



UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA



UNIVERSITA' DELLA CALABRIA

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica e Gestionale

Scuola di Dottorato "Pitagora" in Scienze Ingegneristiche

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Meccanica

La presente tesi è cofinanziata con il sostegno della Commissione Europea,
Fondo Sociale Europeo e della Regione Calabria.

CICLO

XXVIII

TESI

*Progettazione e prototipazione di dispositivi mecatronici
per la gestione sostenibile dell'ecosistema marino.*

Settore Scientifico Disciplinare ING-IND 15

Direttore:

Ch.mo Prof. Sergio Rizzuti

Firma

Coordinatore:

Ch.mo Prof. Leonardo Pagnotta

Firma

Supervisore:

Ch.mo Prof. Maurizio Muzzupappa

Firma

Dottorando: Dott. Francesco Spadafora

Firma

Sommario

Introduzione	5
Capitolo 1	13
1.1 Analisi, studio e salvaguardia dell'ecosistema marino - tecniche di imaging.....	13
1.2 Ricerca e Sviluppo nell'ambito Oil & Gas e cantieristica navale.....	16
1.3 Robotica subacquea, studio dei veicoli e delle strumentazioni	17
1.4 Archeologia subacquea, studi e tecniche di lavoro	26
1.5 Progettazione additiva, prototipazione rapida e stampa 3D	29
Capitolo 2	33
2.1 Introduzione	33
2.2 Progettazione di una mano robotica subacquea.....	35
2.2.1 Progettazione del dito	35
2.2.2 Progettazione del palmo	37
2.2.3 Progettazione dei ruotismi	41
2.2.4 Scelta dei motori.....	44
2.2.5 Progettazione delle tenuta	48
2.2.6 Progettazione dell'elettronica	51
2.2.7 Progettazione del software di controllo.....	53
2.3 Realizzazione della mano robotica subacquea.....	55
2.3.1 Realizzazione del palmo del coperchio e della parte posteriore.....	55
2.3.2 Realizzazione del dito	58
2.3.3 Realizzazione degli elementi in bronzo e degli alberi.....	59
2.3.4 Realizzazione dei ruotismi	60
2.3.5 Assemblaggio della mano robotica	62
2.3.6 Realizzazione dell'elettronica	63
2.4 Test sulla mano robotica	65
2.4.1 Test in camera idrostatica	65
2.4.2 Test in mare	65
2.4.3 Test in vasca a Girona	66
2.5 Caratterizzazione della mano robotica.....	69
2.5.1 Descrizione del banco prova.....	70
2.5.2 Setup sperimentale	71

2.5.3 Test di calibrazione e analisi dei dati ottenuti.....	73
Capitolo 3	77
3.1 Introduzione - I manipolatori subacquei	77
3.2 Reingegnerizzazione del braccio Robotico HLK-43000.....	80
3.2.1 Modifiche meccaniche del manipolatore.....	84
3.2.2 Modifica delle piastre	85
3.2.3 Sensorizzazione del braccio robotico	87
3.3 Progettazione del sistema pan tilt.....	89
3.3.1 Sensorizzazione dell'end-effector	91
3.4 Progettazione dell'elettrotroutensile – spazzola motorizzata	93
3.4.1 Caratteristiche del manipolo portaspazzole.....	93
3.4.2 Caratterizzazione al banco prova dei sensori del manipolo.....	94
3.4.3 Sensorizzazione dell'elettrotroutensile.....	102
3.4.4 Motorizzazione dell'elettrotroutensile	102
3.4.5 Elettronica di controllo dell'elettrotroutensile	103
3.4.6 Progettazione dell'elettrotroutensile.....	104
3.5 Realizzazione elementi del braccio robotico	108
3.6 Realizzazione dell'elettrotroutensile.....	112
Capitolo 4	115
4.1 Introduzione - elettrotroutensili manuali subacquei	115
4.2 Micro-fresa subacquea	116
4.2.1 Scelta della componentistica.....	117
4.2.2 Composizione dell'unità motrice.....	119
4.2.3 Alimentazione e controllo della micro-fresa	121
4.2.4 Realizzazione della micro-fresa	123
4.2.5 Fase di test sulla micro-fresa	125
4.3 Percussore subacqueo.....	126
4.3.1 Progettazione del percussore.....	126
4.3.2 Realizzazione del percussore.....	135
4.3.3 Fase di test sul percussore.....	138
Conclusioni	140
Appendice A.....	143
Appendice B.....	153
Riferimenti Bibliografici	158
Pubblicazioni e Atti di Convegno	161

Dedico questo ulteriore successo

al mio Amore

e alla mia Famiglia

Introduzione

Le modalità di salvaguardia dei fondali marini e dei beni archeologici sommersi nonché l'analisi delle tipiche applicazioni in ambito industriale subacqueo, sono alla base del presente lavoro di tesi.

Lo studio dell'ambiente sottomarino e costiero è altamente complesso e dinamico. Una delle principali sfide in questo settore è sicuramente l'utilizzo di tecnologie innovative in grado di supportare efficacemente il lavoro dei ricercatori e tecnici specializzati impiegati in tale ambito, al fine di mantenere nel futuro i processi ecologici che avvengono all'interno di questo ecosistema, conservandone la sua biodiversità. Le attività di studio dei fondali marini o oceanici sono divenuti oggetto di ricerca scientifica solo da tempi piuttosto recenti; tale campo di interesse risulta quindi in gran parte inesplorato.

Esistono comunque sempre crescenti interessi specifici nell'ambito dello studio dei fondali e dell'intera fascia costiera, particolarmente in Europa (Horizon 2020), e ciò spinge centri di ricerca, università o aziende private a investire in tal senso. In particolare ricercatori e biologi marini sono impegnati nell'analisi e nella salvaguardia degli habitat sommersi, archeologi e studiosi del settore dei beni culturali si adoperano nel campo dell'archeologia o del restauro dei beni sommersi, così come società operanti in ambito industriale off-shore sono interessate ad operare in tale ambito puntando a migliorare non solo l'efficienza e la sicurezza degli operatori durante le fasi di lavoro, ma anche cercando di prevenire problematiche o incidenti che potrebbero danneggiare l'ecosistema marino.

Per quanto riguarda la biologia marina e la salvaguardia dei beni ambientali, è ormai noto che la complessità e la diversità delle caratteristiche geomorfologiche tipiche dei fondali e delle coste, rendono possibile lo sviluppo di una grande varietà di

habitat; tale fenomeno è particolarmente rilevante in Italia. Sono sempre più numerose le minacce alla biodiversità e alla sostenibilità dell'ecosistema di queste aree che derivano dal loro sovra sfruttamento, dall'alterazione chimico-fisica delle acque, ma anche dall'inquinamento. Per fronteggiare queste problematiche, la tutela della biodiversità è diventata a livello nazionale una priorità strategica e numerosi sforzi sono stati indirizzati, tra le altre cose, alla selezione e all'istituzione di Aree Marine Protette. Al fine di preservare il più possibile questo patrimonio e contemporaneamente occuparsi dello studio di quegli indicatori marini utili a fornire informazioni sui cambiamenti climatici, sono ad esempio attentamente monitorate le colonie di posidonia oceanica e i coralli. Queste operazioni sono effettuate da sommozzatori e ricercatori, coadiuvati molto spesso da veicoli subacquei automatici o filoguidati. Tra i tipici task di lavoro, sono annoverate le operazioni di campionatura di sedimenti e di organismi vegetali o animali, l'analisi delle acque e più in generale lo studio della flora acquatica.

L'evoluzione tecnologica ha reso possibile uno studio minuzioso e particolareggiato dell'ambiente costiero e subacqueo con l'utilizzo frequente di tecniche di "imaging" o acustiche (Fig. I).



Figura I- Ricostruzione 3d di fondale marino

La ripresa singola mediante una macchina fotografica tradizionale risulta uno strumento che, pur essendo fondamentale per la rilevazione, è idonea solo ad aree circoscritte, e non adatta a fornire una visione d'insieme. Così molto spesso, al fine di documentare un'area di più vaste dimensioni, è utilizzato il mosaico di immagini (Fig. II) grazie al quale si ha la possibilità di ottenere una visione più ampia e panoramica delle zone di interesse, di includere nel risultato finale ogni dettaglio

impresso sulle singole immagini evitando, nello stesso tempo, l'insorgere di problematiche legate ad un singolo scatto.

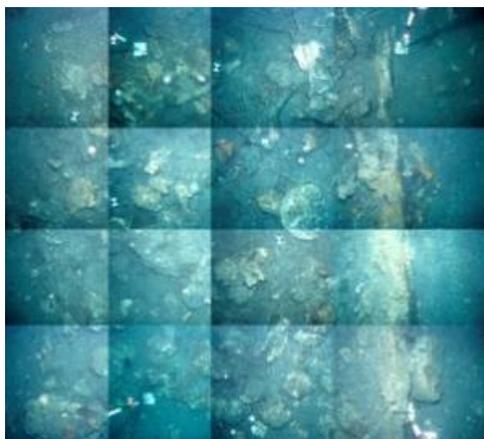


Figura II - Fotomosaico del relitto del Mercure

Partendo dai rilievi fotografici è possibile utilizzare le tecniche fotogrammetriche per ottenere un modello tridimensionale di una determinata zona di interesse. Tale metodologia è molto utilizzata ad esempio nello studio della crescita dei coralli; sovrapponendo modelli tridimensionali rilevati in diversi momenti, è possibile ottenere informazioni precise sulla loro crescita o su eventuali cambiamenti delle colonie. Nel caso in cui le aree da acquisire risultassero particolarmente vaste o se le condizioni di lavoro non fossero adatte all'impiego di operatori sub, è tipico l'utilizzo di veicoli ROV (Remotely Operated Vehicle) o AUV (Autonomous Underwater Vehicle) che possono essere dotati di tutte le tecnologie atte a portare a termine il lavoro in maniera precisa e spesso anche in meno tempo, acquisendo informazioni dettagliate e georeferenziate.

Un altro settore di grande interesse per lo sviluppo di nuove tecnologie a supporto della ricerca è quello dell'archeologia subacquea in cui è possibile differenziare le attività in funzione della tipologia di studio e/o di intervento. Per un paese come l'Italia ricco di storia e di opere d'arte, il restauro e la conservazione dei beni culturali e dei siti archeologici rappresenta una sfida che richiede notevole impiego di risorse. Nonostante gli sforzi e considerando i mezzi a disposizione degli enti preposti alla salvaguardia del patrimonio storico e culturale, le difficoltà sono numerose ed aumentano esponenzialmente se si prendono in esame i siti archeologici che si trovano al di sotto del livello del mare. La penisola italiana può

annoverare alcuni parchi archeologici subacquei di notevole interesse a livello mondiale, come il parco sommerso di Baia o quello che circonda le Isole della Gaiola, entrambi situati nei pressi del golfo di Napoli e venutisi a creare a causa dei tipici fenomeni bradisismici della zona. Come è facile intuire il mantenimento dei parchi sommersi e la loro esplorazione presenta problematiche del tutto diverse e nuove rispetto ai normali siti emersi e risulta essere un'attività recente e ancora soggetta a sviluppo, anche tecnologico, soprattutto per quanto riguarda le pratiche da compiere per conservare nel miglior modo possibile i parchi ed i loro reperti. A tal proposito, in accordo alle linee guida dell'Unesco nell'ambito dell'archeologia e restauro subacqueo, si tende a non rimuovere i ritrovamenti dal sito di rinvenimento ma a conservarli "in situ" (Fig. III). Per questi motivi negli ultimi anni si stanno effettuando rilievi e mantenimenti nelle aree archeologiche al fine di creare un vero e proprio "turismo archeologico sostenibile" sotto il livello del mare. Per garantire una corretta fruizione di queste zone a tutti coloro che non hanno la possibilità di immergersi, sono state create e sono in via di definizione, dei veri e propri musei virtuali, contenenti ricostruzioni tridimensionali dei siti effettuate mediante le tecniche precedentemente introdotte.



Figura III - Sub durante un rilievo del fondale

Al fine di poter mantenere lo stato di conservazione delle strutture subacquee, ritardare il più possibile la proliferazione degli agenti infestanti (vegetazione, incrostazioni calcaree, sedimenti) e per preservare le aree di interesse, sono da poco nate delle nuove figure professionali, ovvero gli archeologi subacquei, che effettuano un lavoro attento e meticoloso e comunque condizionato dal fatto di

dovere operare in mare. Il restauro subacqueo abbina, quindi, il mestiere di restauratore a quello di sub, dovendo intervenire direttamente sul campo con operazioni di pulitura, mantenimento e consolidamento delle aree sottoposte a restauro.

Ogni sessione di lavoro non può essere troppo prolungata a causa sia del limite dettato dalle quantità di aria contenuta nelle bombole che dalla fatica di operare in posizioni molto spesso scomode e non sicure; inoltre, gli archeologi, ancora oggi, si ritrovano ad utilizzare, per tutte le operazioni in cui sono coinvolti, gli stessi utensili “terrestri” riadattati al nuovo ambiente. Generalmente, infatti, per la rimozione degli strati esterni piuttosto tenaci, costituiti da alghe di specie diverse, organismi incrostanti, bivalvi, spugne vengono utilizzati strumenti tradizionali, come piccozze, spatole e scalpelli. Giunti però in prossimità delle superfici archeologiche, la rimozione dei resti degli organismi bivalvi e delle incrostazioni calcaree, diventa particolarmente difficile ed impegnativa; si rende quindi necessario l’utilizzo di piccole spatole, bisturi, scalpellini di precisione, spugne e spazzole per non mettere a serio rischio l’integrità strutturale delle superfici sottostanti (Fig. IV).



Figura IV - Operazioni di restauro su un mosaico

Un ulteriore settore particolarmente attento allo studio dei fondali marini è sicuramente quello dell’industria Oil & Gas. Tipicamente per effettuare operazioni di ricerca di giacimenti petroliferi al di sotto del livello del mare, sono attuate una serie di indagini sui fondali, che indicano la presenza di potenziali riserve di petrolio o di Gas. Le tecniche di rilevamento più diffuse si basano su fenomeni di riflessione e rifrazione delle onde generate da una sorgente artificiale, la cui velocità di

propagazione dipende dal tipo di roccia. Esistono molte tipologie di sorgenti, tra cui quella ad aria compressa detta Air-Gun che risulta essere la più utilizzata. Con questo tipo di indagini vengono generate meccanicamente onde direzionate verso il fondale e, in funzione della costituzione dei differenti strati sedimentari di roccia che si trovano sotto la superficie terrestre, vengono catturate da un ricevitore detto idrofono. Quest'ultimo la trasmette ad un misuratore a bordo che provvede alla registrazione, all'analisi e alla sua trasformazione in immagine fornendo in output informazioni sulla natura degli strati che si trovano sotto la superficie della crosta e l'eventuale presenza di sacche petrolifere o di gas.

Nel campo Oil & Gas è particolarmente diffuso l'utilizzo di veicoli robotici per effettuare studi e monitoraggi dei fondali. Ad esempio, al fine di poter posizionare le piattaforme petrolifere e l'intera rete di condotte e tubazioni, è importante effettuare rilievi batimetrici o geomorfologici, riuscendo ad estrarre, grazie anche a modelli tridimensionali, le caratteristiche dei fondali sui quali saranno successivamente e stabilmente posizionate le piattaforme off-shore e gli oleogasdotti. Un attento monitoraggio, attuato da parte delle aziende operanti nel settore petrolifero, riguarda l'ispezione delle tubazioni al fine di verificare la presenza di eventuali perdite o di problemi dovuti alle incrostazioni sulle condotte. Le operazioni preliminari e tutto ciò che riguarda la manutenzione ordinaria, viene affidata ai veicoli subacquei che, anche grazie a telecamere installate a bordo e ai bracci robotici di cui spesso sono equipaggiati, si sostituiscono all'uomo (Fig. V).



Figura V - a) ROV Ageotec Perseo - b) AUV Girona 500

In alcune circostanze invece è richiesto l'intervento diretto degli operatori tecnico-subacquei che effettuano operazioni di manutenzione straordinaria utilizzando

strumenti manuali o altrimenti attuati in maniera pneumatica o idraulica. Tipicamente sono effettuate anche saldature, tagli, riparazioni o sostituzione di tratti di condotte. Il grado di preparazione necessario a compiere tali lavori e l'utilizzo di macchinari molto costosi, fanno aumentare inevitabilmente e in maniera vertiginosa i costi relativi a questo tipo di intervento e in aggiunta a ciò è necessario considerare il rischio a cui gli operatori sono esposti durante le diverse fasi di lavoro. Ecco perché la ricerca scientifica sta focalizzando la sua attenzione sulla progettazione di bracci e mani robotiche adatti a svolgere in maniera sostenibile specifiche operazioni e da installare su veicoli subacquei, filoguidati o autonomi.

Nel quadro generale appena esposto, riguardante la salvaguardia dei fondali marini e l'analisi delle tecniche relative al loro sviluppo, il presente lavoro di tesi si è concentrato sullo sviluppo prototipale di alcuni dispositivi che rientrano nell'ambito di un progetto PON riguardante proprio l'archeologia marina. In particolare, sono stati progettati e realizzati una microfresa ed un percussore che costituiscono un valido supporto per l'automazione delle operazioni di restauro e conservazione dei beni archeologici sommersi, ma che potrebbero essere facilmente impiegati anche per le immersioni professionali svolte da Operatori Tecnico Subacquei (OTS) nel settore dell'industria off-shore. L'utilizzo di tali strumenti ad impatto ambientale quasi nullo, eviterebbe l'impiego di altri più "dannosi" per l'ambiente, in quanto richiederebbe l'uso di imbarcazioni di supporto con conseguente dispendio di energia, carburante e risorse logistiche.

Nell'ambito del progetto PON Comas "Conservazione in Situ dei Manufatti Archeologici Sommersi" che prevede la conservazione in situ dei beni archeologici sommersi, è stato riprogettato e realizzato un manipolatore idraulico a cinque funzioni provvisto di un elettrotensile, anch'esso appositamente ideato e costruito, dotato di una spazzola abrasiva e di un sistema di rotazione e ribaltamento. Il modello originale prodotto dalla Hydrolek modello HLK43000 prevedeva la possibilità di raggiungere esclusivamente dei "goal" posizionati in prossimità della base del braccio; inoltre non aveva nessun tipo di sensorizzazione sui giunti ed era dotato di una pinza del tipo pick and place.

Durante il periodo di studio all'estero effettuato presso l'Università di Girona, è stata invece sviluppata e realizzata una mano robotica subacquea per equipaggiare il braccio antropomorfo del veicolo AUV presente nel laboratorio dell'Università.

Il presente lavoro di tesi è, quindi, così strutturato: nel primo capitolo è esposto lo studio dello stato dell'arte sulle tecniche di acquisizione e rilievo dei fondali marini e delle strutture sommerse nonché degli strumenti normalmente utilizzati dai restauratori e dagli OTS durante le loro operazioni. Nel secondo capitolo sono descritte le varie fasi di progettazione e realizzazione di una mano robotica antropomorfa subacquea con cui equipaggiare veicoli ROV e AUV ed inoltre sono riportate dettagliate analisi cinematiche e strutturali e i processi di realizzazione del prototipo. Nel terzo capitolo sono illustrate le fasi di sensorizzazione e di riprogettazione di alcuni componenti di un manipolatore subacqueo utilizzato nell'ambito del progetto COMAS; sono altresì illustrati i risultati ottenuti dalle analisi dinamiche e di resistenza, effettuate sul modello virtuale e descritto il cinematismo che controlla il movimento di tilt dello strumento adoperato nelle sessioni di pulizia e restauro, per il quale è descritta anche la fase di calibrazione. Nel quarto capitolo sono descritti gli elettrotensili manuali realizzati per svolgere in maniera più accurata e precisa una serie di operazioni, come ad esempio quelle di archeologia e di restauro subacqueo.

Capitolo 1

Stato dell'Arte

Produrre un completo ed esaustivo stato dell'arte è un aspetto molto importante per un'attività di ricerca, sicuramente utile per accertare ciò che è stato fatto ma anche per individuare quali potrebbero essere i settori di futuri e più approfonditi studi. Nel caso in esame, la ricerca è stata indirizzata all'ambito delle tecnologie subacquee, in particolare alle applicazioni inerenti lo studio dei fondali marini e alle possibili applicazioni delle nuove tecniche nel campo dell'archeologia subacquea. È riportato inoltre un excursus su metodi e tecniche di prototipazione rapida, su cui si basano la progettazione e la realizzazione degli strumenti di seguito descritti. Si è ritenuto opportuno differenziare lo stato dell'arte in funzione delle diverse tematiche affrontate.

1.1 Analisi, studio e salvaguardia dell'ecosistema marino - tecniche di imaging

Inizialmente è stato effettuato un attento approfondimento degli articoli scientifici riguardanti l'analisi, lo studio e la salvaguardia dell'ecosistema marino e si è chiaramente evidenziato che uno dei metodi più efficaci per poter monitorare lo stato di salute degli organismi animali e vegetali che si trovano in fondo al mare, ma anche per verificare la loro crescita, è quello di monitorare periodicamente il sito di interesse mediante una serie di acquisizioni fotografiche o acustiche. L' "imaging" subacqueo risulta essere uno strumento importante da fornire agli scienziati in modo da poter capire più facilmente i diversi processi geologici e biologici che si svolgono in mare. Come mostrato da [Rende et al.], la Posidonia Oceanica che si trova nelle acque calabresi dell'area marina protetta di Capo Rizzuto, risulta essere un classico esempio

dell'ecosistema più caratteristico del Mar Mediterraneo; da tenere sotto un continuo monitoraggio e mantenimento. Gli autori, per valutare l'evoluzione temporale di queste distese, la loro morfologia, l'integrità del fondale marino, ma anche per poter mappare le aree di interesse hanno utilizzato tecniche basate su metodi di acquisizione video-fotografica, elaborazione di immagini e creazione di modelli tridimensionali, ottenuti con tecniche fotogrammetriche che hanno richiesto l'uso di una o più fotocamere digitali nell'ipotesi di configurazione stereo. Un'altra tecnica utilizzata per la mappatura dei fondali è realizzata mediante l'uso di sensori Multibeam e Side Scan Sonar, come mostrato in [Paul et al., 2011 e Campos et al., 2014] In particolare, mediante tali rilievi, è possibile ricavare le mappe di elevazione, dette mappe 2.5D, utili a fornire, anche se in maniera approssimativa, la morfologia globale della zona, ma non adatte a mappare strutture complesse. Anche per aree di piccola estensione, si potrebbe ottenere in output una mappatura più completa pur risultando un'approssimazione del modello 3D. Nel caso in cui il target di acquisizione si trova a profondità abissali, sono utilizzati veicoli ROV o AUV a supporto degli operatori subacquei, in modo tale da eseguire l'intera procedura in sicurezza e in maniera estremamente precisa. In questi casi sono acquisite una serie di immagini, risultato della traiettoria del veicolo e successivamente allineate in un'unica immagine, creando così un fotomosaico. Tale tecnica può essere anche utilizzata per l'acquisizione di relitti di navi affondate nel corso dei secoli, e di particolare rilevanza storica. Questo è il caso della nave "Lune", che è situata a 90 metri di profondità a largo delle coste francesi [Gracias et al. 2013]. Lo scopo di questa indagine è stato quello di creare una mappa veloce ma dettagliata del sito, da utilizzare come base per un successivo intervento archeologico; gli autori riportano inoltre le tecniche di indagine e i metodi utilizzati per ottenere informazioni precise e ad alta risoluzione (giga-mosaico) (Fig. 1.1).

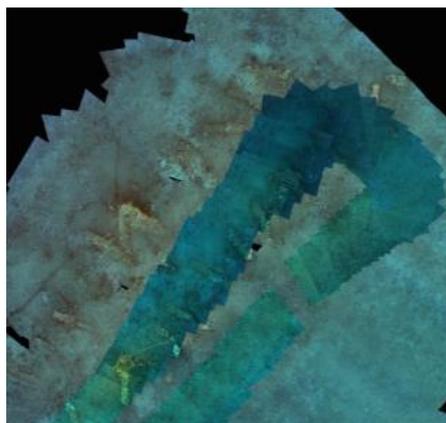


Figura 1.1 - Esempio di fotomosaico subacqueo – la “Lune”

Per monitorare le alghe e la vegetazione marina, è particolarmente controindicato l'uso di tecniche distruttive di rimozione, infatti come descritto da [McDonald et al. 2005] è possibile utilizzare tecniche di ripresa video utili a stabilire mediante l'uso di metodi statistici, la variazione delle praterie di vegetazione anche situate in luoghi remoti e inospitali, partendo dall'analisi delle immagini di una porzione dell'area di interesse. In funzione della distanza dal target di acquisizione e delle condizioni di illuminazione, spesso è necessario ricorrere all'uso di algoritmi di “image enhancement”, [Bianco et al. 2015] in modo tale da rendere più semplice sia l'estrazione delle features all'interno di ogni immagine, che il riconoscimento di un maggior numero di punti nella creazione della nuvola sparsa. In tal modo è stato possibile acquisire, in maniera accurata, una nuvola di punti densa, utile per ottenere il modello 3D; parimenti sono state acquisite migliori informazioni per quanto riguarda la texture dell'oggetto ripreso. E' utile chiarire che, trattandosi di immagini subacquee, lo spettro del visibile diminuisce al variare della profondità soprattutto a causa dell'assorbimento di radiazioni a diverse lunghezze d'onda; in particolare quelle con una frequenza maggiore sono quelle più assorbite; ciò comporta che la componente rossa, scompare a circa 5 metri, l'arancione a circa 7.5, la gialla a circa 12 e infine la verde a circa 21 (Fig. 1.2). Inoltre alle problematiche sopra esposte si aggiungono le attenuazioni della luce, la diminuzione del contrasto e l'aumento del rumore, quest'ultimo causato dalla presenza di microorganismi e di piccole particelle. Tutto questo rende la scena ripresa di un verde-blu che necessita di opportuna correzione.

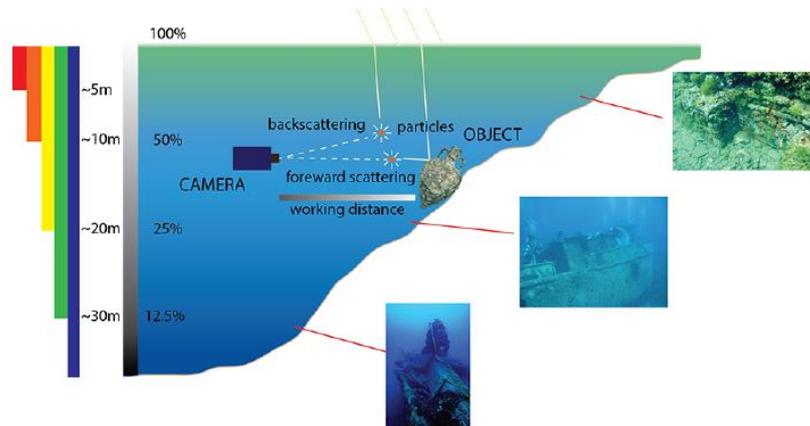


Figura 1.2 - Variazione delle condizioni di illuminazione subacquea

1.2 Ricerca e Sviluppo nell'ambito Oil & Gas e cantieristica navale

Uno degli ambiti in cui le applicazioni subacquee trovano maggiore diffusione, è sicuramente quello dell'Oil & gas. In particolare gli operatori tecnico subacquei, nell'esecuzione del loro lavoro, utilizzano una serie di strumenti scaturiti dalla ricerca industriale in questo ambito. Tipicamente utilizzano una strumentazione di "profondità" ovvero tool pneumatici o idraulici capaci di operare ad elevate pressioni e in maniera continua, a patto di essere supportati da un natante di sostegno utile all'alimentazione dell'intera strumentazione. Nello specifico si tratta di utensili come manipoli, smerigliatori, trapani, demolitori (Fig. 1.3), seghe ed avvitatori utilizzati per operazioni di costruzione subacquea, demolizione o recupero [Stanley Underwater].



Figura 1.3 - trapano e demolitore pneumatico subacqueo

Un'operazione che comunemente viene portata a termine in tale settore, riguarda il controllo e la manutenzione delle condutture; tale processo normalmente costoso e di lunga durata, consiste nell'ispezionare e se necessario riparare la rete delle tubazioni. Le compagnie petrolifere stanno cercando di automatizzare e migliorare la qualità del controllo del "piping" mediante una rapida ispezione effettuata da veicoli subacquei. In tal modo gli addetti alla manutenzione, analizzando le immagini ottenute dai ROV o AUV, sono in grado di determinare eventuali difetti, programmare le procedure di riparazione, cercando così di limitare le problematiche dovute a fughe e guasti. Anche il settore della cantieristica navale pone particolare attenzione alle applicazioni subacquee tecnologicamente avanzate. Infatti al fine di effettuare le operazioni di pulizia dei moli o degli scafi delle barche, specie quelle con elevato pescaggio, e per eliminare tracce di corrosione o di agenti marini infestanti, non solo sono utilizzate strumentazioni come quelle indicate in precedenza ma, in questo ambito, sono anche adoperati dispositivi atti alla pulizia subacquea in cavitazione [Pivovarov 2005]. Tale sistema, derivato dalle tecnologie militari, sfrutta un getto d'acqua contenente una consistente quantità di bolle di vapore instabili, le quali, grazie ad un differenziale di pressione, implodono, attraendo così le sostanze organiche presenti sullo scafo (fouling, denti di cane, incrostazioni). In questo modo, grazie alla capacità attrattiva, è possibile ottenere una pulizia profonda senza creare alcun trauma sullo scafo, preservando quest'ultimo e le sue vernici.

1.3 Robotica subacquea, studio dei veicoli e delle strumentazioni

Generalmente i veicoli robotici marini si dividono in quelli di superficie senza equipaggio (USVs) e quelli sottomarini senza equipaggio (UUVs). Attualmente l'utilizzo di queste macchine subacquee è limitato a poche e specifiche applicazioni a causa di sostenuti costi operativi determinati dalla necessità di utilizzare barche d'appoggio, indispensabili per il trasporto e da ausilio al veicolo durante la missione, ma anche dall'impiego di equipaggi e piloti specializzati. Per questi motivi attualmente gli sforzi tecnologici sono orientati ad aumentare l'autonomia e la durata di ogni singola missione, minimizzando la presenza di operatori umani e aumentandone l'autonomia decisionale (AUVs).

Anche la ricerca accademica in ambito oceanografico ha spesso impiegato questi veicoli per specifiche applicazioni; nel *RiverNet Project* [Cronin et al. 2005], sono utilizzati una serie di veicoli subacquei autonomi con diversi sensori alimentati ad energia solare, con lo scopo di monitorare l'estuario del Hudson River di New York (USA). Altre tipiche applicazioni scientifiche sono, ad esempio, lo studio di vulcani sommersi, l'investigazione sul fenomeno degli tsunami e lo studio della biologia marina a profondità abissali. Per queste ricerche è stato utilizzato il veicolo HROV (Hybrid ROV) *Nereus* che risulta essere il primo ad esplorare la fossa delle Marianne nel 1998 [Bowen et al.]. Altri ambiti di utilizzo dei veicoli ROV o AUV sono quello della ricerca mineraria in mare e anche l'impiego nell'industria oil and gas. In particolare l' *Hugin AUV* nel 1997 [Marthiniussen et al.] ha effettuato la mappatura di un oleodotto nei Mari del Nord, che può essere considerata la prima applicazione di questa tecnologia in tale ambito. La stabilità delle rotte impostate sugli AUV garantisce dati geofisici molto accurati, per questo motivo, vengono utilizzati in ambiti in cui è richiesta un'elevata precisione. Pertanto i costi di gestione di un AUV, mezzo che opportunamente programmato è capace di svolgere task in maniera indipendente, risultano sicuramente inferiori rispetto a quelli di un ROV, garantendo nello stesso tempo, una maggiore velocità di acquisizione, potendo tra l'altro, operare a notevole distanza dalla barca appoggio. Un altro caso studio è rappresentato dal *Girona 500* dell'università di Girona [Ribas et al.]; si tratta di un AUV compatto, progettato per una profondità massima di esercizio di 500 m. Il veicolo è costruito con una configurazione a tre scafi intorno a un telaio in alluminio. Questa particolare disposizione dei componenti fornisce stabilità passiva in beccheggio e rollio, rendendolo adatto per attività che richiedono una notevole stabilità come il rilievo video o interventi diretti sul campo di lavoro, utilizzando il manipolatore robotico in dotazione al *Girona 500*, come nel caso dei progetti Trident [Simetti et al.], Triton [Ridao et al.]

Molto spesso le operazioni in ambito sottomarino vengono eseguite utilizzando veicoli guidati o automatici interagendo, in tal modo, con l'ambiente circostante. Pertanto, soprattutto sui ROV, vengono montati dei manipolatori capaci di eseguire diversi task. L'utilizzo dei bracci robotici sui veicoli non è semplice a causa dei problemi di ritardo connaturati alle comunicazioni sottomarine. Questo fattore è da tenere in considerazione nella gestione dei movimenti e anche per reagire, in maniera

tempestiva, in caso di problemi. Tuttavia i sistemi integrati veicolo-braccio, sono utilizzati per l'esplorazione delle profondità marine e per svolgere attività in aree pericolose o in zone che hanno subito disastri naturali o causati dall'uomo. In questo settore, come già accennato, la ricerca scientifica è in continua evoluzione, specie per quel che riguarda la creazione di algoritmi di controllo che possano consentire lo svolgimento di un determinato compito assegnato dall'operatore, in maniera autonoma o semi-autonoma. Uno dei progetti più interessanti è quello svolto dalla University of Hawaii che ha prodotto un AUV capace di svolgere lavori di manipolazione in completa autonomia [Mariani et al.2009]. Il veicolo denominato SAUVIM (dall'inglese Semi-Autonomous Underwater Vehicle for Intervention Mission) è dotato di un manipolatore a sette gradi di libertà che, grazie alla presenza di un sensore di forza e torsione posizionato a monte del polso, ed alla presenza di un sistema di camera tracking che monitora la posizione dell'end-effector, può svolgere in autonomia svariate operazioni. Un altro studio alquanto interessante è quello proposto dalla Tohoku University in Giappone [Kajita et al. 1997], nel quale viene illustrato il tentativo di caratterizzare un sistema di controllo in forza di un ROV con manipolatore che, sfruttando le forze equilibranti auto-generate dal veicolo, permette di ottimizzare il numero e la potenza dei thruster necessari per il movimento del veicolo. Da segnalare inoltre lo studio effettuato nell'ambito della progettazione di AMADEUS [Casalino et al. 2001] (Advanced MANupilator for DEep Underwater Sampling); trattasi di sistema robotico composto da due bracci robotici che effettuano operazioni cooperando in maniera autonoma.

Al fine di rendere esaustivo il lavoro di ricerca, sono stati analizzati anche i manipolatori subacquei commerciali presenti sul mercato.

Un primo esempio è rappresentato dal braccio "ARM 5E Micro" prodotto dalla ECA HYTEC™ (Fig. 1.4), azienda francese con sede a Montpellier fondata nel 1936 e che da allora mette a disposizione la propria esperienza nel campo dell'industria di trivellazione, nucleare e militare.



Figura 1.4 - Braccio 5E Micro

L' *ARM 5E Micro*, come il nome lascia già intendere, è un manipolatore elettrico a 5 DoF dalle dimensioni davvero modeste, che può essere collocato su ROV anche molto leggeri, dato anche il suo ridotto peso, corrispondente a soli 2.75 kg in acqua, che dunque non influenzano eccessivamente la dinamica del veicolo. È realizzato utilizzando una lega di alluminio anodizzato, la 6082 T6, ed una schiuma polimerica, a celle chiuse, la AIREX C70®, che combina eccellente rigidità e resistenza specifica ad una buona tenacità. Grazie alla sua buona resistenza agli agenti chimici ed alla sua idrorepellenza, questo materiale risulta ottimo per le applicazioni subacquee. Il braccio viene movimentato utilizzando motori elettrici brushless che richiedono 24–30 V in corrente continua o 240 V in alternata, ed ha una profondità operativa massima di 300 m. Il giunto della spalla permette una rotazione che arriva a 120° con una estensione di 640 mm e quindi può operare in un'area non troppo vasta; ma considerando che si tratta di un braccio a sole cinque “funzioni”, sicuramente non è del tutto negativo. Inoltre il polso può essere ruotato in continuo lungo il proprio asse garantendo così una corretta orientazione della pinza, o di un eventuale strumento montato su di esso.

Un secondo manipolatore è il *RigMaster*, (Fig. 1.5) prodotto dalla Schilling Robotics, azienda americana con sede in California fondata nel 1985.



Figura 1.5 - Braccio Rigmaster

Come il nome e l'aspetto lasciano intendere, questo manipolatore a 5 DoF è stato progettato come braccio ausiliario da utilizzare nel campo delle lavorazioni di trivellazione. Infatti, la sua migliore qualità consiste nel poter vantare il rapporto tra peso sollevabile e peso proprio, più alto della sua categoria, grazie all'attuazione idraulica di cui è fornito ed ai materiali con cui è realizzato. Questi sono principalmente alluminio anodizzato e titanio, al fine di renderlo capace di effettuare lavori molto pesanti senza eccedere troppo nel peso (48 kg), ed inoltre lo rende idoneo a lavori in profondità fino a 6500 m. In condizioni di completa estensione arriva a 1372 mm di sbraccio massimo, e può raggiungere un angolo di 105° grazie al giunto posto sulla spalla il quale può ruotare la pinza lungo il proprio asse, senza limitazioni.

Il Magnum-5 Mini è un terzo esempio di braccio robotico (Fig. 1.6), prodotto dalla Canadese International Submarine Engineering Ltd. (ISE), azienda nata nel 1974 che si occupa di sistemi subacquei utilizzati per i più disparati scopi, dalla trivellazione alla raccolta di campioni biologici.



Figura 1.6 - Braccio Magnum-5 Mini

Il Magnum è un braccio idraulico realizzato in alluminio ed acciaio inossidabile, dal peso non elevato, solo 13 kg , capace di sollevare 23 kg, alla massima estensione corrispondente a circa 660 mm. La profondità operativa è di 5000 m in mare.

Per completare la serie di produttori analizzati in questo contesto, occorre ricordare la Hydro-Lek, compagnia inglese che produce sistemi per l'industria subacquea, nucleare e militare e che crea il modello HLK-EH5 (Fig. 1.7).



Figura 1.7 - Braccio HLK-EH5

L'azienda fabbrica manipolatori ad azionamento idraulico dai più semplici, a quattro DoF, a quelli con sette "funzioni". In questa fase sarà descritto il modello HLK-EH5, mentre nel capitolo successivo, verrà presentato il braccio robotico che è stato oggetto di studio, e che viene prodotto dalla stessa azienda. L'HLK-EH5 è un manipolatore a cinque gradi di libertà che gli conferiscono un'eccellente destrezza e snodabilità. I link sono realizzati in alluminio anodizzato e sono ricoperti con una resina epossidica per proteggere ulteriormente il metallo dalla corrosione. Alla massima estensione, che equivale a 795 mm, il braccio è capace di sollevare 25 kg. La spalla permette una rotazione di 90° che garantisce un'area di manovra abbastanza ampia. Il polso, a differenza di quello degli altri manipolatori fin qui visti, non permette una rotazione continua, ma si limita a 180° nelle due direzioni opposte.

Attualmente il mondo della ricerca, con rinnovato sforzo, mira a raggiungere un ambizioso obiettivo che consiste nel dotare un robot di nuova generazione di organi di estremità capaci di competere, in termini di funzionalità, con la mano umana. Infatti il settore della robotica è particolarmente attivo e dimostra un crescente interesse rivolto sia al campo delle protesi che a quello delle costruzioni di dispositivi automatici

che possano sostituire l'intervento dell'uomo in compiti di manipolazione ed esplorazione, soprattutto in ambienti sfavorevoli. Le mani robotiche si dividono principalmente in due grandi categorie: umanoidi e industriali. Le prime sono basate su principi anatomici tipici della mano umana e sono fornite tipicamente di 2, 3 o 4 dita ed un pollice opponibile. Invece le mani industriali possono essere paragonate a pinze adatte ad afferrare oggetti, a tagliare cavi, ecc. Negli ultimi venti anni sono stati raggiunti risultati funzionali a volte sorprendenti, ma alle mani robotiche di nuova generazione viene richiesto un ulteriore salto qualitativo rispetto al passato, sia in termini di capacità funzionale (destrezza) che in termini di compatibilità applicativa, cioè di affidabilità, semplificazione costruttiva, basso costo, ingombro e peso ridotti e soprattutto la possibilità di operare in ambienti estremi.

I modelli *Robotiq Robot Gripper*, *Schunk 2-jaw Gripper* e *flexible robotic Gripper* [Sam et al., 2008] (Fig. 1.8 a,b,c) presenti in letteratura, sono un ottimo esempio di mani robotiche industriali adatte a compiere lavori con estrema precisione, adoperate, ad esempio, nel campo dell'industria farmaceutica o alimentare.



Figura 1.8 - a) Robotiq 2-Finger b) Parallel Gripper WSG 50 c) Flexible Robotic Gripper

In particolare sono dotati di due o tre dita, atti ad afferrare rapidamente gli oggetti. Inoltre l'automazione può sicuramente migliorare l'igiene, con conseguente aumento della shelf-life, ridurre i tempi di set-up, e alle problematiche dovute ai compiti ripetitivi. Al contrario i modelli *Barret Hand* (Fig. 1.9 a) [William T. Townsend et al., 2000], *NU Hand* (Fig. 1.9 b) [Kappasov et al., 2013] sono un esempio di mani antropomorfe, più flessibili ed adatte a svolgere vari task.

