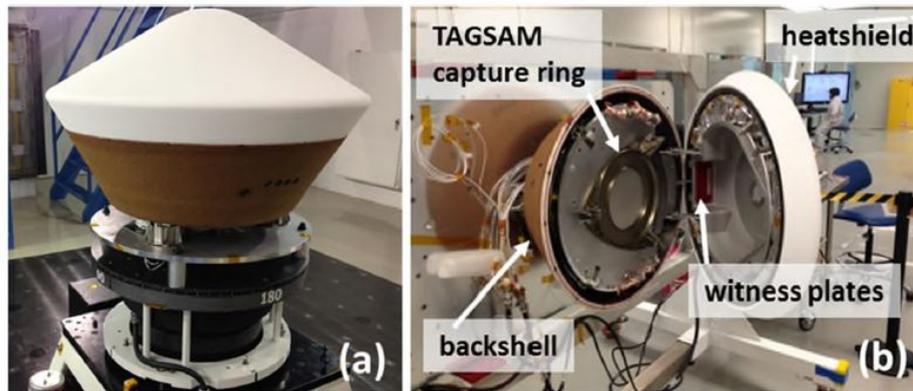


Figura 3.9: Sample Return Capsule (SRC)

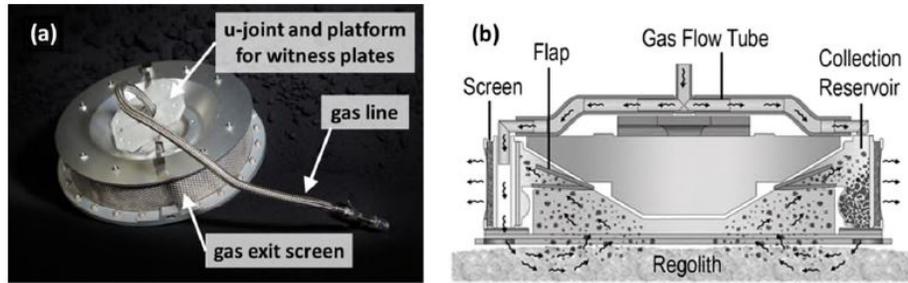


Figura 3.10: Vista esterna della sonda OSIRIS-REx

3.3 Martian Moon Explorer

Indicata con l'acronimo di MMX [13], la missione JAXA in programma per il 2024 prevede l'invio di una sonda in grado di raccogliere campioni dalla luna marziana Phobos e di riportarli sulla Terra per le analisi allo scopo di comprendere come materia organica e acqua siano arrivate sulla Terra e per fornire informazioni utili a future missioni umane su Marte. Inoltre, dal momento che su Phobos potrebbe esserci materiale proveniente da Marte, questa potrebbe essere la prima missione in grado di portare sulla Terra materiale proveniente dal pianeta rosso. Il sistema di campionamento usato utilizza un apparato dotato di una barra metallica che viene affondata nel terreno e una serie di sensori che servono a capire la resistenza del terreno al fine di valutare quale sia la migliore area per le procedure di campionamento. MMX dispone di due campionatori, un P-sampler e un C-sampler. Il C-sampler è un campionatore a doppio cilindro che viene rilasciato da una lega a memoria di forma (SCSMA) ed effettua un carotaggio nel terreno acquisendo 10 g di materiale per una lunghezza di più di 2 cm; il campione viene mantenuto fermo da un meccanismo di blocco a sfera e viene poi spostato in un container tramite un braccio robotico detto "Sample Transfer Unit" che contiene un controller e sensori per le misurazioni da effettuare sul terreno per la scelta del sito di campionamento. Il container viene poi spostato all'interno di una capsula di rientro. Il P-sampler invece sfrutta la pressione di un gas per raccogliere campioni dalla superficie, i quali vengono a loro volta posti in un container separato dal primo e poi mandati alla capsula di rientro tramite manipolatore. Una volta che i campioni sono stati raccolti, all'in-

serimento nella capsula una molla precaricata viene rilasciata creando una pressione sufficiente a realizzare un sigillo metallico tra container e capsula.

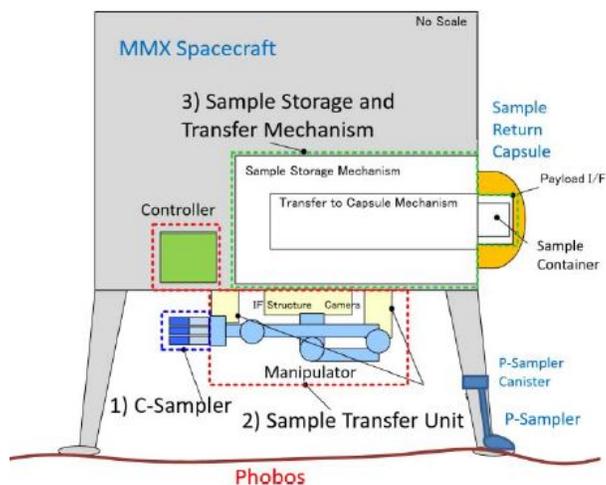


Figura 3.11: Schema della sonda MMX

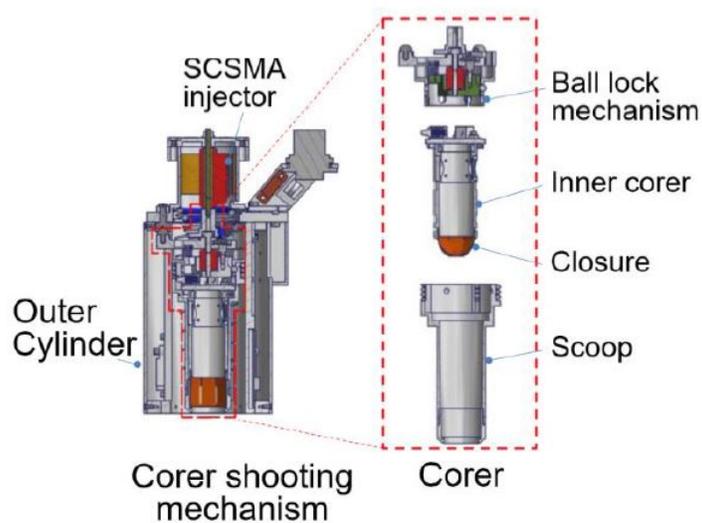


Figura 3.12: Modello 3D del sistema di campionamento

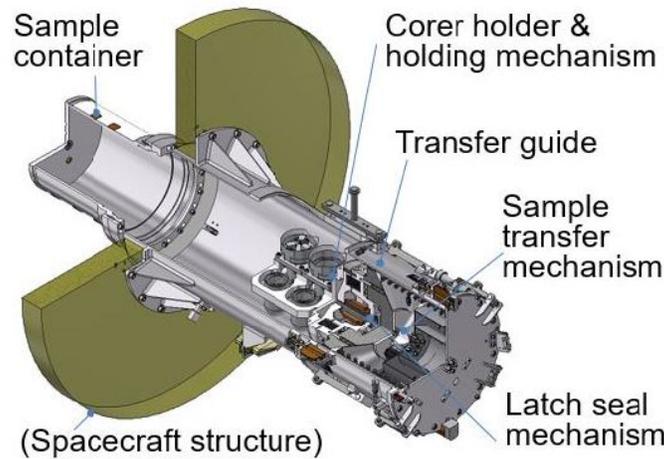


Figura 3.13: Modello 3D del sistema di storage del campione

3.4 MARS 2020

La MARS 2020 [12] è una campagna di missioni concepita dalla NASA che si divide in 4 fasi:

