



Università Politecnica delle Marche

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

Ottimizzazione Strutturale di un Giunto Sferico Riconfigurabile

Structural Optimization of a Reconfigurable Spherical Joint

Tesi di Laurea:

Alessandro Falappa

Relatore:

Prof. Matteo Claudio Palpacelli



Università Politecnica delle Marche

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

Ottimizzazione Strutturale di un Giunto Sferico Riconfigurabile

Structural Optimization of a Reconfigurable Spherical Joint

Tesi di Laurea:

Alessandro Falappa

Relatore:

Prof. Matteo Claudio Palpacelli

A.A.-2019/2020

Università Politecnica delle Marche

Facoltà di Ingegneria

Via Brezze Bianche – 60131 Ancona (AN), Italy

Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutti coloro che hanno contribuito anche solo in parte al progresso ed alla conclusione di questo percorso di studi e che con il loro sapere ed esperienza hanno saputo guidarmi fino ad oggi; a loro va la mia più viva gratitudine ed a me soltanto va la responsabilità di ogni errore contenuto in questa tesi.

Ringrazio in primo luogo il mio relatore: il Professor Matteo Claudio Palpacelli che con la sua disponibilità mi ha premurosamente guidato nella parte conclusiva di questo percorso accademico.

Continuo con il ringraziare Stefano Brillarelli che mi ha seguito passo passo durante ogni fase del tirocinio e che con la sua pazienza ha contribuito in maniera decisiva alla sua buona conclusione.

Un ulteriore e doveroso ringraziamento va ai miei compagni di studio: Andrea, Tommaso, Marco, Niccolò, Zaccaria, Valentino, Fabio ed Antonio che in questi anni passati assieme mi sono stati costantemente a fianco.

Concludo con il ringraziare i miei carissimi amici del gruppo Avis Giovani di Filottrano che in questo ultimo anno mi hanno spinto sempre più a dare il meglio di me e primi in ordine di importanza ringrazio i miei genitori Giordano e Valentina ed i miei fratelli Federico e Lorenzo che costantemente mi sopportano, mi supportano e a cui dedico con vivissima passione questo lavoro.

Alessandro Falappa

Indice

Ringraziamenti.....	v
1. Introduzione.....	9
2. Cenni sulla stampa 3D.....	11
3. PKMs	15
4. Descrizione del Robot e primi accenni sul giunto	17
5. Design concettuale del giunto riconfigurabile originale	21
6. Design funzionale del giunto riconfigurabile originale	23
7. Difetti del Giunto	27
7.0.1. Generalità sulla natura dei difetti	27
7.1. Difetto 1: slittamento degli alberi di comando	28
7.1.1. Equazioni per il calcolo dimensionale dei calettamenti con forza	34
7.2. Difetto 2: interruzione della catena cinematica del cursore	36
7.2.1. Dimensionamento della molla.....	42
7.3. Difetto 3: eccessiva complessità e numero di componenti di telaio e cursore.....	44
7.3.1. Sequenza di montaggio del nuovo telaio	50
7.4. Difetto 4: difficoltà di innesto del cursore	51
8. Sequenza di assemblaggio del giunto modificato.....	53
9. Sviluppi futuri.....	63
9.1. Irreversibilità dell'elica.....	66
9.2. Difetto del cursore a denti mobili.....	67
10. Conclusioni.....	69
11. Bibliografia.....	71

1. Introduzione

“La natura è una macchina che si è fatta da sola, più perfettamente automatizzata di qualsiasi congegno automatico. Creare qualcosa ad immagine della natura significa creare una macchina, e fu con l’apprendere i meccanismi interni della natura che l’uomo divenne un costruttore di macchine.”

Eric Hoffer

Lo scopo di questa tesi è quello di racchiudere in queste poche pagine i risultati dei mesi di lavoro del tirocinio conclusivo del corso di laurea triennale in ingegneria meccanica.

Il soggetto della tesi è un giunto sferico riconfigurabile, un meccanismo che permette il collegamento e la trasmissione del moto tra due organi meccanici bloccando ogni tipo di traslazione pur mantenendo la possibilità tra i due di ruotare grazie ad un motore, una funzione aggiuntiva gli permette inoltre di cambiare la sua mobilità tramite un apposito azionamento.

In particolare, il giunto in questione è realizzato collegando in serie tre cerniere i cui assi, nella configurazione di partenza, rimangono tra loro ortogonali; grazie all’ausilio di un apposito meccanismo è possibile riconfigurare il giunto scollegando il motore da una cerniera e collegarlo ad un’altra.