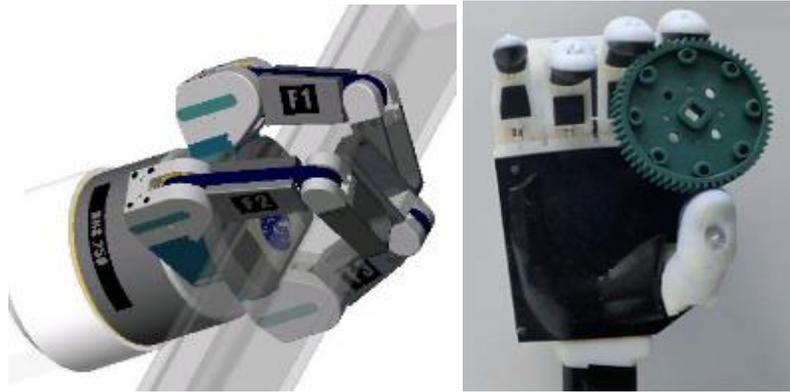


Figura 1.9 - a) BarrettHand b) Nu Hand

Sono in grado di afferrare oggetti rigidi e non rigidi essendo dotate di più dita e anche della capacità di adattarsi a differenti geometrie. Nel caso di *DLR-Hand* [Liu et al., 2008], (Fig. 1.10) ogni dito è dotato di attuazione indipendente grazie ad un motore ed il moto viene trasferito tramite tendini, imitando la funzione di muscoli e legamenti.



Figura 1.10 - DLR/HIT HAND II

Questo dispositivo non ha bisogno di alcun avambraccio poiché tutti gli attuatori e l'elettronica sono integrati nel corpo dito e palmo. Per ottenere un elevato grado di modularità, le cinque dita sono identiche. Ognuna ha tre gradi di libertà e quattro articolazioni e gli ultimi due giunti sono accoppiati meccanicamente. Tutti gli attuatori, gli ingranaggi, l'elettronica e i controllori di comunicazione per un dito sono pienamente integrati nella base del dito. La *Gifu Hand III* [Mouri et al., 2002] (Fig. 1.11) invece è dotata di 5 dita con 4 DOF per il pollice e 3DOF per le dita; tutti i 16 giunti sono dotati di motorizzazione indipendente.

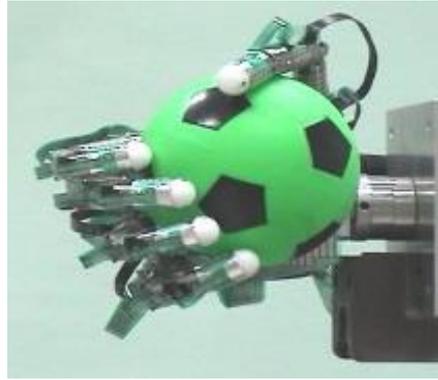


Figura 1.11 - Gifu Hand III

Il crescente interesse per le tecnologie sottomarine utilizzate nei compartimenti Oil & Gas, in campo militare e nella ricerca oceanografica, ha portato allo sviluppo di nuovi strumenti al fine di migliorare gli interventi sottomarini; tra questi gli end effector subacquei si sono imposti come dispositivi indispensabili per molti veicoli quali ROV, AUV, ecc. Al contrario delle applicazioni terrestri, in letteratura sono pochi i riferimenti di mani robotiche subacquee [Lane et al., 1997; Gad at al., 2004; Meng et al., 2006; DFKI, 2010]. Generalmente, i modelli descritti sono semplici end effector dotati di pinza all'estremità, quindi classificabili come mani industriali. Ma se si valutano attentamente i compiti tipici da svolgere in ambito subacqueo, le sole funzionalità caratteristiche di questa categoria di mani, risultano essere particolarmente riduttive, in quanto molte applicazioni, quali ruotare valvole, afferrare cavi o recuperare oggetti o reperti archeologici, sono attuabili solo con mani antropomorfe. La *Three fingered gripper* [Bemfica, 2014] è una mano antropomorfa subacquea in grado di svolgere le funzioni tipiche di questa categoria; in commercio si trova la *HDT's Adroit* [HDT Global] in uso presso la US Navy's Office of Naval Research (ONR) (Fig. 1.12).



Figura 1.12 - Adroit Hand

Questo dispositivo è capace di afferrare qualsiasi strumento adoperabile da operatori subacquei, ed è utilizzabile fino a 150m di profondità.

1.4 Archeologia subacquea, studi e tecniche di lavoro

Uno degli esempi più opportuni di archeologia subacquea è rappresentato dal parco sottomarino di Baia, a cui sono rivolte le varie soluzioni tecniche e progettuali descritte in questo lavoro di tesi. Ma, per quanto degno di particolare nota per la molteplicità di reperti artistici e architettonici e per lo stato di conservazione degli stessi, non può che essere considerato uno degli esempi di archeologia subacquea presenti in Italia. Il porto neroniano di Anzio, i rinvenimenti sottomarini di Agropoli e Punta Trestino e nella Sicilia Orientale, il relitto di Cala Rossano a Ventotene, sono solo alcune delle numerose dimostrazioni di come il patrimonio artistico nella nostra penisola, per quanto già ricchissimo, non sia limitato solo alla terra ferma. Tale patrimonio è in continuo accrescimento ed inoltre, praticamente ogni anno, si verificano nuovi ritrovamenti. A dimostrazione del continuo fiorire dell'arte sommersa, si riporta la scoperta del decimo rostro delle Egadi, elemento di una nave romana risalente alla Prima Guerra Punica, avvenuta nel corso del 2014 [*Archeologia subacquea, 2002, Felici*]. Le ricerche utili al suo rinvenimento sono state condotte con l'ausilio della nave oceanografica Hercules a posizionamento dinamico (DPS), dotata di sistemi di ricognizione elettroacustica di ultima generazione. In particolare si è usato un sonar a scansione laterale, ma soprattutto un multibeam atto ad individuare elementi d'interesse storico-archeologico, sui fondali. A questi strumenti si è aggiunto un veicolo subacqueo filoguidato dotato di telecamere, bracci antropomorfi per il recupero di oggetti così come una sorbona e una lancia ad acqua per limitate operazioni di scavo. La ricerca, come si evince dalla descrizione delle strumentazioni adoperate, non ha previsto l'immersione diretta dell'uomo sul fondo, in considerazione anche dell'alta profondità che mediamente oscilla intorno ai m 100. Soltanto in limitati casi, alcuni subacquei specializzati in immersioni in alto fondale (Fig. 1.13), sono intervenuti direttamente per il recupero di certi oggetti rinvenuti, anche per esigenze di documentazione fotografica ad alta definizione.



Figura 1.13 - Ritrovamento rostro nave romana, luglio 2014

D'altra parte, esistono altri contesti, sempre nel campo dell'archeologia subacquea, dove invece è richiesto l'intervento diretto dell'operatore sub; si tratta di operazioni di sondaggio, campionamento e scavo, per i quali sono necessarie specifiche competenze unitamente alla presenza di un team di supporto logistico. Gli strumenti utilizzati per questo tipo di tasks, possono essere di varia natura, in particolare manuali o automatici: di seguito saranno illustrate diverse soluzioni tecniche adottate per tali scopi. Per quanto riguarda la fase di sondaggio, una volta definita un'area di lavoro da analizzare mediante delle sonde viene verificata la compattezza del terreno sottostante e l'eventuale presenza di sedimenti. L'intera operazione viene svolta prestando molta attenzione a non distruggere l'eventuale bene archeologico posto al di sotto di esso. La fase di campionamento è invece utile a identificare la natura degli strati di sedimenti e può essere effettuata in vari modi, come ad esempio utilizzando spatole, pennelli, scalpelli o taglierini, in modo tale da operare in maniera precisa e non intaccare le zone circostanti. Un campione è una quantità rappresentativa di materiale raccolto da un contesto archeologico o naturale; esso può essere utile per svolgere una prima analisi del sito oggetto d'esame, o per determinare la datazione o l'identificazione di resti organici. La successiva fase di scavo è eseguita mediante l'utilizzo di utensili manuali quali raschietti, taglierini, spatole e scalpelli; occorre considerare che la destrezza del restauratore risulta essere in ogni caso il "tool" più accurato. Per pulire sommariamente le superfici e per prepararle a rilievi fotografici, sono tipicamente utilizzati dei pennelli, utili anche per rimuovere materiali organici o particolarmente fragili. La scelta del materiale costruttivo più idoneo per ogni strumento è molto importante; infatti per il restauro di elementi facilmente danneggiabili, sono utilizzati attrezzi in plastica o comunque non metallici. [Browens,

2011]. Molto spesso è anche praticata la rimozione forzata dalle strutture sommerse e delle incrostazioni di origine vegetale o animale, e per fare ciò possono essere utilizzati scalpelli, spatole, o spazzole munite di setole particolarmente abrasive.

Talvolta sono utilizzati anche strumenti automatici utili al restauro subacqueo e alcuni di essi sono frutto di progetti di ricerca e studi accademici [Petriaggi et al.]; tali dispositivi generalmente aumentano l'efficienza operativa del sub. Si tratta ad esempio di sorbone ad acqua, o di water jet, utili alla rimozione della vegetazione marina che tuttavia non risulta essere una vera e propria attività durevole, in quanto va ripetuta in maniera sistematica. Come mostrato in [Petriaggi et al.], è stata utilizzata come ausilio ai restauratori, una micro smerigliatrice pneumatica (Fig. 1.14), alimentata direttamente da un cilindro installato sul fondale, vicino all'operatore. Tale strumento ha facilitato la rimozione dei residui calcarei di grandi dimensioni, senza danneggiare i manufatti storico-artistico.



Figura 1.13 - Manipolo pneumatico

Un'altra tipologia di intervento caratteristica del restauro subacqueo, è il consolidamento di strutture sommerse, che consiste nel riempimento dei vuoti della muratura con miscele leganti, al fine di migliorarne le caratteristiche meccaniche. Le iniezioni di queste malte idrauliche, in ambiente marino, hanno lo scopo di consolidare e rinforzare, direttamente in situ, i beni per i quali gli elementi di coesione sono andati degradandosi con il passare del tempo, a causa dell'erosione e del moto ondoso dei fondali. L'iniezione di malta viene utilizzata anche per ricostituire la continuità tra le murature e i rivestimenti parietali, in cui spesso vengono conservati l'intonaco o altri rivestimenti (pietra, pietra artificiale, decorazioni pittoriche ad affresco ecc.), anche se con evidenti fenomeni di distacco. I grandi quantitativi di materiale e iniezioni in profondità, hanno fatto nascere l'esigenza di disporre di una nuova strumentazione per l'iniezione della malta idraulica, dal momento che le sacche solitamente impiegate

con successo nei siti di interesse, contenenti malta, presentavano una capacità notevolmente ridotta ed una praticità di utilizzo limitata soprattutto riguardo alle operazioni di finitura. L'iniezione in profondità e con maggiore quantitativo è stata resa possibile grazie alla progettazione dell'erogatore pneumatico in pressione mostrato in figura 1.14 [Petriaggi et al.].



Figura 1.14 - Iniettore di malta a pressione

1.5 Progettazione additiva, prototipazione rapida e stampa 3D

La possibilità di ottenere un oggetto reale attraverso un semplice processo di stampa, è oggetto di studio e ricerca da circa trenta anni; in particolare la prima stampante 3D è stata realizzata dall'ingegnere Charles Hull nel 1986, utilizzando la tecnica chiamata stereolitografia. Da allora, l'utilizzo delle tecniche di progettazione additiva, hanno reso possibile la realizzazione di un gran numero di prototipi in maniera estremamente rapida, consentendo tutte le necessarie verifiche di un prodotto.

Poter realizzare in poco tempo componenti che in maniera convenzionale risultavano molto laboriosi e in taluni casi non realizzabili, ha determinato un forte sviluppo della ricerca in questo ambito, sia a livello aziendale che universitario. Sebbene le prime macchine di prototipazione rapida fossero effettivamente lente, costose e poco precise, gli sforzi di ottimizzazione dei processi e delle stampanti hanno reso il prodotto stampato fortemente simile al modello CAD di partenza. Principalmente i miglioramenti tecnologici si sono concentrati sulla riduzione dei costi, migliorando nello stesso tempo le caratteristiche di velocità e di precisione, nonché i materiali di consumo utilizzati. La tecnica Fused Deposition Modeling, è stata sviluppata alla fine degli anni '80, principalmente da parte di Stratasys Inc [Crump et al.]. Durante il

processo di stampa una testina mobile deposita un filo di materiale fuso, solitamente un filamento in plastica. Questo viene riscaldato a una temperatura leggermente superiore al suo punto di fusione all'interno della testa; quindi essa viene estrusa da un ugello, avente un diametro variabile in funzione della precisione che si vuole ottenere, dalla velocità del processo e del diametro iniziale del filamento stesso. La testa mobile è mossa mediante una serie di motori e viene disegnato il contorno e la sezione trasversale dell'oggetto in stampa, (Fig. 1.15) nonché le varie strutture di supporto per la creazione dei sottosquadri.



Figura 1.15 - Componente stampato con tecnologia FDM

Le velocità e la quantità di materiale che viene spinto fuori dall'ugello, varia in funzione delle caratteristiche che dovrà possedere il componente finale. Dopo essere stata estrusa, la plastica si raffredda e solidifica fino a formare uno strato compatto; quindi si solleva la testa mobile oppure si abbassa il piatto di stampa lungo la direzione z, per poter permettere un nuovo passaggio di stampa. Come mostrato da [Jafari et al, e Bellini et al), sono stati fatti molti progressi nella ricerca per includere l'uso di un sistema composto da due o più ugelli diversi, all'interno dei quali utilizzare materiali differenti, in maniera tale da fabbricare oggetti con nuove proprietà.

Nell'ambito della prototipazione rapida è molto importante la tecnologia SLS (Selective Laser Sintering) (Fig. 1.16); si tratta di un processo di produzione a strati che permette la generazione dei pezzi 3D complessi, consolidando strati successivi di materiale in polvere l'uno sovrapposto all'altro.

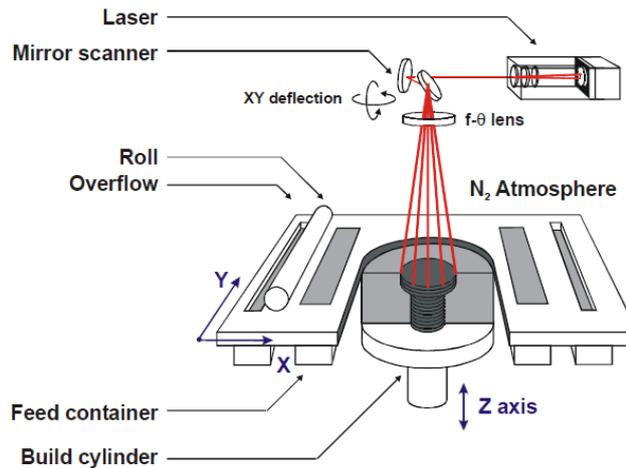


Figura 1.16 - Funzionamento stampante SLS

Trattandosi di polvere plastica, essa viene distribuita all'interno della macchina di stampa e riscaldata ad una temperatura prossima a quella di fusione del materiale stesso; viene poi utilizzato un laser in modo da potere sinterizzare, in maniera selettiva, solamente le aree facenti effettivamente parte dell'oggetto. Come mostrato da [Pham et al.] mediante tale tecnologia è possibile raggiungere precisioni molto elevate e ciascuno strato, la cui sezione trasversale è calcolata dal modello CAD (Fig. 1.17), ha uno spessore tipico da 20 a 150 micron.



Figura 1.17 - Componente stampato con tecnologia SLS

Nel caso in cui viene utilizzata polvere metallica, il procedimento è del tutto simile, l'unica differenza consiste nella modalità di creazione dei componenti. Nella stampa metallica, mentre il laser sinterizza lo "slice" dell'oggetto, la polvere localizzata intorno ad esso non subisce alcuna alterazione termica; quindi per poter stampare sottosquadri, fori, o delle forme particolari, durante la fase di pre-processing è indispensabile anche la progettazione dei supporti. Questi ultimi sono realizzati anche

in materiale metallico, pertanto a differenza della stampa funzionante a polvere plastica nella quale non sono previste tali strutture, [Osakada et al.] è necessario ridurre al minimo la componente di supporto in maniera tale da non dover nuovamente lavorare i componenti stampati (Fig. 1.18).



Figura 1.18 - Componente stampato con tecnologia DLMS

Esistono una serie di materiali disponibili e adatti alla stampa 3D; in particolare lo studio si concentra sulle leghe di titanio, leghe di nichel, acciaio inossidabile di alta qualità, con applicazione nei settori aerospaziale, automobilistico, biomedicale, energetico.

2.1 Introduzione

Dallo studio dello stato dell'arte, presentato in precedenza, sono state individuate le problematiche relative alla progettazione, alla realizzazione e successivamente alla fase di test di una mano robotica in ambito subacqueo. Le soluzioni comunemente adottate nella creazione di tali dispositivi "terrestri", si dividono sostanzialmente in due grandi categorie: la prima riguarda i cosiddetti "gripper" ovvero degli end-effector, che hanno esclusivamente la caratteristica di afferrare oggetti, movimentarli opportunamente e poi riposizionarli; questi vengono comunemente utilizzati in ambito industriale, per poter compiere operazioni ripetitive e che necessitano di elevata precisione. L'altra tipologia di dispositivi, è rappresentata dalle mani antropomorfe; questa risulta essere fortemente diversificata in funzione delle peculiarità di ogni strumento. Considerando ad esempio l'articolazione del dito, questo può essere movimentato mediante motori oppure utilizzando dei tendini. Sicuramente la prima soluzione è tecnicamente più robusta e precisa in quanto permette il corretto movimento di ogni parte del dito e nello stesso tempo consente un'altissima precisione nei movimenti visto che molto spesso si tratta di motori dotati di encoder rotazionali. La seconda soluzione è sicuramente meno precisa, ma più versatile in funzione delle forme e degli oggetti da afferrare. Ciò dipende dal fatto che con questa configurazione non si hanno informazioni numeriche sul posizionamento dai vari giunti e dei link; pertanto in questi casi è richiesta un'adeguata sensorizzazione del cinematismo.

Un'altra differenziazione riguardante le mani robotiche antropomorfe, è stata possibile farla in funzione delle varie tipologie di alimentazione di cui sono dotate. Nello studio in questione, l'attenzione è stata fissata ad articolazioni dotate di attuazione elettrica, altrimenti la movimentazione dei vari link sarebbe stata di tipo idraulico oppure

pneumatico. Un'altra caratteristica presa in esame, ha riguardato la disposizione e il numero di dita di cui dotare la mano. In letteratura esistono manipolatori aventi un numero minimo di tre dita e massimo di sei.

Lo scopo dell'intera progettazione è stato quello di realizzare una mano robotica subacquea antropomorfa, capace di compiere alcuni task che al momento sono svolti essenzialmente da semplici gripper migliorando di fatto la velocità, e la precisione delle operazioni. La prima fase è stata quella di individuare i "tasks" da portare a termine, ottimizzandone anche i tempi di esecuzione mediante l'introduzione di questo nuovo manipolatore. È stata quindi verificata la necessità di afferrare oggetti presenti sui fondali marini per operazioni di campionatura, analisi o più in generale per scopi di ricerca, il riposizionamento di tubature sommerse, oppure la rotazione, la connessione o il distacco di valvole poste sott'acqua, al fine di migliorare anche la sostenibilità ambientale di queste operazioni.

La dimensione delle dita e del palmo, è stata scelta in modo tale che questa potesse avere la capacità di afferrare oggetti di un diametro massimo di 160 mm. L'intero lavoro è stato svolto in collaborazione con il CIRS (Centre d'Investigatiò en Robotica Submarina) dell'Università di Girona in Spagna, (Fig. 2.1) durante sei mesi di studio all'estero del Dottorato di Ricerca.



Figura 2.1 - Edificio del CIRS - Girona

La prima parte della progettazione ha riguardato lo studio delle varie configurazioni possibili per la mano robotica. È stata scelta quella a tre dita, due posizionate nella parte superiore del palmo e una nella parte inferiore, come fosse un pollice opponibile. Tale decisione è stata presa in funzione della tipologia di oggetti che dovrebbero essere manipolati dalla mano robotica, ovvero valvole T-shape, o tratti di tubazione. La

disposizione delle articolazioni, come precedentemente descritta, ha reso possibile sia l'apertura completa, che la chiusura ottimale delle dita della mano. Per l'attuazione sono stati scelti dei servo motori, così come suggerito dalle altre applicazioni già evidenziate nello stato dell'arte, in maniera tale da rendere l'intero meccanismo, non solo sufficientemente forte e resistente, ma anche non eccessivamente costoso. In alternativa è stata vagliata la possibilità di utilizzare motori a corrente continua, per i quali tuttavia date le dimensioni non ridotte, sarebbero stati necessari spazi ben più ampi per il posizionamento, per la gestione e il controllo della rotazione nei due sensi di marcia. Il sistema di attuazione, che sarà descritto nei paragrafi successivi, è totalmente contenuto all'interno del palmo; per questo motivo, è stato necessario renderlo completamente stagno. La parte posteriore del dispositivo serve esclusivamente a sigillare lo strumento e a poterlo collegare ad un qualsiasi braccio robotico.

2.2 Progettazione di una mano robotica subacquea

2.2.1 Progettazione del dito

L'articolazione del dito è costituita da tre falangi, ovvero falange prossimale (I), falange mediale (II) e falange distale (III), proprio come un dito umano. Le lunghezze e le proporzioni sono opportunamente dimensionate in modo tale da garantire una totale estensione ed una chiusura ottimale sul palmo, evitando possibili posizioni singolari che potrebbero causare complicazioni dovute all'impuntamento del cinematismo in determinate posizioni. In particolare potrebbero verificarsi problemi con l'articolazione del dito totalmente estesa o totalmente contratta. In queste condizioni, il tiraggio garantito dai tendini non sarebbe stato sufficiente a consentire la movimentazione del dito stesso. Per questo motivo, da analisi cinematiche effettuate sul modello CAD, sono state introdotte delle limitazioni geometriche, tali da mantenere l'articolazione funzionante in ogni posizione. Le dimensioni dei vari componenti e gli angoli fisicamente raggiungibili da ogni link, sono riportate in figura 2.2.

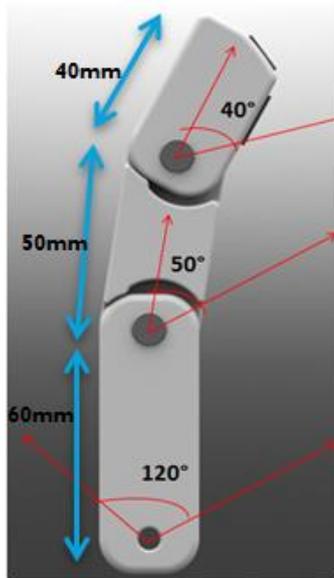


Figura 2.2 - Cinematiso del dito

La maggiore complicazione che si è riscontrata ha riguardato la necessità di evitare il più possibile le zone di tenuta stagna tra il dito e l'esterno. Quindi l'utilizzo di un motore per attuare ogni singola falange, oltre a essere una soluzione che avrebbe comportato notevoli problematiche tecniche, sarebbe stata anche abbastanza costosa ed inoltre l'uso in acqua, avrebbe richiesto la sigillatura dei componenti. Si è optato quindi per una trasmissione a tendini, dove i vari link sono immersi senza necessità di "sealing". In particolare, mediante l'uso di software CAD, è stato studiato e simulato il posizionamento migliore in qualsiasi configurazione, di due canali per ogni falange, all'interno dei quali poter far passare i filamenti per l'attuazione del meccanismo. La posizione delle sedi è stata studiata in maniera tale da averne una nella posizione più esterna del dito, utilizzata in fase di apertura, e una nella posizione più interna, utile alla chiusura dell'articolazione. La progettazione dei canali, è stata realizzata, considerando l'utilizzo nella fase di realizzazione di processi di "additive manufacturing", che saranno descritti nei paragrafi successivi, proprio perché, per poter permettere un totale scorrimento del filamento nella sede, è stato necessario costruire dei profili irregolari (Fig. 2.3), rendendo di fatto irrealizzabile la costruzione mediante tecniche di machining tradizionale.

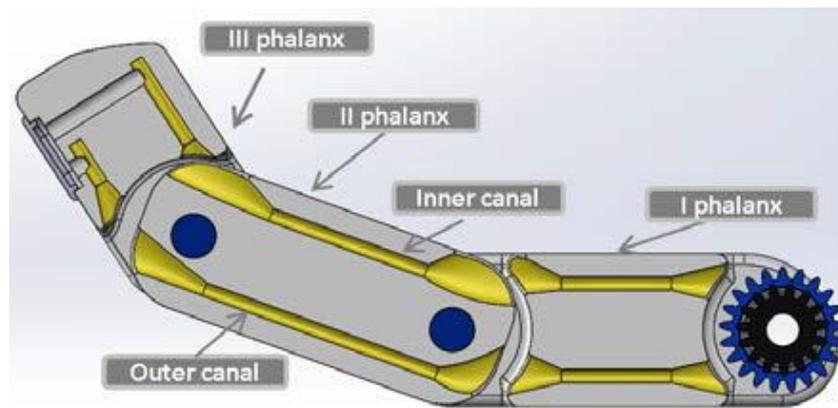


Figura 2.3 - Canali di scorrimento

Non potendo tuttavia simulare mediante i software CAD utilizzati in fase di progettazione l'effettivo allungamento del filamento sono state fatte delle prove sperimentali utilizzando dei prototipi realizzati per stampa 3D con tecnologia FDM. Da queste prove sono state ricavate le lunghezze dei tendini necessari per l'apertura e la chiusura del dito. Nel canale interno, la differenza tra l'estensione e la chiusura è di 22mm, mentre nel canale esterno, tale valore è di 13.8mm. Da ciò ne deriva che l'escursione del filamento interno è maggiore di quello esterno di 8.2 mm. Durante la fase di funzionamento, per avere un'apertura e una chiusura ottimale, è stato necessario avvolgere i tendini su dei ruotismi aventi differenti diametri. Il collegamento tra il dito e il palmo è stato effettuato mediante opportuni ingranaggi, di seguito illustrati.

2.2.2 Progettazione del palmo

La geometria del palmo è stata ottimizzata per la configurazione a tre dita mantenendo una struttura simmetrica, pur avendo disparità di link. Tale ottimizzazione è stata frutto di una iterazione progettuale i cui punti fondamentali sono stati: la riduzione degli ingombri esterni del dispositivo, la possibilità di un corretto assemblaggio, il mantenimento delle finalità progettuali in termini di funzionalità. La movimentazione della mano è stata realizzata attraverso l'uso di servomotori, tipicamente impiegati nel campo del modellismo. Gli spazi interni del palmo, sono stati resi il più possibile indipendenti dalla tipologia di servomotore utilizzato, per non avere limitazioni sulle grandezze o potenze in gioco.

È stato quindi prodotto il modello CAD del palmo della mano, e del coperchio posteriore; in figura 2.4 sono mostrate le principali dimensioni di ingombro.

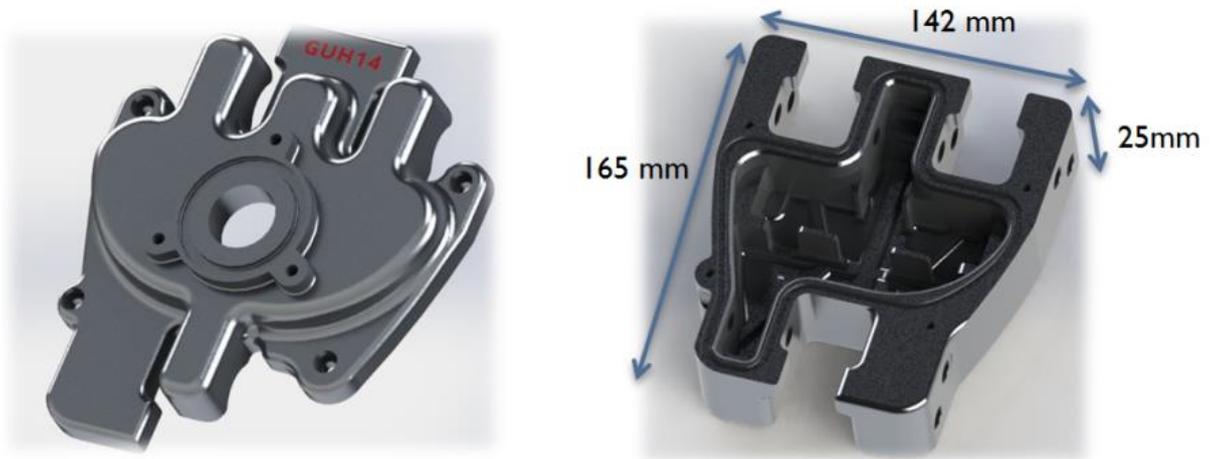


Figura 2.4 – Palmo e coperchio della mano robotica

Definita la geometria del palmo utile ad alloggiare le dita, sono state effettuate alcune simulazioni al FEM in modo da verificare il comportamento del materiale in funzione della pressione di esercizio. Data la necessità di dover resistere in acqua, la scelta progettuale è stata quella di individuare, a pari spessore delle pareti esterne, due materiali utilizzabili a pressioni diverse. Uno plastico da adoperare durante la fase di test e a basse profondità, e un altro metallico avente quindi caratteristiche meccaniche migliori, da utilizzare nella costruzione di uno dispositivo più robusto adatto a profondità elevate. Il limite della simulazione è stato sia la massima tensione di snervamento del materiale che il massimo spostamento ammissibile tra le parti sottoposte a tenuta; il superamento di tali limiti, avrebbe potuto causare l'allagamento del case stagno. Per le simulazioni è stato utilizzato il software FEM ANSYS (Fig. 2.5), al fine di poter riprodurre, in maniera molto precisa, gli stati tensionali e i campi di deformazione durante la fase di utilizzo del dispositivo.

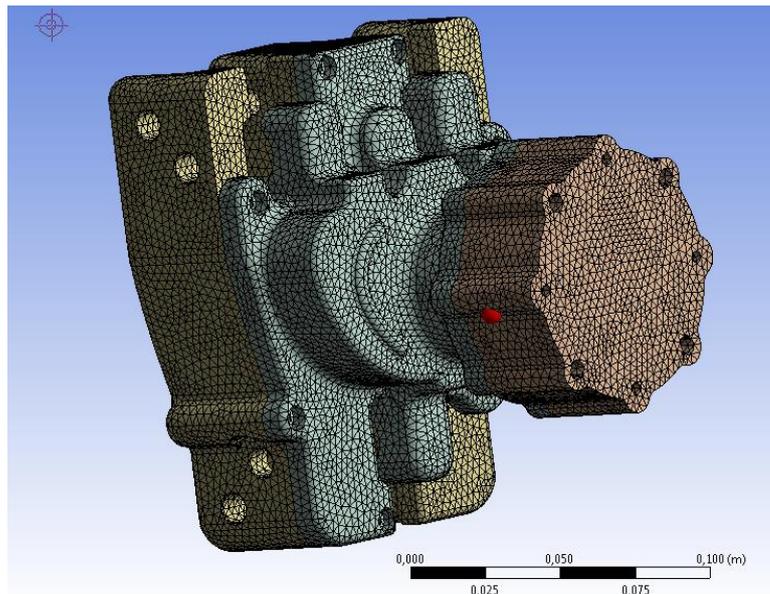


Figura 2.5 - Analisi FEM in Ansys

I componenti considerati nella simulazione sono stati il palmo, il coperchio, e il supporto di collegamento al braccio robotico. Essendo elementi all'interno cavi è stato necessario analizzare il comportamento al variare della profondità, ovvero della pressione.

Nella definizione del modello più adatto alla simulazione, sono state effettuate una serie di prove al fine di riscontrare la corretta dimensione della mesh; è stato scelto come elemento fondamentale quello triangolare con dimensione massima di 3mm, ottenendo così 147504 elementi e 256831 nodi. È stata simulata una pressione idrostatica sul componente, supposto incastrato dalla parte posteriore.

Nella fase di simulazione è stato impiegato come materiale costituente il PA2200, una tipologia di polimero avente caratteristiche meccaniche simili al Nylon con valore di snervamento di 48Mpa. Esso è adoperato sotto forma di polvere, durante il processo di sinterizzazione (Laser Sintering). Tale scelta è stata effettuata in funzione della metodologia di realizzazione con cui si è inteso procedere alla costruzione della mano. La discretizzazione agli elementi finiti e la successiva analisi dei valori relativi alla tensione di snervamento sui vari componenti, ha prodotto come risultato la sostanziale validità del modello, fino a una pressione massima di 50 m, e con un fattore di sicurezza di 1,2. Nel caso in cui le condizioni di utilizzo del dispositivo rendessero necessaria l'applicazione a profondità maggiori, è stato simulato che il materiale costitutivo

potrebbe essere alluminio, in particolare la lega AL6061 avente come limite di snervamento 276Mpa e tensione di rottura pari a 310Mpa . I risultati ottenuti, (Fig. 2.6) sempre utilizzando un fattore di sicurezza di 1.2, rendono affidabile tale utilizzo ad una pressione massima di 300 m.

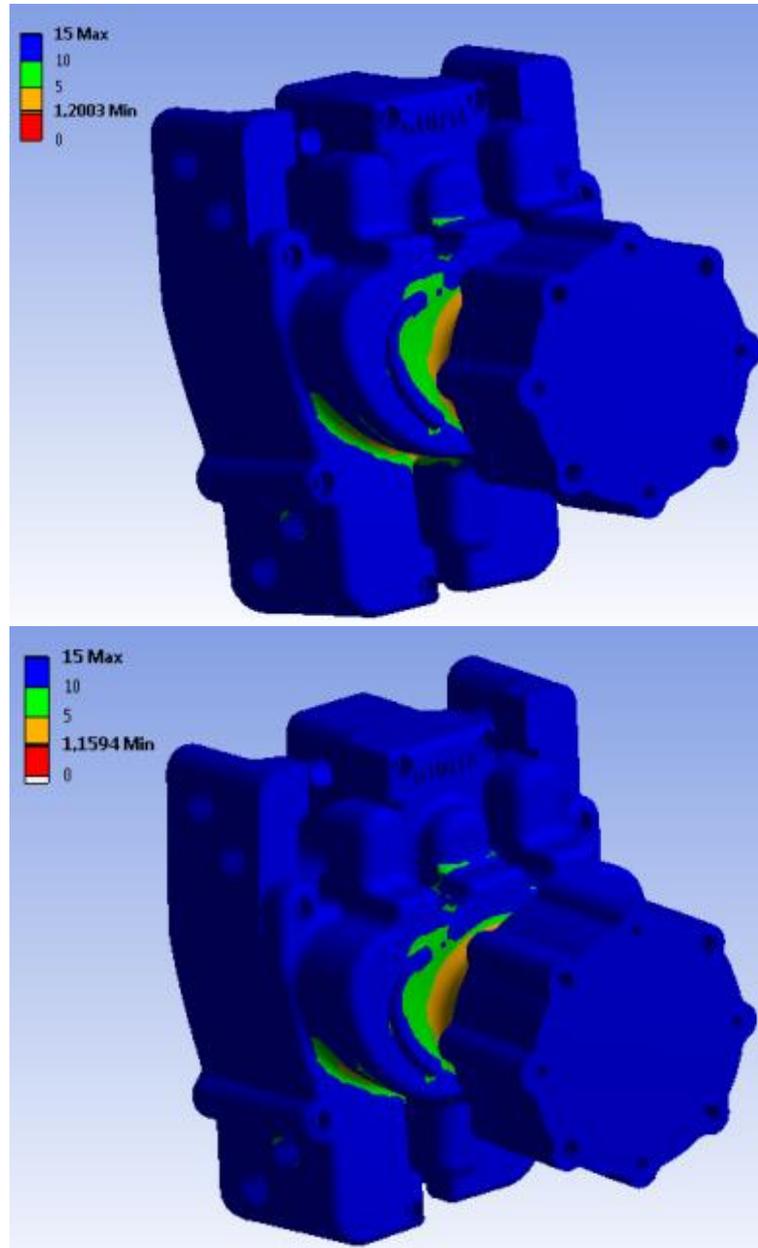


Figura 2.6 - Risultati del fattore di sicurezza - analisi FEM Nylon (a) – Alluminio (b)

Tale valore risulta totalmente corrispondente al valore massimo di profondità raggiungibile dal braccio robotico utilizzato sul veicolo subacqueo “Girona 500”, dell’Università di Girona, come già detto partner di progetto.

La progettazione delle tenute per un componente subacqueo è stata sicuramente un aspetto molto delicato e per questo motivo è stato condotto uno studio accurato sui manuali. Nella mano robotica esistono infatti due diverse tipologie di tenute, ovvero quelle di tipo statico e quelle rotanti. Nel primo caso sono ricavate le sedi per gli o-ring che garantiscono, mediante la loro deformazione elastica, la tenuta in pressione. Discorso simile, per quanto riguarda le tenute dinamiche, ma a differenza delle precedenti, esiste una rotazione relativa tra o-ring e un componente metallico opportunamente lavorato. Uno dei punti di forza della progettazione è risultato essere la completa indipendenza tra palmo e dito che avrebbe permesso di poter procedere velocemente alla sostituzione del componente maggiormente danneggiato, senza dover necessariamente smontare il palmo e le tenute.

2.2.3 Progettazione dei ruotismi

La progettazione complessiva dell'intero cinematismo di un singolo dito, è stata scomposta in tre meccanismi separati: il primo trasmettente il moto dal servomotore all'albero del dito, il secondo da quest'ultimo alla prima falange, il terzo dalla prima alla terza falange. Gli aspetti essenziali del ruotismo sono stati basati sui vincoli dettati dal cinematismo del dito e dalla massima rotazione ammissibile del servo. Si è determinata un'oscillazione tra la massima apertura e chiusura del dito di 120° e una escursione angolare del servomotore variabile tra 120° e 180° in funzione del tipo utilizzato. Il cinematismo è stato sviluppato in modo da rendere comunque la progettazione del ruotismo indipendente dal tipo di servomotore.

2.2.3.1 Primo cinematismo

L'albero di uscita di quasi tutti i servo da modellismo, ha una geometria con profili scanalati "millerighe", mediante i quali è possibile la trasmissione del moto anche di carichi notevoli. Tipicamente dai produttori sono forniti anche alcuni inserti di misure standard dotati di profili millerighe da montare sui motori; tuttavia nel caso in analisi, non sono utilizzabili a causa della necessità di customizzazione della mano robotica. Pertanto sono stati progettati ad hoc delle ruote con profilo opportuno, figura 2.7.



Figura 2.7 - Ruota motrice collegata al servomotore con profilo millerighe

Per la trasmissione del moto è stata utilizzata una cinghia dentata che ingrana tra la ruota motrice, resa così solidale al servo, e quella condotta, collegata all'albero d'uscita del primo meccanismo. L'utilizzo della cinghia dentata, ha garantito il funzionamento con carichi elevati, pur avendo ingombri ridotti. L'interasse tra le due ruote è di 40.82mm ed è stata scelta una cinghia con lunghezza di primitiva di 144mm, 48 denti e un passo di 3mm. Il calcolo del diametro delle pulegge che fungono da ruota motrice e ruota condotta, è stato effettuato in maniera tale da poter avere sull'albero in uscita un'amplificazione del moto (figura 2.8). La ruota motrice, posta a valle del servomotore, misura 24.5 mm di diametro (1), mentre la condotta misura 14mm (2). Il rapporto di trasmissione τ_1 di 1.53, amplifica il moto del servomotore la cui rotazione, ha come vincolo teorico $\pm 90^\circ$, ma effettivamente la programmazione software di fabbrica, riduce la sua corsa a circa $\pm 60^\circ$. La dentatura delle pulegge è stata così creata ad hoc sulla base della cinghia scelta, per poter trasmettere la coppia in maniera ottimale. I valori geometrici sono riassunti in tabella1

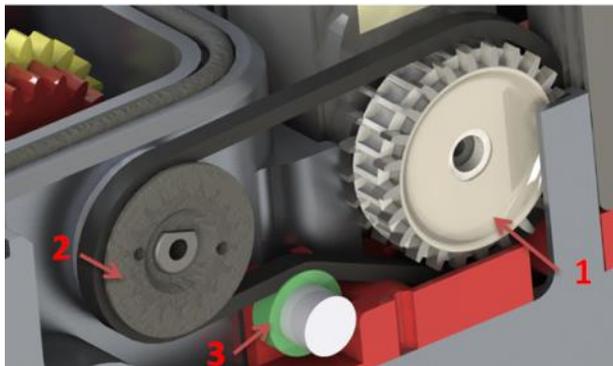


Figura 2.8 - Accoppiamento con cinghia dentata

2.2.3.2 Secondo cinematismo

Trasferito il moto sulla puleggia condotta alla fine del primo cinematismo, è stato spostato, mediante un albero di trasmissione a un gruppo di tre ruote dentate solidali tra loro e anche al palmo della mano, aventi due diametri diversi. Esse ingranano con altre tre ruote poste sul dito, aventi due diametri diversi (Fig. 2.9). La distanza di interasse tra i due ruotismi è stata impostata a 20.86mm.

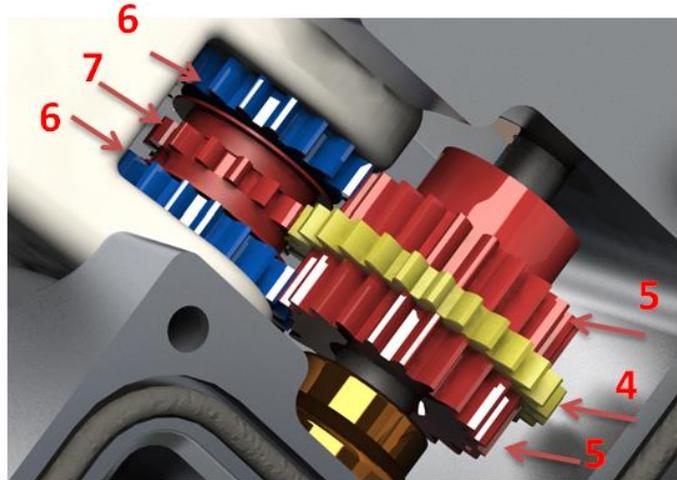


Figura 2.9 - Accoppiamento palmo-dito

Le due ruote dentate esterne (5) solidali al palmo (fig. 2.6) hanno un diametro di 21 mm, mentre la ruota centrale (4) ha un diametro di 26 mm. I diametri delle ruote condotte, poste sul dito, sono rispettivamente di 21 mm (6) e di 15 mm (7). Tutte le informazioni dimensionali sono riassunte in tabella 1. In questa configurazione sono stati ottenuti allo stesso tempo due rapporti di trasmissione differenti ovvero di 1.73 e 1. Con questi valori le ruote esterne trasferiscono esclusivamente il moto senza amplificarlo o diminuirlo, mentre la ruota interna ha il compito di amplificare il moto.