1. Invio su Marte di un rover il cui compito consiste nel raccogliere campioni di terreno, inserirli in provette ermeticamente sigillate e depositarli in attesa di una futura missione
2. L'invio su Marte di un Sample Return Lander (SRL) incaricato di raccogliere i campioni e inserirli in un Orbiting Sample Container (OS) per poi lanciarlo in orbita tramite il Mars Ascent Veichle (MAV)
3. L'invio in orbita attorno a Marte di un Sample Return Orbiter (SRO) che dovrà effettuare un docking con il MAV e dirigersi verso la Terra con il campione
4. La realizzazione sulla Terra di una Mars Returned Sample Handling Facility (MRSH) che dovrà provvedere allo stoccaggio e quarantena del campione, oltre alle strumentazioni necessarie alle analisi

Il design dell'OS proposto dal Mars Formulation Office del JPL è stato soggetto a diverse modifiche nel corso del tempo per adattarlo ai diversi requisiti

di missione, ma il design attuale risulta il seguente:
il sistema prevede l'uso di due componenti principali detti OS shell e OS canister. L'OS shell è essenzialmente il coperchio del porta-campioni ed ha una parte centrale (il core) in cui è presente una barra metallica con un sistema di aggancio (shell rod) e un foglio di schiuma d'alluminio che ha la funzione di tenere ben saldi i campioni. Sono presenti, inoltre, delle cavità in cima e lateralmente al guscio dove sono alloggiati, in cima, la shell rod e ai lati il beacon e le relative batterie per la localizzazione in orbita. È altresì presente una zona di interfaccia col MAV.

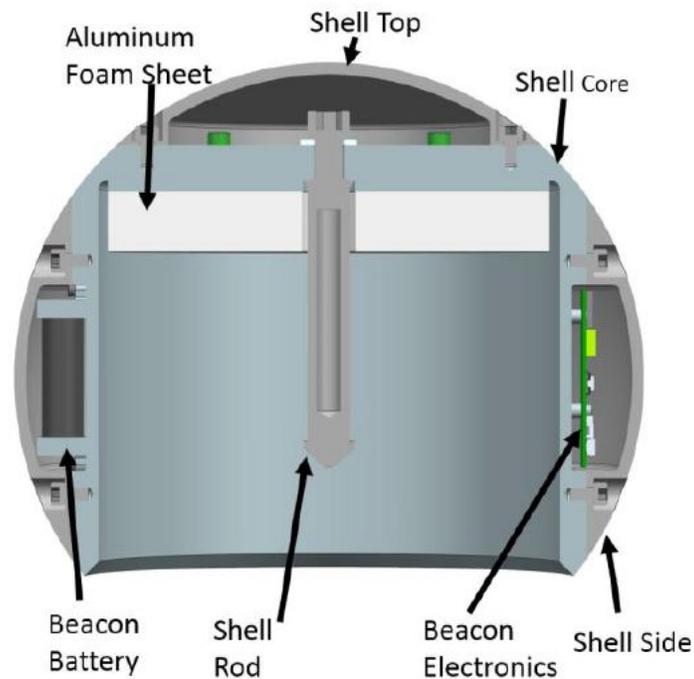


Figura 3.14: Vista in sezione del guscio esterno dell'OS

L'OS canister è il porta-campioni vero e proprio. Può contenere fino a 36 provette di terreno ed è provvisto anche di due piccole taniche da 70 cc sul fondo per la raccolta dell'atmosfera marziana senza sistemi di compressione. Si prevede che il sistema debba raccogliere almeno 50 cc di atmosfera. È dotato anche di due piastre forate che hanno il compito di tenere in posizione le provette e di un meccanismo ad artiglio flessibile (Flexure claw mechanism)

che va accoppiato con la shell rod di cui sopra. Nel momento in cui lo shell viene calato sul canister la shell rod e il flexure claw mechanism vengono agganciati e, tramite una vite sul fondo del canister, lo shell viene tirato verso il fondo in modo da generare un carico di 100 N e schiacciare le provette contro la schiuma per tenerli fermi. Le provette sono ulteriormente tenute in posizione da una scanalatura presente sulle stesse che va ad agganciarsi con le piastre forate, senza tuttavia impedirne l'estrazione.

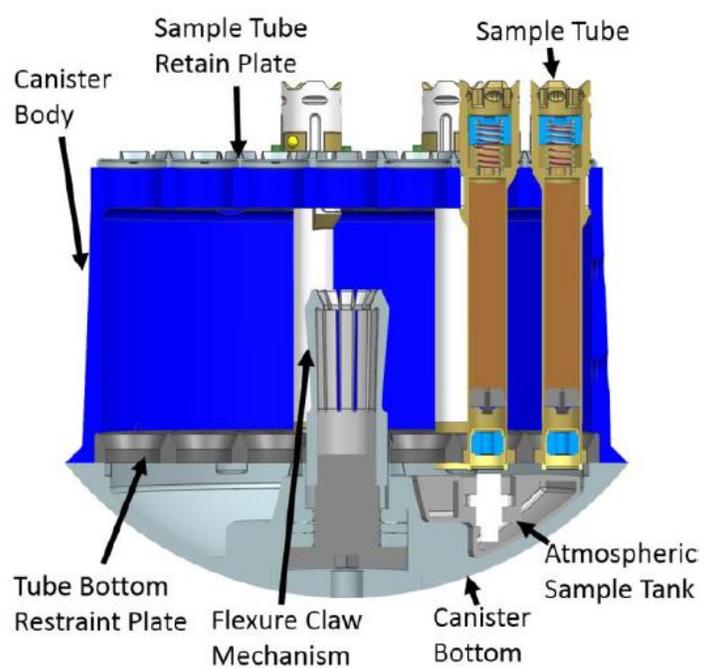


Figura 3.15: Vista in sezione del canister dell'OS

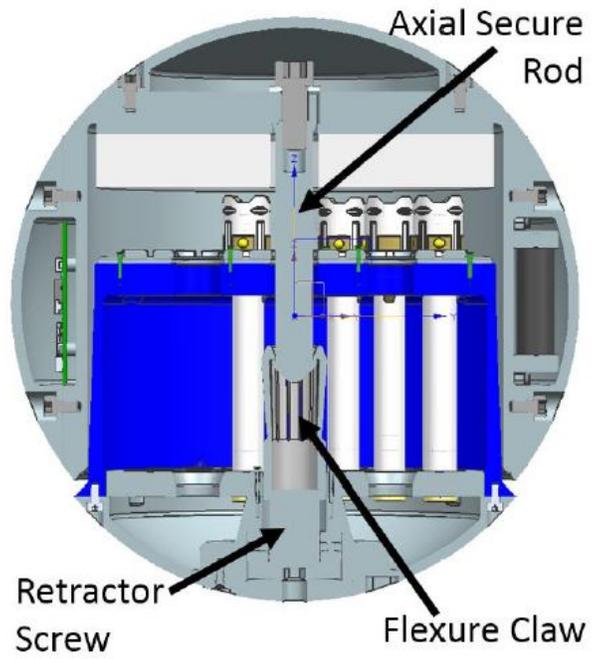


Figura 3.16: Vista in sezione dell'OS

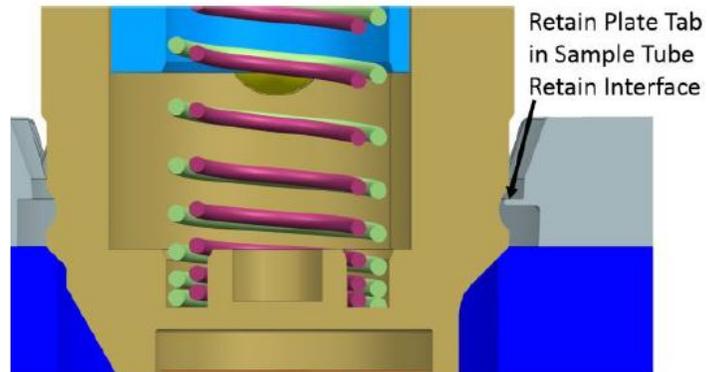


Figura 3.17: Vista in sezione dell'aggancio della provetta alla piastra

Capitolo 4

Sistema di miscelazione

4.1 Apparato per la miscelazione

Come preannunciato all'interno dell'abstract il campione di terreno marziano dovrà essere inserito nel contenitore insieme ad acqua e gas per pressurizzare il tutto portando il sistema chiuso a 1 atmosfera e a 80°C di temperatura mediante un sistema di riscaldamento. Una volta combinato con l'acqua il campione dovrà essere miscelato prima di passare al lab-on-chip.