Lo scopo della tesi è quello di trovare delle potenziali soluzioni atte a migliorare il prototipo del giunto progettato per movimentare una piattaforma che rientra nella categoria dei manipolatori definiti come PKMs.

In questa tesi verranno descritti, dopo aver introdotto i design del manipolatore e quello del giunto, i difetti riscontrati sul prototipo e per ogni difetto verranno proposte delle potenziali soluzioni applicate alla geometria, accompagnate dove necessario dalle equazioni che la letteratura ingegneristica normalmente propone al fine di ottenere un miglioramento dei componenti, non solo per ottimizzare il prototipo ma anche per prepararlo alla sua realizzazione definitiva.

Essendo lo scopo della tesi quella di un’ottimizzazione piuttosto che una riprogettazione completa, tutto il lavoro che verrà descritto nelle prossime pagine si baserà sulla filosofia secondo la quale ottimizzando le geometrie già pensate per assolvere ad un determinato ruolo si possa ottenere sia un aumento delle prestazioni fondamentali già soddisfatte sia quelle ancora da soddisfare completamente, senza dover ricorrere ad ulteriori calcoli; proprio per questo le sezioni che contengono le equazioni si limitano a descrivere la sequenza di calcoli necessaria per un’eventuale progettazione “ex novo” piuttosto che analizzare i valori che le geometrie assumono dopo la loro elaborazione.

Inoltre, tutta la minuteria metallica come viti, cuscinetti, seeger ecc. necessari per l’assemblaggio ed il funzionamento, se non interessati dalle modifiche non verranno menzionati.

A fine tesi verranno inoltre proposti due capitoli che si prefiggono di elencare la sequenza di assemblaggio della versione modificata e degli incipit di potenziali miglioramenti che permetterebbero l’utilizzo del giunto anche in condizioni di funzionamento più estese, diverse da quelle previste.

Il lavoro di ottimizzazione strutturale è stato svolto tramite CatiA: un software di manipolazione tridimensionale CAD/CAM molto popolare in ambito ingegneristico e non solo, che grazie ai numerosi pacchetti di lavoro contenuti al suo interno permette di creare e modificare disegni 3D tenendo conto anche della tipologia di processo con cui questi

vengono realizzati (pezzi tradizionali, pezzi ottenuti tramite piegatura di tubi, piegatura di lamiere, taglio di lamiere, assieme saldati, ecc.) e che permette, a modellazione ultimata, di programmare anche le lavorazioni necessarie per realizzare i pezzi.

Il prototipo già esistente di questo giunto è stato realizzato tramite un processo di stampa 3D chiamato stereolitografia ed il materiale utilizzato è una speciale resina fotosensibile che si solidifica grazie alla luce.

2. Cenni sulla stampa 3D

[1]-[2] La stampa 3D consiste in un processo di produzione con metodologia “additiva”: mentre le tecnologie di produzione tradizionali (di tipo sottrattivo) prevedono di ottenere un prodotto lavorato partendo da un blocco di materiale grezzo a cui viene sottratto materiale grazie all’azione di un utensile dotato di taglienti (ad esempio tornitura, fresatura, foratura ecc.) la stampa 3D basa il suo funzionamento sul depositare strati di materiale chiamati layer.

Il vantaggio dell’utilizzo della stampa 3D rispetto alle tecnologie tradizionali sta nella potenzialità di realizzazione di geometrie complesse non realizzabili tradizionalmente, nella mancanza di necessità di avere per ogni macchina un magazzino contenente un particolare utensile per ogni tipo di geometria da produrre o lavorazione da eseguire, la minor quantità di materia prima necessaria per la produzione, l’assenza di scarti di lavorazione, la possibilità di decidere quanta materia prima utilizzare per un dato volume da stampare e la facilità nel padroneggiare questo tipo di tecnologia sempre più user-friendly anche a chi si affaccia al mondo della meccanica per la prima volta; di contro gli svantaggi dell’utilizzo di questa tecnologia sta nella velocità di produzione dei singoli pezzi mediamente più bassa rispetto le tecnologie tradizionali che rende ancora difficilmente proponibile l’utilizzo per le produzioni in serie, la limitata variabilità delle materie prime utilizzabili, le scarse proprietà meccaniche e la gamma di tolleranze geometriche e dimensionali realizzabili che risultano grossolane e che sono alla base di alcuni dei difetti che si manifestano sul prototipo del giunto.