Interasse (mm)	Diametro motrice (mm)	Diametro condotta (mm)	Rapporto di trasmissione
20.86	26	15	1.73
	21	21	1

Tabella 1 - caratteristiche dimensionali dei cinematismi

2.2.3.3 Terzo cinematismo

Nel meccanismo del dito, le due ruote esterne (6), sono state vincolate alla falange prossimale mentre la ruota centrale di diametro inferiore (7) è stata lasciata libera di scorrervi all'interno. L'attuazione del cinematismo ha fatto in modo che i tendini, posti nei canali esterni ed interni, potessero riavvolgersi opportunamente intorno alle piste di diverso diametro ricavate ai lati della ruota centrale, sia durante la fase di apertura che di chiusura. Questa scelta di fatto ha compensato la differente lunghezza dei tendini dovuta alla geometria dei canali. Tale soluzione, che è possibile definire ibrida, ha determinato una trasmissione rigida del moto alla prima falange, mentre le altre due avevano la possibilità, vista la presenza dei tendini, di riadattarsi in funzione dell'oggetto afferrato, rendendo allo stesso tempo il sistema meno soggetto a rotture provocate da urti. Durante la fase di apertura della prima falange, l'ingranaggio delle ruote e il movimento amplificato della ruota centrale, ha reso possibile l'apertura totale anche delle altre due falangi. Al contrario quando la falange prossimale rimaneva totalmente chiusa, il tendine posto nella parte interna del dito completamente in tensione, comportava il serraggio dell'intera articolazione. La possibile escursione del dito definita in 120° , è stata vincolata per interferenza meccanica sia in apertura che in chiusura.

Utilizzando anche in questo caso le tecniche di progettazione additiva, è stato possibile creare dei canali di passaggio del filamento all'interno della piccola ruota centrale del dito in maniera tale da avere un unico tendine. Il grande vantaggio di questa soluzione progettuale, è stato quello di avere una totale indipendenza tra dito e palmo; infatti sarebbero bastati semplicissimi interventi per poter sostituire un dito con uno nuovo di riserva, senza interessare assolutamente gli altri elementi della catena cinematica.

2.2.4 Scelta dei motori

Per l'attuazione della mano robotica, come detto è stato necessario individuare tra i vari fornitori, il servomotore più adatto alle esigenze. Per una prima fase di verifica e per movimentare il primo prototipo, è stato scelto un servomotore che, pur non avendo delle elevate caratteristiche di coppia, era esso stesso già "waterproof", ovvero capace di essere immerso in acque basse. Questa scelta è stata fatta proprio per poter

essere sicuri che, in caso di fallimento delle tenute all'interno del palmo della mano, non si avesse anche la perdita dell'attuazione. Questi motori della HITEC modello Hs-5646WP erano in grado di trasmettere una coppia massima di 12,9 kg/cm; tale valore pur essendo sufficiente per la movimentazione del meccanismo, non garantiva una adeguata coppia di serraggio. In una seconda fase, una volta effettuati tutti i test sulle tenute, sono stati introdotti tre nuovi servomotori, capaci di esprimere potenze maggiori, ovvero motori HITEC modello HS-7980, dotati di una coppia massima di 46 kg/cm.

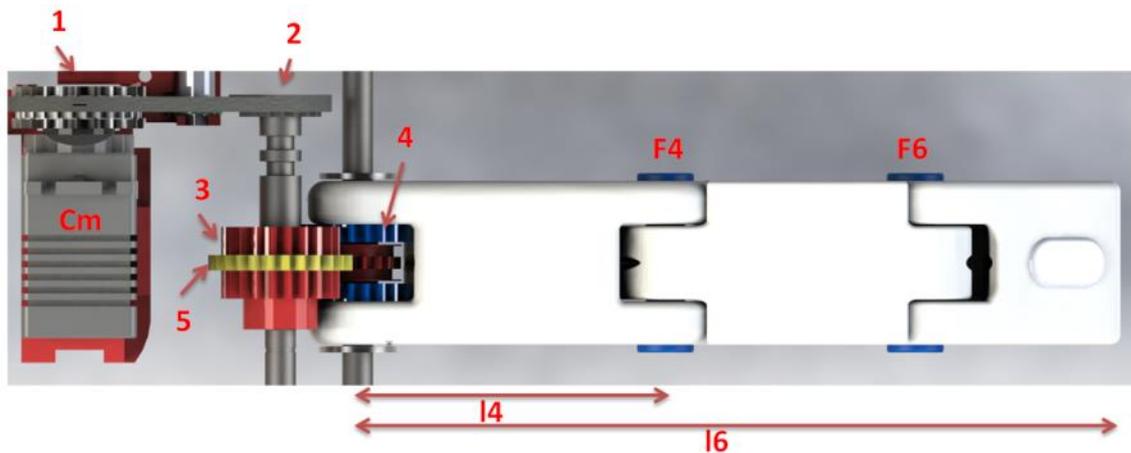


Figura 2.10 - Catena cinematica del palmo e del dito

Una volta impostati i valori delle potenze in gioco e la catena cinematica (Fig. 2.10), è stato possibile definire la forza massima applicabile sul dito.

Nella progettazione del cinematismo si è tenuta in considerazione l'esigenza di dover far compiere alle dita 120° di escursione, da completo serraggio a completa apertura determinando opportune variabili. In primo luogo "l'escursione massima" del servomotore, che come detto è in grado di compiere una rotazione di circa 90°. Dovendo mantenere il sistema compatto è stato necessario utilizzare una cinghia sufficientemente corta in modo tale da non consentire eccessive deformazioni della stessa e pregiudicare il perfetto ingranamento dei denti.

La dimensione delle pulegge dentate facenti parte del secondo cinematismo, è stata definita in funzione della distanza di interasse (presa a priori come punto fermo) tra l'asse sul quale è calettata la ruota motrice (2) e quello su cui è calettata la ruota condotta (4), come mostrato in figura 2.17. La stessa cosa è valida nel caso del primo

cinematismo ovvero quello che si crea tra l'asse del servomotore (1) e l'asse della ruota (2) sempre in riferimento alla figura 2.17. è stata verificata la bontà dei calcoli effettuati mediante un'analisi cinematica svolta con il software CAD Solidworks.

Dati i valori dei diametri delle ruote interessate al cinematismo, è stato possibile calcolare i rapporti di trasmissione, ricavare il peso massimo sopportabile dalla falange distale e quello ammissibile dall'intero dito utilizzando il primo tipo di servomotore con coppia massima di 12.5 kg*cm, In tabella 2 sono mostrati i diametri dei ruotismi.

d1 = 24.5 mm	d2 = 16 mm
d3 = 21 mm	d4 = 21 mm
d5 = 26 mm	d6 = 15 mm

Tabella 2 - Diametri delle ruote dentate e delle pulegge

Per ricavare la forza F4 agente sulla falange distale, è stato calcolato il rapporto di trasmissione T_{41}

$$T_{41} = T_{43} \cdot T_{32} \cdot T_{21} = 1 \cdot 1 \cdot \frac{d_2}{d_1} = \frac{16}{24.5} = 0.653$$

il valore di coppia ottenibile sulla ruota 4 è :

$$C_4 = C_m \cdot T_{41}$$

Esprimendo il valore della coppia del motore in N m si ha:

$$C_4 = 1.226 \cdot 0.653 = 0.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

il peso massimo sopportabile dalla prima falange di lunghezza 60mm è di:

$$F_4 = \frac{C_4}{l_4} = \frac{0.8}{0.06} = 13.3\text{N ovvero } 1.36 \text{ Kg}$$

Per calcolare il valore del peso massimo ammissibile dall'intero cinematismo del dito è stato necessario considerare il rapporto di trasmissione T_{61}

$$T_{61} = T_{65} \cdot T_{52} \cdot T_{21} = \frac{d_6}{d_5} \cdot 1 \cdot \frac{d_2}{d_1} = \frac{15}{26} \cdot 1 \cdot \frac{16}{24.5} = 0.576 \cdot 1 \cdot 0.653 = 0.376$$

Facendo gli stessi passaggi precedenti si è ottenuto:

$$C_6 = 1.226 \cdot 0.376 = 0.46 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$F_6 = \frac{C_6}{b_{\max}} = \frac{0.46}{0.122} = 3.77 \text{ N ovvero } 0.38 \text{ Kg}$$

Nel caso in cui si fosse utilizzato il servomotore più potente con una coppia di 46 kg*cm si sarebbero ottenuti i seguenti valori di forza considerando il caso peggiore, ovvero con il dito in configurazione totalmente aperta: $b_{\max} = 122\text{mm}$ oppure il caso migliore, con il dito totalmente piegato, ovvero: $b_{\min} = 82.5\text{mm}$. In tabella 3 sono riassunti i valori di forza e di coppia risultanti.

$C_4 = 2.94 \text{ N} \cdot \text{m}$	$F_4 = 5 \text{ kg}$
$C_6 = 1.69 \text{ N} \cdot \text{m}$	$F_{6 \min} = 1.41 \text{ Kg}$
	$F_{6 \max} = 2.08 \text{ Kg}$

Tabella 3 - Valori di forza e di coppia del meccanismo

Dai valori di forza ottenuti, è stato possibile desumere che ogni singolo dito al massimo poteva sostenere 1.41 Kg. Ma questo valore rappresentava non solo un carico estremo ma anche una condizione difficilmente raggiungibile durante l'utilizzo. Infatti l'afferraggio e il trasporto di un oggetto, normalmente avviene a dito parzialmente o totalmente chiuso.

Per poter mantenere i servomotori in posizione e anche per garantire la perfetta tensione delle cinghie, è stato progettato un supporto capace di assolvere contemporaneamente a questi due aspetti. In funzione degli ingombri esterni di ogni servomotore, sono stati creati degli alloggiamenti, per bloccare i tre motori dalla parte inferiore, mediante collegamenti filettati e che hanno reso "il gruppo attuazione" un sottoinsieme unico della mano. Infatti è stato necessario effettuare la procedura di montaggio smontaggio per tutti e tre contemporaneamente.

Per poter tendere nella maniera più opportuna la cinghia di trasmissione durante la fase di montaggio e per dare il giusto pretensionamento al primo cinematismo, sono stati inseriti dei piccoli cuscinetti tendi cinghia di diametro 6mm (n3 figura 2.8). Una delle problematiche più importanti riguardanti l'utilizzo e l'attuazione mediante servomotore è stata che non si garantiva l'assenza di moto retrogrado; infatti, una volta rimossa l'alimentazione agli attuatori, essi cessavano di erogare coppia e quindi non si opponevano ad eventuali carichi esterni. Il meccanismo così attuato si definisce "backdrivable". Al fine di ovviare a questa problematica, è stato progettato un supporto posto nella parte superiore dei servi che fungeva anche da alloggiamento per dei solenoidi. Quando essi venivano alimentati, movimentavano un profilo scanalato che come un cuneo creava interferenza bloccando la ruota motrice del servo evitandone così il moto retrogrado, anche senza alimentazione (Fig. 2.11).

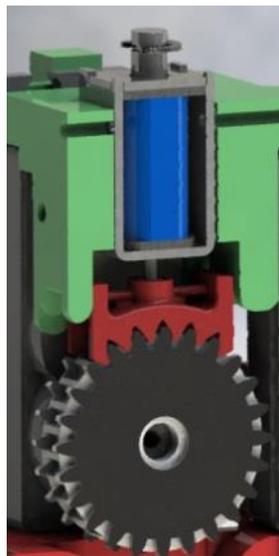


Figura 2.11 - Sistema di blocco con solenoide

2.2.5 Progettazione delle tenuta

Nello studio delle tenute per componenti ad uso subacqueo, è stato necessario effettuare un'attenta progettazione ed avere anche un'elevata precisione durante la realizzazione, al fine di rispettare le tolleranze poste sulle superfici di interfaccia tra due componenti nonché nelle cave per gli anelli elastici detti "o-ring", capaci di garantire la tenuta stagna.

All'interno della mano robotica erano presenti sia tenute di tipo statico che di tipo dinamico. In entrambi i casi sono state utilizzate quelle di tipo NBR (Acrylonitrile-Butadiene), una tipologia di gomma che garantiva sia elasticità che resistenza alla compressione e tipicamente utilizzato a contatto di fluidi non corrosivi. La progettazione delle tenute statiche ha previsto l'individuazione della dimensione del diametro interno della superficie della cava al fine di scegliere la corretta misura degli o-ring. Nel caso in cui la cava per l'o-ring, non avesse un profilo circolare, è stato calcolato il diametro equivalente considerando il perimetro dello spigolo della cava interna (Fig. 2.12). Tutta questa precisione e accortezza è stata necessaria perché durante la fase di montaggio un o-ring non poteva essere dilatato per più del 5% della sua lunghezza secondo la norma ISO3601-2, e né tantomeno poteva avere un diametro maggiore rispetto a quello della cava. La misura corretta per la tenuta, è stata ricavata consultando apposite tabelle fornite dai produttori in funzione delle geometrie impostate.

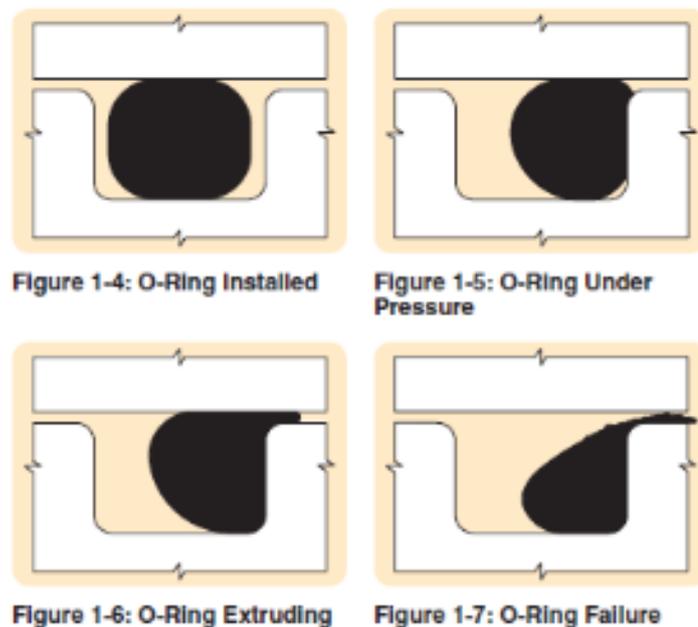


Figura 2.12 - Montaggio errato della tenuta elastica (Parker Handbook 2009)

Gli anelli elastici funzionando a compressione, mediante una deformazione elastica, riempiono gli spazi all'interno della gola appositamente creata. Nel caso in cui qualche prescrizione non fosse rispettata, l'o-ring potrebbe fuoriuscire dalla sede parzialmente o totalmente, e l'acqua entrerebbe all'interno. Di notevole importanza è la finitura

superficiale delle facce a contatto nonché la creazione di opportuni raggi di raccordo per evitare l'intrappolamento dell'anello già in fase di montaggio e quindi il suo danneggiamento. E' molto importante altresì una corretta lubrificazione delle parti a contatto ed un'attenta pulizia visto che anche un solo granello di polvere potrebbe far fallire il dispositivo a tenuta stagna. Solitamente per queste applicazioni viene utilizzato grasso al silicone, che garantisce la perfetta adesione dell'o-ring alla sede e aiuta a migliorare la tenuta del dispositivo.

Le prescrizioni già dette sono parimenti valide nel caso delle tenute rotanti, ed inoltre è necessario sia considerare la possibilità di rifinire le parti a contatto tra o-ring e sede al fine di mantenere valori di rugosità media R_a da 0.8 a 1.6 per o-ring utilizzati per tenute statiche e ($R_a = 0.25$ to 0.5 mm) nelle tenute dinamiche. È inoltre necessario prevedere l'utilizzo di smussi e raggi di raccordo per evitare di danneggiare l'o-ring già durante la fase di montaggio. Rispettando tutto quanto detto, anche nel caso delle tenute rotanti non è necessaria, la sostituzione, pur stabilendo una manutenzione programmata in funzione delle ore di utilizzo.. La sostituzione dell'anello elastico visto che lo strisciamento può causarne il consumo, anche in condizioni di lubrificazione ottimale. La situazione più impegnativa, per qualsiasi tipo di tenuta, è quella del funzionamento in condizioni di "shallow water" ovvero a bassissima profondità poiché, in questo caso, non avendo gli effetti positivi della pressione che comprime gli elementi, gli o-ring si deformano in maniera ottimale solo se tutte le indicazioni di progetto sono rispettate. In caso contrario, durante il funzionamento la bassa pressione esterna, tende a favorire l'ingresso dell'acqua all'interno dei componenti. Nel caso in cui anche l'elemento della pressione esterna è presente in maniera importante, la compressione tra le due parti accoppiate favorisce la deformazione dell'o-ring e l'aumento delle sue capacità di tenuta stagna.

Per questi motivi le prime prove sul dispositivo hanno avuto successo sia nelle condizioni di shallow water che alla pressione di esercizio massima prefissata.. La tenuta stagna di un'apparecchiatura subacquea, in generale è a rischio in quanto, a bassa pressione idrostatica, i componenti che deformano l'o-ring sono opportunamente mantenuti in pressione esclusivamente dai dispositivi di bloccaggio come ad esempio le viti utilizzate per la chiusura del dispositivo. La situazione risulta

essere nuovamente problematica solo dopo un eccessivo aumento della pressione. In questo caso la deformazione della geometria iniziale delle superfici di interfaccia, di tipo elastico o di tipo plastico potrebbe di fatto causare il cedimento della tenuta. Lo stesso effetto si sarebbe avuto se la tensione raggiunta dal materiale fosse stata superiore al suo limite di snervamento, causando la rottura del componente.

2.2.6 Progettazione dell'elettronica

Per il corretto funzionamento di una mano robotica è stato necessario implementare un adeguato controllo elettronico al fine di gestire non solo la movimentazione delle dita ma anche la sensoristica di verifica e analisi dei dati. Come detto per permettere l'attuazione dei servo motori, è stato necessario inviare un input tale da consentire la rotazione alternata nelle due direzioni.

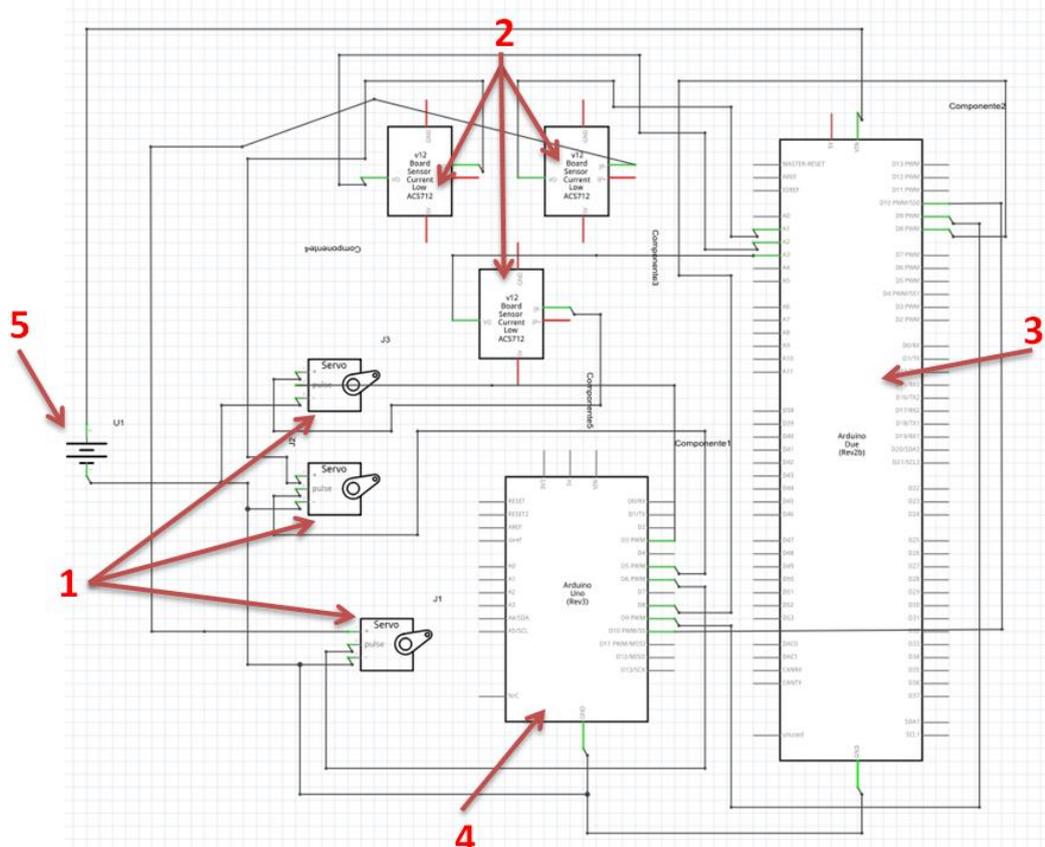
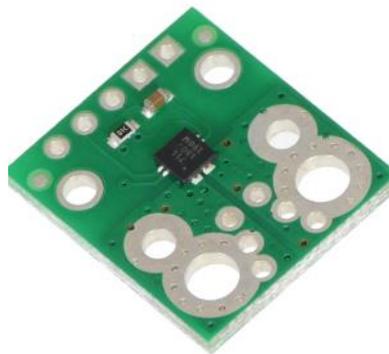


Figura 2.13 - Circuito semplificato dell'elettronica della mano

L'intero circuito elettronico sviluppato è riassunto nel precedente schema semplificato (Fig. 2.13). Da ogni servomotore (1), fuoriuscivano tre cavi: uno di alimentazione, uno

di massa e uno di segnale; visto che è stato previsto che ogni motore poteva muoversi indipendentemente dagli altri due, è stato indispensabile collegarli nella maniera più opportuna. Al fine di avere un controllo diretto sul carico che istante per istante viene assorbito da ogni motore, sono stati collegati in serie dei sensori di corrente (2), in maniera tale da verificare, in funzione del valore di corrente assorbita, se durante una qualsiasi manipolazione, il carico afferrato fosse stato eccessivo. Per evitare problemi di sovraccarico e di potenziale rottura che si sarebbero potuti avere superando i 5A, è stato monitorato il valore di ampere assorbito istantaneamente. La gestione della movimentazione così come il monitoraggio dei sensori di corrente è stata affidata a due schede logiche Arduino (3,4), che opportunamente programmate, erano in grado sia di dialogare tra di loro che con i motori, che con un dispositivo di input come ad esempio la tastiera di un computer oppure un joystick. I sensori di corrente utilizzati, del tipo ACS711EX erano capaci di rilevare variazioni di amperaggio dai -15.5 ai 15.5 Ampere (Fig. 2.14). Essi funzionavano a 5 V con la seguente caratteristica [pololu.com].



$$i = 36.7 A * \frac{V_{OUT}}{V_{CC}} - 18.3 A$$

Figura 2.14 - Sensore di corrente e la sua caratteristica

Dove i è la corrente rilevata dal sensore, V_{out} è la tensione in uscita dal sensore, e V_{cc} è la sua corrente di alimentazione. Come già detto i sensori di corrente sono stati posizionati in serie ad ogni servomotore in maniera tale da monitorare indipendentemente i tre segnali ricevuti.

L'alimentazione della mano robotica è stata affidata a una batteria LiPo a 7.4v (5), capace di generare la potenza necessaria all'intera circuiteria elettronica e all'alimentazione della mano robotica per circa 12 ore. La circuiteria rappresentata è stata alloggiata all'interno di un box stagno e collegata alla mano mediante un cavo

stagno e dei “passa parete” (Fig. 2.15) opportunamente progettati e resinati per poter resistere fino a una pressione massima di 300 m.



Figura 2.15 - Passacavo subacqueo

L'intero sistema mano robotica e componentistica elettronica è stato reso dipendente da dispositivi posti “all'asciutto” solo per quanto riguarda l'input del segnale di comando e l'output di visualizzazione dei dati.

2.2.7 Progettazione del software di controllo

Utilizzando la scheda logica Arduino per la gestione elettronica del dispositivo, è stata essenziale la programmazione della stessa mediante la scrittura di programmi nel linguaggio proprietario del dispositivo utilizzato. Come detto sono state impiegate due schede separate per evitare di avere ritardi nei calcoli e nell'elaborazione dei dati. A tal proposito occorre precisare che un primo Arduino è stato programmato per controllare la movimentazione dei servo motori, l'altro invece ha permesso la lettura e l'analisi dei dati dei sensori di corrente con modalità che saranno descritte nei prossimi paragrafi.

2.2.7.1 Sensori di corrente

Questo programma caricato sul primo Arduino permette la lettura dei valori di corrente rilevati da ogni sensore. Per evitare i problemi di sovraccarico precedentemente descritti, è stato definito a priori un valore massimo di corrente ammissibile. Questo valore può essere impostato dall'utente in funzione dei diversi scenari di utilizzo della mano robotica. Il software effettua un campionamento di un certo numero di valori

rilevati in un lasso di tempo (400 millisecondi) creandone un valore medio in modo da avere una misurazione stabile e il più possibile priva di errori dovuti ad assorbimenti di picco. Ogni valore medio registrato, si confronta con il valore massimo impostato e se questo risulta inferiore, alle dita è ancora permessa la movimentazione in chiusura, altrimenti è abilitata esclusivamente l'apertura. Durante la movimentazione di un oggetto afferrato, per evitare la continua alimentazione dei motori che potrebbero subire dei sovraccarichi, sono stati posti, come detto in precedenza, dei solenoidi che azionati dalla pressione di un tasto dal dispositivo di input, creano interferenza meccanica e quindi evitano il moto retrogrado del dispositivo fino alla successiva pressione e allo sblocco dello stesso. In appendice A è riportato il codice in linguaggio Arduino.

2.2.7.2 Hand controller

L'altro programma che è stato caricato sulla seconda scheda logica gestisce, come detto, la movimentazione dei motori. Come condizione iniziale è stata definita una posizione di avvio per i motori verificata ad ogni accensione del dispositivo, e che corrisponde a metà della corsa degli attuatori. Per la movimentazione delle dita è stata scelta una normale tastiera di computer e i tasti "q", "w", "e" servono a comandare l'apertura delle tre dita mentre "a", "s", "d" servono alla chiusura. La pressione di uno di questi tasti provoca un graduale movimento dei motori. Sono stati inoltre definiti i limiti di movimentazione per ogni servomotore, ovvero un range da 0° a 120°, che corrisponde al limite meccanico del cinematismo. In appendice A è riportato il codice in linguaggio Arduino.

2.2.7.3 Interfaccia grafica

L'interfaccia grafica, sviluppata in C++, è altamente intuitiva e semplice, e serve a controllare, mediante tastiera, la mano robotica per la cui movimentazione è necessario un cavo USB. Dal software è inizialmente richiesto di inserire la porta COM di comunicazione tra il computer e l'elettronica di controllo (Fig. 2.16), poi in tempo reale, sono visualizzati i valori della posizione angolare di ogni servomotore e quindi di

ogni dito, nonché il valore istantaneo di corrente assorbita da ognuno di essi. Per permettere una movimentazione precisa di ogni attuazione è necessaria la pressione del tasto corrispondente e al suo rilascio, il moto si interrompe mantenendo la posizione raggiunta. In appendice A è riportato il codice in linguaggio C++.

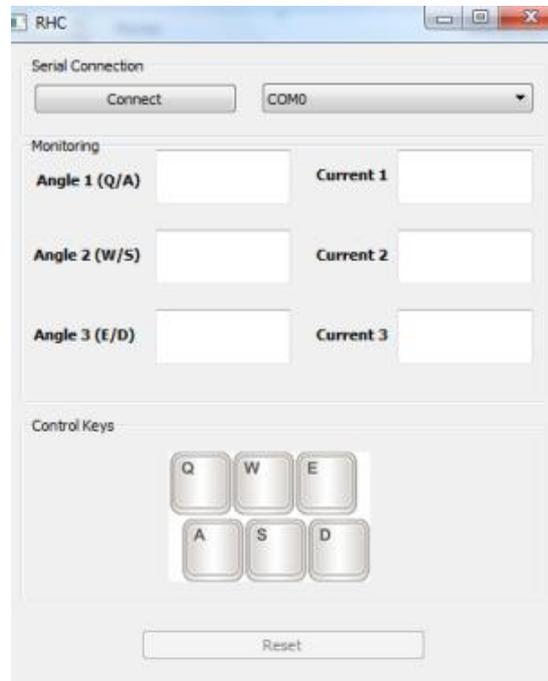


Figura 2.16 - Interfaccia grafica

2.3 Realizzazione della mano robotica subacquea

2.3.1 Realizzazione del palmo del coperchio e della parte posteriore

La fase di realizzazione della mano robotica come detto, è frutto di tutta la fase di progettazione precedentemente descritta. Ogni aspetto è stato infatti accuratamente verificato e simulato con i software CAD e FEM. Per poter constatare se gli sforzi progettuali avessero prodotto soluzioni funzionanti, in alcune situazioni è stato necessario creare prototipi fisici come nel caso della valutazione degli ingombri dei vari componenti, o della loro semplicità di assemblaggio.

Per la prima fase di “prototipazione” dei componenti della mano (non soggetti a movimento) come il palmo, il suo coperchio e la parte posteriore di collegamento con il braccio robotico, è stata prevista la realizzazione mediante stampa 3D con tecnica FDM

(fused deposition modeling) (Fig. 2.17) dei primi modelli in PLA, un materiale plastico avente bassissime caratteristiche meccaniche ma abbastanza funzionale per le operazioni preposte, utilizzando la stampante 3D *Makerbot replicator 2X*.

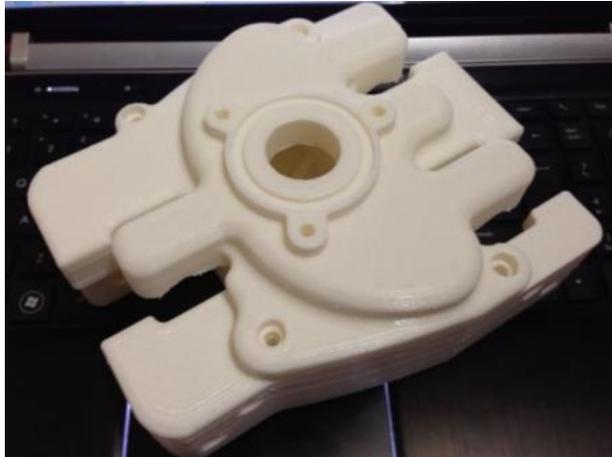


Figura 2.17 - Mano stampata in PLA

La seconda fase, ha previsto la creazione del prototipo definitivo per quanto riguarda i tre componenti sopra descritti. Sulla base delle simulazioni agli elementi finiti, è stato scelto di realizzare un dispositivo in materiale plastico capace di funzionare, come detto, con ampi margini di sicurezza fino a un massimo di 50 m di profondità. Utilizzando la stampante 3D EOS Formiga P110 (Fig. 2.18), sono stati realizzati i componenti in PA2200, materiale plastico sotto forma di polvere di colore bianco, che ha caratteristiche meccaniche molto simili al nylon; le cui caratteristiche meccaniche sono riportate in Appendice B.



Figura 2.18 - Eos Formiga P110 e polvere di PA2200

Il processo di stampa, mediante tecnologia laser sintering, permette di realizzare componenti di qualsiasi forma geometrica in quanto, durante la fabbricazione del

componente, non è prevista la generazione di strutture di supporto. Grazie alla temperatura elevata che la macchina raggiunge durante la fase di stampa, la polvere di PA2200 è riscaldata ad una temperatura prossima a quella di fusione, ovvero circa 160°. Quindi il compito del laser è quello di apportare solo la quantità di energia necessaria alla completa fusione delle parti interessate, pertanto l'uso di tale tecnologia rappresenta un grandissimo vantaggio che permette anche di creare qualsiasi tipo di sotto squadro o anche componenti cavi al loro interno.

Le tecniche di prototipazione rapida, consentono inoltre di ottenere parti molto complesse in poco tempo. Un altro fattore rilevante è la bassa densità di questo materiale plastico che consente anche di creare componenti dotati di una notevole spinta positiva in acqua. Nella realizzazione di apparecchiature ad uso subacqueo come la mano robotica, questo aspetto risulta essere di effettiva rilevanza poiché costruire un dispositivo di peso neutro o leggermente positivo, implica che il veicolo o il braccio robotico sul quale può essere montato, debba necessitare di minore forza durante le fasi di utilizzo. Riuscendo a garantire tolleranze nell'ordine del decimo di millimetro è stato così possibile rispettare le prescrizioni dei manuali per la progettazione delle tenute. Le superfici create, pur presentando una leggera rugosità superficiale, sono state facilmente rilavorate. È stato possibile inoltre stampare parti direttamente dotate di filettatura, evitando così qualsiasi lavorazione di foratura o maschiatura. In figura è possibile verificare l'evoluzione dei prototipi di mano robotica (Fig. 2.19).

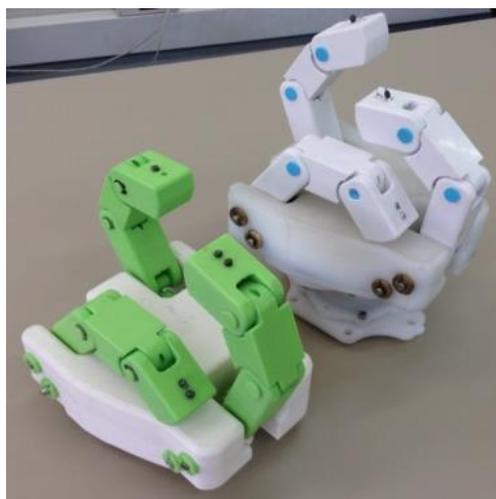


Figura 2.19 - Confronto tra due versioni di mano robotica

2.3.2 Realizzazione del dito

La realizzazione del dito ha permesso di verificare l'effettiva funzionalità dei cinematismi. Come descritto nel paragrafo sulla progettazione del dito, sono stati previsti dei canali di passaggio per i tendini di attuazione del dito. Le loro dimensioni sono state di volta in volta riadattate in funzione degli studi sui primi prototipi creati in PLA. Questa fase è stata particolarmente importante proprio per il fatto che con il software CAD non è possibile simulare il comportamento di elementi come i tendini e né tantomeno l'eventuale elasticità del materiale. Proprio mediante queste prime fasi di prototipazione è stato possibile misurare empiricamente le lunghezze a riposo e in massima estensione per ogni falange e anche la quantità di filamento necessario a compiere l'intera escursione sia in apertura che in chiusura. È possibile dire quindi che la fase di creazione dei prototipi fisici abbia influenzato positivamente la fase di riprogettazione di alcuni aspetti specifici non solo del dito, ma dell'intero dispositivo (Fig. 2.20). Le ruote dentate facenti parte del terzo meccanismo, sono state anch'esse realizzate in PLA nella fase prototipale, ma data la scarsa resistenza all'usura, il prototipo definitivo del dito, nonché i suoi ruotismi, sono stati realizzati per sinterizzazione in PA2200.



Figura 2.20 - Dito robotico sinterizzato e la sua sezione

Un componente particolarmente importante per la movimentazione del dito è la ruota centrale del terzo cinematismo, in quanto essa presenta una cava a spirale all'interno della quale passa l'unico tendine utile alla movimentazione dell'articolazione del dito che è costituito da un filamento in acciaio inox (Fig. 2.21) ; inoltre sono presenti le piste di avvolgimento di quest'ultimo. Da notare che tale soluzione tecnica sarebbe stata assolutamente irrealizzabile mediante i processi costruttivi tradizionali.

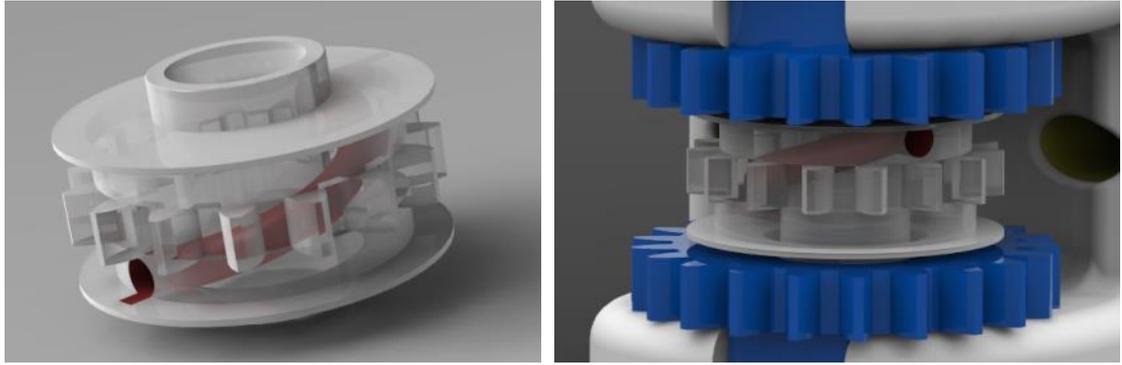


Figura 2.21 - Particolare ruota terzo cinematismo

L'intero meccanismo del dito, come detto, è stato reso completamente indipendente dal palmo della mano, non solo per quanto riguarda il cinematismo delle dita ma anche per il ruotismo presente alla base della falange prossimale. Il bloccaggio dei tendini e la messa in tensione è stata affidata a inserti metallici posizionati nella parte finale della falange distale.

2.3.3 Realizzazione degli elementi in bronzo e degli alberi

Per rispettare i vincoli progettuali della funzionalità delle tenute, sono stati realizzati una serie di elementi aventi funzione di guidare l'attuazione del meccanismo. Tutti quanti gli alberi di trasmissione presenti all'interno del dispositivo, sono stati realizzati in acciaio inox a partire da un semilavorato rettificato, sia per potere avere un'elevata resistenza sia per avere la possibilità utilizzo in ambienti corrosivi. I profili degli alberi di trasmissione sono stati opportunamente costruiti per poter alloggiare o-ring di piccole dimensioni e anelli seeger utili al bloccaggio delle ruote dentate. Nella parte terminale degli alberi in acciaio è stata realizzata una scanalatura per l'inserimento della ruota condotta del primo cinematismo. Non essendo previsti all'interno del dispositivo la presenza di cuscinetti di rotolamento, sono stati utilizzati, per poter permettere un corretto scorrimento tra albero e sede, elementi in bronzo, realizzati con elevata finitura superficiale garantendo così le caratteristiche progettuali delle tenute dinamiche come spiegato in precedenza. (Fig. 2.22) .

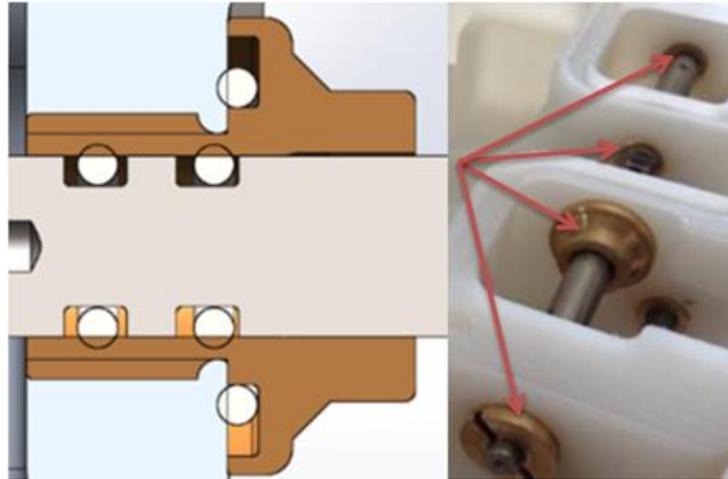


Figura 2.22 - Modello CAD (a) e componenti reali (b) bronzine realizzate per tornitura

Queste bronzine sono state inoltre filettate in modo da potere essere collocate ai lati del palmo delle mano. Mentre la tenuta dinamica è stata assicurata dall'interfaccia tra albero in acciaio, o-ring e bronzina, quella statica, come si evince dalla, è stata ottenuta mediante un'apposita scanalatura per anello elastico. Per completare l'installazione di questi elementi all'interno del palmo sono stati realizzati dei profili atti ad operare con un cacciavite o con una chiave esagonale (Fig. 2.23).

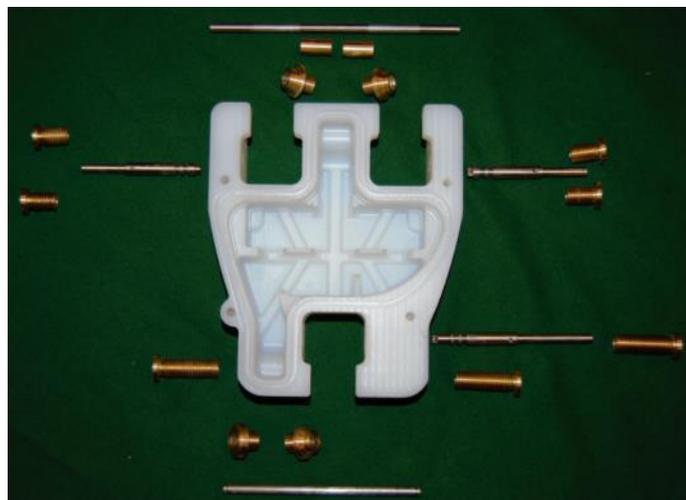


Figura 2.23 – Palmo della mano robotica, bronzine e alberi in acciaio

2.3.4 Realizzazione dei ruotismi

Nella realizzazione dei componenti facenti parte del ruotismo del palmo, un aspetto che ha fortemente influenzato la fase di realizzazione, è stato sicuramente l'importante

customizzazione dei profili sia per quanto riguarda le pulegge che per quanto riguarda gli ingranaggi. È stato necessario non solo un particolare profilo esterno, come descritto in precedenza, ma anche la parte interna di collegamento con gli alberi di trasmissione. Per questi motivi, non è stato possibile utilizzare prodotti commerciali, ma anche in questo caso si è dovuto ricorrere alla stampa 3D. Malgrado siano stati effettuati dei test con componenti stampati in PA2000, a causa delle forze in gioco, in alcuni punti molto elevate, è stato necessario ricorrere a materiali aventi caratteristiche meccaniche migliori; in particolare sono stati realizzati in acciaio inox. Per evitare di effettuare costose lavorazioni alle macchine utensili e non potendo contare sull'acquisto da catalogo data la customizzazione, si è proceduto alla creazione dei componenti utilizzando la stampante 3D Eos M280 utilizzando la tecnologia DMLS (Direct Metal Laser Sintering) (Fig. 2.24).