Sono stati passati al vaglio diversi sistemi di miscelazione, come uno shaker, un miscelamento a ultrasuoni oppure un miscelatore ad asta da inserire all'interno del canister, ma in questo design si è preferito optare per un sistema diverso, usato ampiamente nel settore chimico, ossia l'impiego di un agitatore magnetico (stir bar). L'apparato consiste in un motorino in corrente continua, alimentato con una tensione da determinarsi per via sperimentale, sul cui asse è calettato un magnete permanente, mentre all'interno del canister dovrà essere presente un agitatore magnetico. All'invio di corrente al motorino il magnete inizia a ruotare facendo ruotare a sua volta anche l'agitatore presente all'interno del canister e creando un vortice che miscela il campione. Il sistema così proposto è vantaggioso poiché permette di avere separazione degli ambienti, evitando quindi di forare ulteriormente il contenitore (aggiungendo possibili fonti di perdite); inoltre permette di ridurre gli ingombri e le masse sia in termini di guarnizioni sia in termini di attuatori necessari all'avvio della miscelazione e riduce anche le vibrazioni rispetto a uno shaker tradizionale. Gli unici svantaggi sono:

- Il contenitore deve essere realizzato in materiale diamagnetico. Essen-

do la stir bar stessa un magnete, la miscelazione non può avvenire se l'agitatore si accoppia magneticamente con il contenitore

- Partendo con il coperchio in posizione di chiusura l'ancoretta è un elemento mobile. Sul meccanismo di chiusura deve pertanto essere previsto un sistema di alloggiamento dell'agitatore. Così facendo, all'apertura del porta-campioni l'ancoretta viene trascinata e lasciata cadere per gravità nel contenitore.

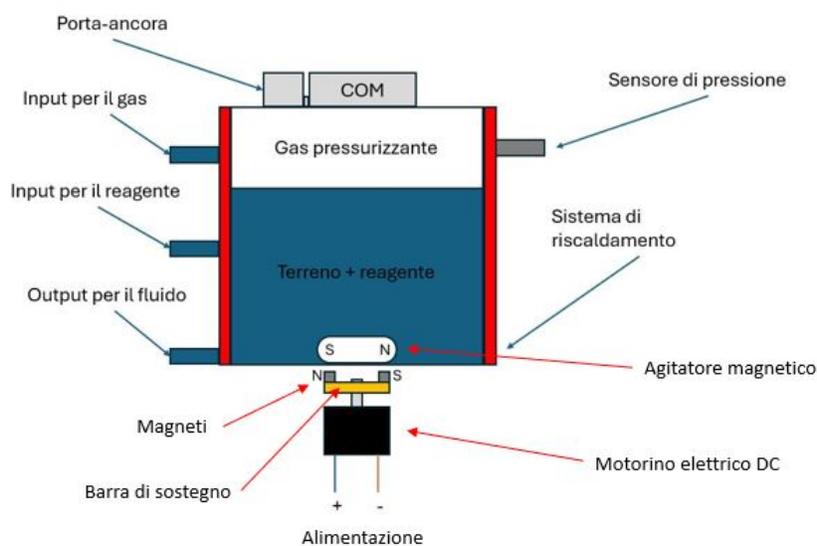


Figura 4.1: Diagramma dell'apparato di miscelazione

Per il sistema di miscelazione proposto sono stati identificati quindi 1 agitatore magnetico di 2 cm di lunghezza e 7 mm di diametro rivestito in PTFE.



Figura 4.2: Ancoretta magnetica usata per il setup

Il range di temperature in cui può lavorare varia tra -196°C e $+250^{\circ}\text{C}$ quindi non vi sono problemi di compatibilità con le temperature richieste per il campione. Un valore preciso della massa, così come il materiale del nucleo magnetico non è disponibile.

Per quanto riguarda i magneti sono stati identificati dei magneti quadrati al neodimio B662 della K&J[2], realizzati in NdFeB, aventi massa pari a 2.16 g e con campo superficiale pari a 3387 gauss. Per un corretto funzionamento non devono lavorare oltre gli 80°C , ma non trovandosi a contatto diretto con il contenitore il rischio è minimo.

Il concept iniziale prevedeva l'utilizzo di un magnete più potente per tenere l'agitatore legato al fondo del canister, tuttavia l'idea è stata scartata per due motivi: trattandosi di due magneti permanenti, il calcolo della forza magnetica per via analitica è estremamente oneroso poiché dipende da un gran numero di variabili e gli studi presenti coinvolgono solo magneti di forma uguale; inoltre l'uso di un campo magnetico più potente potrebbe portare ad attivazione le microbiglie magnetiche presenti nel lab-on-chip, andando a comprometterne il funzionamento.

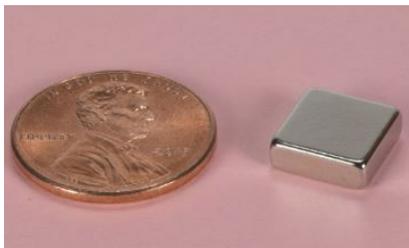


Figura 4.3: Magnete usato nel setup

Per il motorino in corrente continua è sufficiente prendere un qualsiasi motorino con rotazioni per minuto fino a 1000-1500 e variare la tensione di funzionamento fino a raggiungere le rpm più adatte. Di questo aspetto si parlerà però nella sezione dedicata agli sviluppi futuri.

4.2 Fisica del vortice

La fisica dietro la miscelazione del campione può essere riassunta tramite il concetto del vortice di Rankine. In base a tale descrizione, il vortice generato dall'agitatore è una combinazione di un vortice forzato nella colonna di fluido

sopra la stir bar e di un vortice libero all'esterno del primo. In particolare, definendo con c il raggio del vortice forzato, r la coordinata del raggio e z la coordinata verticale, il campo di velocità del fluido si può descrivere con 3 componenti ossia *velocità radiale* V_r lungo la coordinata r , *velocità tangenziale* V_t e *velocità verticale* V_z lungo la coordinata z tali che:

$$V_r = 0$$

$$V_t = \begin{cases} \frac{Cr}{c^2}, & r \leq c \\ \frac{C}{r}, & r > c \end{cases}$$

$$V_z = 0$$

con C parametro proporzionale alla circolazione del fluido. In base a esperimenti svolti dall'università di Pázmány [7] in Ungheria, usando un agitatore magnetico di lunghezza $2a$ e diametro d , immerso in un contenitore di raggio R riempito d'acqua il cui livello, con l'ancoretta già inserita, è indicato con H , dopo l'instaurarsi del vortice il livello dell'acqua si abbassa nella zona centrale del vortice mentre si alza fino a raggiungere H' sui bordi del contenitore, producendo un Δh pari a $H'-h$, con h la distanza tra livello minimo dell'acqua e il fondo del contenitore, con le dovute correzioni per via dell'effetto lente del contenitore in vetro.