Mentre le tecniche di produzione sottrattiva possono essere sia manuali che computerizzate, quelle additive sono unicamente gestite da software; per la realizzazione di un oggetto con stampa 3D è necessario avere la geometria del pezzo in formato digitale realizzato tramite software CAD e solitamente salvato come file STL ; questo file deve poi essere caricato sul programma che gestisce la stampante e che permette di impostare secondo le necessità i vari parametri di lavoro in particolare lo spessore dei layer e la posizione del componente da realizzare all’interno dello spazio di lavoro della macchina; dopodiché una volta avviato il programma sarà la macchina a portare avanti la lavorazione senza il bisogno di ulteriori operazioni da parte dell’operatore se non a fine esecuzione del programma quando sarà necessario estrarre il pezzo finito ed eseguire le dovute operazioni di post produzione che variano a seconda del tipo stampa.

Il materiale utilizzato per la stampa del giunto è una resina termoplastica con le seguenti caratteristiche meccaniche:

METRIC		
	Green	Postcured
Tensile Properties		
Ultimate Tensile Strength	38 MPa	65 MPa
Young's Modulus	1.6 GPa	2.8 GPa
Elongation at Failure	12%	6.2%
Flexural Properties		
Flexural Modulus	1.25 GPa	2.2 GPa
Impact Properties		
Notched IZOD	16 J/m	25 J/m
Temperature Properties		
Heat deflection temp. @ 264 psi	42.7 °C	58.4 °C
Heat deflection temp. @ 66 psi	49.7 °C	73.1 °C

Con il termine Green si intendono le proprietà della resina a fine stampaggio.

Mentre con il termine postcured si intendono le proprietà ottenute dopo un trattamento di post produzione che prevede la cottura in forno a luce ultravioletta a 60° C per un tempo complessivo di 60 minuti.

Le principali tecnologie di stampa 3D attualmente disponibili sul mercato sono:

1. **FFF – Fused Filament Fabrication:** la materia prima, sottoforma di filamento plastico viene fatto passare attraverso un ugello riscaldato che sciogliendola la deposita o sul piano della macchina (il primo strato) o sui strati già depositati (layer); normalmente la testa della macchina dotata di ugello si muove orizzontalmente così da depositare il materiale, al piano della macchina invece è affidato l'avanzamento verticale che ad ogni layer terminato si abbassa per permettere il deposito di un nuovo strato di materiale; tra tutte, questa tipologia, è la più semplice ed economica, sia le proprietà meccaniche che la qualità superficiale del pezzo risultano scarse in confronto alle altre.
2. **DLP – Digital Light Processing:** in questo caso la materia prima è una resina fotosensibile allo stato liquido contenuta all'interno di una vasca trasparente posta nella parte più bassa della stampante, ad ogni strato, la piattaforma si abbassa in modo che l'ultimo strato depositato entri in contatto con la resina liquida dopodiché un proiettore DLP (sistema di elaborazione digitale della luce) proietta in condizioni di luce inattiva un'immagine del layer che solidifica un nuovo strato di resina; questo sistema è più complesso e costoso del precedente, spesso la resina allo stato liquido risulta tossica e cancerogena, per questo i pezzi stampati necessitano di un attento processo di post produzione prima di poter essere maneggiati in completa sicurezza, sempre rispetto al sistema FFF questo processo a parità di volume stampato risulta più lento, ma la qualità è più elevata e non c'è il rischio del cedimento del materiale.
3. **CJP – Color Jet Printing:** questo è un sistema di stampa professionale che prevede l'utilizzo di due materie prime, la prima in polvere e può essere gesso o plastica, la seconda invece normalmente liquida è il legante, in questo caso il processo di stratificazione dei layer è diviso in due fasi: la prima in cui la macchina deposita un primo strato di polvere che ricopre tutta la superficie utile della macchina poi nella seconda uno strato di legante viene depositato solo dove necessario; a fine processo dalla vasca di stampaggio che risulta piena di polvere di gesso si estrae il pezzo formato dai vari strati di collante che ne hanno definito la forma, il gesso superfluo nella vasca viene poi recuperato e riutilizzato, questa tipologia di stampa non richiede alcun supporto per sostenere gli strati del pezzo considerati a sbalzo in quanto che a sorreggerli c'è il gesso già depositato; il

principale vantaggio di questa tecnologia è l'elevatissima complessità delle forme ottenibili senza deformazioni dovute al cedimento del materiale depositato durante lo stampaggio.