Figura 2.24 - Puleggia dentata (2 fig 2.8) durante e dopo la sinterizzazione

Il materiale costitutivo in questo caso è stato “GP1”, una particolare polvere metallica con caratteristiche meccaniche equiparabili a quelle di un normale acciaio inox; le caratteristiche tecniche di questo materiale sono riportate in Appendice B. Il processo di stampa che per alcuni aspetti è simile al caso della sinterizzazione di polveri plastiche, tuttavia presenta notevoli differenze dovute al fatto che i componenti sinterizzati in acciaio hanno necessità, durante la fase di costruzione, di opportune strutture di supporto, anch'esse realizzate in acciaio. È evidente che anche durante la fase di progettazione è necessario minimizzare i supporti per poter ottimizzare il consumo di materiale, tenendo anche conto che per alcune superfici potrebbe non essere più possibile la lavorazione. Dunque ogni ruotismo del palmo è stato creato utilizzando questa tecnologia, mentre il terzo ruotismo, facente parte del dito, è rimasto in materiale plastico in modo da poter non solo facilmente individuare “l'anello debole della catena” (Fig. 2.25), ma anche di poterlo facilmente sostituire.

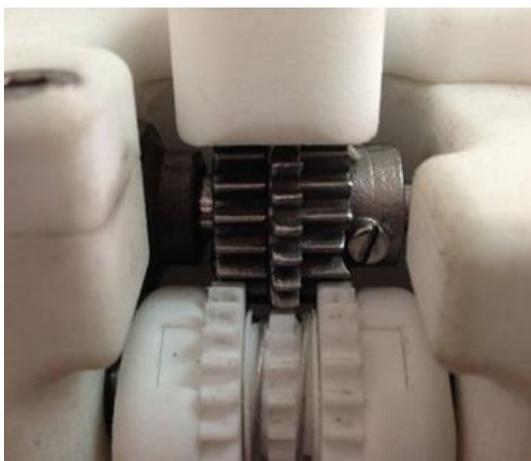


Figura 2.25 - Ruotismo in Acciaio e in Nylon entrambi stampati in 3D

2.3.5 Assemblaggio della mano robotica

La fase di assemblaggio dell'intero sistema è stata di semplice esecuzione, così come le operazioni di manutenzione. Per prima cosa sono stati assemblati i servomotori e i solenoidi di bloccaggio all'interno delle loro case di supporto (Fig. 2.26) e poi è stato possibile l'inserimento della parte di attuazione all'interno del palmo.



Figura 2.26 - Servomotori della mano

Successivamente è stato possibile assemblare i tre alberi di trasmissione del moto avendo cura di sistemare attentamente gli o-ring e gli anelli di bloccaggio.

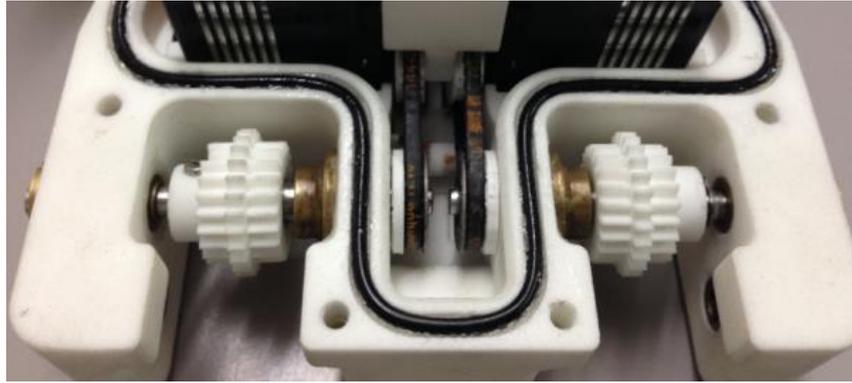


Figura 2.27 - Palmo della mano e meccanismo assemblato

Si è poi proceduto alla tensione del meccanismo di trasmissione del moto posizionando la cinghia dentata sulla ruota condotta del primo cinematismo ed in ultimo è stato possibile inserire le dita, pretensionando opportunamente il cinematismo (Fig. 2.27). Sono stati effettuati i collegamenti elettrici ed elettronici tra il pacco batteria e il dispositivo. Per azionare e rendere operativa la mano robotica (Fig. 2.28) è stato necessario collegare l'intero sistema ad una porta USB di un qualsiasi computer .

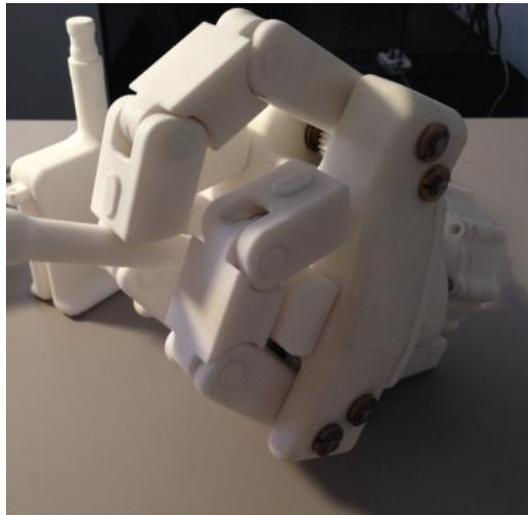


Figura 2.28 - Mano robotica completamente assemblata

2.3.6 Realizzazione dell'elettronica

L'elettronica del dispositivo è stata realizzata, come già detto, utilizzando due schede logiche Arduino 2, collegate tra loro. (Fig. 2.29, 2.30) Esse sono state alloggiare insieme ai sensori di corrente su una basetta "millefori" al fine di ottenere una circuiteria compatta.

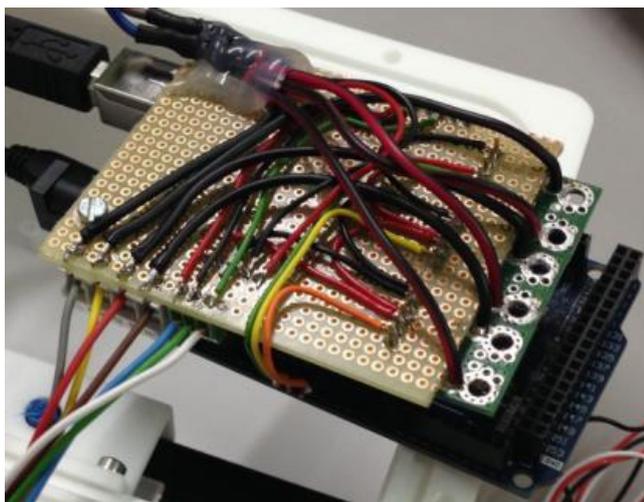


Figura 2.29 - Circuiteria elettrica ed elettronica

L'intera strumentazione, insieme alla batteria utile all'alimentazione del dispositivo è stata posizionata, mediante opportuni supporti, all'interno di un case stagno stampato in 3D. Il collegamento tra la mano e il case dell'elettronica è stato effettuato mediante un cavo opportunamente scelto per utilizzi subacquei, di una lunghezza di 3m .



Figura 2.30 - Pacco batteria ed elettronica

2.4 Test sulla mano robotica

La fase di test sulla mano robotica è stata essenzialmente divisa in varie fasi. Per prima cosa è stato necessario verificare l'integrità strutturale del dispositivo, al fine di validare la progettazione, mentre una seconda fase di test sui cinematismi e sulle tenute, è stata effettuata direttamente nell'ambiente di utilizzo ovvero in mare. La terza fase è stata quella di testare il dispositivo durante un tipico scenario di lavoro.

2.4.1 Test in camera idrostatica

Per verificare l'effettiva validità dei dati raccolti durante la simulazione agli elementi finiti, è stata testata l'integrità della mano robotica all'interno di una camera idrostatica (Fig. 2.31).



Figura 2.31 - Test in camera idrostatica

È stata simulata un'immersione dello strumento ad una profondità 4 bar, che corrisponde al valore massimo di pressione raggiungibile dalla camera di prova; sono stati effettuati una serie di test di carico e scarico della pressione in maniera più o meno veloce, senza avere mai nessun tipo di problema di infiltrazione d'acqua. Ovviamente in questo modo è stato possibile simulare esclusivamente la tenuta statica cioè il funzionamento del dispositivo senza nessun movimento delle articolazioni.

2.4.2 Test in mare

Una seconda importante prova, è stata effettuata al fine di valutare se le tenute dinamiche, presenti all'interno del dispositivo, avessero potuto garantire una corretta

tenuta. Il test è stato condotto ad una profondità di 10 m, e per poter verificare il funzionamento del cinematismo, è stato movimentato il meccanismo, azionando manualmente l'articolazione delle dita. Questa scelta è stata fatta al fine di preservare i motori nel caso in cui ci fossero stati problemi determinati da infiltrazioni d'acqua. Anche in questo caso è stata verificata la corretta progettazione delle tenute dinamiche (Fig. 2.32) nonché il sostanziale funzionamento dell'intero cinematismo.



Figura 2.32 - Test in mare

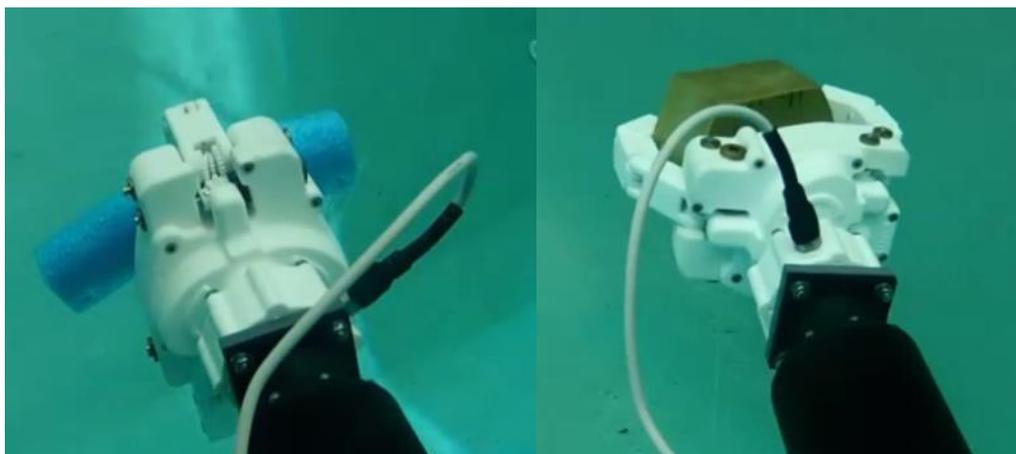
2.4.3 Test in vasca a Girona

L'ultima fase di test, è stata quella più importante in quanto è stato messo alla prova l'intero dispositivo, analizzandone il funzionamento sia da un punto di vista meccanico che controllistico ed elettronico. Come detto in precedenza la prima parte della progettazione e le prime fasi di prototipazione sono state eseguite in collaborazione con l'Università di Girona al fine di testare lo strumento subacqueo in alcuni degli scenari operativi più diffusi ovvero il recupero di oggetti di forme diverse flottanti in acqua e soprattutto l'afferraggio, la disconnessione, la riconnessione e il rilascio di una valvola posta su un pannello posizionato sulle pareti di una piscina. Per prima cosa è stato necessario provvedere al collegamento tra la mano robotica e l'AUV "Girona 500" dell'Università di Girona (Fig. 2.33). Una volta effettuata la connessione elettrica ed elettronica del box di controllo della mano, l'intera strumentazione è stata posta nella piscina dell'Università Spagnola.



Figura 2.33 - Mano robotica sul Girona 500

Il primo test è stato quello di afferrare alcuni oggetti di forme diverse posizionati all'interno della piscina di dimensioni 8x16x5 m. Tali oggetti, positivi in acqua, sono stati collegati a dei piombi in maniera tale da fluttuare a circa 1 m dal fondo della piscina. Il controllo del veicolo e della mano è stato completamente manuale, al fine di simulare un'operazione di recupero gestita dall'operatore. La procedura di afferraggio, è stata portata a termine in maniera abbastanza rapida su tutti e quattro i corpi da recuperare, senza particolari problemi sia per quanto riguarda l'afferraggio, che il loro trasporto (Fig. 2.34).



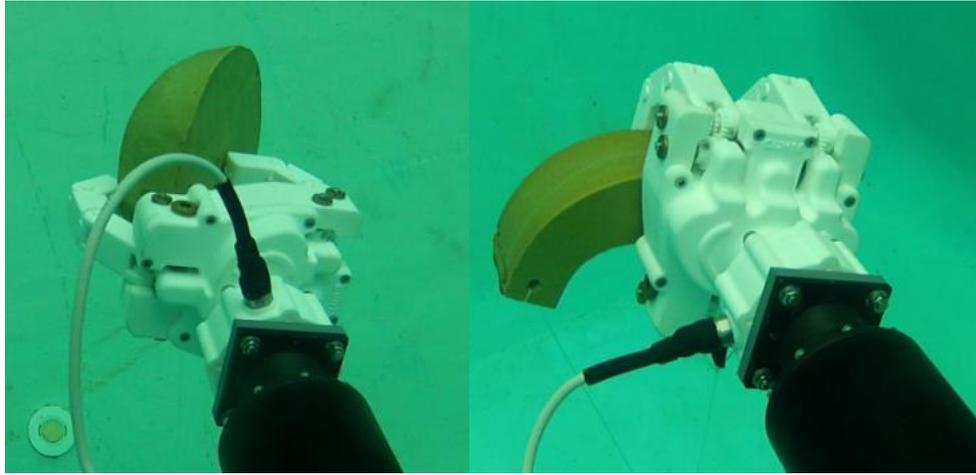


Figura 2.34 - Mano robotica durante i test di afferraggio

La seconda fase di test ha invece riguardato l'operazione di afferraggio, disconnessione, connessione e rilascio di una valvola. L'importanza di questo test è data dal fatto che l'intera procedura di approccio del veicolo e di movimentazione della mano è stata svolta in maniera completamente automatica, senza nessun tipo di azione o intervento da parte del pilota; pertanto questa operazione risulta essere totalmente innovativa. La fase di sviluppo di tale procedura è stata gestita interamente dall'Università di Girona; le modalità di gestione del movimento dell'AUV, Braccio e mano, sono proposte in [D. Youakim et al. 2015]. In particolare, dopo aver portato a termine la fase di calibrazione utilizzando il software "MoveIt" , è stato portato a termine per dieci volte la campagna di sperimentazione ottenendo il 100% di risultati positivi. Si può quindi affermare che tale metodo di approccio e movimentazione dei vari componenti del sistema è ripetibile e affidabile. Durante l'esperimento il veicolo subacqueo Girona 500, grazie alle telecamere utili alla navigazione, partendo da una qualsiasi posizione della vasca, è stato in grado di individuare il target da raggiungere (ovvero il pannello di prova). Per prima cosa è stato necessario avvicinarsi ad esso in maniera graduale verificando in vari step il raggiungimento di goal intermedi; avvicinare la valvola mediante il movimento del braccio e infine della mano in chiusura e in apertura al fine di avere una corretta presa. (Fig. 2.35) L'eventuale sovraccarico registrato dai sensori di corrente della mano robotica, avrebbe determinato un arretramento del veicolo e il riinizio della manovra in modo automatico.

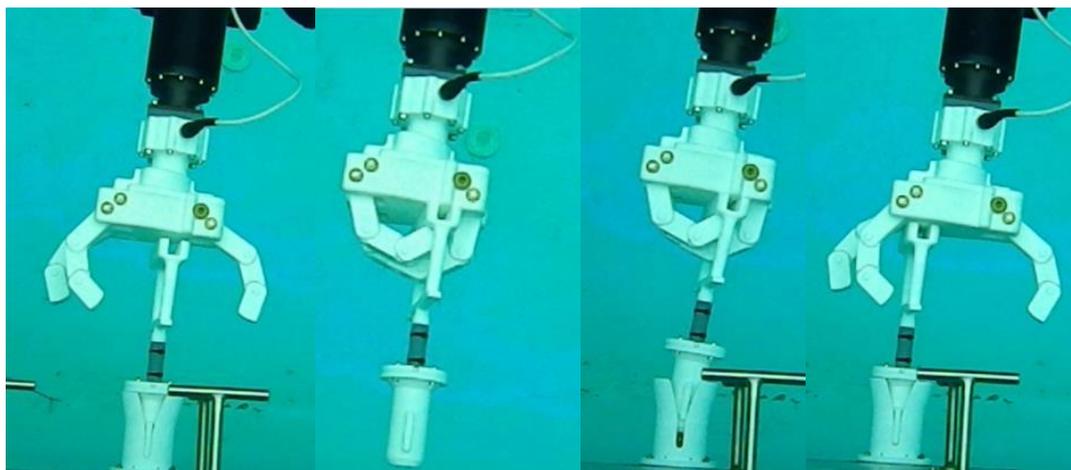


Figura 2.35 - Mano robotica durante il test con la valvola

2.5 Caratterizzazione della mano robotica

La caratterizzazione della mano robotica è un aspetto fondamentale per poter individuare eventuali limiti e per poter comprenderne a fondo le potenzialità. Partendo dalla realizzazione di un banco di prova, sono state eseguite una serie di prove sperimentali con l'obiettivo di caratterizzare, al variare della geometria e del peso degli oggetti afferrati, il comportamento della mano, relativamente alla possibilità di sollevamento ed afferraggio. Per eseguire i test (che saranno successivamente descritti), sono stati realizzati dei provini cilindrici in PVC, aventi diametri e lunghezze differenti tra di loro, rispettivamente di 63mm, 80mm, 100mm, 125mm, 160mm (il massimo teorico afferrabile dalla mano) e con lunghezza di 200 e 300 mm. All'interno dei provini sono stati di volta in volta posti dei pesi noti, per poter misurare la reale forza esercitabile dal meccanismo inserito in acqua.



Figura 2.36 - Cilindri di prova e pesi noti, modello CAD e componenti reali

2.5.1 Descrizione del banco prova

La struttura del sistema è costituita da barre di alluminio di sezione quadrata di dimensioni 30*30 mm. Le lunghezze dei profili sono state opportunamente modificate in relazione alle esigenze di movimentazione della mano. In particolare, la struttura presenta 4 GDL che permettono al dispositivo di poter assumere un ampio range di posizioni nello spazio. Per la movimentazione del banco prova sono stati introdotti quindi quattro giunti, rispettivamente due rotoidali e due prismatici con accoppiamento ruota dentata-vite senza fine e cremagliera-ruota dentata. La disposizione opportuna di tali giunti ha permesso la movimentazione del sistema e la misurazione delle angolazioni e degli spostamenti (fig. 2.37).

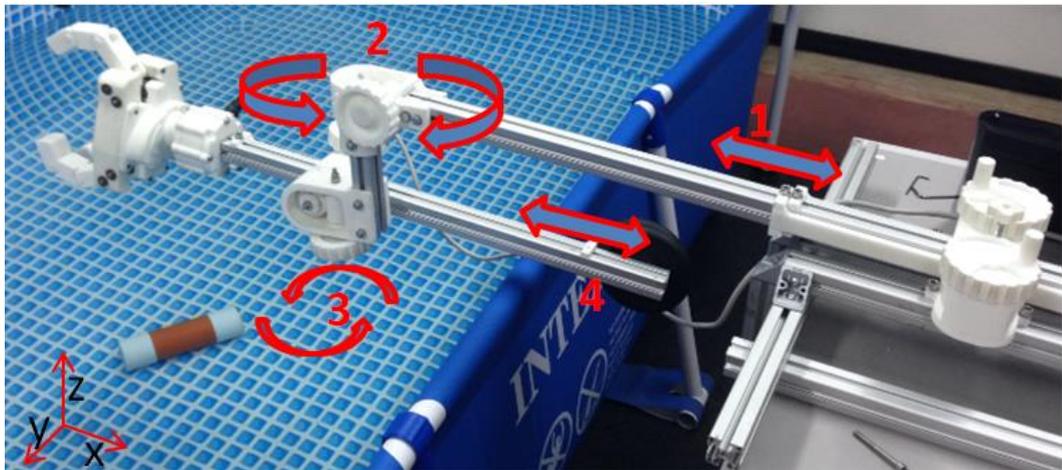


Figura 2.3.7 – Sistema si calibrazione

In particolare, come si evidenzia in figura 2.3.7, la struttura realizzata consente la traslazione lungo x del giunto 1, la rotazione lungo z del giunto 2, la rotazione lungo y del giunto 3 e la traslazione lungo x del giunto 4. La misurazione della traslazione e della rotazione angolare è stata effettuata mediante l'uso di tradizionali metri a nastro, convertendo, laddove necessario, il valore rilevato da mm a gradi utilizzando la relazione $1\text{mm}:1.64^\circ$ (funzione del diametro della ruota alla quale è stato collegato lo strumento di misura).

2.5.2 Setup sperimentale

Il banco prova appena descritto è stato utilizzato, come detto in precedenza al fine di condurre prove utili a rilevare i parametri fondamentali che descrivono il funzionamento della mano al variare delle condizioni di lavoro ovvero:

- 1) peso massimo afferrabile dalla mano in varie configurazioni;
 - 2) dimensioni massime afferrabili dalla mano nelle varie configurazioni;
- e come ulteriore parametro utile a comprenderne il funzionamento anche i
- 3) valori di corrente assorbita dai servomotori durante il funzionamento.

È utile individuare tali valori di corrente, per verificare se durante le fasi di afferraggio e movimentazione in qualche configurazione, esistono dei valori di picco di assorbimento che potrebbero causare dei cedimenti dei motori stessi. Come detto in precedenza al fine di evitare sovraccarichi, la circuiteria elettronica riduce la coppia erogabile dal servo se i valori di Ampere assorbiti superano una soglia precedentemente definita; in questo caso il limite era di 3 A (*riga 13 sensori di corrente Appendice A*).

Le fasi di test sono state condotte nei laboratori del DIMEG utilizzando una piscina di prova di dimensioni 2500*1600*650(h) mm, riempita per circa il 60% (con altezza del livello dell'acqua di 350 mm), ad una temperatura di circa 15°C. Tutto ciò al fine di misurare la capacità di presa della mano e la sua movimentazione sempre al di sotto della linea di galleggiamento.

Il peso di tutti i cilindri vuoti di figura 2.36 è stato misurato con una bilancia centesimale; i valori ottenuti e riportati in tabella 4 sono stati approssimati visto che, in tale circostanza, la risoluzione al centesimo di grammo risultava essere superflua.

Diametro (mm)	Lunghezza (mm)	Peso (g)
63	200	160
	300	211
80	200	204

	300	258
100	200	249
	300	329
125	200	321
	300	421
160	200	427
	300	556

Tabella 4 - Dimensioni dei cilindri fuori dall'acqua

Per verificare l'esatto valore del peso del cilindro in acqua, tenendo presente il principio di Archimede, è stato necessario calcolare la spinta dal basso verso l'alto che risulta essere pari al peso del volume di fluido spostato, secondo la legge:

$$F = \rho * g * V$$

dove ρ è la densità del fluido, in questo caso acqua (1000 Kg/m³), g è l'accelerazione di gravità (9,8 m/s²) e V rappresenta il volume del corpo immerso (espresso in m³).

Il peso dei cilindri immersi risulta perciò essere diverso rispetto a quello precedentemente calcolato; il peso effettivo infatti è pari alla differenza tra il peso in aria e la forza applicata dal fluido. I valori calcolati sono riportati nella tabella 5.

Diametro (mm)	Lunghezza (mm)	Volume (mm ³)	Peso in acqua (g)
63	200	168516	30
	300	130189	43
80	200	218545	30
	300	169536	39
100	200	280022	30
	300	218477	48
125	200	360587	34
	300	283304	56
160	200	479845	43
	300	380571	71

Tabella 5 - Dimensioni dei cilindri e peso in acqua

2.5.3 Test di calibrazione e analisi dei dati ottenuti

La modalità di svolgimento dei test è stata studiata in modo da poter ottenere i valori dei parametri richiesti, mantenendo sotto controllo le variazioni delle condizioni di lavoro della mano. Sono state effettuate due diverse prove, intervallate da una attenta analisi dei risultati conseguiti nella prima e predisposte due procedure standard, le cui caratteristiche sono descritte nelle tabelle 6 e 7.

Prova N°1	
<i>Durata</i>	30 secondi
<i>Posizione iniziale del sistema</i>	Angolazione: 90° rispetto al livello dell'acqua (giunto 3) Altezza iniziale: 500 mm (giunto 4)
<i>Angolazione iniziale dei servomotori</i>	90°- 90°- 90° (mano quasi totalmente aperta)
<i>Caratteristiche della prova</i>	La mano è immersa in acqua fino ad una posizione tale da poter afferrare il cilindro; effettuata l'operazione di presa, si rileva il valore della corrente assorbita, si fa risalire di 300 mm [4 fig. 2.3.7] e si procede alla rotazione del braccio di un angolo di 40° [3 fig. 2.3.7] (mano sempre totalmente immersa). Si rileva il successo o l'eventuale cedimento della presa.

Tabella 6 - Caratteristiche della prima tipologia di prove

Prova N°2	
<i>Durata</i>	30 secondi
<i>Posizione iniziale del sistema</i>	Angolazione: 90° rispetto al livello dell'acqua (giunto 3) Altezza iniziale: 500 mm (giunto 4)
<i>Angolazione iniziale dei servomotori</i>	90°-90°-90° (mano quasi totalmente aperta)
<i>Caratteristiche della prova</i>	La mano è immersa in acqua fino ad una posizione tale da poter afferrare il cilindro; effettuata l'operazione di presa, si rileva il valore della corrente assorbita; si sposta la mano lungo la direzione verticale [4 fig. 2.3.7] di un valore pari a 300 cm, e si sposta il sistema in direzione orizzontale [1 fig. 2.3.7] (struttura mano sempre totalmente immersa). Si rileva il successo o l'eventuale cedimento della presa.

Tabella 7 - Caratteristiche della seconda tipologia di prove

Nelle figura 2.3.8 sono mostrate alcune fasi delle prove.

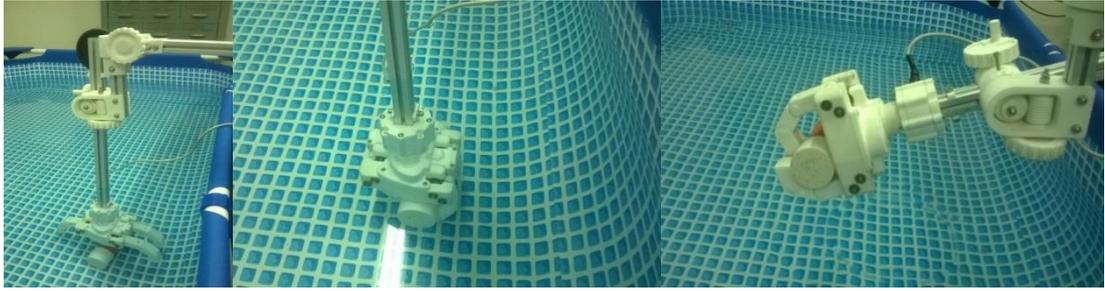


Figura 2.3.8 - Particolari riferiti alla prova 1 : avvicinamento, presa, rotazione

L'utilizzo di queste procedure standardizzate ha permesso in primo luogo di velocizzare il processo di esecuzione delle prove, grazie ad una gestione più semplice delle variabili da modificare, in secondo luogo ha consentito di ottenere risultati confrontabili tra loro, minimizzando eventuali errori di valutazione dovuti alla variazione non controllata dei fattori. Nella fase di progettazione dei test, si era pensato di orientare i cilindri sia in orizzontale che in verticale, ma quest'ultima configurazione, nella fase di esecuzione, è risultata incompatibile con l'afferraggio dei provini cilindrici a causa della particolare geometria della mano che permette una buona presa se gli oggetti da prendere presentano un'ampia zona di afferraggio. Nella tabella 1 in Appendice A, sono riportati i risultati ottenuti nella prima prova, nella quale sono stati utilizzati tutti i diametri disponibili dei cilindri. I pesi riportati tengono conto del peso a vuoto del cilindro posto in acqua al quale si somma quello aggiunto manualmente all'interno. Il grafico 1, mostra l'andamento dei singoli test effettuati durante la prima prova, considerando solo quelli in cui la presa è andata a buon fine.

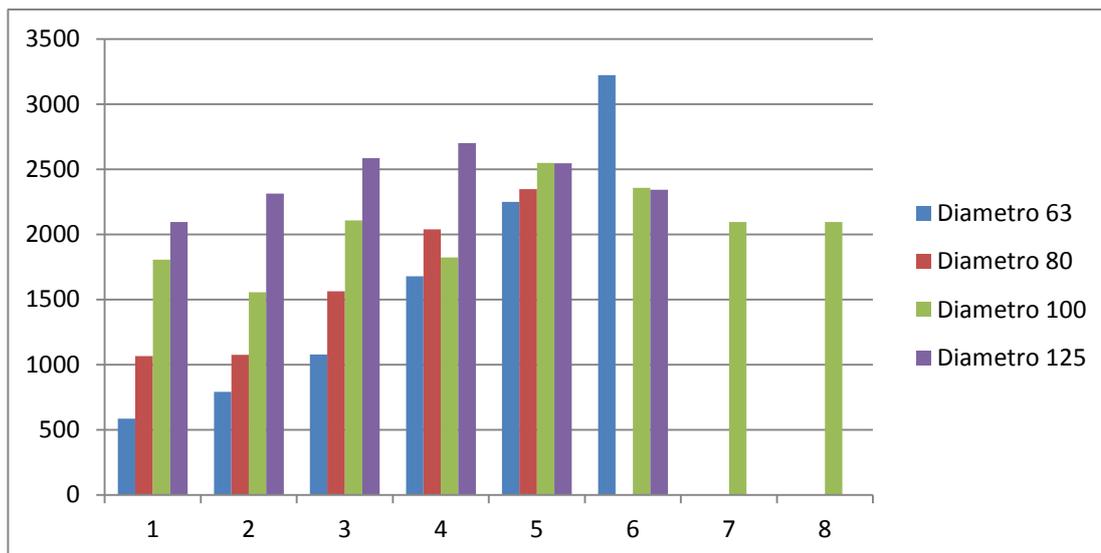


Grafico 1 - Risultati prima tipologia di prove

In riferimento al grafico, sulle ascisse è riportato il numero di test eseguiti per ogni diametro del cilindro, sulle ordinate invece il peso dei cilindri movimentati dalla mano, espresso in grammi. In seguito all'analisi dei risultati dei test relativi alla prima prova, sono emersi alcuni aspetti rilevanti: primo fra tutti, è apparso evidente che il limite di funzionamento della mano con i cilindri di diametro 63 mm e 80 mm è più alto ovvero è possibile movimentare un peso maggiore; il secondo risultato rilevante è rappresentato dalla incapacità della mano di afferrare i cilindri con diametro maggiore o uguale a 160 mm a causa, della lunghezza delle falangi delle dita.

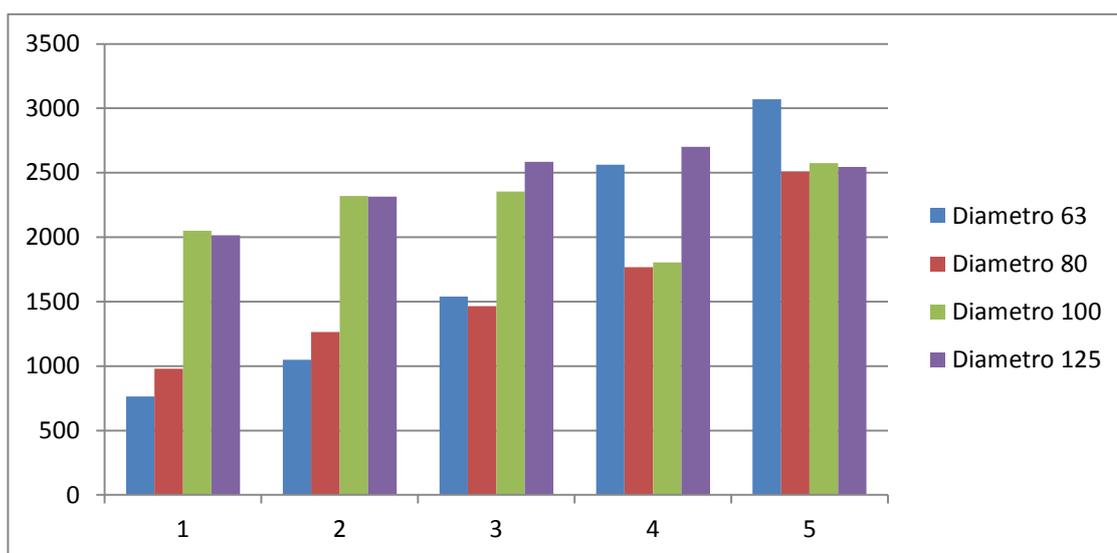


Grafico 2 - Risultati seconda tipologia di prove

Il grafico 2, mostra i valori ottenuti nella seconda prova, i cui dati di dettaglio sono riportati in tabella 2 in Appendice A. A differenza del caso precedente nella seconda tipologia di test, descritta in tabella 7, emerge subito che il peso massimo afferrabile dalla mano, risulta essere meno dipendente dalla dimensione del cilindro afferrato. Pertanto mentre nella prima prova, che prevedeva l'afferraggio e la rotazione, le dita sollecitate maggiormente dal peso sono state essenzialmente le due poste da un lato, nella seconda prova le tre dita hanno contribuito in ugual misura all'afferraggio e al trasporto del peso. I risultati finali ottenuti durante le due prove sono stati:

- 1) il valore medio del peso massimo afferrabile in acqua è di circa 2,8 Kg;
- 2) il valore della corrente assorbita dalla mano nelle condizioni limite (che corrispondono ai pesi massimi che la mano riesce ad afferrare) è compreso nell'intervallo 2 - 2.2 A ;
- 3) la lunghezza dei cilindri e in generale degli oggetti da afferrare, non influisce sul comportamento della mano;
- 4) la forza massima teorica per ogni singolo dito nel caso ideale era di 2.08 Kg (a braccio massimo); i risultati ottenuti nelle varie configurazioni dei test, rispecchiano tali limiti. Considerando che in ogni circostanza almeno due dita contemporaneamente erogano coppia, il peso che singolarmente è stato sostenuto da ogni dito è di 1.4 Kg.

Capitolo 3

Braccio Robotico

3.1 Introduzione - I manipolatori subacquei

Per effettuare attività di ricerca in ambito subacqueo, vengono impiegati molto spesso dei veicoli ROV oppure AUV, capaci di immergersi anche a profondità abissali; uno dei loro grandi vantaggi è che richiedono solo un controllo da remoto da parte dell'operatore, che quindi non rischia la sua incolumità durante la missione. Questi veicoli sono in grado di effettuare varie task come ad esempio il monitoraggio dei fondali, delle strutture sommerse oppure offrono la possibilità di potere eseguire studio o ricerca dei relitti inabissati. Quindi una buona parte del lavoro è effettuata grazie al sistema di visione di cui è dotato un veicolo di questo tipo; infatti, come detto in precedenza, dalle immagini di tipo ottico o di tipo acustico, è possibile compiere attività di analisi di aree che per vari motivi risultano inaccessibili all'uomo, effettuare una mappatura dei fondali o ricostruire l'intero sito di interesse (Fig. 3.1). Molto spesso per poter attuare operazioni di campionatura, di recupero o di pulitura, è necessario dotare tali robot subacquei di bracci antropomorfi, capaci di compiere una serie di task altrimenti irrealizzabili.

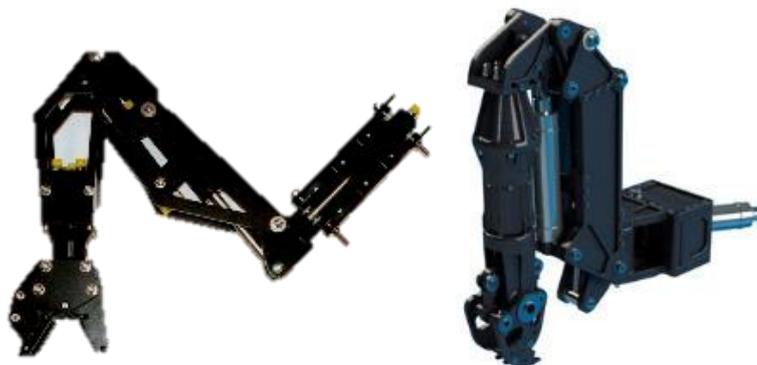


Figura 3.1 - Manipolatori robotici ad uso subacqueo

Lo sviluppo dei manipolatori subacquei si è avuto grazie anche alla ricerca in ambito terrestre; infatti molti bracci robotici subacquei sono in prima approssimazione un riadattamento di quelli utilizzati ad esempio nel settore industriale. Tuttavia essi sono dotati di opportuni accorgimenti che ne consentono il funzionamento in ambiente marino, come ad esempio il contatto con acqua salata e a profondità elevate. Così come per i manipolatori terrestri, è possibile differenziare anche per quelli subacquei in funzione dei gradi di libertà (DOF), ovvero il numero di giunti che permettono la movimentazione delle varie parti dell'articolazione (link), oppure della sua parte terminale (end-effector). È possibile effettuare una suddivisione del manipolatore in funzione dei suoi componenti in cui il primo, detto link-0, funge da base e permette di vincolare la struttura del braccio robotico al veicolo. In funzione del numero DOF, sono quindi individuati i vari giunti e i vari link del manipolatore. Alla fine è posizionato l'end-effector che come una sorta di "mano" permette l'interazione con gli oggetti limitrofi, adattando il braccio robotico in funzione del tipo di lavoro da svolgere.

Per poter permettere la rotazione o la traslazione dei vari link, sono posti tra di essi, dei giunti prismatici oppure rotazionali. La movimentazione dei vari giunti può essere controllata dall'operatore in maniera visiva mediante l'utilizzo delle camere montate sul veicolo; tuttavia la gestione del braccio e dei suoi movimenti, risulta effettivamente poco accurata e soprattutto dipendente dall'esperienza del pilota ROV. La modalità più efficace, utilizzata soprattutto nei veicoli AUV che non prevedono l'intervento umano durante la missione, è quella di dotare ognuno dei giunti, di opportuna sensorizzazione in maniera tale che la loro lettura possa permettere di individuare il posizionamento di ogni link e dell'end-effector. Nota la posizione del sistema di riferimento della base del braccio, è possibile stabilire, mediante una serie di matrici di trasformazione, la posizione della mano, conoscendo i valori delle variabili di ogni giunto. Tipicamente i punti di snodo dei robot antropomorfi sono definiti in maniera crescente a partire da quello posizionato sulla spalla. L'ultimo link è sempre l'end-effector sul quale comunemente vengono posizionati almeno due giunti in maniera tale da permettere l'orientamento della mano in varie configurazioni.

La costruzione di questa sorta di polso, permette l'adattamento del manipolatore ad un target ben preciso. Infatti, muovendo esclusivamente gli ultimi link, si evitano laboriose

manovre delle prime parti del braccio (tipicamente di dimensioni maggiori) o addirittura dell'intero veicolo; così facendo aumentano anche le configurazioni in cui il braccio può raggiungere determinate posizioni.

Ad esempio durante un'operazione di pulitura, la posizione mantenuta del ROV sarà più indietro e più in alto rispetto al task da raggiungere. L'operatore che movimenta o supervisiona l'intera strumentazione dal natante di supporto, godrà quindi di una più ampia visuale dello scenario di lavoro. Montando all'estremità del braccio una spazzola rotante, sarà possibile compiere attività di pulitura di architetture che si presentano in diverse configurazioni, come si evince dalle figure 3.2 di seguito ovvero posizionate in maniera frontale, laterale a destra o sinistra e parallela al ROV. L'azionamento dei giunti del braccio e dell'end effector, eviterà lo spostamento dell'intero veicolo; ciò vuol dire compiere le operazioni in meno tempo e in modo più accurato.

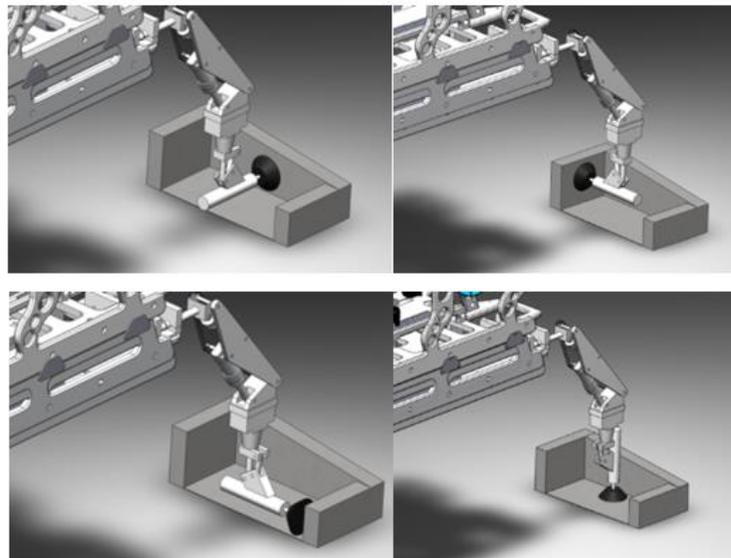


Figura 3.2 - Simulazione di pulitura delle strutture sommerse

Come detto l'end-effector è la parte di un manipolatore subacqueo mediante cui è possibile portare a termine i compiti richiesti. La tipologia più semplice consiste in una semplice pinza capace di afferrare e movimentare oggetti. Esistono tuttavia anche altri strumenti di cui è possibile dotare un braccio robotico per svolgere lavori più specifici, come ad esempio delle spazzole o strumenti per praticare fori o compiere operazioni di serraggio di bulloni.