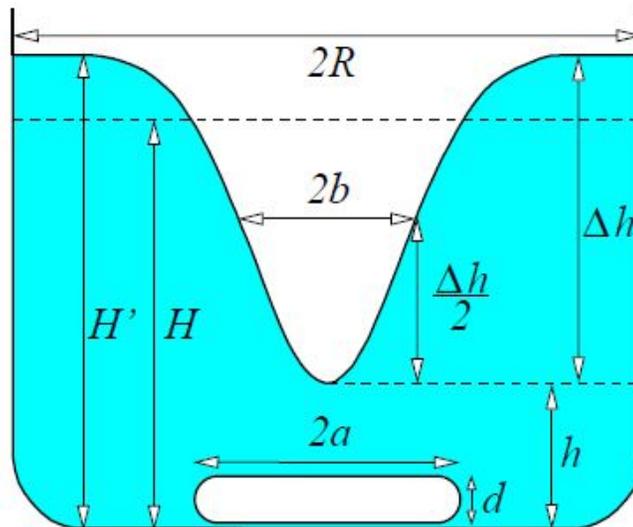


Figura 4.4: Rappresentazione del vortice nel contenitore con i relativi parametri

Dai risultati è emerso che, definita Ω la frequenza di rotazione dell'agitatore, il Δh è proporzionale a Ω^2 e che il parametro C è definibile come $C = Ah$ dove A è un coefficiente determinato sperimentalmente. Per determinare i parametri della zona centrale del vortice, quindi b e h è stata svolta un'analisi dimensionale che coinvolge i numeri di Reynolds e Froude dal quale risulta che

$$\Delta h = \frac{\Omega^2 a^2 d^2 R^{\frac{1}{2}}}{\nu(\alpha H + kR)g^{\frac{1}{2}}}$$

e che la sua dipendenza da H sia piuttosto debole. Per la semi-larghezza b invece è emerso che non dipende dalla frequenza di rotazione della stir bar, come non dipende nemmeno da H, portando alla seguente relazione:

$$b = \frac{\beta a \nu}{d(gR)^{\frac{1}{2}}}$$

Per quanto riguarda invece il parametro c, risulta che la sua espressione è la stessa di b

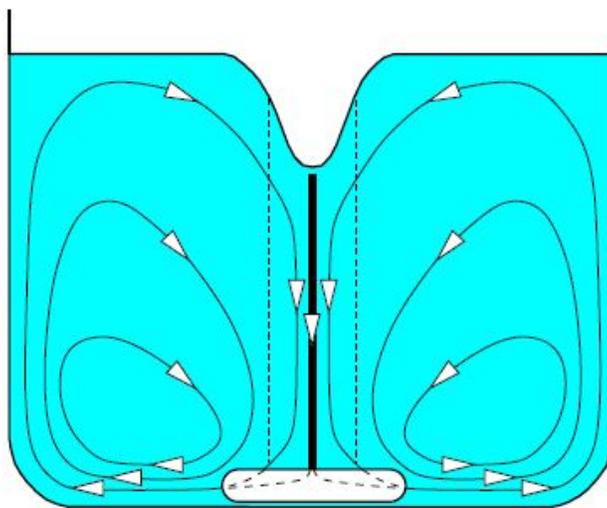


Figura 4.5: Rappresentazione delle zone convettive laterali nel vortice e del risucchio centrale

Capitolo 5

Dimensionamento del canister

5.1 Sezione inferiore

In base a quanto specificato nella sezione precedente, dovendo individuare un materiale diamagnetico per la realizzazione del contenitore, la scelta è ricaduta sul titanio puro, in quanto la lega titanio-vanadio (Ti-6Al-4V), pur essendo molto usata in ambito aerospaziale, presenta un debole comportamento paramagnetico. Dato il sistema di miscelazione in uso, il canister è stato concepito per emulare un becher usato in chimica, pertanto la forma più adatta è quella cilindrica.

Il cilindro principale del porta-campioni deve resistere a una pressione interna di massimo 1 atmosfera (101325 Pa). Considerando che lo spessore del cilindro è calcolabile con la seguente formula [8]:

$$t = \frac{S_f P r}{\sigma_{Ti}}$$

Dove t indica lo spessore del case, S_f il fattore di sicurezza, che è impostato a 2 per piccoli contenitori in pressione, P la pressione di esercizio in Mpa e r il raggio interno del contenitore in m. σ_{Ti} è la resistenza ultima a trazione del titanio, pari a $1.23 * 10^9$ Pa, espressa in Mpa. Dai calcoli si ottiene uno spessore troppo piccolo per essere fattibile a macchina, quindi è stato approssimato a 1 mm, anche in previsione dei carichi assiali che dovrà gestire a causa del sistema di chiusura, dei carichi di lancio e dovuti ai carichi termici. Dovendo contenere un volume massimo di 200 ml, l'altezza massima del contenitore risulta pari a 44.8 mm con un diametro di 75.4 mm.

Il cilindro è composto da 2 parti, una prima parte, che è il cilindro vero e

proprio, alta 44.8 mm e avente raggio paria 37.7 mm e un coperchio spesso 5mm su cui è praticato un foro di diametro pari a 25 mm non centrato. La prima parte si presta meglio a essere realizzata tramite processi di imbutitura [14], quindi, per i raggi di raccordo di matrice e punzone è stata usata la seguente regola empirica [3]:

$$R_m = K \sqrt{(D - d)s}$$

$$5s \leq R_p \leq 0.3d$$

dove D è il diametro del disco della lamiera di partenza, s è lo spessore e d è il diametro del punzone e K è una costante che varia tra 0.8 e 0.9. Tra matrice e punzone vi è un gioco calcolabile con $g = s + K' \sqrt{10s}$ dove K' è una costante che vale 0.07 per gli acciai, 0.02 per le leghe di alluminio e 0.04 per gli altri materiali. Considerando un diametro di lamiera D grande a sufficienza da consentire l'asportazione di eventuali orecchie risultano raggi di raccordo del punzone pari a 5 mm e della matrice pari a 6.8 mm (leggermente maggiorato).

Il canister prevede la presenza sia di porte di input, per reagente e gas, sia di porte di output per il fluido da convogliare verso il lab-on-chip. Le porte devono avere una sezione di passaggio del fluido con diametro pari a 2 mm e, dovendo essere collegate alla mini fluidica, la scelta per il collegamento è ricaduta sui raccordi portagomma (hose barb) tipo Polyconn[4].



Figura 5.1: Raccordo per la mini fluidica

Essendo necessaria anche la presenza di un sensore di pressione è stata prevista la presenza di un'altra porta sfasata di 90° rispetto alle porte per i fluidi/gas per evitare che le vibrazioni dovute al passaggio del fluido influiscano negativamente sulla lettura della pressione. Tutte le porte dovranno essere saldate sulla superficie del canister.

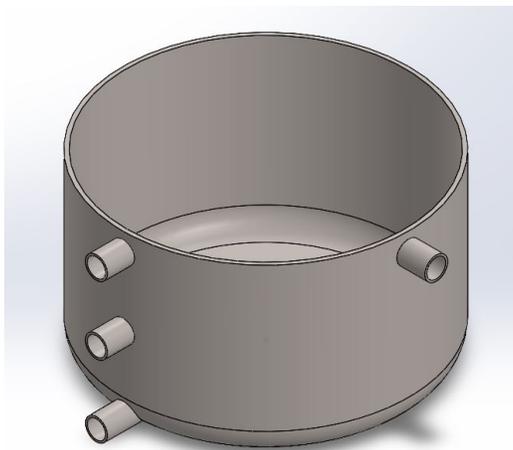


Figura 5.2: Modello 3D della parte inferiore del canister con le varie porte

5.2 Sezione superiore

La sezione superiore del canister è stata progettata come una piastra circolare di 75.4 mm di diametro avente solo un foro per il campione di 25 mm di diametro e non centrato. Collegata alla piastra circolare vi è poi un'altra piastra rettangolare, con bordi raccordati, che ha la funzione di supporto per il sistema di chiusura quando questo si trova in posizione aperta, nel momento in cui il campione viene inserito. La piastra è stata progettata con uno spessore di 5 mm per resistere ai carichi derivanti dal sistema di chiusura ed evitare quindi spostamenti eccessivi che potrebbero compromettere la tenuta in pressione del canister.