La movimentazione di un manipolatore subacqueo è garantita dagli attuatori che sono i componenti che generano il moto dei link intorno ai giunti. In questo scenario è possibile individuare due diverse tipologie ovvero quelli idraulici o quelli elettrici; essi vengono scelti, tra le altre cose, in funzione della tipologia di lavoro che dovrà essere svolta da un particolare veicolo. Il sistema necessario al funzionamento di un manipolatore idraulico è formato da una pompa e da un certo numero di cilindri da essa attuati. Il movimento del link ad essi collegati è garantito mediante la messa in pressione del fluido idraulico all'interno del circuito. Nel caso invece di braccio ad attuazione elettrica, un motore ha la funzione di azionare lo specifico giunto, prevedendo quindi anche la connessione elettrica ad una centralina di controllo. La potenza erogata da entrambi i sistemi, deve essere ovviamente superiore rispetto a quella necessaria alla movimentazione del insieme "a vuoto" ma anche all'eventuale recupero o spostamento di oggetti durante le fasi di utilizzo. Tipicamente, per poter compiere operazioni dove è richiesta una potenza maggiore, sono impiegati degli attuatori idraulici.

Il caso studio proposto, riguarda le fasi di riprogettazione e realizzazione di un manipolatore subacqueo, ed è stato svolto al fine di poter portare a termine le attività di ricerca richieste nell'ambito del progetto COMAS. È stato necessario infatti dotare il veicolo ROV Perseo GTV di un braccio robotico capace di effettuare, nell'ambito della archeologia subacquea, operazioni di pulitura di strutture e artefatti sommersi in maniera tale da preservare in maniera duratura il bene archeologico.

3.2 Reingegnerizzazione del braccio Robotico HLK-43000

È stato necessario per prima cosa individuare le modifiche da eseguire sul manipolatore che tipicamente equipaggia il ROV Perseo GTV, ovvero il braccio robotico della Hydro-leck modello HLK-43000. Tale dispositivo possiede 5° di libertà ad attuazione idraulica, progettato per poter compiere lavori per i quali non si necessita di elevata potenza, data la sua ridotta dimensione. Il materiale costitutivo è principalmente polietilene e ha un peso in acqua di circa 4,5 kg (Fig. 3.3). La contenuta lunghezza dei link consentono allo strumento di raggiungere un'estensione di 530 mm con una capacità di carico di 40 kg.

Dovendo riadattare tale dispositivo ad operazioni di archeologia subacquea, di cui precedentemente si è parlato, le sue caratteristiche geometriche e di funzionalità, non si adattavano alle necessità richieste durante le fasi di lavoro; in particolare la dimensione ridotta del link principale (link 1) non permetteva il raggiungimento di punti posti a una distanza di poco superiore a 500mm, senza muovere contestualmente il veicolo ad esso collegato. Inoltre non è previsto sul modello HLK-43000 nessun tipo di sensorizzazione utile all'archeologo per la guida del braccio durante le fasi di pulitura dei beni sommersi.



Figura 3.3 - Braccio robotico HLK-43000

Come detto l'attuazione idraulica, prevede il posizionamento di tre cilindri per la movimentazione dei tre link principali e di altri due posti sull'end-effector che consentono rispettivamente l'apertura e chiusura della pinza e la sua rotazione (Fig. 3.4). Le escursioni angolari dei tre giunti corrispondono a:

- 120° circa di shoulder roll (1° giunto);
- 90° circa in shoulder pitch (2° giunto);
- 45° di elbow pitch (3° giunto).



Figura 3.4 - Cilindro idraulico

I cilindri realizzati ad hoc dalla casa madre, sono capaci di lavorare ad una pressione massima di 210 bar, erogano 1050 kg di forza durante la fase di estensione e 650 kg in contrazione e la corsa massima del pistone è di 65 mm. Il braccio robotico è dotato di un sistema di valvole che consentono o impediscono il passaggio del flusso d'olio, senza la possibilità di parzializzare l'afflusso nel circuito, e ciò al fine di poter alimentare il gruppo idraulico. Saranno di seguito descritte le parti che compongono il braccio.



Figura 3.5 - Base del manipolatore e primo cilindro

Il link iniziale o link-0 (Fig. 3.5, 3.6), trasmette il movimento di rotazione del braccio intorno alla base, con un valore massimo di 90° ed è ottenuto mediante il primo cilindro ad esso collegato. Data l'architettura del braccio, tale link può essere visto anche come il componente che collega la spalla del manipolatore alla porzione successiva della catena cinematica. Il link -0, è composto da una serie di elementi in acciaio inox saldati tra di loro e da un componente tubolare che funge da asse di rotazione. Al suo interno sono sistemati i vari tubi di alimentazione del sistema di "piping" idraulico.



Figura 3.6 - Link-0

A questo link sono collegate due piastre realizzate in materiale polimerico che fungono non solo da alloggiamento per gli altri due cilindri idraulici, ma conferiscono anche, in funzione della loro particolare geometria, la dimensione dello “sbraccio” massimo del manipolatore. Su queste piastre sono praticati dei fori che consentono l’inserimento di opportuni perni per il fissaggio degli attuatori. L’utilizzo delle due piastre consente non solo di preservare l’integrità del sistema idraulico in caso di urti accidentali, ma anche di influire positivamente alla galleggiabilità del sistema, data la bassa densità del materiale costituente (Fig. 3.7).



Figura 3.7 - Piastra originale del braccio

L’end-effector è posizionato a valle delle piastre e grazie al movimento alternato di altri due attuatori, consente la rotazione di 180° del polso e la chiusura e apertura della pinza. La corsa del pistone del cilindro utilizzato per la movimentazione in apertura e chiusura, è di soli 27 mm (Fig. 3.8).



Figura 3.8 - End-effector del braccio originale

3.2.1 Modifiche meccaniche del manipolatore

Per poter effettuare al meglio le operazioni comunemente svolte nell'ambito dell'archeologia subacquea, è richiesta elevata precisione, pazienza e cura dei dettagli, quindi è opportuno impiegare, già "all'asciutto", personale specializzato. Ovviamente l'ambito sottomarino non fa che amplificare i tempi, i costi e le problematiche. L'aspetto principale è rappresentato dalla necessità di dover mantenere un'accuratezza elevata, non solo durante la fase di pulitura vera e propria, ma anche durante quella di approccio al bene archeologico. La procedura di pulizia e di mantenimento delle strutture sommerse non solo richiede attenzione, ma deve essere frequentemente ripetuta, poiché gli organismi animali e vegetali ripopolano in maniera rapida le zone appena ripulite, determinandone un nuovo degrado. Per questi motivi risulta chiaro che automatizzare il più possibile operazioni di questo tipo, possa essere molto vantaggioso.

Equipaggiare un veicolo ROV di un braccio antropomorfo dotato di spazzola rotante, può essere una delle soluzioni alle problematiche appena descritte. Partendo dal manipolatore HLK-43000, sono state necessarie una serie di modifiche e accorgimenti utili a poter adattare tale strumento a compiere i task precedentemente descritti, in particolar modo, potendo contare sulla possibilità di adoperare spazzole nelle posizioni più idonee ad effettuare la pulitura delle murature sommerse.

Nell'ambito del restauro subacqueo, non è possibile utilizzare un braccio idraulico come quello in esame senza le opportune modifiche; infatti come detto, non avendo il controllo della posizione di ogni link, non è possibile garantire il corretto movimento del manipolatore compatibilmente con la presenza di strutture sommerse. Le ridotte dimensioni delle piastre del braccio originale, rappresentano non solo un pericolo per eventuali collisioni tra veicolo e strutture, ma anche una vera e propria limitazione alle possibilità di lavoro. È stato inoltre necessario riadattare l'end-effector del braccio robotico al fine di poter montare un sistema pan tilt sul quale alloggiare un elettroutensile dotato di spazzola. Le variazioni che sono state apportate, non hanno alterato le caratteristiche cinematiche del manipolatore.

3.2.2 Modifica delle piastre

La prima modifica ha riguardato le due piastre di polietilene che collegano la spalla alla parte iniziale dell'end-effector. Come già detto La funzione di tale piastre è essenzialmente quella di guidare il movimento dei pistoni idraulici in estensione e contrazione. Sono state quindi apportate delle modifiche alla loro geometria, (Fig. 3.9) prevedendo su di esse gli alloggiamenti per il sistema di monitoraggio della posizione dei vari giunti.



Figura 3.9 - Confronto tra piastra originale e riprogettata

L'aumento della dimensione delle due piastre è stato effettuato tenendo in considerazione le sollecitazioni a cui sono sottoposti i componenti originali del manipolatore. Un membro particolarmente soggetto a carichi elevati in questa nuova configurazione è il link-0, che effettivamente deve sopportare l'intero peso della struttura così modificata. L'analisi FEM, ha dimostrato che pur con un carico sicuramente maggiore, le tensioni rimangono di fatto al di sotto del limite di snervamento in qualsiasi configurazione, con un carico applicato di 200 N (Fig. 3.10). Dai risultati della simulazione si è ottenuto 141Mpa di valore massimo di tensione, considerando per l'analisi 266015 nodi e 118910 elementi triangolari con dimensione 1mm. Il valori di forza impostati in tale analisi sono assolutamente sovrastimati nel caso in cui il manipolatore opera in ambiente marino; ma risultano ancora accettabili (fattore di sicurezza 2), nel caso in cui esso si trova effettivamente montato sul veicolo subacqueo, ma ancora non immerso in mare e quindi senza risentire dell'effetto benefico dato dalla galleggiabilità dei componenti.

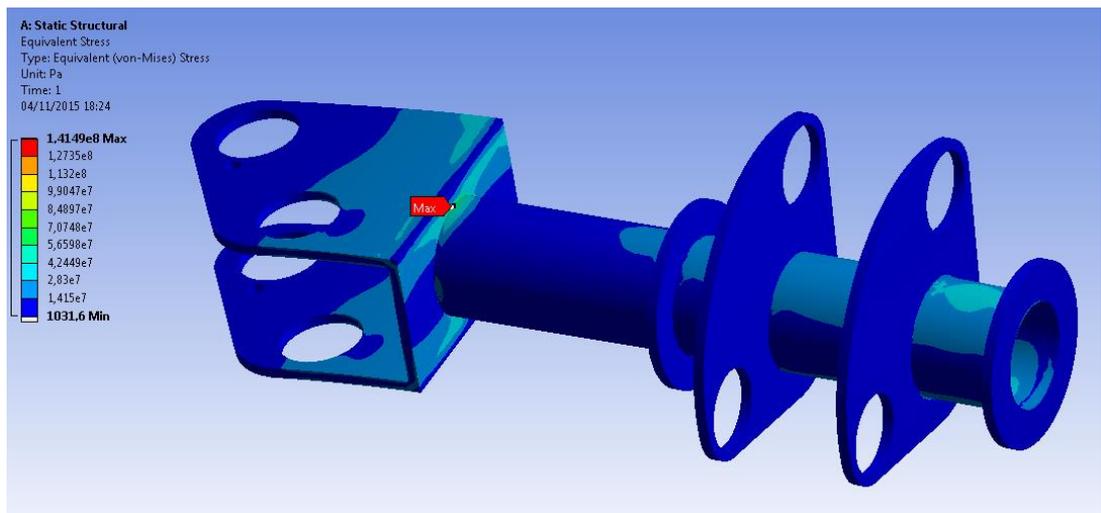


Figura 3.10 – Analisi statica in Ansys sul link-0

È stato simulato anche lo stato tensionale a cui sono sottoposte le due piastre utilizzando il Derlin (una resina acetlica) come materiale costruttivo per la simulazione, e la medesima modalità di generazione della mesh; anche in questo caso gli stati tensionali presenti sul componente risultano ampiamente al di sotto del limite di snervamento con un carico di 100 N (Fig. 3.11).

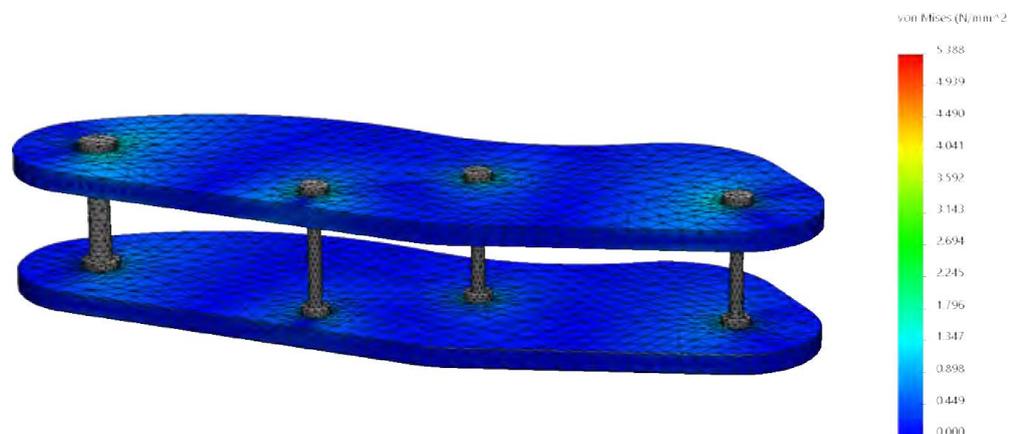


Figura 3.11 – Analisi statica sul sistema di piastre

Tale risultato si è avuto grazie al fatto che gli elementi di collegamento tra la piastra superiore e la piastra inferiore sono perni metallici (acciaio inox) che quindi rendono l'assieme così composto, molto resistente. La deformazione ottenuta durante la fase di simulazione è risultata essere di circa 1 mm nella zona di freccia massima. Al fine di evitare problemi dovuti ad eventuale incurvamento delle piastre, sono state progettate due sottili lastre di acciaio inox in modo da fungere da scheletro di supporto rendendo

il sistema ancora più rigido. Pur avendo apportato tali modifiche, è stato possibile validare il nuovo design del braccio robotico sia da un punto di vista di resistenza meccanica che di rigidità.

3.2.3 Sensorizzazione del braccio robotico

La totale assenza di un feedback da parte del manipolatore, rende di fatto altamente problematico un suo utilizzo sul campo. È stato quindi necessario dotare il braccio originale di un sistema di sensorizzazione (Fig. 3.12), cercando allo stesso tempo di mantenere contenuti gli ingombri e fornendo un'adeguata protezione alla strumentazione.



Figura 3.12 - encoder magnetici rotazionali stagni (a) non stagni (b)

I sensori utilizzati sono stati degli encoder magnetici rotazionali, capaci di effettuare la misura dell'orientazione dei vari giunti; in particolare i primi tre sono stati posti in prossimità del loro asse di rotazione. Essi hanno dimensioni rilevanti, ma sono già "marinizzati", gli altri due posti sull'end-effector hanno invece dimensioni contenute, ma necessitano di uno scafandro per poter impedire il contatto tra l'acqua e i componenti elettronici al loro interno. Entrambe le tipologie di encoder rilevano la posizione angolare assoluta di un albero rotante che, per via della particolare geometria, genera un campo magnetico variabile; dalla misura di questa variazione, l'elettronica interna al sensore restituisce il valore angolare. Per poter trasferire la rotazione dal giunto dell'encoder al braccio, sono state utilizzate una serie di ruote dentate opportunamente posizionate. Al fine di rendere più chiare le scelte di progettazione, di seguito saranno illustrati i gradi di libertà del braccio robotico e il modo con cui il moto viene trasferito alla sensoristica elettronica.

3.2.3.1 Rotazione intorno alla base del manipolatore

Per la misurazione del giunto, posizionato sulla spalla del manipolatore, è posta una corona dentata resa solidale con il link-0, in maniera tale da poterne misurare l'escursione angolare rispetto alla base (Fig. 3.13).



Figura 3.13 - Ingranaggio encoder sul link-0

Un'altra ruota dentata che ingrana con la precedente, è resa solidale all'albero dell'encoder. Per evitare che durante la fase di utilizzo in mare tra i denti delle ruote possano finire detriti, l'intero gruppo di trasmissione è stato protetto con un carter appositamente progettato. I collegamenti tra le ruote dentate, i carter e gli encoder, sono stati ottenuti mediante collegamenti filettati

3.2.3.2 Movimentazione del link-1

La funzione dei due cilindri idraulici posti all'interno delle due piastre, consente l'estensione e la contrazione del manipolatore. Anche in questo caso la misurazione dello spostamento angolare, è stata ottenuta utilizzando gli stessi encoder adoperati nel caso precedente. La giusta posizione dei due componenti elettronici è stata individuata all'interno delle due piastre in modo tale da poter essere non solo protetti da urti accidentali, ma anche il più possibile vicini agli assi di rotazione. Anche in questo caso sono stati progettati dei carter protettivi per poter preservare le ruote dentate (Fig. 3.14) utilizzate per la trasmissione del moto tra giunto ed encoder.



Figura 3.14 - piastre con ingranaggi per 2° e 3° encoder e carter protettivo

È stata utilizzata una ruota dentata solidale con il giunto che funge da ruota motrice rispetto a quella calettata sull'albero dell'encoder in modo da misurarne la rotazione.

Dovendo in questi due casi minimizzare gli ingombri e massimizzare l'efficienza del meccanismo, sono state ideate delle ruote dentate aventi una parte interna opportunamente sagomata al fine di ricalcare il profilo della parte con cui sono state accoppiate. Il posizionamento degli encoder sulla piastra è stato effettuato mediante dei supporti distanziali progettati per garantire un corretto ingranamento delle ruote (Fig. 3.15).



Figura 3.15 - Ingranaggio con scanalatura interna

3.3 Progettazione del sistema pan tilt

Una delle problematiche che rendono il braccio robotico HLK 43000 non adatto all'utilizzo nell'ambito dell'archeologia subacquea è l'assenza di una movimentazione adeguata per l'end-effector. La presenza della pinza nel modello originale, non dà nessun vantaggio agli scopi prefissati, in più l'assenza di sensoristica non ne agevola l'utilizzo.

Per questi motivi è stato progettato un sistema che potesse permettere una movimentazione migliore dell'ultima parte del manipolatore dotandolo, allo stesso tempo, dispositivi elettronici per individuare la posizione di ogni giunto. Come detto in precedenza il meccanismo che controlla la movimentazione della pinza (apertura e chiusura) (Fig. 3.16) e la rotazione intorno al proprio asse, è affidata ad un pistone che scorre all'interno di un cilindro; tutto il sistema a sua volta può essere ruotato alternativamente di 180°.

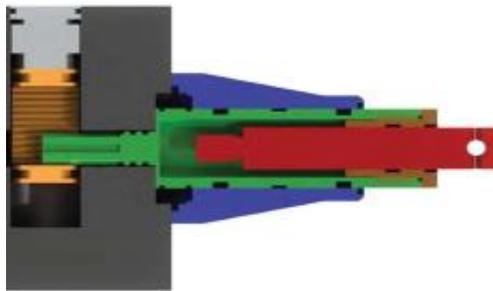


Figura 3.16 - Meccanismo di funzionamento dell'end-effector

Per il corretto funzionamento del sistema pan tilt, sono state individuate, in maniera opportuna, le dimensioni da assegnare ai vari link del nuovo cinematismo, considerando come variabile fissa la massima estensione del pistone, in maniera da permettere una rotazione di circa 90°.

Il meccanismo di Pan tilt, è stato configurato mediante l'utilizzo di un tool specifico di SolidWorks, il Design Study. Questo tool permette di vagliare varie ipotesi configurative per ottimizzare aspetti di natura geometrica o derivanti da simulazioni agli elementi finiti. I parametri mantenuti fissi nella fase di studio sono stati: la corsa del pistone, per vincoli meccanici non modificabili (1 fig.3.17) e la distanza tra l'asse di rotazione del perno di tilt sulla piastra e l'asse del cilindro (2 fig. 3.17). In appendice B è possibile analizzare i ventuno scenari presi in considerazione. Alcuni non sono risultati validi, perché la combinazione della lunghezza del perno e della distanza tra gli assi era tale da rendere il modello irrealizzabile. La combinazione preferita è stata quella che avrebbe determinato la corsa angolare massima del cinematismo. I valori ottenuti sono stati: una lunghezza del perno pari a 83 mm ed una distanza sul supporto di 21.5 mm; con questi valori il cinematismo ha permesso una rotazione di circa 85°, e il quasi completo ribaltamento del sistema. È stata quindi progettata una piastra che potesse esser

incernierata alla struttura del cilindro dell'end-effector tramite bulloni, ma che allo stesso tempo potesse fornire un appoggio ottimale alla sensoristica necessaria alla misurazione dell'orientazione del tool da montare sul sistema (Fig. 3.17).

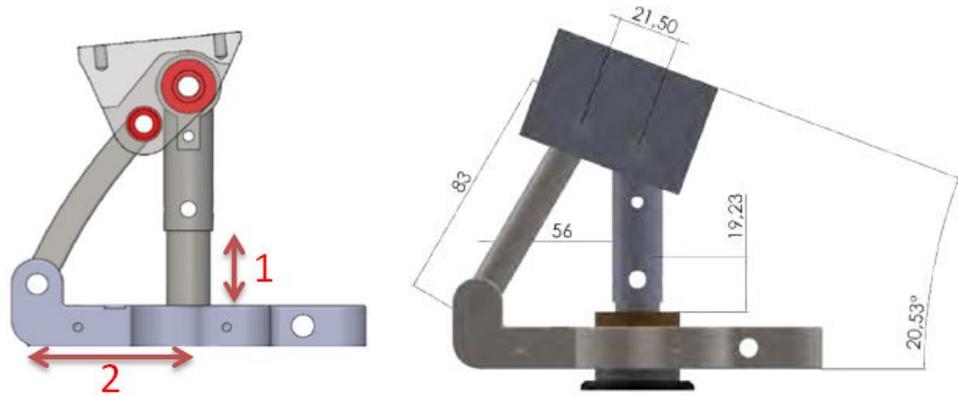


Figura 3.17 - sistema pan tilt

3.3.1 Sensorizzazione dell'end-effector

Per rendere il controllo del manipolatore più efficiente possibile, è stata introdotta nella sua parte terminale un'ulteriore sensorizzazione ovvero sul sistema pan tilt precedentemente descritto, sono stati collocati due encoder magnetici di dimensioni sensibilmente minori rispetto a quelli utilizzati sugli altri link. Mediante la misura della rotazione degli encoder è stato possibile individuare rispettivamente la rivoluzione intorno all'asse del cilindro, in un range che varia da 0° a 180° alternato, e l'inclinazione rispetto all'asse del cilindro stesso. Per poter effettuare le misurazioni sono state ancora una volta utilizzate delle ruote dentate; in particolare la prima resa solidale al componente di supporto del cilindro (che resta fermo durante la rotazione), l'altra invece è posta sullo stelo dell'encoder. Per quanto riguarda la misurazione del secondo grado di libertà, la rotazione del tool viene valutata a partire dallo spostamento verticale del cilindro; utilizzando un sistema pignone cremagliera è stato possibile ancora una volta utilizzare un encoder rotazionale trasformando di fatto un motore lineare in uno rotativo (Fig. 3.18).



Figura 3.18 - Sistema ingranaggi encoder pan tilt

Un aspetto fondamentale per la progettazione dell'intero sistema di misurazione elettronica è stato allo stesso tempo il posizionamento degli encoder, nonché la loro collocazione all'interno di un case a tenuta stagna in quanto, come accennato in precedenza, in questo caso la sensoristica utilizzata, non prevede, la possibilità che gli encoder possano essere direttamente immersi in acqua senza opportuna protezione. Al fine di ridurre gli ingombri e permettere un montaggio senza grosse difficoltà, è stato progettato, valutando i vantaggi dell' "additive manufacturing", un case unico avente una geometria significativamente complicata (Fig. 3.19) ma che potesse anche consentire l'inserimento degli encoder, il passaggio dei cavi, la collocazione dei dispositivi di sealing quali o-ring e anelli di tenuta.



Figura 3.19 - Case protettivo degli encoder end-effector

Anche nel caso dell'end-effector, sono stati definiti dei carter che potessero avere la funzione di proteggere i vari accoppiamenti da tutti quei sedimenti che si sarebbero potuti generare durante l'operazione di pulitura.

L'assieme complessivo dell'end-effector, con il sistema di misurazione dell'orientamento montato, viene mostrato in figura. Come si può notare (Fig. 3.20) il sistema risulta abbastanza compatto ed inglobato all'interno del cinematismo.



Figura 3.20 - Modello CAD del sistema Pan tilt

3.4 Progettazione dell'elettro utensile – spazzola motorizzata

3.4.1 Caratteristiche del manipolo portaspazzole

L'obiettivo che si intende raggiungere mediante la progettazione di un sistema dotato di spazzola motorizzata, è quello di ideare un elettro utensile opportunamente sensorizzato ed in grado di movimentare strumenti adatti ad operazioni di pulizia subacquea che tipicamente sono costituite da setole abrasive, rendendole intercambiabili e facili da sostituire, compatibilmente con il sistema pan tilt precedentemente descritto. Il dispositivo che è stato progettato, include anche l'equipaggiamento di sensori per il controllo della coppia erogata, della temperatura e di tutte le forze trasmesse alla struttura sulla quale è effettuato il mantenimento. Mediante l'utilizzo del sistema pan tilt è così possibile un orientamento ottimale di tale strumento.

Trattandosi di un dispositivo ad alimentazione elettrica funzionante in acqua, è stato necessario studiare attentamente tutte le prescrizioni richieste per l'uso di organi di tenuta dinamica ad alta velocità, in particolare sin dall'inizio è stata posta grande attenzione a quelli che sarebbero potuti essere i punti deboli di un dispositivo del genere. Come visto nel caso studio della mano robotica, la finitura superficiale dei

componenti o il rispetto delle tolleranze di lavorazione durante la fase di produzione, risulta fondamentale per la buona riuscita del prototipo.

3.4.2 Caratterizzazione al banco prova dei sensori del manipolo

Per eseguire le operazioni di calibrazione dei sensori utilizzati nel manipolo portaspazze, è stato progettato e realizzato un banco prova modulare che allestito in opportune configurazioni, permette di tarare delle celle di carico a bottone poste a 120° di distanza, utili alla misura sia del carico lungo l'asse del mandrino, che della coppia erogata al fine di costruire il grafico che correla Corrente assorbita – Coppia erogata. Per il funzionamento del banco prova, è stato utilizzato un primo prototipo di manipolo strumentato, precedentemente sviluppato nel DIMEG (Fig. 3.21).

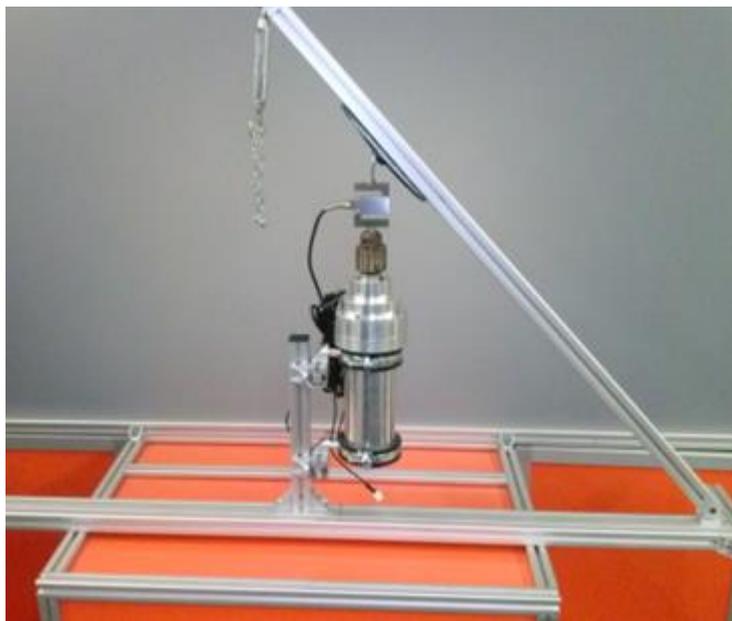


Figura 3.21 - allestimento del banco prova per spinta assiale

Il banco prova per la misura della spinta assiale è costituito da una serie di profilati item incernierati tra loro, il prototipo e una cella di carico a 'S' collegata da una parte alla parte superiore del mandrino e dall'altra ad una piastra inclinata. L'immagine in figura 3.21 è solo una delle possibili configurazioni. La cella di carico utilizzata è una cella a 'S' (Phidgets Inc. – mod. CZL301C) in grado di misurare carichi di trazione e di compressione con un valore massimo di 100kg e un'accuratezza dello 0,02% FS (figura 3.22)



Figura 3.22 - Cella di carico a 'S'

Essa misura l'effettivo carico trasferito al mandrino e da questo alle celle a bottone. La geometria della configurazione mostrata in figura 3.21, consente di valutare anche i carichi laterali rispetto all'asse del mandrino; in questo modo è stato possibile misurare anche le eventuali componenti flessionali che nascono dall'applicazione del carico stesso. Quindi la cella a 'S' diventa il riferimento rispetto al quale si è valutata la risposta delle celle a bottone. Mediante l'uso del collegamento inclinato tra piatto e cella a 'S', si è verificata la risposta delle celle di carico a bottone rispetto alle diverse configurazioni di prova:

- Carico verticale in direzione dell'asse del mandrino.
- Carico inclinato di 30° rispetto all'asse del mandrino.
- Carico inclinato di 45° rispetto all'asse del mandrino.
- Carico inclinato di 60° rispetto all'asse del mandrino.

L'acquisizione è stata effettuata con frequenza di 10[Hz]; dall'analisi delle sei prove svolte mediante tale sistema sono state ottenute le risposte delle celle di carico. Attraverso un foglio di calcolo elettronico (Tab. 8) è stata eseguita una media ogni dieci valori registrati, sia dalle celle di carico a bottone che dalla cella di carico a 'S', così da ottenere un valore medio per secondo. Il carico misurato dalle tre celle a bottone è stato sommato per essere confrontato con quello misurato dalla cella a 'S'.

A	B	C
Tempo [s]	Media cella S [kg]	Media somma celle a bottone [kg]
1	0,451	0,901
2	0,44	0,887
3	0,469	0,835
4	0,562	0,853
5	0,35	0,887
6	0,345	0,821
7	0,44	0,859
8	1,05	0,596
9	1,922	0,499
10	1,886	0,539
11	1,427	0,463
12	1,604	0,479
13	2,08	0,525
14	1,718	0,611
15	1,293	0,534
16	1,318	0,458
17	1,146	0,432
18	1,261	0,149
19	1,277	0,134
20	1,649	0,14
21	2,74	0,267
22	3,335	0,582

Tabella 8 - Tabella dati sperimentali

Nel grafico seguente (figura 3.23) sono evidenziati sia i valori di dispersione sia la retta di regressione lineare, di cui è riportata l'espressione matematica. In ascissa sono presenti i dati delle celle di carico a bottone mentre in ordinata quelli della cella a 'S'.

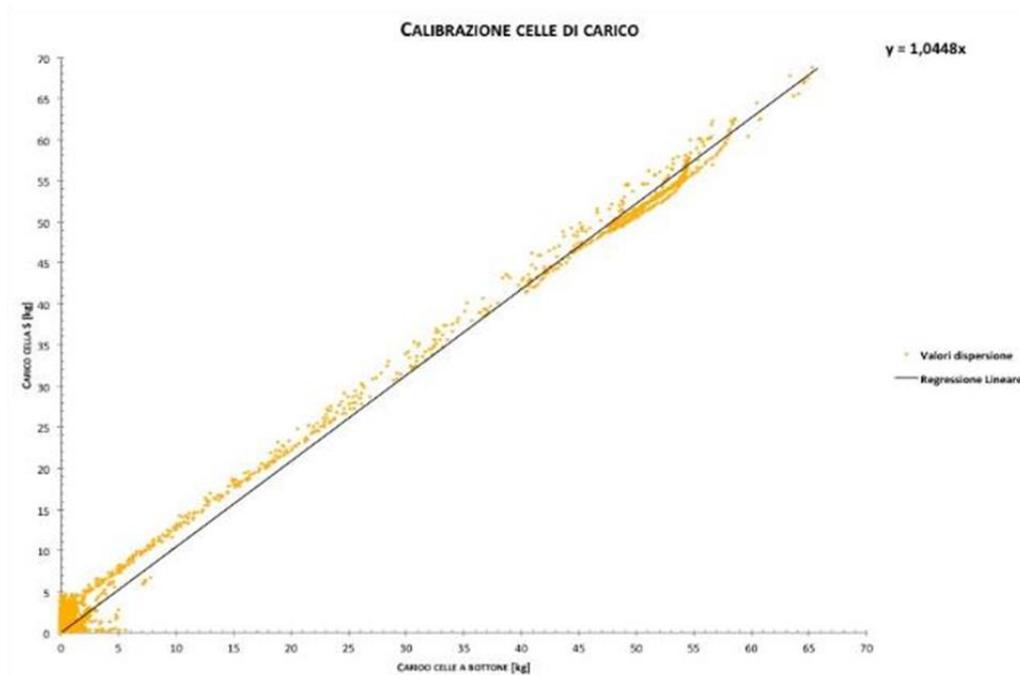


Figura 3.23 – Grafico di calibrazione

Dove l'equazione della retta di regressione lineare è:

$$C_m = 1,05C_b \text{ [kg]}$$

in cui: C_b = somma carico celle a bottone; C_m = carico sul mandrino.

Dall'equazione così ricavata si evidenzia che il valore misurato dalle celle di carico a bottone, durante la fase dei test del manipolo, deve essere aumentato di circa il 5% per ottenere il dato corretto secondo le analisi svolte nella calibrazione dei sensori stessi. Con tale approssimazione ci si pone comunque in una condizione di sicurezza. Infatti nelle misurazioni sono stati trascurati i pesi propri degli elementi che si trovano a valle delle celle di carico(mandrino e cella di carico a 'S' con i relativi collegamenti). I risultati saranno allora approssimati per eccesso e questo ci pone in una condizione cautelativa.

La coppia torcente erogata dal prototipo del manipolo portaspazzole, è stata misurata in maniera indiretta correlandone la corrente assorbita durante l'utilizzo tramite un grafico ricavato prima per via teorica e poi confrontato ai valori ricavati per via sperimentale. Nel primo caso, per calcolare il valore della coppia erogata in funzione della corrente, è stato necessario calcolare il valore della costante di coppia;

$$K_T = \frac{V_a - R_a \cdot I_a}{\Omega} \left[\frac{N \cdot m}{A} \right]$$

In cui $\Omega = \frac{2\pi n}{60} \left[\frac{rad}{sec} \right]$ e con $R_a = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \text{ [\Omega]}$

V_a = tensione di alimentazione; R_a = resistenza di armatura; V_{cc} = tensione di cortocircuito (a rotore bloccato); I_{cc} = corrente di cortocircuito; I_a = corrente di alimentazione; Ω = velocità angolare; n = numero di giri motore

I valori di I_v (corrente assorbita a vuoto) e I_{cc} (corrente ad albero bloccato) sono misurate tramite un amperometro. Per calcolare la costante di coppia K_T è stato posto il caso di motore a vuoto, quindi i valori da inserire nell'equazione sono:

$$n_v = 27090 \left[\frac{giri}{min} \right] \quad V_v = 36,92 \text{ [V]} \quad I_v = 2,78 \text{ [A]} \quad R_a = 1,16 \text{ [\Omega]}$$

Da cui:

$$\Omega = 2835,42 \left[\frac{rad}{sec} \right] \text{ e quindi } K_T = 0,0119 \left[\frac{N \cdot m}{A} \right]$$

Nota la K_T , il rapporto di riduzione e il rendimento del riduttore epicicloidale tramite l'equazione seguente posso ricavare la relazione tra coppia erogata e corrente assorbita:

$$C_r = \frac{\eta_r}{i} K_T \cdot I_a \quad [N \cdot m]$$

in cui ancora, i = rapporto di riduzione; η_r = rendimento del riduttore; I_a = corrente assorbita; K_T = costante di coppia del motore. Nel caso in esame si ha:

$i=1:16$; $\eta_r=0,84$; $K_T=0,0119$ e quindi:

$$C_r = 0,1599 \cdot I_a$$

Plottando i valori della funzione C_r otteniamo un grafico in cui in ascissa è riportata la corrente assorbita dal manipolo e in ordinata la coppia erogata (figura 3.24).

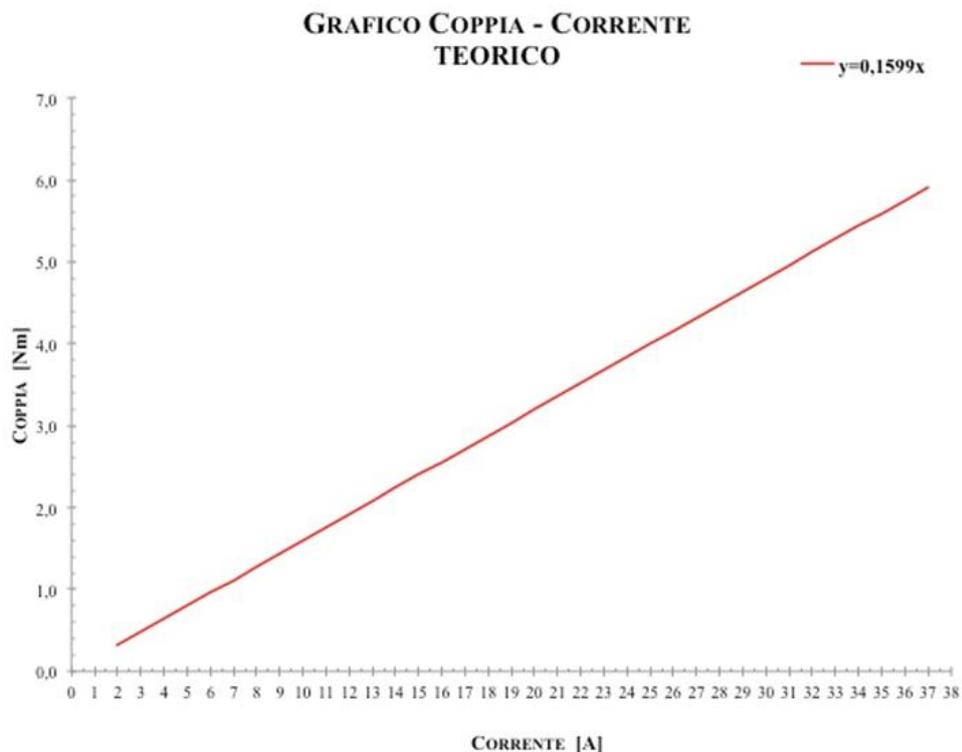


Figura 3.24- Grafico della funzione Coppia-Corrente calcolato per via teorica.

La fase di misurazione sperimentale della coppia torcente, è stata effettuata in una diversa configurazione del banco prova, come mostrato in figura 3.25;

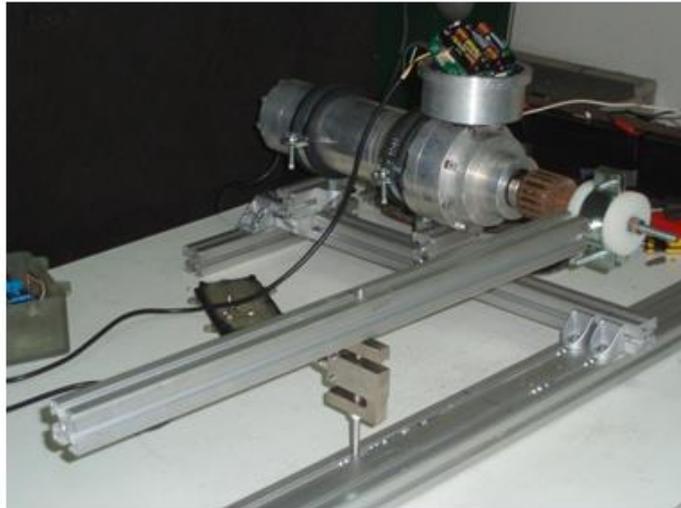


Figura 3.25- Banco prova per la misurazione della coppia torcente

Al mandrino è stato collegato un sistema a frizione costituito da un cilindro in teflon con doppio spallamento, inserito in un collare d'acciaio. Serrando il collare d'acciaio al cilindro di teflon aumenta l'attrito tra le parti e la coppia torcente è stata trasferita dal mandrino al braccio del sistema. In questo modo il sistema simula la coppia resistente che il manipolo incontrerà durante l'utilizzo con i diversi utensili. Il carico è stato a sua volta trasferito alla stessa cella di carico utilizzata in precedenza e posta a distanza nota.

Per ottenere la coppia erogata dal manipolo si usa la formula:

$$F_s = C_s \cdot 9,81 \quad [N] \text{ e con } C_e = F_s \cdot d \quad [Nm]$$

considerando che: C_e = Coppia erogata dal manipolo [Nm]; F_s =Forza che agisce sulla cella 'S' [N]; C_s = Carico misurato dalla cella a 'S' [kg]; d = Distanza dal centro del mandrino al centro della cella a 'S' [m]. Alla fine dell'analisi dei dati si è ricavato un grafico che riporta l'andamento della coppia torcente erogata in funzione della corrente assorbita.