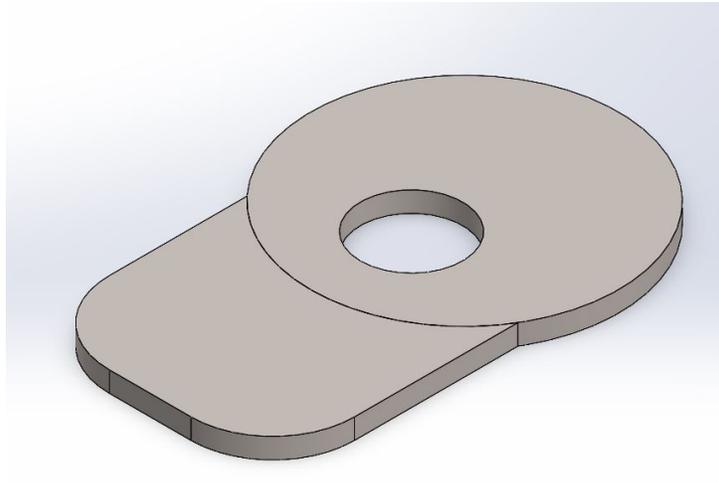


Figura 5.3: Modello 3D della parte superiore del canister

Capitolo 6

Sistema di chiusura

Il canister menzionato nei capitoli precedenti deve sostenere una pressione massima di 1 atmosfera. Considerato che il foro per il campione ha 25 mm di diametro, il sistema di chiusura dovrà applicare una forza di circa 100 N. Per ottemperare al requisito è stato pensato un sistema composto da due coperchi, uno per il canister e uno che funge da interfaccia tra laboratorio e ambiente esterno, entrambi composti da due parti, un alloggiamento per l'o-ring in PTFE e un coperchio a cupola ellittica di semiasse minore pari a 1 mm e semiasse maggiore pari a 12.5 mm. Gli o-ring sono stati scelti in PTFE in quanto il range di operatività va dai -240 °C ai +260°C e il loro fissaggio al sistema di chiusura può essere effettuato tramite vulcanizzazione. Entrambi i coperchi sono stati realizzati in alluminio 2024, dal momento che è la lega più utilizzata in ambito aerospaziale.

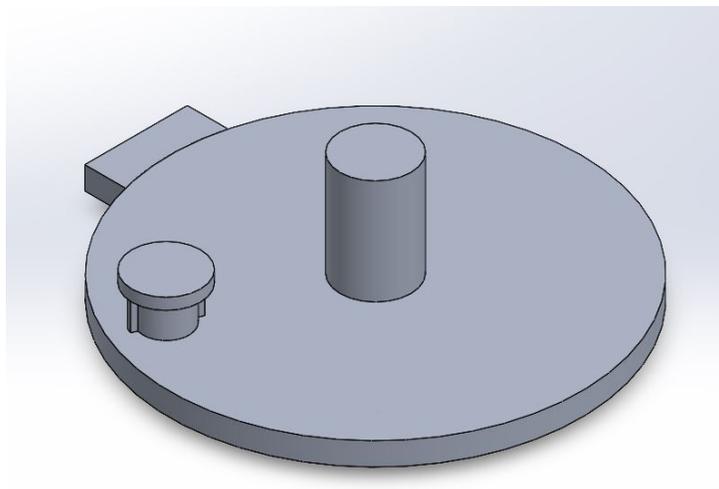


Figura 6.1: Modello 3D del coperchio inferiore

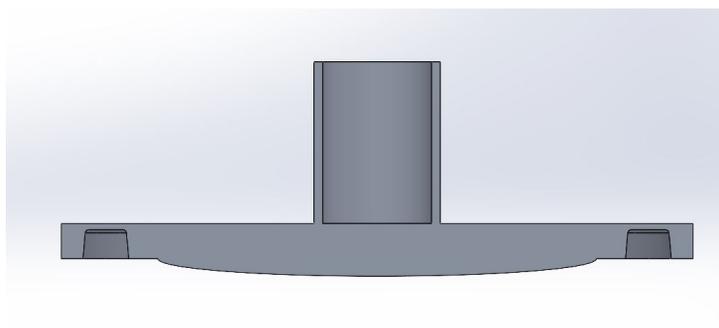


Figura 6.2: Sezione del coperchio superiore

Per sostenere il carico dichiarato sopra si era pensato inizialmente all'impiego di una molla a spirale, ma dal momento che il sistema dovrà essere alloggiato in uno spazio di massimo 10 cm di altezza, si è preferito optare per le molle a tazza, il cui ingombro è notevolmente minore. Vi sono però delle controindicazioni in quanto, nonostante il ridottissimo ingombro, la corsa è minima, quindi, considerata l'altezza delle cupole ellittiche, sono necessari 2 mm di corsa per spostare il coperchio da una posizione di chiusura a una posizione di apertura. Le molle scelte hanno una corsa massima di 0.34 mm, quindi si è deciso di metterne alcune in serie per avere la stessa forza, ma una corsa disponibile maggiore. Dai datasheet, le molle scelte esercitano un

carico di 147 N in massima compressione, quindi, per ottenere un carico di 100 N è sufficiente comprimere ogni singola molla di 0.24 mm, pertanto, per coprire i 2 mm di corsa sono sufficienti 20 molle impilate in serie. Per evitare problemi di flessione delle molle a seguito dello spostamento, entrambe i coperchi hanno degli alberi che fungono da porta-molla aventi altezza pari all'altezza della molla equivalente in posizione di chiusura, quindi 9.2 mm. La scelta della molla è ricaduta sulla 1250-620-35-316 della Sodemann[5] in acciaio inox (W. No. 1.4310), dal momento che il campo di operatività varia tra -200°C e $+200^{\circ}\text{C}$, mentre gli altri materiali presentavano limite inferiore di temperatura non adeguato.

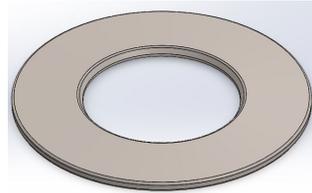


Figura 6.3: Modello 3D della molla a tazza

In posizione di chiusura ogni molla è compressa di 0.24 mm, quindi la lunghezza compressa risulta pari a 0.56 mm (11.2 mm considerando la totalità delle molle impilate), mentre in posizione di apertura ogni molla è compressa al massimo, quindi ha un'altezza di 0.46 mm portando a un'altezza complessiva delle molle di 9.2 mm. Si è quindi ottenuta la differenza di 2 mm cercata. Considerando anche lo spessore dei due alloggiamenti dell'o-ring e delle due cupole, sia in posizione di apertura che in chiusura si ottiene un'altezza del COM pari a 15.2 mm.

Il design iniziale del coperchio prevedeva la presenza di un foro centrale di alloggiamento per l'ancoretta, in modo che questa venisse trascinata per gravità all'interno del canister, ma questo design si basava sul fatto che il coperchio partisse da una posizione aperta. Per ovviare al problema si è valutato un collegamento, al coperchio inferiore, di un porta-ancoretta in titanio, posizionato però in orizzontale, che assolve alla stessa funzione: passando in posizione di apertura trascina l'ancoretta sopra il foro del canister, facendola cadere per gravità all'interno dello stesso. Inizialmente il COM era stato concepito per essere più basso, tuttavia a causa della presenza del porta-ancora è stato necessario aumentarne l'altezza. Questo ha reso necessaria una ri-

duzione dell'altezza del canister (e quindi un allargamento del diametro) in modo da avere sufficiente spazio per il setup di miscelazione.

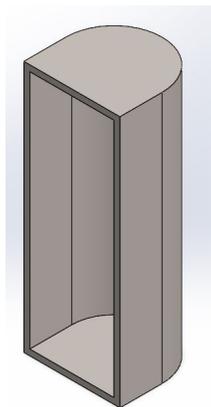


Figura 6.4: Modello 3D del porta ancora, in verticale

Per passare dalla posizione di apertura a quella di chiusura e viceversa è richiesto un sistema di attuazione che sia regolabile per permettere uno spostamento di un certo angolo (circa 94.59°), quindi si è optato per un servo motore. Definita la posizione dell'attuatore è stato necessario tracciare una "guida circolare" per determinare il raggio migliore per connettere l'attuatore al COM, che risulta essere pari a 18.5 mm. Si è quindi realizzato un segmento di collegamento in alluminio 2024 da agganciare al coperchio inferiore e all'asse del motore. La parte inferiore del coperchio può allora muoversi liberamente di massimo 1 mm, ossia l'esatta distanza verticale richiesta per passare dalla posizione di apertura a quella di chiusura. Per ragioni di sicurezza il movimento verticale è limitato dalla rondella posta sopra il sistema di aggancio.

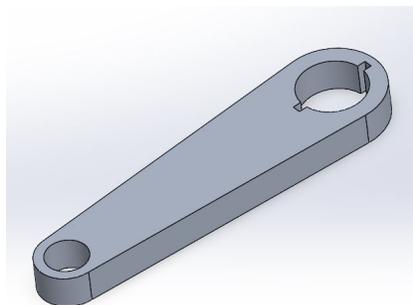


Figura 6.5: Modello 3D del segmento di collegamento

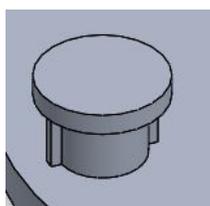


Figura 6.6: Dettaglio del sistema di aggancio del coperchio inferiore

Di seguito sono riportate le immagini relative al modello finale in posizione di apertura, chiusura e nel momento in cui l'ancoretta viene rilasciata

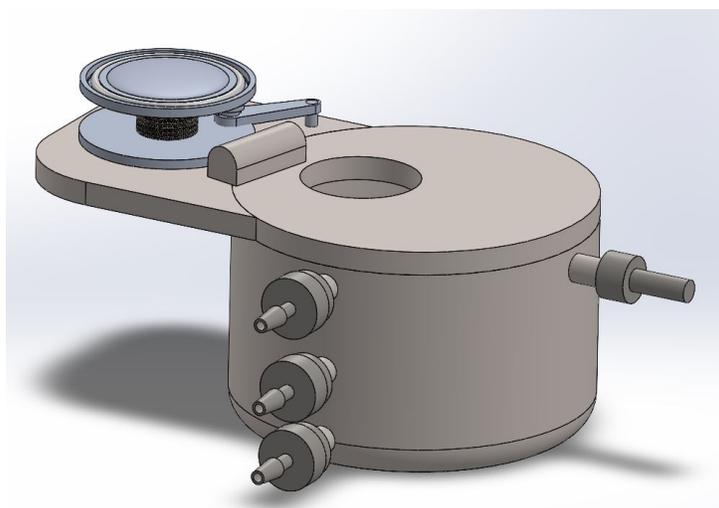


Figura 6.7: Modello del sistema in posizione di apertura

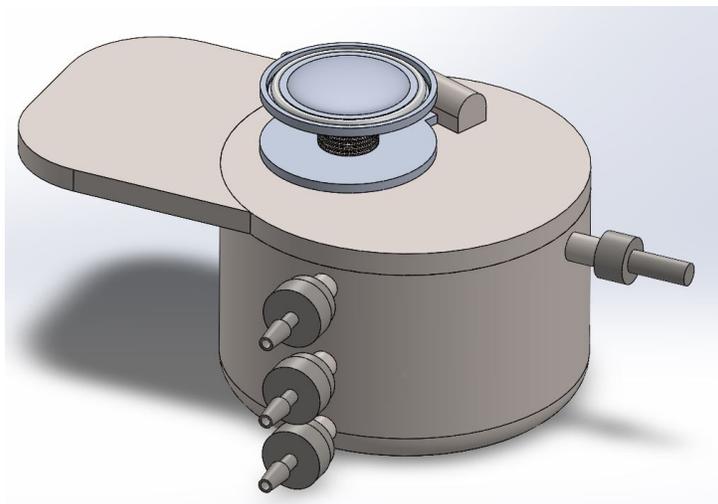


Figura 6.8: Modello del sistema in posizione di chiusura

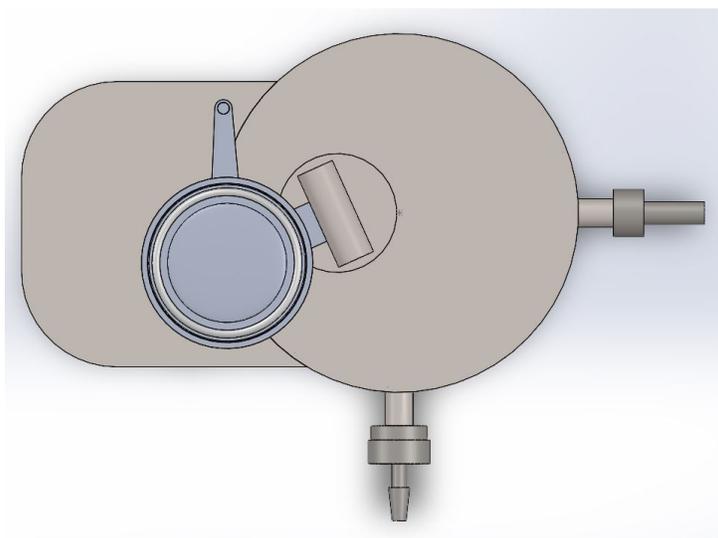


Figura 6.9: Rilascio dell'ancoretta durante l'apertura

e le immagini relative al sistema di chiusura in posizione aperta e chiusa in presenza di una lastra che simula la parete del Cubesat.