Il grafico in figura 3.26 presenta i valori di dispersione dei dati, e la linea di tendenza calcolata, di cui si riporta l'equazione attraverso la funzione "linea di tendenza di potenza". Questa funzione applica il metodo dei minimi quadrati cercando una curva di regressione che minimizza la somma dei quadrati delle distanze tra i dati osservati e quelli della curva. L'espressione della curva di regressione è:

$$y = 0,0622x^{1,2966}$$

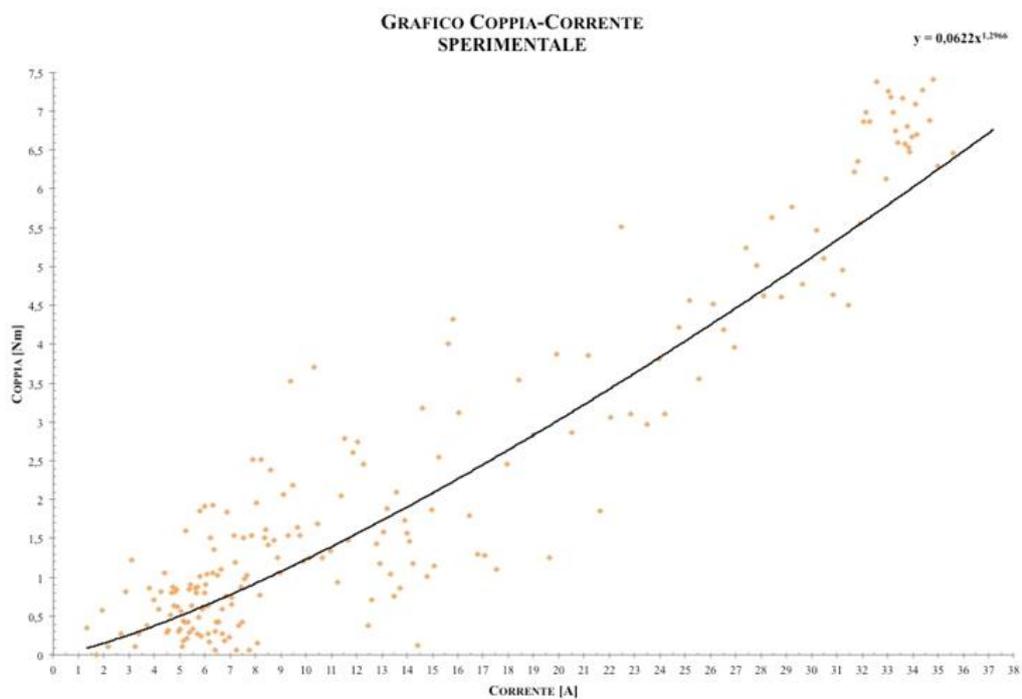


Figura 3.26 - Grafico coppia-corrente costruito per via sperimentale

Le due strade percorse per eseguire l'analisi hanno prodotto risultati simili. Nel grafico seguente (Fig. 3.27) sono riportate le due curve, quella teorica e quella sperimentale:

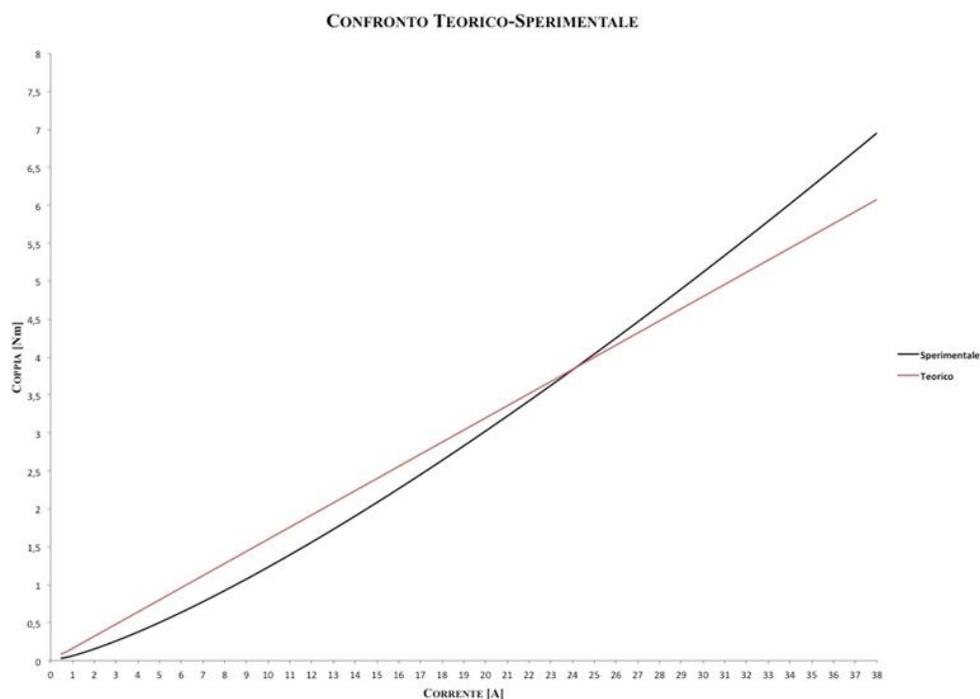


Figura 3.27 - Confronto tra andamento teorico e sperimentale delle curve di coppia

L'andamento leggermente parabolico della curva calcolata sperimentalmente è dovuto al metodo usato per calcolare la curva di regressione. Nella parte iniziale, la curva sperimentalmente è minore di quella calcolata per via teorica. Ciò è giustificato dal fatto che il calcolo teorico è stato eseguito considerando motore elettrico e gruppo di riduzione isolati, invece la prova sperimentalmente è stata eseguita con il manipolo completamente assemblato in cui quindi erano presenti albero porta-mandrino, mandrino, anello di tenuta. A bassi valori di corrente assorbita, e di conseguenza a velocità di rotazione modeste, le inerzie e gli attriti di questi elementi e del sistema di frizione usato nella prova, costituiscono una percentuale influente di perdite, mentre all'aumentare della corrente assorbita dal motore elettrico, e quindi all'aumentare della velocità di rotazione del mandrino, tali perdite diminuiscono al punto di diventare ininfluenti. Nella tabella seguente sono riportati i valori ricavati dall'equazione della curva di regressione che approssima i dati sperimentali.

CORRENTE [A]	COPPIA [Nm]	CORRENTE [A]	COPPIA [Nm]	CORRENTE [A]	COPPIA [Nm]	CORRENTE [A]	COPPIA [Nm]
2,5	0,2	11	1,40	19,5	2,93	29	4,90
3	0,25	11,5	1,47	20	3,02	29,5	5,00
3,5	0,32	12	1,55	20,5	3,12	30	5,12
4	0,38	12,5	1,64	21	3,22	30,5	5,23
4,5	0,44	13	1,73	21,5	3,32	31	5,34
5	0,5	13,5	1,82	22	3,42	31,5	5,45
5,5	0,57	14	1,90	22,5	3,52	32	5,56
6	0,63	14,5	1,99	23	3,62	32,5	5,68
6,5	0,70	15	2,01	23,5	3,73	33	5,79
7	0,78	15,5	2,17	24	3,83	33,5	5,90
7,5	0,85	16	2,26	24,5	3,93	34	6,00
8	0,92	16,5	2,3	26	4,04	34,5	6,13
8,5	1,00	17	2,45	26,5	4,14	35	6,24
9	1,08	17,5	2,54	27	4,25	35,5	6,36
9,5	1,15	18	2,63	27,5	4,57	36	6,48
10	1,23	18,5	2,73	28	4,68	36,5	6,60
10,5	1,31	19	2,83	28,5	4,79	37	6,72

Tabella 9 - Tabella di conversione dei valori di corrente misurata

3.4.3 Sensorizzazione dell'elettro utensile

L'elettro utensile è stato progettato per poter alloggiare una serie di sensori al fine di misurare la temperatura raggiunta nelle parti interne dello strumento, la spinta assiale e il numero di giri dal motore. Per la misurazione della forza sono state impiegate delle celle di carico utili a verificare le sollecitazioni istante per istante, mediante la misura di un segnale elettrico che è variabile durante le operazioni di pulitura. Si tratta quindi di uno strumento che rileva la deformazione meccanica in maniera indiretta, trasformando i millivolt in valori di deformazione. Per poter ottenere un'informazione il più possibile corretta, sono state utilizzate tre celle di carico (Fig. 3.28) disposte a 120° tra di loro, in modo tale da poter valutare non solo i carichi presenti lungo la direzione del mandrino (e della spazzola), ma anche le altre due componenti che si sviluppano durante il normale utilizzo.



Figura 3.28 - Cella di carico

La misurazione del numero di giri è stata affidata ad un foto transistor, dispositivo tipicamente utilizzato nella circuiteria di controllo dei motori. È stato inoltre adoperato un sensore di corrente a monte del motore stesso al fine di verificare, istante per istante, la corrente assorbita; durante il funzionamento, essa risulta ovviamente variabile in funzione la coppia erogata.

3.4.4 Motorizzazione dell'elettro utensile

I componenti principali di un elettro utensile sono sicuramente il motore e il riduttore; la soluzione adottata è stata basata sull'utilizzo di un gruppo motore-riduttore (di un trapano commerciale Bosch. La relazione tra coppia e corrente assorbita dal motore, è stata ricavata come spiegato precedentemente dalla prova al banco. Le informazioni

riguardanti il corpo riduttore, sono state invece ricavate a partire dalla geometria dei componenti. Essendo presenti due stadi di riduzione, dotati di ingranaggi epicicloidali collegati tra loro, si è ottenuto un rapporto di riduzione totale di 1:16.

3.4.5 Elettronica di controllo dell'elettrotensile

Per l'elettronica di controllo del motore dell'utensile, è stata utilizzata una scheda SyRen 25 (Fig. 3.29).

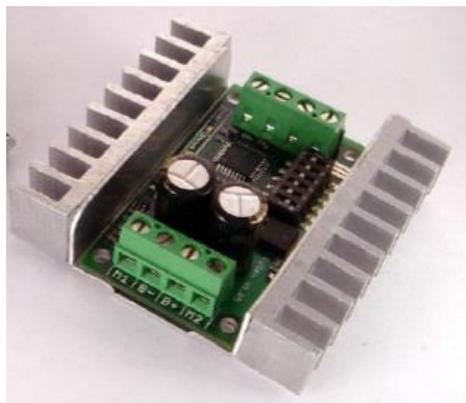


Figura 3.29 - Scheda elettronica di controllo motore

Le caratteristiche principali sono:

- tensione di input: 6-24 V, max 30V;
- corrente di output: fino a 10°25° continua;
- dimensioni: 2.4" x 2.3" x 8";
- peso: 55 g

Per l'elettronica di controllo dei sensori invece, si è optato per commissionare la progettazione e la realizzazione di una scheda ad hoc, in modo tale da collegare e controllare le celle di carico, il foto transistor, i sensori di corrente e l'alimentazione.

3.4.6 Progettazione dell'elettrotensile

La fase di progettazione dell'intero dispositivo, è stata scomposta in quattro "assiemi" fondamentali ovvero il corpo sensori (A), il corpo riduttore (B), il corpo motore (C) e il corpo elettronica (D) (Fig. 3.30). Per ognuno di essi saranno descritti in seguito gli aspetti progettuali più rilevanti. I vari "sottoassiemi" sono stati assemblati indipendentemente tra di loro, successivamente montati e poi ancorati sul sistema pan tilt, precedentemente progettato.

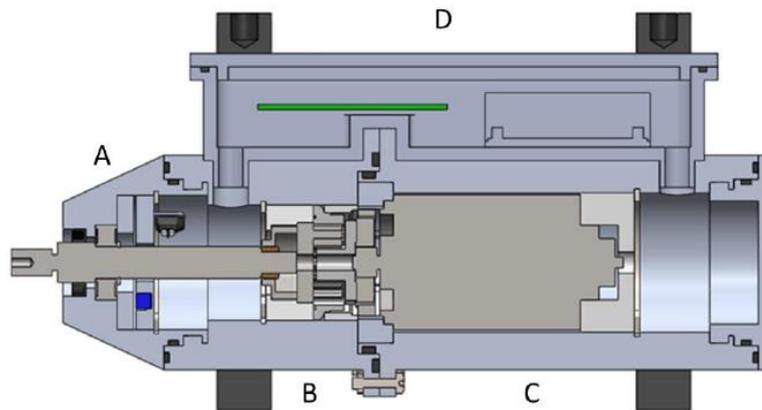


Figura 3.30 - Vista in sezione dell'elettrotensile

3.4.6.1 Il corpo sensori

La progettazione di questa parte di strumento, si è basata sulla necessità di poter contenere le celle di carico e il foto transistor, nonché di assicurarne, durante la fase di utilizzo, il perfetto funzionamento. In altre parole si tratta della porzione anteriore del "manipolo" per il quale sono previsti, oltre ai vari componenti utili al moto come cuscinetti o albero di trasmissione, anche i dispositivi di tenuta e di bloccaggio per i componenti elettronici. In figura 3.25 sono riportati il modelli CAD dei componenti..

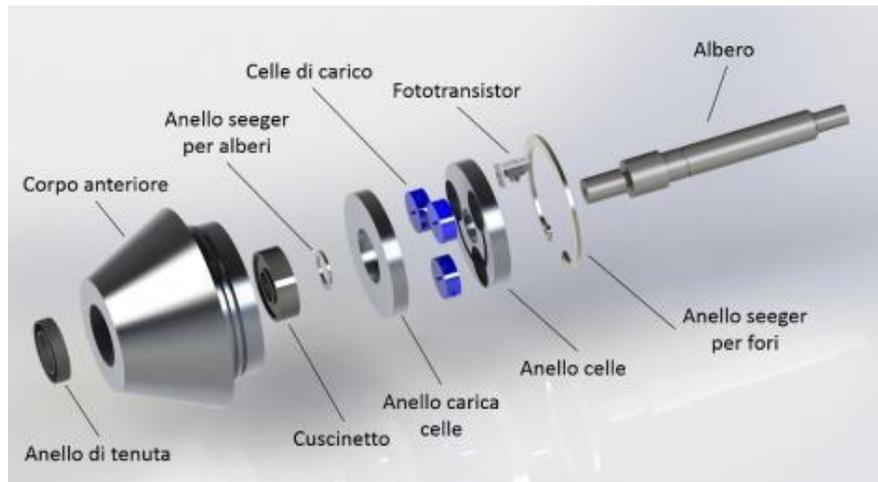


Figura 3.30 - Esploso corpo sensori

3.4.6.2 Il corpo riduttore

La parte centrale dello strumento ha la funzione di contenere il gruppo riduttore; in particolare i vari stadi del rotismo sono tenuti in posizione mediante opportuni anelli di bloccaggio che non consentono rotazioni indesiderate del meccanismo. Il sistema è composto da due stadi di riduzione rispettivamente con un rapporto di trasmissione di 1:4 ciascuno. È stato inoltre progettato un corpo centrale in materiale metallico in maniera tale da bloccare gli anelli esterni del secondo stadio di riduzione. Le varie geometrie sono state inoltre ottimizzate per poter consentire un semplice passaggio dei cavi dell'elettronica, posizionata anteriormente. In figura 3.31 i modelli CAD del corpo riduttore.

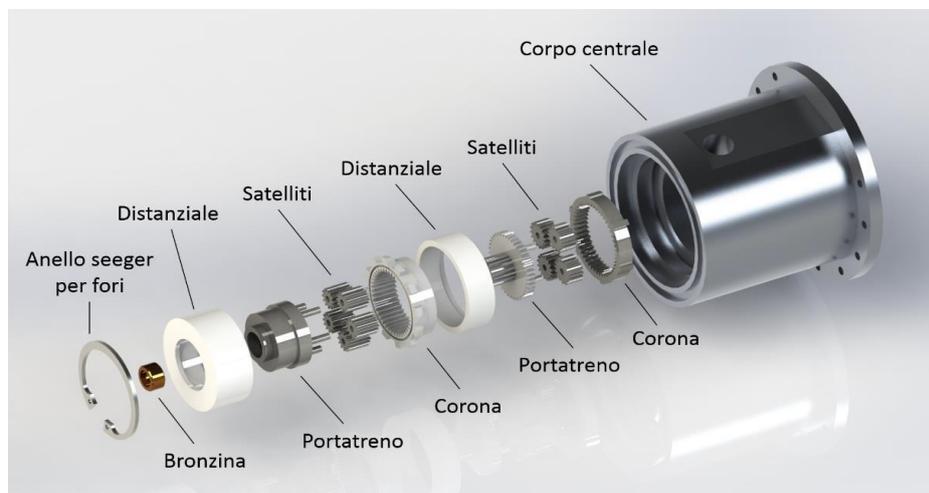


Figura 3.31 - Esploso corpo riduttore

3.4.6.3 Il corpo motore

Questa parte dell'elettro utensile ha lo scopo di contenere il motore e allo stesso tempo di poter dissipare il calore che da esso è generato; per questo motivo è stato scelto, al fine di garantire un migliore scambio termico, un involucro realizzato in alluminio. Il corpo motore è risultato essere anche la parte terminale posteriore del dispositivo e presenta sulla parte superiore una superficie lavorata in modo da essere la base per il case del corpo elettronica (Fig. 3.32).

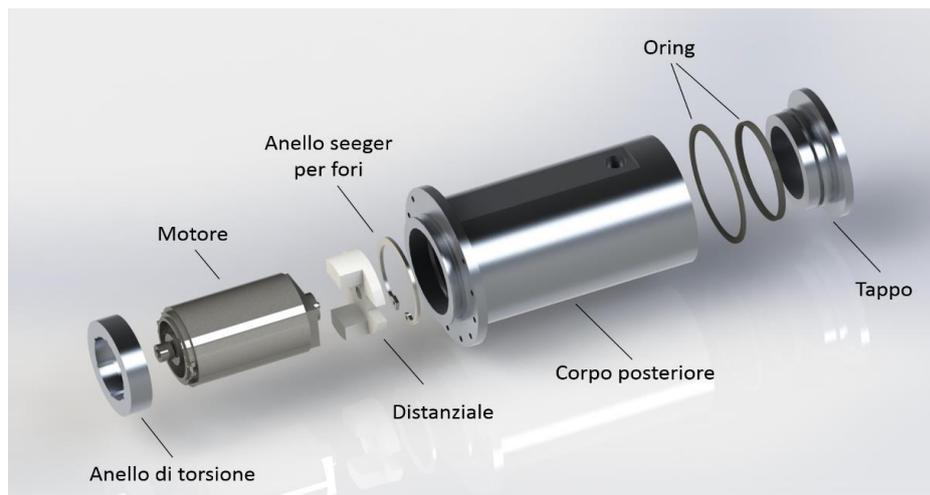


Figura 3.32 - Esploso corpo motore

3.4.6.4 Il corpo elettronica

Il case dell'elettronica ha la funzione di alloggiare le due schede presenti ovvero quella di controllo del motore e quella di controllo dei sensori. Tale case è opportunamente forato per consentire il passaggio dei cavi all'interno del corpo motore posto al di sotto di esso; (Fig. 3.33) il fissaggio è effettuato mediante collegamenti filettati e la tenuta stagna è garantita mediante l'utilizzo di o-ring assiali.

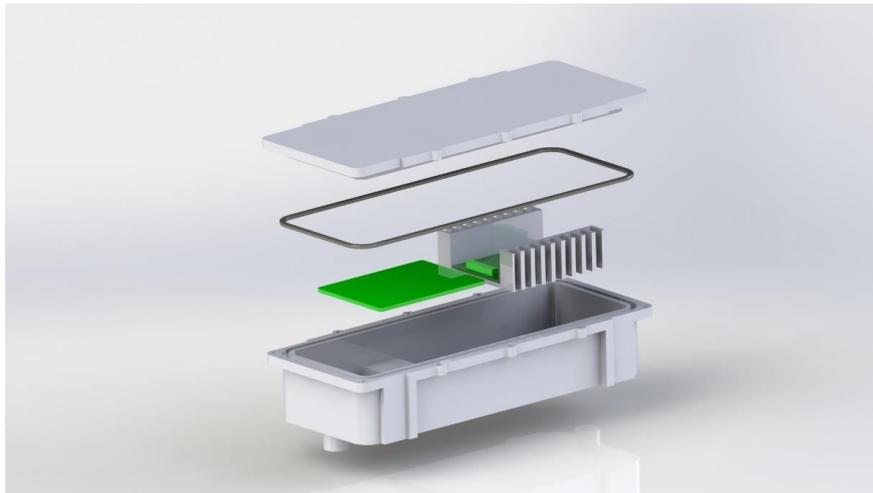


Figura 3.33 - Esploso corpo elettronica

È stato inoltre necessario individuare una soluzione ottimale per il collegamento tra l'elettro utensile e il sistema pan tilt. È stata creata, al di sotto dello strumento, una piastra forata in maniera tale da poter essere collegata, mediante viti, al braccio robotico. La progettazione di tale supporto è stata effettuata tenendo presente i problemi di possibili sovrapposizioni tra la parte posteriore del manipolo e la piastra di base del sistema pan tilt (Fig. 3.34); ciò avrebbe potuto interferire con l'escursione massima dell'ultimo link dell'end-effector.

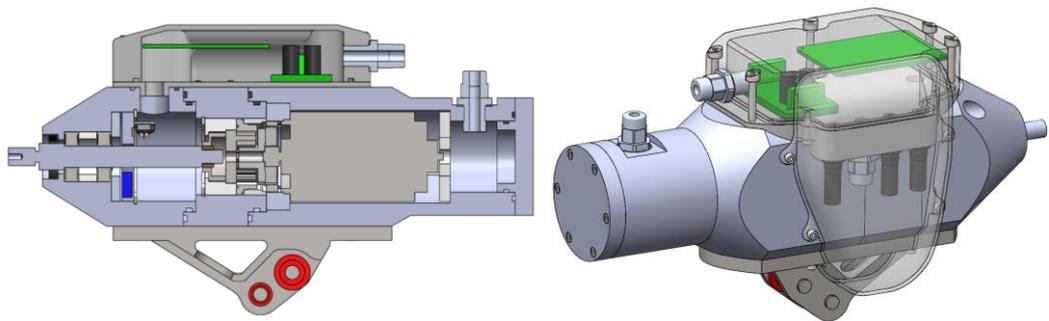


Figura 3.34 - Manipolo con scheda di controllo motore

Per ridurre al minimo la presenza di cavi fluttuanti, utilizzati per i vari collegamenti elettrici ed elettronici, sono stati utilizzati, anche in questo caso, dei carter per preservare le parti più sensibili. Di seguito è mostrato un esploso del complessivo (Fig. 3.35) in riferimento alla bollatura, consultare l'Appendice B.

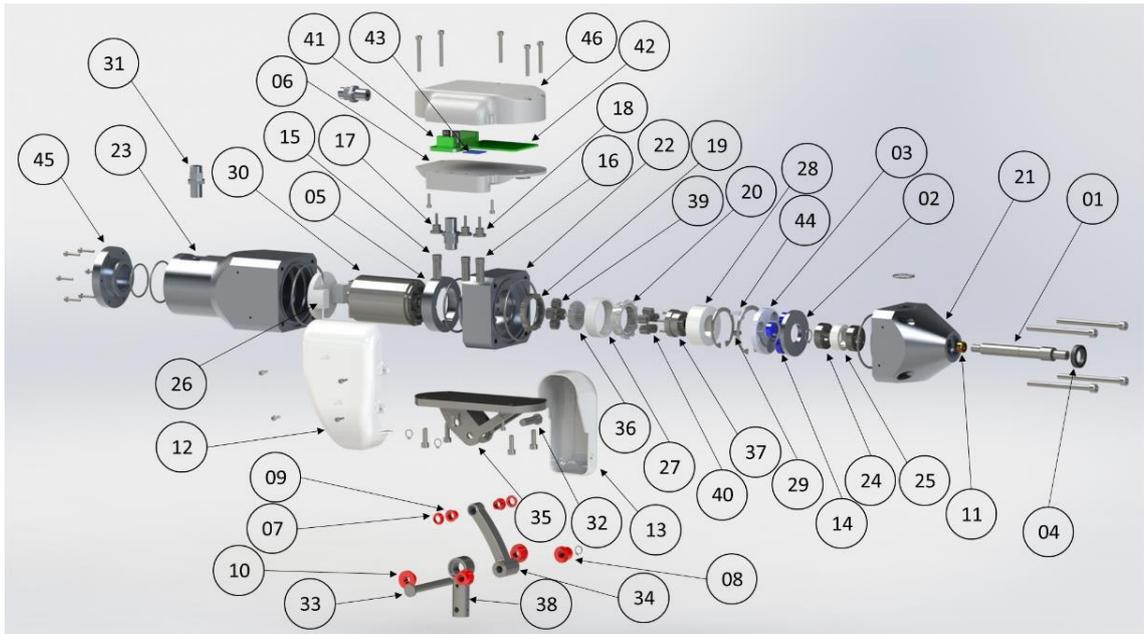


Figura 3.35 - Esploso del manipolo porta spazzole

3.5 Realizzazione elementi del braccio robotico

Per la fase di realizzazione dei componenti del manipolatore, sono state utilizzate, in maniera frequente, le tecniche di stampa 3D; in particolare il laser sintering di materiale plastico. Per la realizzazione delle parti metalliche, e della gran parte del manipolo, si è scelto di adoperare tecniche tradizionali di asportazione di truciolo, in maggior misura, operazioni di tornitura.

Per quanto riguarda la realizzazione delle piastre del manipolatore, dalle simulazioni FEM effettuate sulle piastre del link-1, è stata validata la realizzazione in Derlin, una resina acetica rinforzata in fase di produzione con fibre di vetro o teflon, che senza problemi sopporta, le sollecitazioni generate, sia in fase di movimentazione del braccio che durante la fase di pulitura. L'analisi agli elementi finiti del sistema composto dalle due piastre, superiore e inferiore, collegate mediante perni distanziali, ha evidenziato come detto, anche una buona rigidità del sistema. Tale fattore non era trascurabile poiché, a causa dell'aumento delle dimensioni geometriche, avrebbe potuto causare instabilità nel controllo. La realizzazione è stata eseguita mediante processo di taglio water-jet da una piastra di Derlin nero di 15 mm. L'intera produzione dei componenti in stampa 3D è stata da me interamente curata, sia nella fase di realizzazione vera e

propria che nella progettazione dei sistemi di supporto per i componenti stampati. Inoltre è stata da me seguita la gestione, la programmazione e il controllo delle macchine CNC.

In questo caso la lavorazione eseguita al controllo numerico, ha garantito non solo precisioni nell'ordine del centesimo di millimetro, ma ha anche generato superfici già utilizzabili senza alcuna lavorazione di finitura. Oltre alle piastre sono stati riprogettati e realizzati degli scheletri di supporto in acciaio inox al fine di irrigidire ancora di più l'assieme e per poter garantire una base d'appoggio ottimale alle teste delle viti di serraggio per i perni in acciaio e per le strutture di supporto degli encoder. Anche in questo caso il taglio water-jet da una lastra d'acciaio di 2 mm (Fig. 3.36), è stata la soluzione ideale, visto gli spessori e la complessità della geometria.



Figura 3.36 - Piastra del link 1 e struttura di supporto

La problematica della sensorizzazione del braccio robotico, è stata affrontata in fase di progettazione non solo per quanto riguarda la scelta degli encoder da utilizzare, ma anche per la modalità di trasferimento del moto, dal giunto al sensore. Per questo motivo, come detto, è stato progettato un sistema d'ingranaggi e ruote dentate che potesse, in ciascuna configurazione e per ogni link, restituire il valore di posizione corretto. Oltre ai sistemi a ingranaggio per la trasmissione del moto, sono stati previsti delle strutture di fissaggio dei sensori sulle piastre del braccio, in modo tale da evitare spostamenti accidentali.

La necessaria customizzazione degli ingranaggi da utilizzare per la trasmissione del moto nei primi tre encoder stagni, ha reso indispensabile il ricorso a tecniche di stampa 3D. I prototipi per le attività di verifica di montaggio e di funzionamento, sono stati

realizzati in ABS con una stampante 3D Makerbot Replicator 2X, basata su tecnologia FDM (fused deposition modelling). Il grado di precisione raggiungibile con questa tecnica di stampa 3D ha soddisfatto i requisiti della fase “prototipale”. Comunque è necessario precisare che i componenti realizzati in ABS non sono sufficientemente resistenti all’usura e trattandosi di ruote dentate, questo risulta un limite tecnico imprescindibile. Per la costruzione dei modelli definitivi d’ingranaggi e strutture di supporto degli encoder, si è optato per scelte produttive differenti.

Il “machining” classico, è stato scelto per la realizzazione dei componenti aventi geometrie non particolarmente complicate, mediante una fresatrice a controllo numerico a quattro assi (Fig. 3.37) (Roland Modela pro II).



Figura 3.37 - Realizzazione componenti per fresatura a controllo numerico

Gli ingranaggi e le parti, difficilmente producibili o che avrebbero richiesto lunghe e costose lavorazioni con tecniche di asportazione di truciolo, sono stati costruiti con la stampante 3D EOS Formiga P110 (Fig. 3.38) (Laser Sintering).



Figura 3.38 - Particolare dei ingranaggio e cover protettivo degli encoder

In questo modo ognuno dei tre encoder risulta collegato al giunto interessato e alla piastra del manipolatore (Fig. 3.39).



Figura 3.39 - Encoder e struttura di fissaggio in posizione

Per il fissaggio in posizione sui giunti dei vari ingranaggi e sistemi di trasmissione, sono stati utilizzati collegamenti filettati. Inoltre, al fine di rendere possibile le normali operazioni di manutenzione, sono stati creati componenti facilmente “disassemblabili” e ispezionabili. In molte situazioni sono state create delle geometrie ad-hoc per l'alloggiamento dei case e degli encoder (Fig. 3.40), minimizzando al contempo gli ingombri. Il passaggio dei cavi di collegamento e alimentazione è stato garantito utilizzando dei normali “passacavo” per uso subacqueo.



Figura 3.40 - Case stagno per encoder end-effector

L'intero sistema Pan-Tilt dell'end effector, (Fig. 3.41) è stato realizzato in Nylon con la stampante 3D Formiga P110, con tolleranze di realizzazione dell'ordine del centesimo di millimetro.



Figura 3.41 - Manipolatore e end-effector assemblati

In figura , è mostrato l'intero sistema pan-tilt montato sul braccio; anche in questo caso, per evitare problemi di sporcizia e interferenza tra ruote e ingranaggi, e per evitare inoltre eventuali rotture dovute ad urti accidentali, sono stati creati dei carter protettivi capaci di preservare l'integrità dei meccanismi.

3.6 Realizzazione dell'elettro utensile

Per compiere le operazioni di pulitura dei beni sommersi, è fissato un manipolatore elettrico dotato di spazzola, posto a valle dell'intera catena cinematica del braccio. È possibile operare nella configurazione migliore per ogni task, mediante la movimentazione dei vari link e del sistema pan-tilt.

La realizzazione di questo strumento, è stata eseguita per mezzo di macchine utensili tradizionali, partendo da un grezzo di alluminio, opportunamente fresato e tornito. Come componentistica interna sono stati utilizzati elementi derivati da un trapano Bosch modello GRS 36-V LI 2 in particolare motore e gruppo riduttore. Le altre parti necessarie, per il corretto funzionamento del "device" sono state realizzate alle macchine utensili, per stampa 3D LS o acquistate da catalogo.

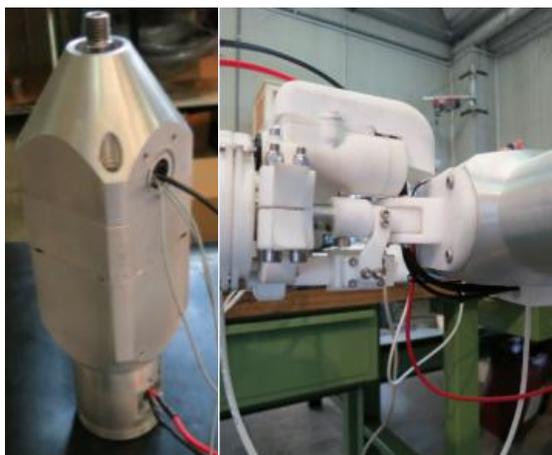


Figura 3.42 - Corpo motore spazzola motorizzata

Per garantire l'impermeabilità dell'elettro-utensile, sono state adoperate sia tenute statiche per le parti fisse, che tenute dinamiche per l'albero di trasmissione (Fig. 3.42).

Per equipaggiare il dispositivo del suo utensile abrasivo, sono stati effettuati una serie di test utilizzando materiali differenti, disparate disposizioni delle setole e diametri diversi, avvalendosi delle indicazioni fornite dagli archeologi subacquei. Le spazzole di Nylon sono risultate le più adatte allo scopo, poiché effettivamente capaci di rimuovere le incrostazioni anche tenaci, senza danneggiare le strutture. Il kit è stato composto quindi da spazzole assiali, a tazza e radiali, di varie dimensioni (Fig. 3.43) in modo tale da poter gestire la loro capacità abrasiva. Il montaggio vero è proprio, ha previsto il serraggio al mandrino dell'elettro-utensile mediante una comune chiave di bloccaggio.



Figura 3.43- Kit spazzole abrasive

L'elettronica dell'elettrotensile, contenuta all'interno di un box stagno fresato alla macchina a controllo numerico (Fig. 3.44), ed è stata posta, come visto, al di sopra del corpo motore.



Figura 3.44 - Case elettronica fresato

In figura, è possibile osservare l'intero manipolatore pronto per essere montato sullo "skid" del ROV. Alcuni passacavo, presenti al suo interno, non aventi dimensioni standard, sono stati realizzati mediante stampa 3D con tecnologia DMLS con la stampante EOS M280. Il cablaggio dei sensori e dei circuiti di alimentazione è stato reso stagno mediante resinatura poliuretanica e giunzioni realizzate ad-hoc. L'intero dispositivo assemblato è mostrato in figura 3.45

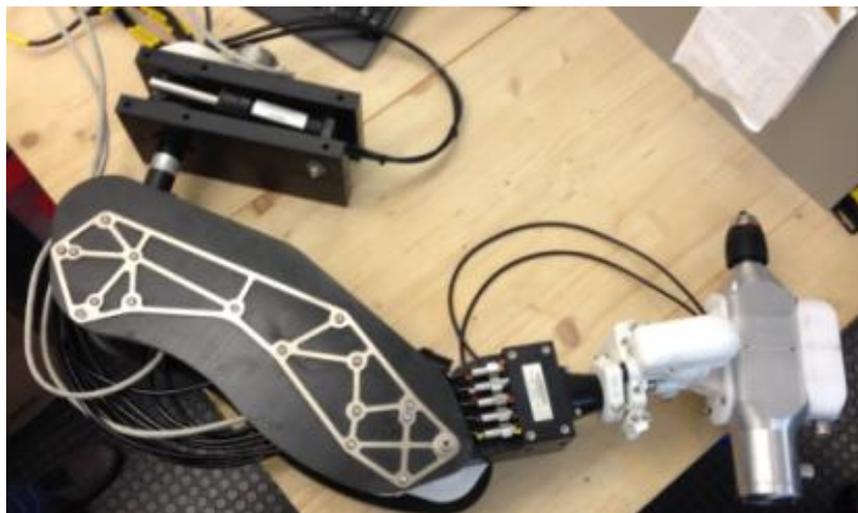


Figura 3.45 - Intero manipolatore assemblato

Elettrotensili subacquei

4.1 Introduzione - elettrotensili manuali subacquei

Nell'ambito del progetto COMAS, al fine di fornire ai restauratori subacquei strumenti utili a svolgere in maniera più rapida e accurata il loro lavoro, sono stati progettati e realizzati degli elettrotensili manuali, utili alla rimozione degli agenti incrostanti dalle architetture sommerse. Nel precedente capitolo, è stato illustrato lo studio dello stato dell'arte degli strumenti subacquei in commercio, dotati di alimentazione pneumatica o idraulica; la scelta di questo tipo di realizzazione dipende, come detto, essenzialmente dalla volontà di limitare il più possibile l'utilizzo di apparecchiature elettriche in acqua, e per aumentare la sicurezza degli operatori. Tuttavia una scelta in tal senso, aumenta i costi dovuti all'impiego di dispositivi complessi che richiedono la discesa di cavi, a volte anche molto lunghi, dalla barca appoggio. Le elevate potenze che tali strumenti sono in grado di erogare, e anche le dimensioni e il peso dei devices, non si adattano bene con la necessità di precisione e attenzione da riservare al campo dell'archeologia subacquea. Il restauratore che utilizza una strumentazione del genere, è in questo modo costantemente vincolato alla posizione dell'imbarcazione che di fatto limita la mobilità.

Ovviando alle criticità dei dispositivi presentati, determinati dalla presenza di apparecchiature sotto tensione in acqua, sono state realizzate e verificate tutte le precauzioni per eliminare qualsiasi tipo di rischio all'operatore. Per avere un elevato livello di sicurezza, i case che contengono gli organi di movimento, poste a diretto contatto con il sub, sono stati separati da quelli contenenti le batterie di alimentazione, creando un pacco batterie esterno. I case resi singolarmente stagni e indipendenti tra loro, sono stati collegati solo con cavi e connettori per uso subacqueo. Questa soluzione ha inoltre diminuito i pesi e aumentato la maneggevolezza e l'ergonomia

degli strumenti. La componentistica elettronica integrata, ha permesso di gestire la velocità di attuazione, il controllo della fase di carica e scarica della batteria e l'individuazione di eventuali infiltrazioni d'acqua. I materiali e le tecniche di lavorazione utilizzati per la creazione del prototipo, rendono gli strumenti utilizzabili fino a 50 metri di profondità, tenendo conto che tali altitudini comprendono la quasi totalità dei siti archeologici sommersi.

Sono stati individuati alcuni dispositivi ad utilizzo terrestre ma di simile funzionalità che meglio si adatterebbero ad un'eventuale marinizzazione dei componenti. Essi presentano infatti caratteristiche costruttive, pesi e ingombri che possono essere presi come riferimento in fase di progettazione e poi di realizzazione dei prototipi. Partendo dallo studio dei cinematismi degli organi in movimento, e dalle caratteristiche di funzionamento di questa tipologia di strumenti, sono stati opportunamente progettati e integrati gli organi di tenuta statica e dinamica per il corpo motore, aggiungendo, come detto, apparecchi elettronici di controllo. Le tecniche di realizzazione dei primi prototipi sono state basate o su lavorazioni con macchine utensili tradizionali, o su fabbricazione additiva (stampa 3D). La scelta della tecnologia più idonea è stata generata dall'analisi delle diverse caratteristiche funzionali di ogni componente.

4.2 Micro-fresa subacquea

Il caso studio presentato, riguarda la progettazione di un elettrotensile subacqueo compatto per la pulitura di reperti archeologici sommersi; durante la fase di progettazione l'attenzione è stata focalizzata sulla realizzazione di un utensile compatto e maneggevole ma avente le prestazioni necessarie per l'esecuzione di interventi di pulitura meccanica su materiali lapidei sommersi. In particolare, mediante l'utilizzo di opportune frese e spazzole, sarà possibile effettuare la rimozione di organismi incrostanti altrimenti possibile in maniera meno rapida e accurata, mediante l'utilizzo di classiche spazzole.

La progettazione dell'utensile è basata su una struttura modulare di facile manutenzione. Il dispositivo è costituito da un'unità includente il motore e da un'altra contenente l'alimentazione, l'elettronica di controllo e le batterie agli ioni di litio. Le

principali problematiche di progetto hanno riguardato lo studio dei dispositivi di tenuta statica e dinamica, che garantiscono l'uso del dispositivo in totale sicurezza. La struttura modulare dell'utensile (Fig. 4.1) riduce al minimo le superfici di accoppiamento esposte all'acqua al fine di minimizzare il rischio di infiltrazioni e semplificando, allo stesso tempo, le operazioni di manutenzione.

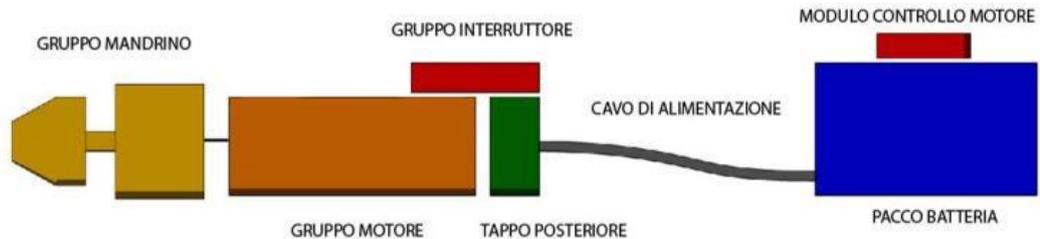


Figura 4.1 - Schema semplificato micro-fresa

Per rendere lo strumento il più possibile ergonomico e adatto ad essere impugnato in maniera semplice, è stato impostato il diametro massimo dell'utensile a 50 mm.

4.2.1 Scelta della componentistica

È stato scelto come motore il Maxon Ec-4pole Brushless da 200 watt (Fig. 4.2). Il diametro è di soli 30 mm, ed è dotato di sensori di hall per la misura della posizione del rotore. La presenza di tali sensori è indispensabile in quanto aiutano l'avvio del motore nelle situazioni in cui necessita alta coppia allo spunto. La presenza dell'anello di tenuta sull'albero rotante fa sì che sia necessaria una coppia elevata all'avvio in modo da vincere l'attrito statico delle superfici di tenuta; l'utilizzo di un motore sensored risolve efficacemente il problema.



Figura 4.2 - Motore Maxon 200W

Come elettronica è stata scelta la scheda ESCON 70/10 (Fig. 4.3) con corrente massima erogabile di 10 ampere e possibilità di controllare motori dotati di sensori di hall. La scheda permette il monitoraggio completo dei parametri del motore via pc tramite interfaccia USB consentendo il fine tuning del dispositivo in relazione alle condizioni di utilizzo. È stato necessario ricorrere a tale scheda data la potenza del motore, le cui caratteristiche sono riportate in tabella.

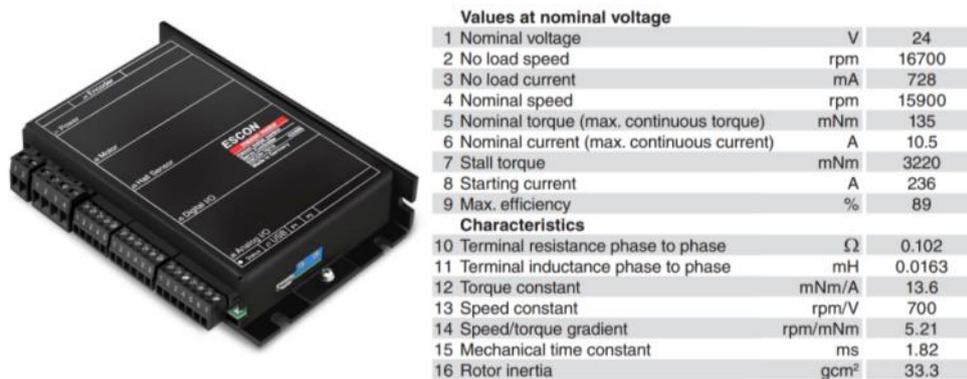


Figura 4.3 - Scheda elettronica Escon e la sue caratteristiche

Per quel che riguarda la coppia di stallo massima, si ha un valore di 3.22 Nm. Queste caratteristiche consentiranno di evitare impuntamenti durante le operazioni di pulizia dei materiali più tenaci.

Il sistema viene alimentato a 24 volt tramite due pacchi batterie al litio da 6 celle ciascuno collegati in parallelo in modo da avere una capacità di 5500 mAh. Sono state scelte celle al litio poiché hanno il miglior rapporto peso-prestazioni. Il controllo della velocità viene effettuato mediante un potenziometro da 100 KOhm collegato al relativo ingresso analogico presente sulla scheda di controllo. L'abilitazione del dispositivo viene invece effettuata mediante un pulsante posizionato sul corpo motore. Tale meccanismo di accensione, integra un sensore di pressione gestito da un micro-controllore. Le varie frese e spazzole sono posizionate su un mandrino auto-serrante modello SP-03 J-0 FGE prodotto dalla Llambrich USA (Fig. 4.4) interamente realizzato in acciaio inox, capace di serrare utensili con gambo da 0.3 a 3 mm.