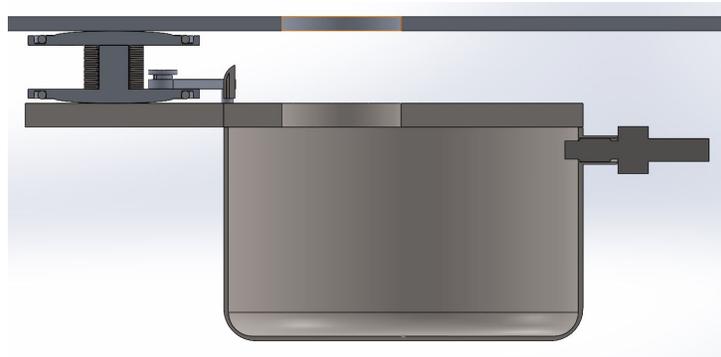


Figura 6.10: Sezione del porta campioni in configurazione aperta

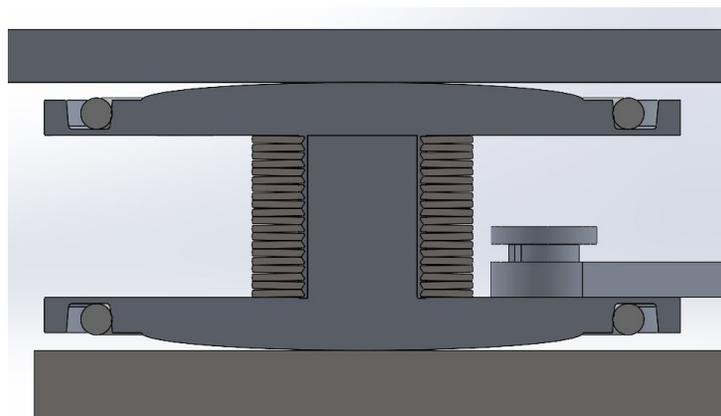


Figura 6.11: Particolare del sistema di chiusura in configurazione aperta

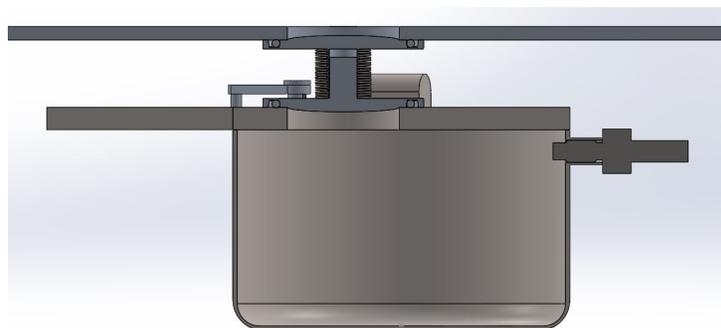


Figura 6.12: Sezione del porta campioni in configurazione chiusa

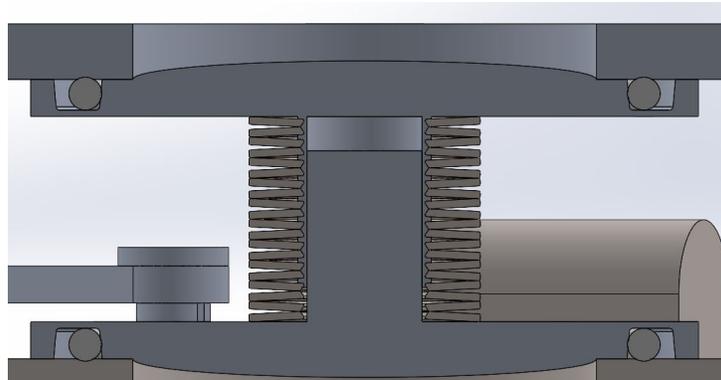


Figura 6.13: Particolare del sistema di chiusura in configurazione chiusa

Considerato un carico massimo di 147 N, sapendo che, nel caso in cui non vi sia alcun coating per ridurre l'attrito, il coefficiente di attrito statico tra alluminio e titanio varia tra 0.34 e 0.29, prendendo un valore medio di 0.315, avendo un braccio di 32.5 mm e un sistema di chiusura il cui peso è di circa 19.94 g (6 g per le molle, 6.6 per il coperchio inferiore, 5.75 per l'inferiore, 0.5 per il portamotore, 1.09 per il porta-ancora), trascurando gli o-ring si ottiene una coppia necessaria di 0.9 Nm.

Capitolo 7

Analisi e sviluppi futuri

7.1 Analisi statiche

Sono state condotte due analisi statiche del sistema progettato usando gli strumenti forniti da Solidworks. Nel modello 3D rappresentato è presente una lastra di alluminio 2024 rappresentativa del confine tra Cubesat e ambiente marziano.

7.1.1 Configurazione aperta

In configurazione aperta il porta-campioni è esposto all'ambiente marziano, quindi sono stati applicati i seguenti carichi:

- 147 N da parte delle molle a tazza
- Carico termico di -80°C tra la lastra e il canister, all'interno del canister e sopra la lastra
- Carico termico di 20°C nella zona del canister.
- Gravità terrestre
- Pressione di 1 atm nella zona del canister

Si riportano quindi i risultati in termini di spostamenti, sforzi e deformazioni



Figura 7.1: Analisi statica in posizione di apertura, vista frontale

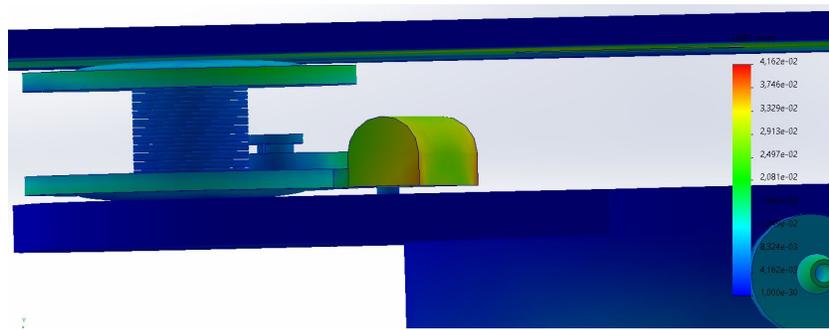


Figura 7.2: Analisi statica in posizione di apertura, dettaglio del sistema di chiusura

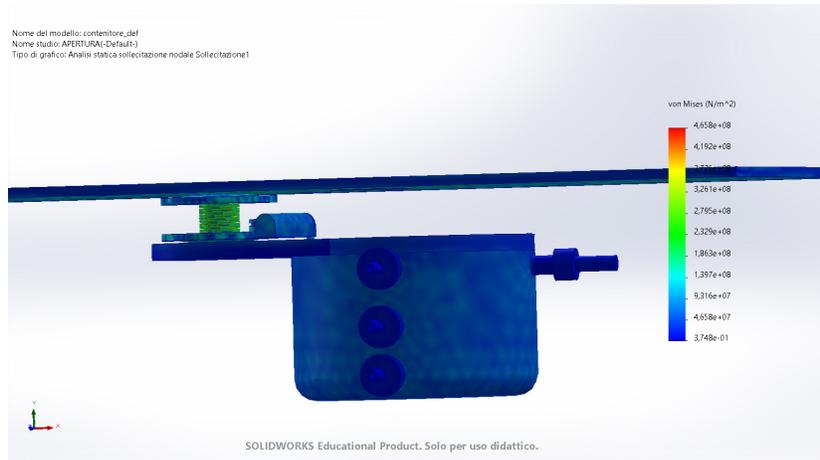


Figura 7.3: Analisi statica in posizione di apertura, sollecitazioni

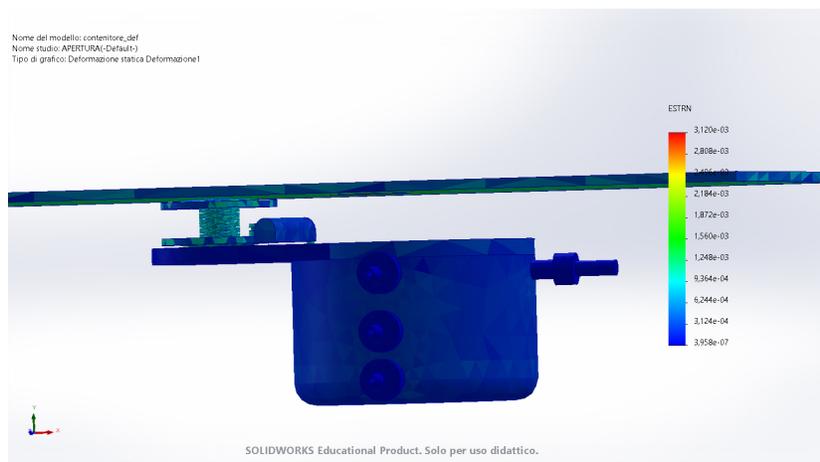


Figura 7.4: Analisi statica in posizione di apertura, deformazione

Si può vedere che lo spostamento massimo del sistema è pari a massimo 4.162×10^{-2} mm localizzato nella zona del porta-ancoretta e sulla lastra.