Figura 4.4 - Mandrino in acciaio inox

Per quanto riguarda i dispositivi di tenuta, sono stati utilizzati comuni o-ring come tenute statiche, ed un anello di tenuta radiale DIN 3760 tipo AS-P a doppio labbro.

4.2.2 Composizione dell'unità motrice

Il gruppo contenente il motore è stato progettato in modo tale che quest'ultimo sia a contatto con le pareti interne del case al fine di assicurare la necessaria dissipazione termica. Il tappo posteriore è stato fissato al corpo mediante sei viti. (Fig. 4.5) Sul tappo è presente un passacavi a tenuta stagna per il cavo di alimentazione del motore costituito da tre fili ognuno dei quali relativo ad una fase, 5 fili relativi ai sensori hall e due fili per il sensore di pressione per l'accensione.

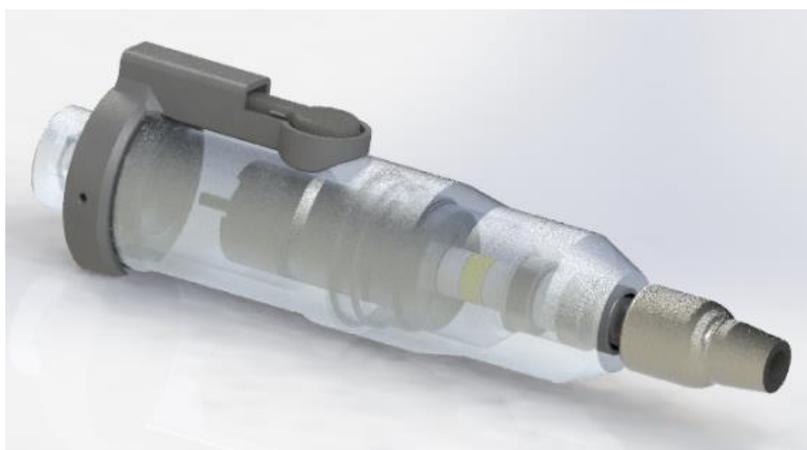


Figura 4.5 - Modello CAD della micro-fresa

Sul tappo e corpo sono state ricavate le sedi per due coppie di o-ring di tenuta: uno lavora in senso radiale mentre l'altro in senso assiale, in modo da assicurare la tenuta in tutte le condizioni di utilizzo oppure nel caso in cui l'utensile venga inavvertitamente svitato sott'acqua. Come detto, per l'accensione dello strumento è utilizzato un sensore di pressione inglobato all'interno di un "coating" in gomma (Fig. 4.6) al fine di garantire la tenuta, e montato all'interno di un case protettivo in Nylon realizzato mediante stampa 3D.



Figura 4.6 - Sistema di attuazione con sensore di pressione

Tale sistema, non avendo parti in movimento, garantisce maggiore affidabilità evitando il distacco del rivestimento protettivo. Il principio di funzionamento del sensore comporta un ulteriore vantaggio, in quanto si rende possibile l'attuazione del dispositivo a qualunque profondità operativa (compatibilmente con il limite prefissato di 50 metri). All'accensione dell'utensile, un'opportuna procedura di calibrazione, attuata mediante il microcontrollore integrato nel case dell'elettronica di controllo motore, consente di rilevare la pressione esterna al fine di garantire un funzionamento costante a qualunque profondità.

Per assicurare una semplice manutenzione del dispositivo, il gruppo anteriore si fissa avvitandolo solamente al gruppo motore senza utilizzare attrezzi. All'interno è presente l'albero che trasmette il moto dal motore al mandrino che viene supportato da due cuscinetti a sfere radiali. L'assieme dell'albero e dei cuscinetti, è tenuto in posizione da una serie di anelli seeger. La tenuta dinamica è posizionata all'estremità del corpo per interferenza. Al fine di garantire una perfetta tenuta, è richiesta la rettifica della porzione di albero su cui va ad agire l'anello di tenuta radiale. Per semplificare la

realizzazione ed il controllo dei componenti, senza pregiudicare il corretto funzionamento del dispositivo, l'albero di uscita è collegato all'albero motore da un giunto flessibile (Fig. 4.7). Tale giunto è in grado di compensare disallineamenti trasversali tra gli assi dei due alberi di 1 mm e differenze di inclinazione di 1° dovuti ad imprecisioni di lavorazione, senza provocare deleterie vibrazioni dato l'elevato regime di rotazione (maggiore di 20000 rpm).



Figura 4.7 - Componentistica di trasmissione

4.2.3 Alimentazione e controllo della micro-fresa

La struttura del pacco batteria è composta da un case realizzato per stampa 3D, tale modulo comprende il sistema di attuazione, le batterie al litio e la scheda elettronica di controllo, nonché il sistema di accensione e regolazione (Fig. 4.8).



Figura 4.8 - Pacco batteria ed elettronica

Agendo su di un pomello collegato ad un'asta a tenuta stagna, si accende il dispositivo e si regola la velocità. In particolare, spostando il pomello in senso assiale, si attiva

l'interruttore generale di alimentazione direttamente collegato alle batterie, mentre ruotandolo si agisce su un potenziometro per la regolazione della velocità (Fig. 4.9).



Figura 4.9 - Sistema di accensione e regolazione della velocità

La tenuta dell'intero case è garantita da un o-ring che lavora in senso assiale. La cava è stata opportunamente dimensionata sul case in modo che il tappo possa assicurare la corretta deformazione dell'elemento elastico.

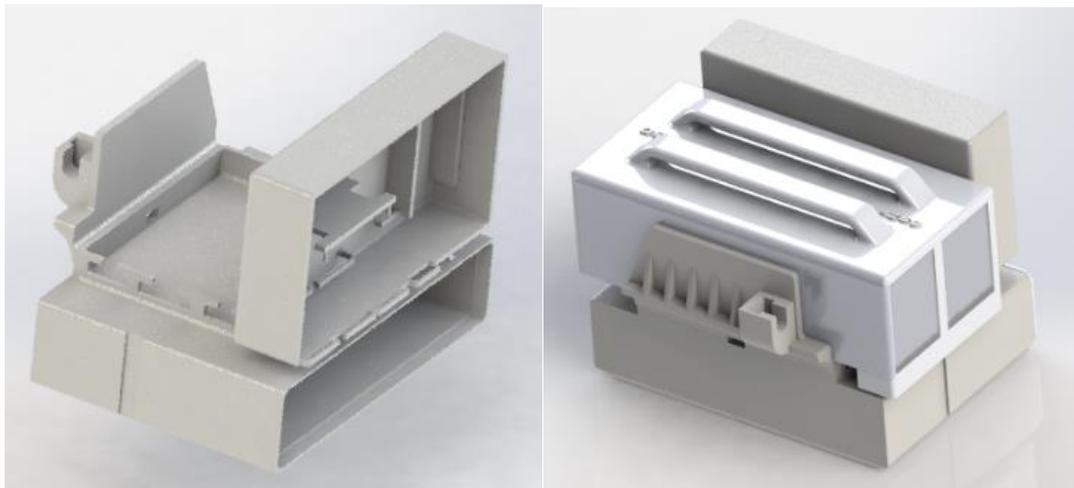


Figura 4.10 - sistema di fissaggio per elettronica e batteria

Tutta l'elettronica di controllo è contenuta all'interno di un apposito modulo (Fig. 4.10). Dati gli ingombri della scheda di controllo motore è stata progettata un'unità di alimentazione composta da due pacchi LiPo 6S da 2700 Mah di opportune dimensioni collegati in parallelo. Sullo stesso modulo trova posto il microcontrollore Arduino Nano utilizzato per abilitare oppure disabilitare il dispositivo.

Di seguito è schematizzato l'insieme delle connessioni alla scheda di controllo motore. Al connettore J1 viene connessa l'alimentazione e il polo negativo è collegato

all'interruttore posizionato sul modulo di controllo. Dalla stessa linea viene prelevata la tensione, opportunamente regolata, che alimenta il microcontrollore Arduino Nano. I connettori J2 e J3 sono utilizzati per connettere il motore Brushless sensored mentre al connettore J6 viene collegato il potenziometro per la regolazione della velocità del rotore. Infine l'ingresso digitale 1 sul connettore J5 viene utilizzato per abilitare oppure disabilitare la scheda (Fig. 4.11). In particolare quando la leva sul manopolo subisce una flessione, il microcontrollore invia una tensione di 5 volts su tale pin al fine di abilitare la scheda e mettere in rotazione il motore alla velocità impostata sul potenziometro.

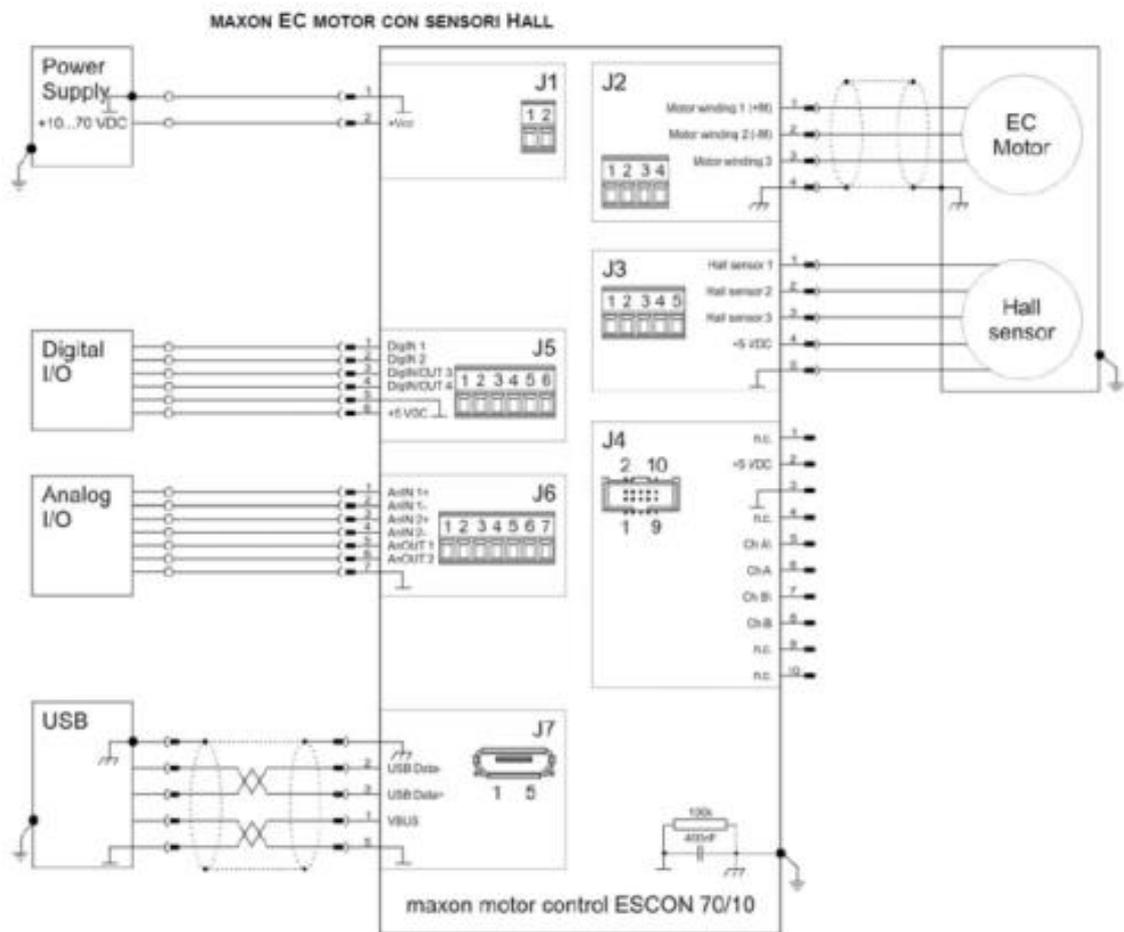


Figura 4.11 - Schematico dell'elettronica della micro-fresa

4.2.4 Realizzazione della micro-fresa

La prototipazione dell'elettroutensile è stata effettuata utilizzando differenti macchine e differenti materiali, in relazione al design e in funzione del componente. Il corpo dello strumento e il case stagno dell'elettronica sono stati realizzati in alluminio, mentre è

stato scelto l'acciaio inox per l'albero di collegamento tra motore e mandrino. Alcuni componenti, dati i requisiti funzionali e di resistenza meccanica, sono stati realizzati attraverso prototipazione rapida. I componenti dalla forma più complessa e quelli di supporto all'elettronica sono stati invece realizzati in Nylon PA6 utilizzando una fresatrice CNC a 4 assi. Relativamente al manipolo portautensili, i tre elementi del case (Corpo anteriore, Corpo motore e Tappo), sono stati realizzati mediante tornitura a partire da un tondo cilindrico in alluminio (Fig. 4.12).



Figura 4.12 - Micro-fresa assemblata e cavo stagno

Sempre utilizzando il tornio sono state create le sedi per gli o-ring di tenuta, le filettature per il collegamento delle parti e le sedi per gli anelli seeger atti a bloccare i componenti interni. Particolare attenzione è stata posta all'effettuazione dell'albero, realizzato in acciaio inox. In particolare, al fine di garantire la tenuta all'acqua ad elevata velocità, è stata necessaria un'elevata finitura superficiale sulla porzione di albero in contatto con l'anello di tenuta a doppio labbro. Il giunto flessibile è stato solamente avvitato all'albero ad un'estremità, mentre, dalla parte opposta, un grano filettato ha permesso il montaggio e la rimozione del mandrino consentendo il bloccaggio dell'albero.

Il contenitore stagno per le batterie e l'elettronica di controllo, composto dal case con relativo tappo, è stato realizzato per stampa 3D in PA200. Il tappo è stato fissato sul case solo avvitandolo. La presenza della maniglia ha facilitato il trasporto dell'intero pacco.



Figura 4.13 - Pacco batteria assemblato

Anche il modulo contenente le batterie e l'elettronica di controllo, data la complessità della geometria e le caratteristiche meccaniche richieste, è stato realizzato mediante prototipazione rapida (Fig. 4.13). Su di esso sono presenti le connessioni per il motore e i relativi sensori e rimangono accessibili i connettori per la ricarica bilanciata delle batterie.

4.2.5 Fase di test sulla micro-fresa

L'utensile è stato sottoposto a test di tenuta in camera idrostatica fino ad una pressione di 4 bar per 60 minuti prima dell'effettivo utilizzo sul campo. I risultati sono stati più che positivi, sia per il manipolo portastrumenti che per il pacco batteria. La sperimentazione sul campo è stata condotta presso il sito archeologico sommerso di Baia (Na). Il dispositivo è stato testato dai reali utilizzatori (restauratori subacquei) su differenti tipologie di strutture che evidenziano la presenza di differenti agenti incrostanti.

Durante le attività è stato possibile utilizzare differenti tipologie di frese, di semplice sostituzione dal momento che l'elettroscopio è dotato di mandrino auto serrante. Una prima fase di pulitura, mediante spazzole in Nylon, ha eliminato dalle superfici gli infestanti vegetali, rivelando le incrostazioni sottostanti (Fig. 4.14). Quindi la micro-fresa è stata utilizzata per la rimozione di agenti incrostanti quali spugne e serpulidi.



Figura 4.14 - Test e operazioni di pulitura

La validità dello strumento proposto è stata confermata anche dai restauratori subacquei poiché i risultati ottenuti hanno mostrato non solo una effettiva rapidità misurata durante le fasi di lavoro, ma anche vantaggi da un punto di vista ergonomico e funzionale, dimostrando come uno strumento del genere, possa consentire una più facile rimozione degli organismi incrostanti non avvalendosi di costosi sistemi idraulici o pneumatici.

4.3 Percussore subacqueo

4.3.1 Progettazione del percussore

Il primo aspetto affrontato, durante la fase di progettazione del percussore subacqueo, è stato quello di individuare le varie tipologie di utensili in commercio che avessero potuto soddisfare i requisiti, facendo le opportune modifiche. Per questo motivo è stato scelto un trapano martello della Bosch modello GBH 18 V-Li, uno dei modelli più compatti e diffusi. Per quanto riguarda la trasmissione del moto rotatorio da parte del motore, una ruota conica riceve il moto dal pignone dello stesso con un angolo di 30°, la trasmissione passa così all'albero su cui è calettata e attraverso un'ulteriore pignone, viene trasferito ad una ruota successiva posizionata sul cilindro in acciaio su cui è alloggiato il mandrino (Fig. 4.15). Il moto alternato di percussione è invece generato da un pistone che, azionato da una forcella calettata sull'albero primario dotato di una pista di sfere lubrificate, agisce su un cuscinetto d'aria presente all'interno del cilindro principale. Con questa tipologia di meccanismo, l'alberino genera allo stesso tempo il

moto di rotazione del mandrino e quello di percussione, attivato in automatico per mezzo della pressione esercitata sul materiale da lavorare.

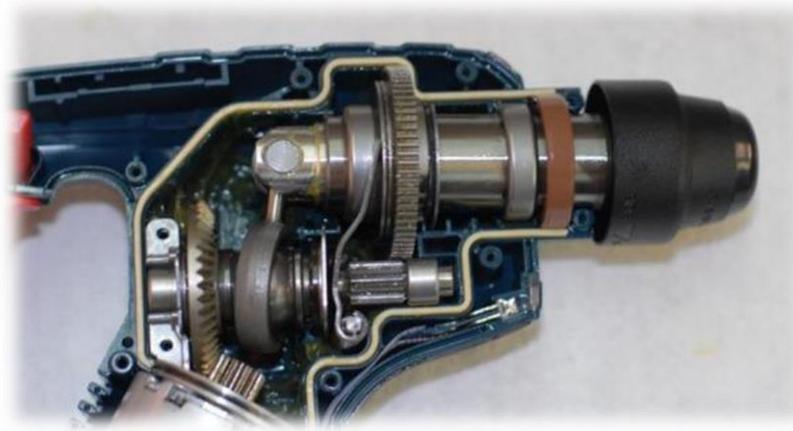


Figura 4.15 - Trapano Bosch BGH

Durante il normale utilizzo, il mandrino viene spinto in direzione assiale premendo all'interno l'intero cilindro, una molla a lamina si oppone a tale spostamento, ed ha anche il compito di fornire una contropinta costante e di azionare o disinserire una frizione utile a disinnescare la percussione. Questo strumento è dotato di mandrino con innesto del tipo SDS-Plus per l'inserimento delle punte senza dover utilizzare la specifica chiave. L'alimentazione del motore elettrico è fornita da una batteria al litio da 2 Ah.

Nella riprogettazione dello strumento, ovviamente è stato necessario tenere in considerazione il diverso ambito di utilizzo, ovvero l'ambiente marino, e anche un eventuale facile impiego da parte dell'operatore. I punti critici, rispetto alla tenuta stagna del dispositivo, sono stati individuati nella parte anteriore soggetta non solo alla moto vibratorio, ma anche alle sollecitazioni esterne. La geometria e gli ingombri esterni dello strumento sono riportati in figura 4.16; in particolare sono di seguito specificati i passi più importanti della progettazione.

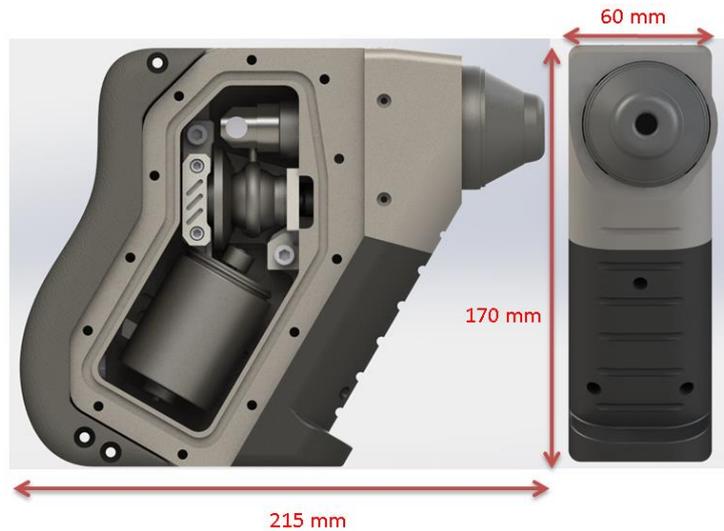


Figura 4.16 - ingombri geometrici dello scalpello

4.3.1.1 Case principale

Per quanto riguarda il design è stato scelto di creare un guscio che potesse seguire, per quanto possibile, i contorni della struttura originale avvolgendo il maggior numero possibile di elementi meccanici facenti parte della trasmissione. Infatti la funzione del case era quella di ospitare l'albero di trasmissione e il motore e fungere da supporto per il case secondario ospitante invece il cilindro pneumatico, (Fig. 4.17) il tutto garantendo la tenuta stagna e la resistenza meccanica.

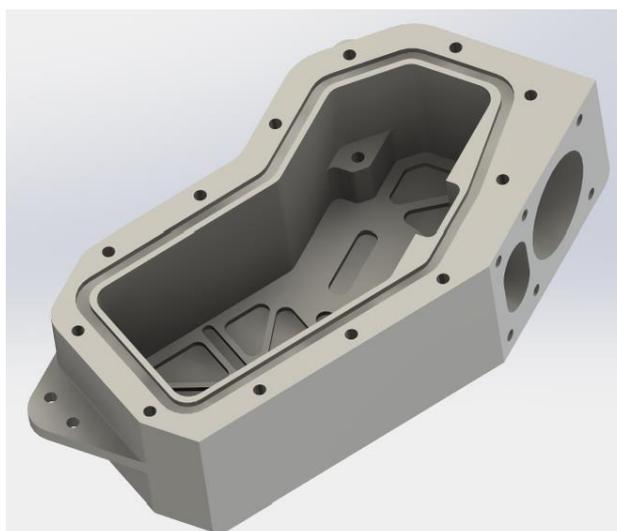


Figura 4.17 - Modello CAD case principale

Come si evince dalla figura, è stato previsto sulla parte anteriore dello dispositivo, un opportuno alloggiamento per il case del cilindro pneumatico e i vari fori per il centraggio e il posizionamento (Fig. 4.18). È presente inoltre una seconda apertura per permettere il montaggio dell'albero primario. Sulla superficie di interfaccia con il tappo è stata ricavata la sede per la tenuta e i fori per le viti di serraggio.

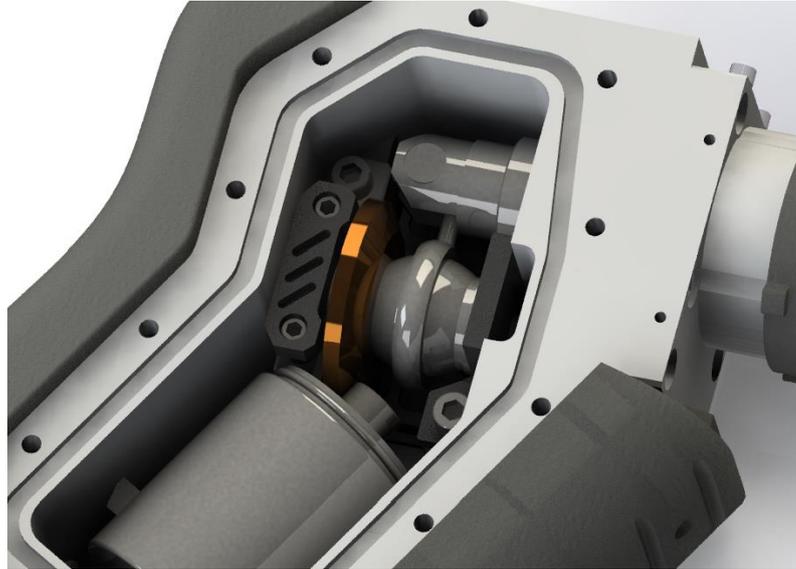


Figura 4.18 - Case principale e meccanica installata

4.3.1.2 Case cilindro pneumatico

Il case del cilindro pneumatico è formato principalmente da una piastra di superficie cilindrica su cui sono stati ricavati le sedi per gli o-ring e i fori per le viti di collegamento al case principale. Essendo necessaria, per il funzionamento del meccanismo, una totale coassialità tra i due case, sono state opportunamente progettate delle superfici per permettere un perfetto centraggio (Fig. 4.19).

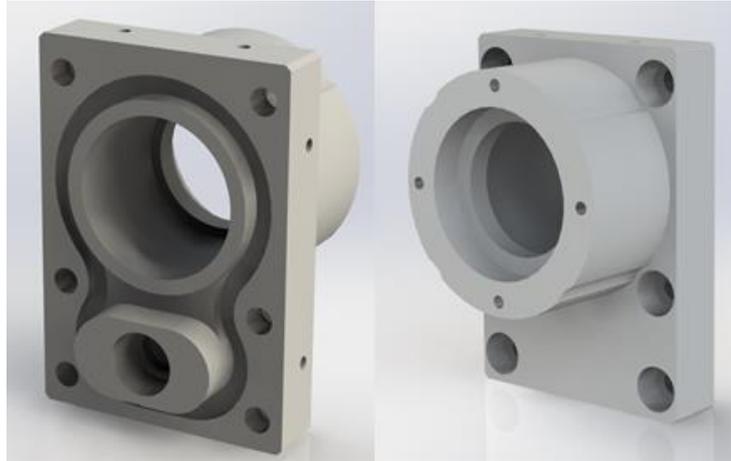


Figura 4.19 - Case cilindro percussore

Il cilindro pneumatico, posto all'interno del foro ricavato da tale piastra, è supportato anteriormente mediante un cuscinetto radiale. A differenza dello strumento originale non è più presente la ruota dentata utile alla trasmissione del moto e per tale motivo sono state ricavate le scanalature destinate ad accogliere due spine in modo da evitare la relativa rotazione del cilindro. Rispetto al modello di serie, e considerato l'uso a cui è destinato il percussore, si è preferito fare in modo che l'azione di percussione fosse permanente così da non dover esercitare la pressione utile per l'innesto della frizione sulle superfici oggetto di restauro. A tale scopo è stata eliminata la molla a lamina di ritorno che disinnestava il moto vibratorio e, allo stesso tempo, fungeva da sistema di smorzamento delle vibrazioni. La mancanza di questo elemento elastico ha reso necessaria la progettazione di un nuovo sistema di smorzamento per assorbire le sollecitazioni agenti sui case. Il cilindro pneumatico risulta perciò libero di scorrere assialmente, anche se in misura limitata, (Fig. 4.20) al fine di garantire il funzionamento del sistema pistone-cilindro. A smorzare le vibrazioni provvedono due rondelle in materiale elastomerico, alloggiato intorno al cilindro, ai lati dell'anello di supporto.

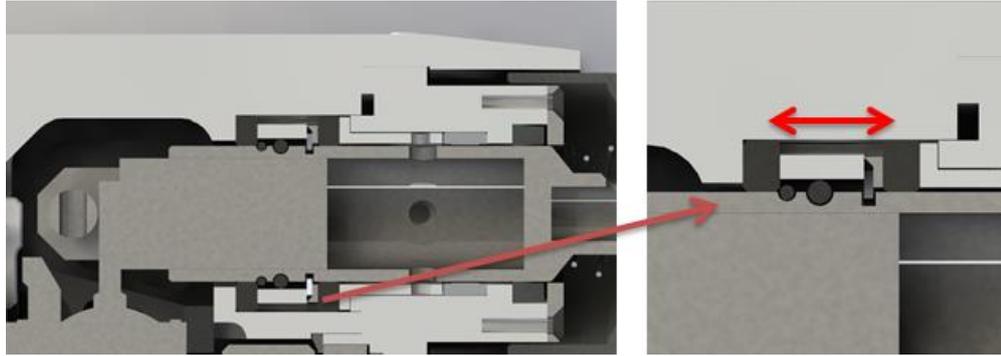


Figura 4.20 - Percorso delle forze provenienti dal cilindro pneumatico

Il gioco che si crea così tra il case e il cilindro rende necessario l'utilizzo di un sistema di tenuta stagna; non essendo tuttavia fissa la posizione tra i due componenti non è stato possibile utilizzare un normale o-ring bensì una tenuta più particolare detta "Balsele" (Fig. 4.20). Questo elemento elastico è composto da un elastomero che agisce come una tenuta dinamica, ed è in grado di sopportare pressioni fino a un massimo di 40 Mpa e velocità di 0,5 m/s, ed utilizzabile per resistere alla pressione anche con spostamenti assiali, che sono effettivamente alla base del dispositivo. In figura 4.21 a , è riportata una sezione di questo particolare tipo di tenuta e la posizione di montaggio nel dispositivo.

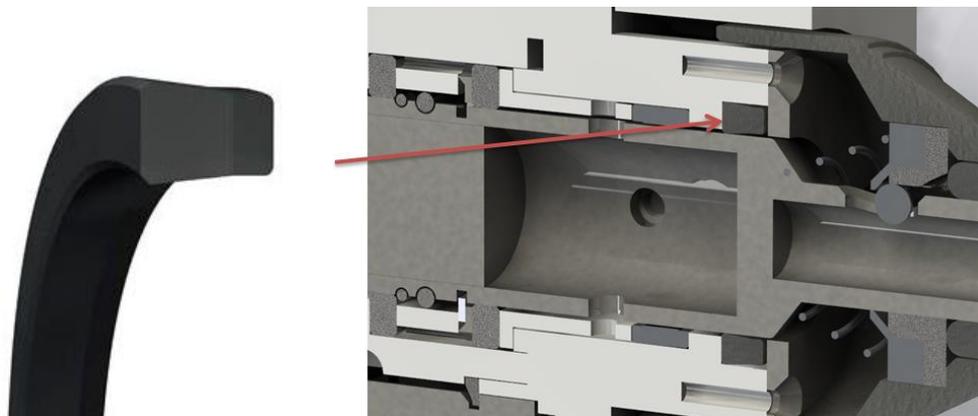


Figura 4.21 - Tenuta stelo Balsele ed alloggiamento nel case cilindro

Il montaggio tra l'assieme principale e quello del cilindro pneumatico, si ottiene accostando i due case ed inserendo il pistone già montato sulla forcella, nel cilindro percussore (Fig. 4.22).

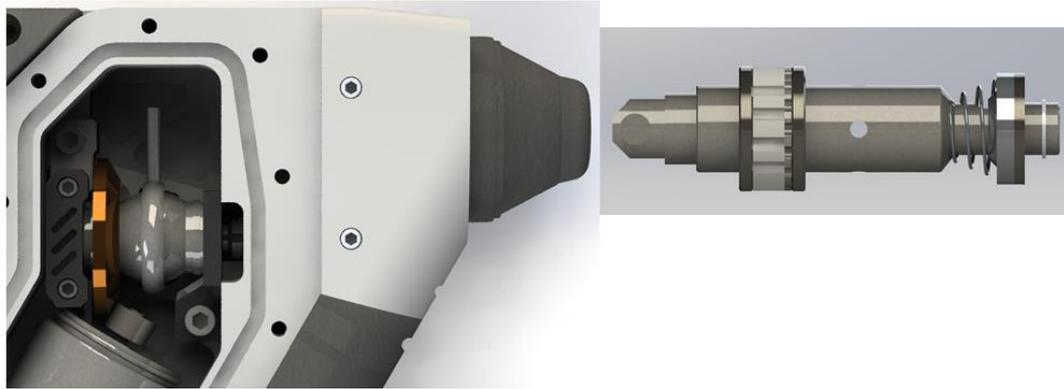


Figura 4.22 - Accoppiamento tra gli assiemi dei due case.

4.3.1.3 Impugnatura del percussore

Allo scopo di garantire un corretto utilizzo dello strumento da parte dell'archeologo subacqueo, è stata creata una coppia di maniglie (anteriore e posteriore) partendo da studi ergonomici che potessero non solo assolvere alle funzioni meccaniche richieste ma utili anche ad aumentare l'ergonomia del sistema. La forma e le dimensioni della maniglia stessa, variano in funzione dell'uso a cui sarà destinata. La capacità di imprimere una forza da parte del polso, è massima quando si trova in posizione neutra e diminuisce quando esso è flessso o esteso. L'impugnatura posteriore presenta quindi forma e dimensioni adatte a favorire l'azione di pressione del percussore contro una superficie ad esso perpendicolare o con una lieve inclinazione. (Fig. 4.23). La parte anteriore dello strumento è caratterizzata da una maniglia direttamente sagomata sulle dimensioni dello strumento, in modo tale da evitare lo scivolamento della mano ed aumentarne il grip.

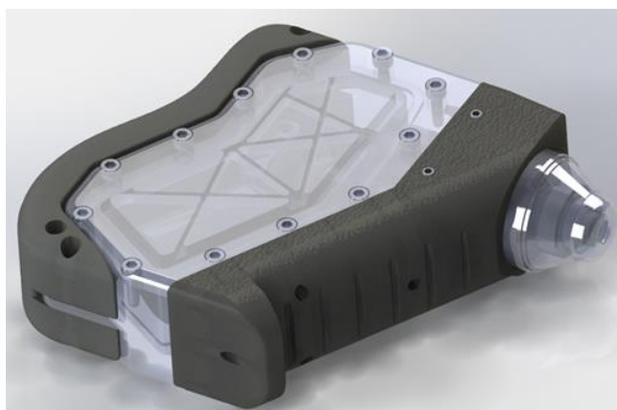


Figura 4.23 - Impugnatura anteriore e posteriore del percussore

4.3.1.4 Case elettronica

Nel percussore subacqueo si è deciso, come visto, di separare il comparto elettronico mantenendo interno alla struttura del percussore solo il motore ed alloggiando in un case indipendente i sistemi di controllo e di alimentazione dello stesso. Il contenitore è costituito da due gusci; all'interno del primo sono ricavate le sedi per l'alloggiamento della scheda elettronica, dell'interruttore e del meccanismo di comando dello stesso e tenuti in posizione tramite delle piastrine di forma opportuna (Fig. 4.24). È contenuta inoltre la batteria, bloccata da un supporto. Sullo stesso elemento è presente il foro per il connettore che conduce i cavi al percussore e la sede per l'inserimento dell'O-ring. Il secondo guscio chiude ermeticamente la struttura e funge esclusivamente da tappo.

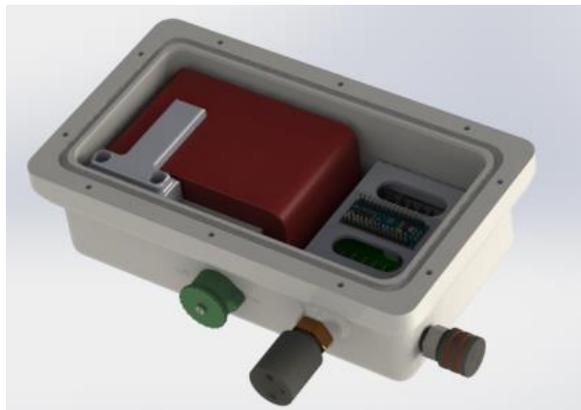


Figura 4.24 - Case elettronica e alimentazione del percussore

Per quanto riguarda il funzionamento elettronico del sistema (Fig. 4.25), ne è riportata in figura una rappresentazione schematica:

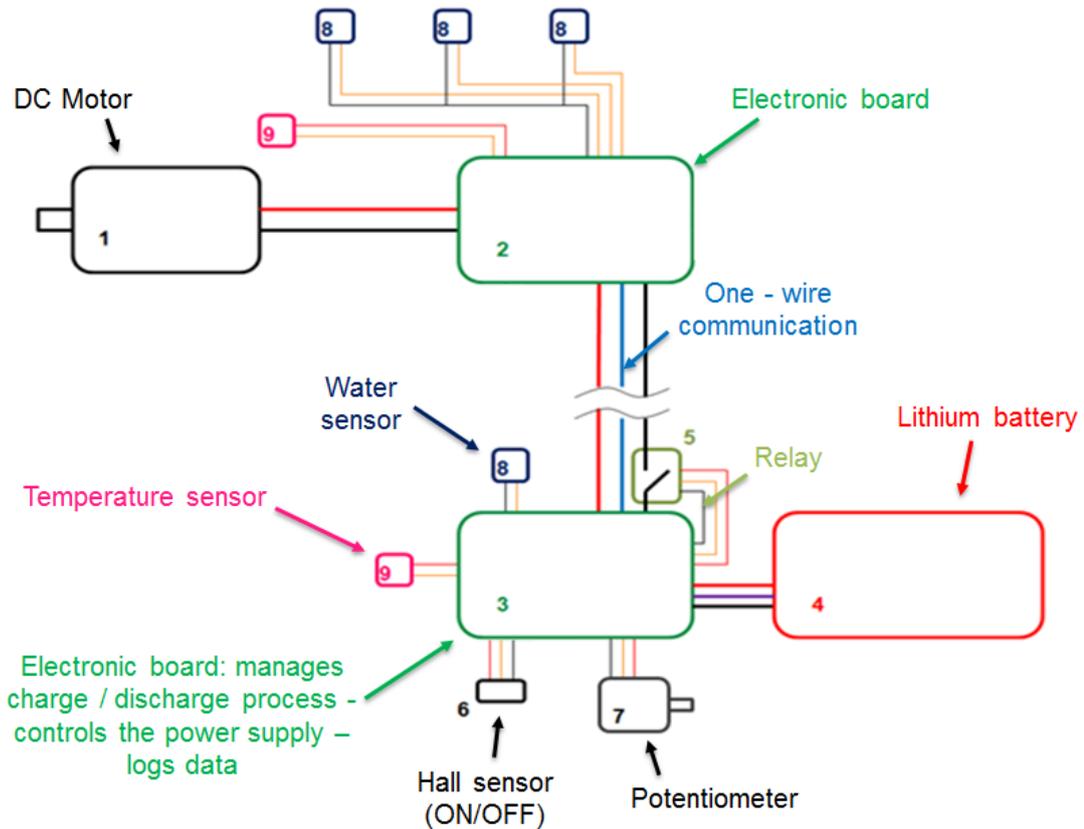


Figura 4.25 - Schema di gestione elettronica

Il sistema a percussione è azionato da un motore elettrico DC Brushed (1), alimentato da una batteria da 7,4V al litio da 10 Ah (4). Tra il motore e la batteria si frappongono due schede elettroniche, in comunicazione tra loro: la (3) in particolar modo, inserita nel pacco batteria, oltre a gestire il processo di carica e scarica delle celle al litio, permette il controllo della potenza erogata attraverso una modulazione a larghezza di impulso.

Il sistema di attuazione è composto da un sensore Hall analogico (6) e da un cinematisimo che regola la relativa posizione di un magnete permanente rispetto ad esso. Variando la loro distanza si modifica il campo magnetico rilevato e, conseguentemente, la tensione letta dalla scheda di controllo. Pertanto, impostando un opportuno valore di soglia, è possibile avviare o fermare la percussione. Tale soluzione è stata preferita poiché, collocando il sensore dentro l'involucro stagno delle batterie, in assenza di connessioni fisiche con l'esterno, si riduce il rischio che possa inserirsi acqua. La regolazione della velocità di rotazione del motore è possibile mediante l'azione esercitata su un potenziometro (7).

Al fine di garantire il corretto funzionamento dello strumento e anche l'incolumità dell'operatore, è stato progettato un apposito sistema di sicurezza sia in corrispondenza del motore che della batteria; infatti sono presenti sensori di presenza acqua (8) e di temperatura (9). I primi permettono di rilevare eventuali infiltrazioni, mentre i secondi monitorano le condizioni termiche del dispositivo durante il suo utilizzo. Nel caso in cui venga rilevata la presenza di acqua o temperature troppo elevate, la scheda elettronica di gestione della batteria (3) agisce su un relè (5), disaccoppiando l'alimentazione fino alla risoluzione della criticità. Inoltre la scheda in questione, effettua un data logging che permette di valutare la natura del problema, qualora questo si dovesse presentare. Il collegamento tra le due schede elettroniche avviene tramite tre cavi: due dedicati alla potenza, mentre il terzo stabilisce una comunicazione "one-wire" che permette alle due schede di dialogare; in questo modo la scheda (3) può azionare il relè e registrare i dati anche a partire da quei sensori che, poiché collocati vicino al motore, sono collegati alla scheda (2).

Lungo la connessione tra le due schede vi è un connettore subacqueo che, oltre all'utensile, permette di collegare il pacco batteria ad un carica batterie esterno. In tal modo le celle al litio possono caricarsi senza dover essere necessariamente estratte dal loro alloggiamento.

4.3.2 Realizzazione del percussore

In primo luogo è stata effettuata la produzione di un primo prototipo dello strumento al fine di verificare ingombri, interferenze o eventuali problematiche di montaggio. In particolare, durante la procedura di assemblaggio, nonostante la simulazione al calcolatore evidenziasse l'assenza di interferenze tra i componenti, si è provveduto alla realizzazione dei modelli fisici dei costituenti coinvolti mediante stampa 3D, utilizzando una Makerbot Replicator 2X, basata su tecnologia FDM (Fig. 4.26).

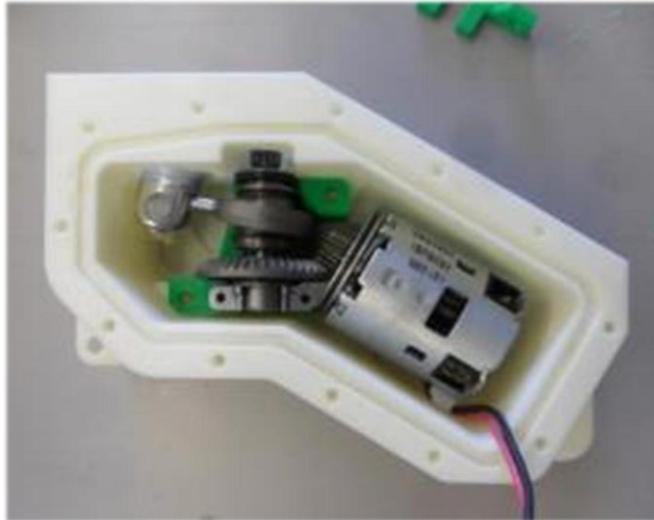


Figura 4.26 - Prototipo di case principale

È stato così possibile effettuare in poco tempo tutti i test prima descritti, sfruttando appieno le potenzialità della prototipazione rapida. In questa fase è stata verificata e ottimizzata la procedura di assemblaggio delle varie parti, sia sul pacco batteria che sul corpo principale. In figura 4.27 è mostrato il corpo di trasmissione del moto alternato con il suo supporto realizzato in stampa 3D.