7.1.2 Configurazione chiusa

In configurazione di chiusura il contenitore è isolato dall'ambiente marziano, quindi i carichi applicati sono i seguenti

- Un carico di circa 103.7 N dovuto alle molle compresse
- Un carico in pressione di 1 atmosfera nella zona del canister esternamente ad esso
- Carico in pressione di 2 atmosfere all'interno del canister
- Un carico termico di 80°C nel canister e sulla superficie esterna
- Un carico di 5g corrispondente al massimo carico di lancio applicabile usando il lanciatore Vega-C
- Carico termico di -80°C tra il canister e la lastra.
- Carico termico di 20°C nella zona del canister, canister escluso

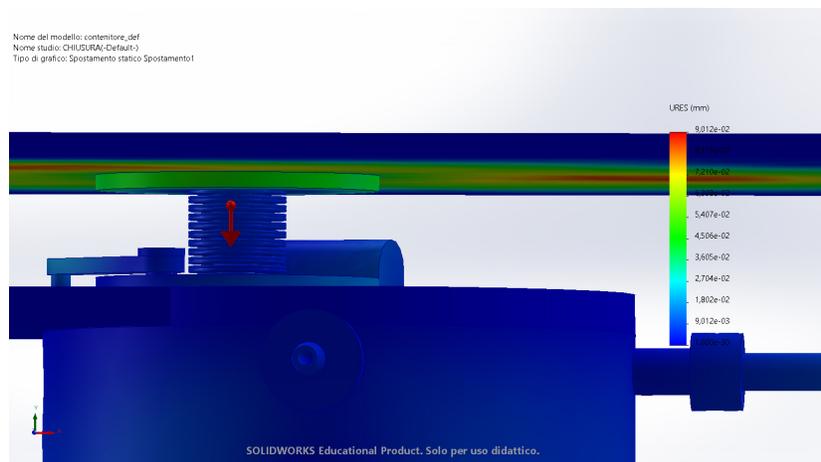


Figura 7.5: Analisi statica in posizione di chiusura, spostamento

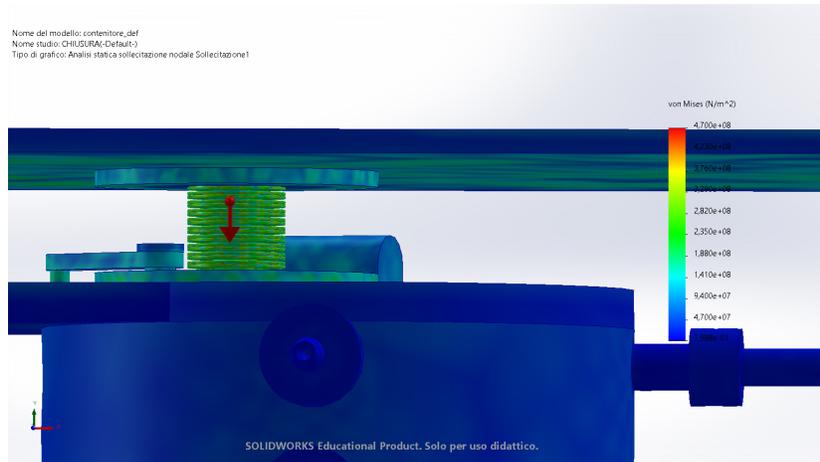


Figura 7.6: Analisi statica in posizione di chiusura, sollecitazioni



Figura 7.7: Analisi statica in posizione di chiusura, deformazione

I risultati dell'analisi mostrano uno spostamento più marcato di massimo $4.506 * 10^{-2}$ mm in corrispondenza della zona della molla. Si è preferito mostrare solo il dettaglio del sistema di chiusura poiché la restante parte del contenitore presentava spostamenti molto bassi e quindi non degni di nota. La lastra presente nei modelli è unicamente rappresentativa della superficie del laboratorio su cui il COM va a premere.

7.2 Sviluppi futuri

Successivamente alla progettazione del porta-campioni, sarà possibile apportare ulteriori perfezionamenti realizzando fisicamente il prototipo e sottoponendolo a una serie di test atti a verificare la correttezza e la validità delle scelte progettuali prese nella fase di design, tra i quali:

- Un test del meccanismo di chiusura, per verificare non soltanto la capacità del sistema di chiudersi e aprirsi a comando, ma anche per verificare la tenuta della piastra di appoggio al carico di 147 N.
- Un test in pressione, per verificare la tenuta del sistema alla pressione di esercizio e alla MEOP.
- Un test in temperatura per verificare che il campione all'interno del contenitore raggiunga gli 80°C.
- Test di miscelazione: dal momento che non esistono criteri oggettivi che permettano di determinare se la miscelazione è avvenuta correttamente, si possono eseguire dei test variando sia il tempo di miscelazione sia le rpm del motorino, variando la tensione ai terminali, per stabilire quali siano i migliori parametri per la miscelazione.

Bibliografia

- [1] URL: <https://www.labtestsguide.com/clia>.
- [2] URL: <https://www.kjmagnetics.com/proddetail.asp?prod=B662>.
- [3] URL: <https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/285967>.
- [4] URL: <https://www.polyconn.com/mb-062>.
- [5] URL: <https://www.molle-industriali.it/1250-620-35-316>.
- [6] Harris J.W. et al. Bierhaus E.B. Clark B.C. “The OSIRIS-REx Spacecraft and the Touch-and-Go Sample Acquisition Mechanism (TAG-SAM).” In: *Space Science Reviews* 214 (2018). ISSN: 1572-9672. DOI: 10.1007/s11214-018-0521-6. URL: <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0521-6>.
- [7] Gábor Halász et al. “Vortex flow generated by a magnetic stirrer”. In: *American Journal of Physics* 75.12 (dic. 2007), pp. 1092–1098. ISSN: 0002-9505. DOI: 10.1119/1.2772287. eprint: https://pubs.aip.org/aapt/ajp/article-pdf/75/12/1092/13126275/1092\1\1_online.pdf. URL: <https://doi.org/10.1119/1.2772287>.
- [8] Ronald D. Humble. *Space Propulsion Analysis and Design*. McGraw-Hill, 1995.
- [9] Beshore E. et al Lauretta D.S. Balram-Knutson S.S. “OSIRIS-REx: Sample Return from Asteroid (101955) Bennu.” In: *Space Science Reviews* 212 (2017). ISSN: 1572-9672. DOI: 10.1007/s11214-017-0405-1. URL: <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0405-1>.
- [10] Radu Mihalache et al. “Closing Force Evaluation of a Sample Return Capsule for a Phobos Sample Return Mission”. In: *Applied Sciences* 11.17 (2021). ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app11178115. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/17/8115>.

- [11] Yamanouchi S. et al. Okazaki R. Sawada H. “Hayabusa2 Sample Catcher and Container: Metal-Seal System for Vacuum Encapsulation of Returned Samples with Volatiles and Organic Compounds Recovered from C-Type Asteroid Ryugu”. In: *Space Science Reviews* 208 (2017). ISSN: 1572-9672. DOI: 10.1007/s11214-016-0289-5. URL: <https://doi.org/10.1007/s11214-016-0289-5>.
- [12] Scott Perino et al. “The evolution of an orbiting sample container for potential Mars sample return”. In: *2017 IEEE Aerospace Conference*. 2017, pp. 1–16. DOI: 10.1109/AERO.2017.7943979.
- [13] Hirotaka Sawada et al. “The MMX Sampler for Phobos Sample Return Mission”. In: *2021 IEEE Aerospace Conference (50100)*. 2021, pp. 1–8. DOI: 10.1109/AERO50100.2021.9438409.
- [14] Steven R. Schmid Serope Kalpakajian. *Tecnologia Meccanica*. Pearson, 2021.
- [15] Yoshikawa M. et al. Watanabe Si. Tsuda Y. “Hayabusa2 Mission Overview”. In: *Space Science Reviews* 208 (2017). ISSN: 1572-9672. DOI: 10.1007/s11214-017-0377-1. URL: <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0377-1>.