Figura 4.27 - Sistema di trasmissione del moto

La fase successiva, ha riguardato la creazione del “prototipo funzionale” del cesello elettrico. Il dimensionamento strutturale è stato fatto per poter permettere il funzionamento ottimale del tool a 50 metri di profondità. Le componenti strutturali del corpo principale dell’utensile, sono state realizzate mediante fresatura CNC a 4 assi, partendo da un blocco di resina acetica POM-C (Delrin), il quale soddisfa i requisiti di

resistenza strutturale (Fig. 4.28). Tale materiale inoltre, si adatta perfettamente all'utilizzo in ambiente sommerso.



Figura 4.28 - Realizzazione CNC del case principale

Tutte le componenti interne di supporto agli organi di trasmissione ed al cilindro pneumatico, la cui realizzazione, data la complessità della forma, avrebbe richiesto tempi e costi elevati a differenza dei processi tradizionali per asportazione di truciolo, sono stati realizzati mediante sinterizzazione di polveri di nylon utilizzando la stampante 3D EOS Formiga P110. Le analisi e le prove sperimentali hanno mostrato come i componenti realizzati mediante sinterizzazione, assolvono egregiamente al compito per cui sono stati progettati. A titolo di esempio sono mostrati alcuni dei componenti realizzati mediante sinterizzazione e il pacco batteria dello strumento, con in evidenza i passanti per poter agganciare il pacco direttamente alla cintura del sommozzatore (Fig. 4.29).

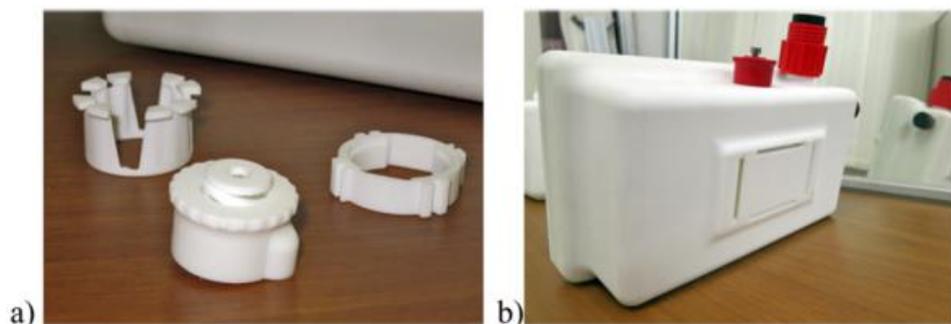


Figura 4.29 - Componenti percussore (a), case alimentazione (b)

Il pacco batteria è stato fabbricato interamente mediante sinterizzazione laser di polveri in Nylon. Tale tecnica di lavorazione ha consentito di ottimizzare la disposizione

degli elementi costituenti l'elettronica riducendo al minimo il numero di componenti da realizzare. Il case è stato trattato con una vernice poliuretanica bicomponente al fine di saturare ogni poro presente sulla superficie del componente realizzato mediante sinterizzazione. Tale trattamento garantisce la tenuta fino ad una pressione di 5 bar in immersione prolungata. La figura mostra l'esploso del corpo principale dello strumento, (Fig. 4.30)



Figura 4.30 - Esploso percussore

la fig. 4.31 mostra l'utensile completo di pacco batterie.



Figura 4.31 - Percussore assemblato con spatola inox

4.3.3 Fase di test sul percussore

In primo luogo il dispositivo è stato testato in camera idrostatica ad una pressione di 5 bar per le verifiche strutturali e sottoposto ad una serie di test di laboratorio al fine di

controllare i vari sistemi di sicurezza. In particolare è stato comprovato sperimentalmente come la scelta di alimentare il motore a 7.4V consenta di mantenere una temperatura inferiore ai 50 °C dopo un'ora di funzionamento continuo, evitando l'utilizzo di un dissipatore oppure di materiali differenti per il case.



Figura 4.32 - Test in mare e operazioni di pulitura

Il test sul campo del dispositivo (Fig. 4.32) è stato condotto ancora una volta presso il parco archeologico sommerso di Baia (NA). Le prove sperimentali hanno evidenziato la grande potenza e modulabilità del dispositivo, capace di rimuovere le incrostazioni più tenaci con semplicità senza l'utilizzo dei comuni attrezzi manuali. Il percussore è dotato di spatole in acciaio inox di differente dimensione in modo da poter trattare incrostazioni e superfici differenti. La disposizione delle impugnature frontali e la possibilità di poter montare differenti impugnature posteriori, ha consentito ai restauratori subacquei di utilizzare il dispositivo su varie superfici, dal momento che è possibile afferrarlo in diverse posizioni. Al termine dell'attività di sperimentazione, è stato possibile verificare l'assenza di infiltrazioni e usure anomale della varie parti.

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi descrive lo sviluppo prototipale di diversi dispositivi subacquei da utilizzare nel campo della salvaguardia dei beni naturalistici o dell'industria off-shore. Tutti i dispositivi descritti risultano utili per semplificare e supportare il lavoro in situ sia dei ricercatori che dei restauratori e nascono dall'analisi delle esigenze specifiche che sono state evidenziate a partire da alcuni progetti attivati presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica e Gestionale dell'Università della Calabria.

Nel caso della mano robotica, il risultato raggiunto con il lavoro di tesi ha permesso di raggiungere risultati molto interessanti nella fase di test con il braccio robotico dell'AUV Girona 500 ed evitando, in alcuni casi, anche il diretto impiego di operatori umani. La novità del prototipo realizzato è stata sicuramente quella di poter utilizzare una mano robotica con caratteristiche antropomorfe, avente perciò un palmo e tre dita attuabili singolarmente, in grado di lavorare anche a profondità elevate. La semplicità costruttiva e il potenziale basso costo di realizzazione, ne fanno un prodotto versatile in quanto compatibile con la gran parte dei bracci robotici di media dimensione. È stata curata non solo la realizzazione meccanica, ma anche la progettazione software ed elettronica, rendendo il dispositivo elettrico completamente indipendente per quanto riguarda l'alimentazione.

Per quanto riguarda il braccio robotico, sono state effettuate una serie di modifiche al manipolatore originale del ROV Pegaso, in modo tale da renderlo idoneo alle operazioni di pulizia subacquea delle strutture archeologiche sommerse necessarie per il progetto COMAS. La trasformazione meccanica del braccio è stata effettuata in modo meticoloso ed ha richiesto una lunga fase durante la quale è stata indispensabile una nuova progettazione di alcuni componenti, come ad esempio le piastre del link

centrale e quella che serve da supporto alla struttura dell'end-effector. Una progettazione ex-novo è invece stata eseguita per il sistema di movimentazione dell'estremità del braccio; in particolare per quanto riguarda l'ultimo link, è stata portata a termine la definizione del cinematismo di un sistema pan tilt in maniera tale da avere una corsa sufficientemente ampia, considerando lo scarso spostamento reso disponibile dal pistone dell'attuatore originale. Fondamentale è stato, inoltre, lo sviluppo dei sistemi di supporto e di protezione per gli ingranaggi e per gli encoder che sono stati, in alcuni casi, marinizzati ed utilizzati per monitorare, in maniera precisa, le posizioni assunte da ogni parte del braccio robotico durante le diverse fasi di lavoro. Per rendere lo strumento effettivamente fruibile sul campo, è stata altresì ideata e realizzata una spazzola robotica motorizzata in grado di compiere la vera e propria operazione di pulitura effettuata mantenendo sempre il controllo attivo sulle potenze e le forze scambiate.

L'ultimo caso studio presentato è relativo all'ideazione e alla costruzione di un percussore subacqueo e di una microfresa, adatti alla rimozione delle incrostazioni e delle impurità presenti sui manufatti sommersi. In questo caso, per entrambi i dispositivi, la fase di progettazione ha avuto come scopo primario quello di concepire elettrotensili capaci di operare in ambiente marino, prevedendo quindi sistemi statici e dinamici di tenuta stagna, capaci di operare in condizioni particolarmente gravose quali la rotazione ad elevata velocità e la percussione. La resistenza meccanica dei tool, è stata adeguata agli scenari di utilizzo, dotandoli per di più di ingombri limitati per garantire la corretta ergonomia.

Per la realizzazione di tutti i componenti dei casi oggetto di studio e proposti in questa tesi, è stata adoperata principalmente la stampa 3D. Potendo svincolarsi dai limiti tecnologici tipici della progettazione sottrattiva e della realizzazione alle macchine utensili, è stato possibile basare il design sull'effettiva funzionalità degli strumenti. Pur avvalendosi dell'utilizzo di diverse tecnologie (FDM, SLS, DMLS) e diverse stampanti, durante la creazione dei prototipi, il fattore comune è stato quello di garantire in poco tempo la produzione di pezzi altamente tecnologici e con un design particolarmente finalizzato all'efficienza, tutte caratteristiche peculiari della prototipazione rapida e della fabbricazione additiva. Allorquando per la fabbricazione dei componenti non è

stato effettivamente conveniente o necessario utilizzare tecnologie sofisticate, sono state impiegate macchine a controllo numerico. In particolare. Più dell'80% della costruzione di tutti i prototipi è stata effettuata nei laboratori dell'Università della Calabria. Le fasi di test realizzate hanno confermato per tutti i dispositivi l'effettiva validità della progettazione, anche se in taluni casi, effettuando diversi esperimenti intermedi, è stato opportuno apportare modifiche in corsa d'opera senza che questi determinassero uno stravolgimento dell'idea iniziale, ma piuttosto miglioramenti utili a garantire il corretto funzionamento dei prototipi.

Appendice A

Risultati delle prove di caratterizzazione della mano robotica

Prova N°1		
Diametro (mm)	Peso (g)	Esito della prova
	Corrente assorbita (A)	Commenti
63	585	Positivo
	1	
63	790	Positivo
	1	ingombro massimo nel cilindro
63	1078	Positivo
	1,4	
63	1678	Positivo
	1,6	
63	2248	Positivo
	2	
63	3223	Positivo
	2,2	limite massimo di peso
80	1065	Positivo
	1	
80	1075	Positivo
	1	ingombro massimo nel cilindro
80	1564	Positivo
	2	
80	2039	Positivo
	2,1	
80	2347	Positivo
	2,2	limite massimo di peso
80	2529	Negativo
	/	
100	1805	Positivo
	1,6	
100	1555	Positivo
	1,4	
100	2108	Positivo
	1,6	
100	3083	Negativo

	/	
100	2603	Negativo
	/	
100	1823	Positivo
	1,5	
100	2548	Positivo
	2	limite massimo di peso
100	2356	Positivo
	1,8	
125	2094	Positivo
	1,6	
125	2314	Positivo
	1,6	
125	2584	Positivo
	1,6	
125	3576	Negativo
	/	
125	2700	Positivo
	2,1	limite massimo di peso
125	2546	Positivo
	2	
125	2341	Positivo
	2,1	
160	1800	Negativo
	/	la mano non ha presa sul cilindro
160	3400	Negativo
	/	la mano non ha presa sul cilindro

Tabella 1 – Prova di carico N°1

Prova N°2		
Diametro (mm)	Peso (g)	Esito della prova
	Corrente assorbita (A)	Commenti
63	765	Positivo
	1,1	
63	1050	Positivo
	1,3	
63	1540	Positivo
	1,6	
63	2562	Positivo
	2	
63	3070	Positivo
	2,2	limite massimo di peso

80	980	Positivo
	1	
80	1265	Positivo
	1	
80	1465	Positivo
	1,8	
80	1768	Positivo
	2,1	
80	2510	Positivo
	2,2	limite massimo di peso
80	2710	Negativo
	/	
100	2050	Positivo
	1,9	
100	2320	Positivo
	2,1	
100	2355	Positivo
	2,1	
100	3042	Negativo
	/	
100	1805	Positivo
	1,5	
100	2575	Positivo
	2	limite massimo di peso
125	2014	Positivo
	1,6	
125	2314	Positivo
	1,7	
125	2584	Positivo
	1,8	
125	3476	Negativo
	/	
125	2700	Positivo
	2,1	limite massimo di peso
125	2546	Positivo
	1,8	
160	1200	Negativo
	/	la mano non ha presa sul cilindro
160	2455	Negativo
	/	la mano non ha presa sul cilindro

Tabella 2 – Prova di carico N°2

Codice di programmazione Arduino e C++ per la mano robotica

- **MOVIMENTO SERVOMOTORI**

```
#include <Servo.h>

int MIN_ANGLE = 20; // Min servo angle
int MAX_ANGLE = 120; // Max servo angle
int START_POINT = 80; // Apertura della mano iniziale (Lo fa quando arduino viene
alimentato, o quando da software viene premuto il tasto reset)

float current1 = 0;
float current2 = 0;
float current3 = 0;
bool stop_servo_1 = false;
bool stop_servo_2 = false;
bool stop_servo_3 = false;

// Define servos
Servo myservo1;
Servo myservo2;
Servo myservo3;

// Define current angle servo
int angle1;
int angle2;
int angle3;

// Define initial status of servos
boolean servo1_move_inc = false;
boolean servo1_move_dec = false;
boolean servo2_move_inc = false;
boolean servo2_move_dec = false;
boolean servo3_move_inc = false;
boolean servo3_move_dec = false;

// Define time delay of every degree of rotation (time in millis)
int delayTime = 15;

void setup() {

  // Set Serial baudrate
  Serial.begin(9600);
  Serial3.begin(9600);

  // Attach servos
  myservo1.attach(2); // KEYS: Q/A --> current3 OK
  myservo2.attach(4); // KEYS: W/S --> current1 OK
  myservo3.attach(5); // KEYS: E/D --> current2 OK

  pinMode(8, INPUT); // sets the digital pin as output
  pinMode(9, INPUT); // sets the digital pin as output OK
  pinMode(10, INPUT); // sets the digital pin as output

  reset();
}

void loop() {

  // =====
  // ===== READ STOP SIGNALS =====
  // =====
  stop_servo_1 = digitalRead(10); // OK
  stop_servo_2 = digitalRead(8); // OK
  stop_servo_3 = digitalRead(9); // OK

  //Serial.println(String(stop_servo1)+String(",")+String(stop_servo2)+String(",")+String(
  stop_servo3));

  // Define string command
  String cmd = "";

  if(Serial.available() > 0)
```

```

{
  // =====
  // ===== READ COMMAND STRING =====
  // =====
  cmd = Serial.readStringUntil('\n');

  // =====
  // ===== MAKE CHOICE =====
  // =====
  if(cmd.substring(0,4) == "MOVE")          // From Software
  {
    // Update servos state
    updateServosState(cmd);
  }
  else if(cmd == "RESET")                  // From Software
  {
    // Reset servos
    reset();
  }
}

if(Serial3.available() > 0)
{
  String curr = Serial3.readStringUntil('\n');
  if(curr.substring(0,7) == "CURRENT") // From 2nd Arduino
  {
    // Update current values
    updateCurrent(curr);
  }
}

// =====
// ===== MOVE SERVOS =====
// =====
moveServos();

// =====
// ===== SEND CURRENT DATA ANGLES =====
// =====
sendCurrentDataInfo();
}

void sendCurrentDataInfo()
{
  //=====
  //===== Send to client data nformations =====
  //=====

  // Format: INFO:angle1,angle2,angle3,tension1,tension2,tension3
  String to_software = String("INFO:") + String(angle1 - MIN_ANGLE) + String(",") +
    String(angle2 - MIN_ANGLE) + String(",") +
    String(MAX_ANGLE - angle3) + String(",") +
    String(current1) + String(",") +
    String(current2) + String(",") +
    String(current3);

  Serial.println(to_software);
  //=====
  //=====
}

void updateServosState(String command)
{
  // =====
  // ===== MAKE A MOVE CHOICE =====
  // =====
  // Check correct size of string FORMAT --> MOVE:0,0,0,0,0,0 ---> Q,W,E,A,S,D ---> 0
  : not pressed, 1 : pressed

  // If bad string
  if(command.length() != 16)
  {
    servo1 move inc = false;
    servo1 move dec = false;
    servo2 move inc = false;
    servo2 move dec = false;
    servo3 move inc = false;
    servo3 move dec = false;
    return;
  }
}

```

```

    }

    if(command[5] == '1')
        servo1_move_inc = true;
    else
        servo1_move_inc = false;

    if(command[7] == '1')
        servo2_move_inc = true;
    else
        servo2_move_inc = false;

    if(command[9] == '1')
        servo3_move_dec = true;
    else
        servo3_move_dec = false;

    if(command[11] == '1')
        servo1_move_dec = true;
    else
        servo1_move_dec = false;

    if(command[13] == '1')
        servo2_move_dec = true;
    else
        servo2_move_dec = false;

    if(command[15] == '1')
        servo3_move_inc = true;
    else
        servo3_move_inc = false;
}

void moveServos()
{
    if(servo1_move_inc)
    {
        if( (angle1 < MAX_ANGLE))
        {
            myservo1.write(++angle1);
            delay(delayTime);
        }
    }

    if(servo1_move_dec)
    {
        if((angle1 > MIN_ANGLE) && (!stop_servo_1) )
        {
            myservo1.write(--angle1);
            delay(delayTime);
        }
    }

    if(servo2_move_inc)
    {
        if((angle2 < MAX_ANGLE))
        {
            myservo2.write(++angle2);
            delay(delayTime);
        }
    }

    if(servo2_move_dec)
    {
        if((angle2 > MIN_ANGLE) && (!stop_servo_2))
        {
            myservo2.write(--angle2);
            delay(delayTime);
        }
    }

    if(servo3_move_inc)
    {
        if((angle3 < MAX_ANGLE) && (!stop_servo_3))
        {
            myservo3.write(++angle3);
            delay(delayTime);
        }
    }
}

```

```

    }
}

if(servo3 move dec)
{
    if((angle3 > MIN_ANGLE))
    {
        myservo3.write(--angle3);
        delay(delayTime);
    }
}

void updateCurrent(String command)
{
    // CURRENT:1.0,1.0,1.0
    String data = command.substring(8,command.length()-1);
    int firstCommaIndex = data.indexOf(',');
    int secondCommaIndex = data.indexOf(',', firstCommaIndex+1);
    int thirdCommaIndex = data.indexOf(',', secondCommaIndex+1);
    String firstValue = data.substring(0, firstCommaIndex);
    String secondValue = data.substring(firstCommaIndex+1, secondCommaIndex);
    String thirdValue = data.substring(secondCommaIndex+1);

    current1 = firstValue.toFloat();
    current2 = secondValue.toFloat();
    current3 = thirdValue.toFloat();
}

void reset()
{
    angle1 = START_POINT;
    angle2 = START_POINT;
    angle3 = ((MAX_ANGLE+MIN_ANGLE)/2) - ( START_POINT - ((MAX_ANGLE+MIN_ANGLE)/2) );
    myservo1.write(angle1);
    myservo2.write(angle2);
    myservo3.write(angle3);
}

```

• **SENSORI DI CORRENTE**

```

//#include <LiquidCrystal.h>
//LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);
int sensore_corrente1=1;
int sensore_corrente2=2;
int sensore_corrente3=3;
int millisecondi_lettura=400; //Tempo in cui acquisisco e medio nella calibrazione
//unsigned long time = millis();
unsigned long i=1;
int k=1; // Contatore per la media dinamica nel while
float a=0;
float b=0;
float c=0;

float CURRENT LIMIT = 3;//3.6; // <===== QUI SI MODIFICA IL LIMITE DI
CORRENTE

void setup()
{
  Serial3.begin(9600);
  //lcd.begin(16, 2);
  //lcd.print("Assorbimento (A)");

  pinMode(8,OUTPUT); // sets the digital pin as output
  pinMode(9, OUTPUT); // sets the digital pin as output
  pinMode(10,OUTPUT); // sets the digital pin as output
}

void loop()
{
  float Vcc=3.3;
  unsigned long limite=millisecondi_lettura*i;

  // Calcolo la media della acquisizioni dinamicamente
  while (millis()<limite) {
    float a_star=analogRead(sensore_corrente1);
    float b_star=analogRead(sensore_corrente2);
    float c_star=analogRead(sensore_corrente3);
    delay(10);
    a=(a*(k-1)+a_star)/k;
    b=(b*(k-1)+b_star)/k;
    c=(c*(k-1)+c_star)/k;
    //Serial.println(c_star);
    k=k+1;
    // time=millis();
  }
  i=i+1;
  k=1;
  //Serial.println(a);
  float Vout1=a*Vcc*0.000977517; // 0.000977517=1/1023
  float Vout2=b*Vcc*0.000977517;
  float Vout3=c*Vcc*0.000977517;
  float x1=Vout1/Vcc;
  float x2=Vout2/Vcc;
  float x3=Vout3/Vcc;
  float corrente1=36.7*x1-28.35;
  float corrente2=36.7*x2-28.55;
  float corrente3=36.7*x3-28.35;
  //lcd.setCursor(0, 1);

  if(corrente1 > CURRENT LIMIT)
  {
    digitalWrite(8,HIGH);
  }
  else
  {
    digitalWrite(8,LOW);
  }
  //delay(50);
  //lcd.print(corrente1);
  //lcd.setCursor(5, 1);
  //lcd.print(corrente2);
  //delay(10);
  //lcd.setCursor(11, 1);

```

```
//lcd.print(corrente3);
//delay(10);

    if(corrente2 > CURRENT_LIMIT)
        digitalWrite(9,HIGH);
    else
        digitalWrite(9,LOW);

    if(corrente3 > CURRENT_LIMIT)
        digitalWrite(10,HIGH);
    else
        digitalWrite(10,LOW);

    //Send data
    Serial3.println(String("CURRENT:") + String(corrente1) + String(",") +
String(corrente2) + String(",") + String(corrente3) + String("\n"));
}
```

• DEFINIZIONE INTERFACCIA GRAFICA

```

#include "Connection.h"

/* KEYBOARD KEYS */
#define Q_KEY 0x51
#define A_KEY 0x41
#define W_KEY 0x57
#define S_KEY 0x53
#define E_KEY 0x45
#define D_KEY 0x44

Connection::Connection(void) {}

Connection::~Connection(void) {}

SerialPort* serial_port;
bool Connection::isConnected = 0;
int Connection::current_angle1 = 0;
int Connection::current_angle2 = 0;
int Connection::current_angle3 = 0;
float Connection::current_tension1 = 0;
float Connection::current_tension2 = 0;
float Connection::current_tension3 = 0;
void Connection::keyboardListener()
{
    while(isConnected)
    {
        // FORMAT: MOVE:0,0,0,0,0,0 --> Q,W,E,A,S,D --> 1 = pressed

        bool Q_ = 0, W_ = 0, E_ = 0, A_ = 0, S_ = 0, D_ = 0;

        if(GetKeyState(Q_KEY) & 0x80)
            Q_ = 1;
        if(GetKeyState(W_KEY) & 0x80)
            W_ = 1;
        if(GetKeyState(E_KEY) & 0x80)
            E_ = 1;
        if(GetKeyState(A_KEY) & 0x80)
            A_ = 1;
        if(GetKeyState(S_KEY) & 0x80)
            S_ = 1;
        if(GetKeyState(D_KEY) & 0x80)
            D_ = 1;
        std::stringstream ss;
        ss << "MOVE:" << Q_ << "," << W_ << "," << E_ << "," << A_ << "," << S_ << ","
<< D_ << "\n";
        std::string command = ss.str();

        serial_port->write_some(command);

        Sleep(50);
    }

    serial_port->stop();
}

void Connection::sendResetCommand()
{
    // String -> RESET:angle1,angle2,angle3
    std::string command = "RESET\n";
    serial_port->write_some(command);
}

bool Connection::startConnection(std::string port_name)
{
    serial_port = new SerialPort();
    isConnected = serial_port->start(port_name.c_str(),9600);

    if(!isConnected)
        return false;

    new boost::thread(boost::bind(&Connection::keyboardListener, this));

    return true;
}

```

Appendice B

- **CARATTERISTICHE TECNICHE EOS – PA2200**

2 Technical data

General material properties

Average grain size	ISO 13320-11	56	μm
	Laser diffraction	2.20	mil
Bulk density	EN ISO 60	0.45	g/cm ³
Density of laser-sintered part	EOS method	0.93	g/cm ³
		58	lb/ft ³

Mechanical properties

Tensile modulus	EN ISO 527	1700	MPa
	ASTM D638	247	ksi
Tensile strength	EN ISO 527	48	MPa
	ASTM D638	6962	psi

Material data sheet

Elongation at break	EN ISO 527	24	%
Elongation at break	ASTM D638	24	%
Flexural modulus	EN ISO 178	1500	MPa
	ASTM D790	217	ksi
Flexural strength	EN ISO 178	58	MPa
	ASTM D790	8412	psi
Charpy - Impact strength	EN ISO 179	53	kJ/m ²
Charpy - Notched impact strength	EN ISO 179	4.8	kJ/m ²
Izod - Impact strength	EN ISO 180	32.8	kJ/m ²
Izod - Notched impact strength	EN ISO 180	4.4	kJ/m ²
Ball indentation hardness	EN ISO 2039	78	N/mm ²
Shore D - hardness	ISO 868	75	-
	ASTM D2240	75	-

The mechanical properties depend on the x-, y-, z-position and on the exposure parameters used.

- **CARATTERISTICHE TECNICHE EOS – GP1**

Technical data

General process and geometric data

Minimum recommended layer thickness	20 μm 0.8 mil
Typical achievable part accuracy [1]	
- small parts	$\pm 20 - 50 \mu\text{m}$ 0.8 - 2.0 mil
- large parts [2]	$\pm 0.2 \%$
Min. wall thickness [3]	0.3 - 0.4 mm 0.012 - 0.016 in
Surface roughness	
- after shot-peening	$R_a 2.5 - 4.5 \mu\text{m}$, $R_y 15 - 40 \mu\text{m}$ $R_a 0.1 - 0.2$, $R_y 0.6 - 1.6 \text{ mil}$
- after polishing	R_z up to $< 0.5 \mu\text{m}$ (can be very finely polished)
Volume rate [4]	
- standard parameters (20 μm layers, full density)	2 mm^3/s 0.44 in^3/h
- Inner core parameters (Skin & Core style, full density)	4 mm^3/s 0.88 - 1.1 in^3/h

Material data sheet

Young's modulus	170 \pm 30 GPa (25 \pm 4 msi)	typical 180 GPa (26 msi)
Elongation at break		
- in horizontal direction (XY)	min 25 % typical 31 \pm 5 %	typical 29 %
- in vertical direction (Z)	min 25 % typical 35 \pm 5 %	typical 31 %
Hardness [6]		
- as built	approx. 230 \pm 20 HV1	
- ground & polished [7]	approx. 250 - 400 HV1	

- **DISTINTA BASE SPAZZOLA MOTORIZZATA**

Distinta Base Spazzola Motorizzata					
ITEM	NAME	DESCRIPTION	QTY.	MAKE	BUY
1	ALBERO		1	X	
2	ANELLO CARICA CELLE		1	X	
3	ANELLO CELLE		1	X	
4	ANELLO DI TENUTA	AN. TEN. 15 25 6 ASP	1		X
5	ANELLO TORSIONE		1	X	
6	BASE CASE		1	X	
7	BOCCOLA PERNO		2	X	
8	BOCCOLA PERNO GRANDE		2	X	
9	BOCCOLA PERNO TILT		2	X	
10	BOCCOLA PROLUNGA		2	X	
11	BRONZINA	8x12x6.5	1		X
12	CASE CAVI GRANDE		1	X	
13	CASE CAVI PICCOLO		1	X	
14	CELLA DI CARICO	DS EUROPE BC 302	3		X
15	CONNETTORE 2 PIN (M)	UP01L07M002SBK1Z2ZA	1		X
16	CONNETTORE 9 PIN (M)	UP01L07M009SBK1Z2ZA	2		X
17	CONNETTORE 2 PIN (F)	UR03W07F002SBK1E2NA	1		X
18	CONNETTORE 9 PIN (F)	UR03W07F009SBK1E2NA	2		X
19	CORONA DENTATA 1	Bosch GSR V-LI Prof.	1		X
20	CORONA DENTATA 2	Bosch GSR V-LI Prof.	1		X
21	CORPO ANTERIORE		1	X	
22	CORPO CENTRALE		1	X	
23	CORPO POSTERIORE		1	X	
24	CUSCINETTO	12x28x8	2		X
25	DISTANZIALE CUSCINETTO		1	X	
26	DISTANZIALE POSTERIORE		1	X	
27	DISTAZIALE RIDUTTORE 1		1	X	
28	DISTAZIALE RIDUTTORE 2		1	X	
29	FOTOTRANSISTOR	Vishay TCRT5000	1		X
30	MOTORE	Bosch GSR V-LI Prof.	1		X
31	PASSACAVO	1/2 INCH	3		X
32	PERNO		2	X	
33	PERNO GRANDE		1	X	
34	PERNO TILT		1	X	
35	PIVOT		1	X	
36	PORTATRENO 1	Bosch GSR V-LI Prof.	1		X
37	PORTATRENO 2	Bosch GSR V-LI Prof.	1		X
38	PROLUNGA PISTONE		1	X	
39	RUOTA SATELLITE 1	Bosch GSR V-LI Prof.	4		X
40	RUOTA SATELLITE 2	Bosch GSR V-LI Prof.	5		X

41	SCHEDA MOTORE	SyRen 25	1		X
42	SCHEDA SENSORI		1		X
43	SCHEDA CORRENTE	RobotItaly 582508	1		X
44	SUPPORTO TRANSISTOR		1	X	
45	TAPPO		1	X	
46	TAPPO CASE		1	X	
47	VITE	M3X10	6		X
48	VITE	M3X12	2		X
49	VITE	M3X16	6		X
50	VITE	M4X30	4		X
51	VITE	M4X35	2		X
52	VITE	M5X16	4		X
53	VITE	M6X80	4		X
54	ANELLO SEEGER PER ALBERI	A12(12x1)	1		X
55	ANELLO SEEGER PER ALBERI	A8(8x0.8)	3		X
56	ANELLO SEEGER PER FORI	J50(50x2)	1		X
57	ANELLO SEEGER PER FORI	WA-J43(43x1.75)	1		X
58	O-RING	22x2	1		X
59	O-RING	35x2	1		X
60	O-RING	44x2	1		X
61	O-RING	57x2.5	2		X
62	O-RING	65x2.5	2		X

- PROGETTAZIONE DEI LEVERAGGI SISTEMA PAN TILT

Scenario	Lunghezza perno di tilt [mm]	Distanza assi supporto [mm]	Angolo misurato (deg)		
			P.M.S.	P.M.I.	Totale
1		20,0	-	31,52	31,52
2		20,5	-	31,58	31,58
3		21,0	-	31,63	31,63
4	81	21,5	-	31,67	31,67
5		22,0	-	31,70	31,70
6		22,5	-	31,72	31,72
7		23,0	-	31,73	31,73
8		20,0	-	37,25	37,25
9		20,5	-	37,17	37,17
10		21,0	-	37,09	37,09
11	83	21,5	47,92	37,01	84,92
12		22,0	41,00	36,91	77,91
13		22,5	37,02	36,82	73,84
14		23,0	34,00	36,71	70,71
15		20,0	40,25	43,01	83,26
16		20,5	36,04	42,80	78,83
17		21,0	32,84	42,58	75,43
18	85	21,5	30,22	42,37	72,59
19		22,0	27,98	42,16	70,14
20		22,5	26,02	41,95	67,97
21		23	24,28	41,74	66,01

Riferimenti Bibliografici

Ocean Research

Rendea, F. S., Irvingb, A. D., Lagudic, A., Brunoc, F., Scalised, S., Cappad, P., ... & Ciceroa, A. M. (2015). Pilot Application of 3d Underwater Imaging Techniques for Mapping Posidonia Oceanica (L.) Delile Meadows. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1, 177-181.

Paul, M., Lefebvre, A., Manca, E., & Amos, C. L. (2011). An acoustic method for the remote measurement of seagrass metrics. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 93(1), 68-79.

Campos, R., Garcia, R., Alliez, P., & Yvinec, M. (2014). A surface reconstruction method for in-detail underwater 3D optical mapping. *The International Journal of Robotics Research*.

Biancoa, G., Muzzupappaa, M., Brunoa, F., Garciab, R., & Neumann, L. (2015). a New Color Correction Method for Underwater Imaging. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1, 25-32.

McDonald, Justin I., Grey T. Coupland, and Gary A. Kendrick. "Underwater video as a monitoring tool to detect change in seagrass cover." *Journal of environmental management* 80.2 (2006): 148-155.

Gracias, N., Ridao, P., Garcia, R., Escartin, J., L'Hour, M., Cibecchini, F., ... & Mallios, A. (2013, June). Mapping the Moon: Using a lightweight AUV to survey the site of the 17th century ship 'La Lune'. In *OCEANS-Bergen, 2013 MTS/IEEE* (pp. 1-8). IEEE.

Bowen, A. D., Yoerger, D. R., Taylor, C., McCabe, R., Howland, J., Gomez-Ibanez, D., ... & Jakuba, M. V. (2008). The Nereus hybrid underwater robotic vehicle for global ocean science operations to 11,000 m depth (pp. 1-10). IEEE.

RiverNet project http://cfpub.epa.gov/ncer_abstracts/new/index.cfm/fuseaction/display.abstractDetail/abstract/6221/report/F

Marthiniussen, R., Vestgard, K., Klepaker, R. A., & Storkersen, N. (2004, November). HUGIN-AUV concept and operational experiences to date. In *OCEANS'04. MTS/IEEE TECHNO-OCEAN'04* (Vol. 2, pp. 846-850). IEEE.

Ribas, D., Palomeras, N., Ridao, P., Carreras, M., & Mallios, A. (2012). Girona 500 auv: From survey to intervention. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1(17), 46-53.

Simetti, E., Casalino, G., Torelli, S., Sperindé, A., & Turetta, A. (2014). Floating underwater manipulation: developed control methodology and experimental validation within the TRIDENT project. *Journal of Field Robotics*, 31(3), 364-385.

Ridao, P., Carreras, M., Ribas, D., Sanz, P. J., & Oliver, G. (2014, August). Intervention AUVs: The Next Challenge. In *IFAC world Congress. Keynote in the Marine Robotics Workshop*.

Parco archeologico di Baia - <http://www.parcoarcheologicosommersodibaia.it/>

Underwater drill - <http://www.stanleyhydraulics.com/applications/underwater>

Pivovarov A. - Cleaning of submerged surfaces by discharge of pressurized cavitating fluids - US 7494073 B2

Arm

Marani, G., Choi, S. K., & Yuh, J. (2009). Underwater autonomous manipulation for intervention missions AUVs. *Ocean Engineering*, 36(1), 15-23.

Kajita, H., & Kosuge, K. (1997, September). Force control of robot floating on the water utilizing vehicle restoring force. In *Intelligent Robots and Systems, 1997. IROS'97., Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on* (Vol. 1, pp. 162-167). IEEE.

Casalino, G., Angeletti, D., Bozzo, T., & Marani, G. (2001). Dexterous underwater object manipulation via multi-robot cooperating systems. In *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on* (Vol. 4, pp. 3220-3225). IEEE.

Chiaverini, S., & Sciacivco, L. (1993). The parallel approach to force/position control of robotic manipulators. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 9(4), 361-373.

Rigmaster - <http://www.f-e-t.com/images/uploads/Schilling%20Rigmaster.pdf>

ARM 5E Micro - <http://www.ecagroup.com/en/solutions/arm-5e-micro>

Magnum-5 Mini - <http://www.ise.bc.ca/Magnum-5-mini.html>

HLKEH5 - <http://www.hydro-lek.com/datasheets/HLKEH5.pdf>

Hand

Bemfica, J. R., Melchiorri, C., Moriello, L., Palli, G., & Scarcia, U. (2014, May). A three-fingered cable-driven gripper for underwater applications. In *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on* (pp. 2469-2474). IEEE.

Gad, R. S., Naik, G. M., & Aralgedad, N. (2004). A design of 2-DOF gripper circuit for deep-sea objects. In *Oceans' 04 MTS/IEEE Techno-Ocean'04* (IEEE Cat. No. 04CH37600).

Hdt global-aviabile: <http://www.hdtglobal.com/services/robotics/underwater/>.

Kappassov, Z., Khassanov, Y., Saudabayev, A., Shintemirov, A., & Varol, H. A. (2013, August). Semi-anthropomorphic 3D printed multigrasp hand for industrial and service robots. In *Mechatronics and Automation (ICMA), 2013 IEEE International Conference on* (pp. 1697-1702). IEEE.

Liu, H., Wu, K., Meusel, P., Seitz, N., Hirzinger, G., Jin, M. H., ... & Chen, Z. P. (2008, September). Multisensory five-finger dexterous hand: The DLR/HIT Hand II. In *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 3692-3697). IEEE.

Mouri, T., Kawasaki, H., Yoshikawa, K., Takai, J., & Ito, S. (2002, October). Anthropomorphic robot hand: Gifu hand III. In *Proc. Int. Conf. ICCAS* (pp. 1288-1293).

Meng, Q., Wang, H., Li, P., Wang, L., and He, Z. (2006). Dexterous underwater robot hand: Heu hand ii. In *Mechatronics and Automation, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on*, 1477 –1482.

Robotiq-Adaptive Gripper 2-FINGER model – Aviable:<http://robotiq.com/media/Robotiq-2-Finger-Adaptive-Gripper-Specifications.html>

Schunk. - 2-Finger Parallel Gripper WSG.

Available:<http://mobile.schunkmicrosite.com/en/produkte/produkte/2-fingerparallel-gripper-wsg.html> (April 13).

Sam, R., & Nefti, S. (2008). Design and development of flexible robotic gripper for handling food products. In *2008 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*.

William T. Townsend (2000) The Barrett Hand grasper -*Industrial Robot: An International Journal* - Volume 27.

Sensori di corrente <https://www.pololu.com/file/0J497/ACS711.pdf>

Archeology

Felici, Enrico. *Archeologia subacquea: metodi, tecniche e strumenti*. Ed. Pier Giorgio Monti. Istituto poligrafico e Zecca dello Stato, Libreria dello Stato, 2002.

R. Petriaggi, R. Mancinelli, "An experimental conservation treatment on the mosaic floor and perimeter walls of room n. 1 of the so-called «Villa con ingresso a protiro» in the underwater archaeological park of Baia (Naples)". *Archeologia Maritima Mediterranea*, vol.1, pp. 109-126, 2004

R. Petriaggi, B. Davidde, "The ISCR Project "Resto-ring Underwater": an evaluation of the results after ten years from the beginning". 4th Conference on Preserving Archaeological Remains in Situ, "Conservation and Management of Archaeological Sites", 14, Paris. 2012

Tusa La battaglia delle Egadi <http://www.regione.sicilia.it/beniculturali/archeologiasottomarina/news/rostro.htm>

Bowens, Amanda, ed. Underwater archaeology: the NAS guide to principles and practice. John Wiley & Sons, 2011.

Additive manufacturing

Crump S S. Fused deposition modeling (FDM): putting rapid back into prototyping. In: The 2nd International Conference on Rapid Prototyping. Dayton, Ohio, 1991: 354–357

Jafari M A, Han W, Mohammadi F, Safari A, Danforth S C, Langrana N. A novel system for fused deposition of advanced multiple ceramics. Rapid Prototyping Journal, 2000, 6(3): 161–175

Bellini A, Shor L, Guceri S I. New developments in fused deposition modeling of ceramics. Rapid Prototyping Journal, 2005, 11(4): 214–220

Pham D T, Dimov S, Lacan F. Selective laser sintering: applications and technological capabilities. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 1999, 213(5): 435–449

Osakada K, Shiomi M. Flexible manufacturing of metallic products by selective laser melting of powder. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(11): 1188– 1193

EOS, "Laser Sintering System - EOSINT M 280 Data Sheet," [Online]. Available:
http://www.eos.info/systems_solutions/metal/systems_equipment/eosint_m280. [Accessed 30 March 2014]

Gibson, G. Goenka, R. Narasimhan and N. Bhat, "Design Rules for Additive Manufacture,2010.[Online]
.Available:<http://utwired.engr.utexas.edu/lff/symposium/proceedingsArchive/pubs/Manuscripts/2010/2010-59-Gibson.pdf>.
[Accessed 6 February 2014].

Publicazioni e Atti di Convegno

Spadafora, F., Muzzupappa, M., Bruno, F., Ribas, D., & Ridao, P. (2015). Design and Construction of a Robot Hand Prototype for Underwater Applications. *IFAC-PapersOnLine*, 48(2), 294-299.

Bruno, F., Muzzupappa, M., Gallo, A., Barbieri, L., Galati, D., Spadafora, F., ... & Petriaggi, R. (2015, May). Electromechanical devices for supporting the restoration of underwater archaeological artefacts. In *OCEANS 2015-Genova*(pp. 1-5). IEEE.

Bruno, F., Muzzupappa, M., Gallo, A., Barbieri, L., Galati, D., Spadafora, F., ... & Petriaggi, R. (2015, May). Electromechanical devices for supporting the restoration of underwater archaeological artefacts. In *OCEANS 2015-Genova*(pp. 1-5). IEEE.

Bruno, F., Muzzupappa, M., Lagudi, A., Gallo, A., Spadafora, F., Ritacco, G., ... & Di Stefano, G. (2015, May). A ROV for supporting the planned maintenance in underwater archaeological sites. In *OCEANS 2015-Genova* (pp. 1-7). IEEE.

Spadafora, F., Galati, D., Gallo, A., Bruno, F., Muzzupappa, M. (2015, June). Design and construction of an electric chisel for underwater applications. *XXV international conference on graphics engineering*, San Sebastian.

Spadafora, F., Galati, D., Gallo, A., Bruno, F., Muzzupappa, M. Design and construction of an electric chisel for underwater applications. *Dyna* | Novembre - Dicembre 2015 | Vol. 90 n°6

D. Youakim, P. Ridao, N. Palomeras, F. Spadafora, D. Ribas and M. Muzzupappa , Autonomous Underwater Free Floating Intervention, *The IEEE Robotics and Automation Magazine*, in press.