4. **MJP – Multi Jet Printing:** questa tipologia di stampa professionale è simile alla precedente e prevede la deposizione strato per strato di resine plastiche allo stato liquido, fotoindurenti per il corpo del pezzo e di materiale ceroso che funge da supporto (nel caso precedente era il polvere stessa a fare da supporto), in questo caso alla qualità delle forme ottenute si sommano le maggiori proprietà meccaniche delle materie prime utilizzabili che rendono questa tipologia di stampa adatta oltre che alla prototipazione anche alle piccole produzioni.
5. **SLA – Stereolitografia:** la stampa SLA è identica in tutto e per tutto al sistema DLP se non per la fonte luminosa; mentre la DLP sfrutta un proiettore la cui risoluzione è legata alla dimensione ed al numero dei pixel, la stereolitografia non proietta l'immagine della sezione bensì un laser ad alta intensità viene fatto camminare lungo tutta la superficie da solidificare, questo sistema permette la composizione di immagini analogiche piuttosto che digitalizzate, con una risoluzione finale pressoché perfetta, inoltre a pezzo finito la superficie in termini di rugosità ha qualità paragonabile a quella ottenibile per asportazione di truciolo.
6. **SLS – Sinterizzazione Laser Selettiva:** la tecnologia professionale SLS realizza un pezzo attraverso un processo di addizione stratificata, in cui un laser permette di fondere la materia prima (materiale termoplastico) sottoforma di polvere ottenendo così il pezzo tridimensionale; in maniera del tutto simile alla CJP la stampante deposita uno strato sottilissimo di polvere plastica, dopodiché invece di depositare un collante questa polvere viene fusa grazie ad un laser; i vantaggi nell'utilizzo del laser sono legati come per il caso precedente alla possibilità di ottenere immagini analogiche non che qualità superficiali estremamente elevate.
7. **DMP – Direct Metal Printing:** la DMP altro non è che la SLS applicata per la produzione di componenti metallici, il funzionamento è del tutto analogo se non per la materia prima di natura metallica e l'intensità del fascio laser che deve essere in grado di raggiungere le elevate temperature di fusione delle leghe utilizzate; l'utilizzo di questo genere di macchina piuttosto che una più tradizionale ad asportazione di truciolo si ha principalmente quando il metallo utilizzato possiede proprietà meccaniche tali da rendere problematica ogni altro tipo di lavorazione specialmente quando la durezza del metallo comporterebbe un'usura degli utensili elevato, nonostante ciò risulta vantaggiosa anche quando si devono realizzare componenti elaborati in cui i tempi morti dovuti al riposizionamento dei pezzi in una normale macchina CNC è dello stesso ordine di grandezza dei tempi di lavoro.

Queste sono le principali tipologie di stampa 3D, non sono le uniche e non è neanche da escludere che alcune macchine utilizzino dei sistemi combinati di quelle elencate sopra; oggi queste tecnologie prendono sempre più piede nel mondo della meccanica e nonostante ancora è difficile pensare di utilizzarle al di fuori del campo della prototipazione il loro veloce sviluppo porterà ben presto a rivoluzionare i sistemi di produzione tradizionale portando numerosi benefici in questo settore.

3. PKMs

[3]I manipolatori riconfigurabili possono rappresentare una risposta alla richiesta di flessibilità nell'industria manifatturiera moderna.

Un manipolatore riconfigurabile o metamorfico è una macchina capace di cambiare la sua mobilità a seguito di un locale cambiamento della cinematica.

Per modificare la struttura cinematica di un manipolatore possono essere utilizzati molti metodi; il più comune è quello di utilizzare un giunto bloccabile, ovvero un giunto con diversi gradi di libertà di cui uno di questi può essere selettivamente bloccato allo scopo di riconfigurare la mobilità finale.

La famiglia delle PKMs, Parallel Kinematics Machines (Macchine a cinematica parallela), in particolare possono trovare grandi vantaggi nell'utilizzo dei giunti riconfigurabili, in quanto partendo da piccole modifiche sulla propria cinematica si possono raggiungere grandi cambiamenti sulla mobilità finale dell'intero sistema.

La disponibilità limitata dei campi di applicazione è una dei maggiori inconvenienti delle PKMs, perciò la possibilità di utilizzare in questo tipo di macchine strutture cinematiche in grado di modificare localmente o temporaneamente la loro mobilità è motivo di grande interesse.

Come risaputo, molte tipologie di giunti "ad anello chiuso", tipiche dei PKMs, possono presentare molteplici modalità di lavoro o di assemblaggio, spesso caratterizzate da diverse capacità di movimento ognuna delle quali corrisponde ad un diverso tipo di soluzione alla cinematica del proprio robot.

Da questo risultato si capisce come la possibilità di sfruttare due, tre, o più modalità di configurazione di una macchina a cinematica parallela può enormemente accrescere la sua usabilità in applicazioni industriali.

Diversi studi si concentrano sulla possibilità di modificare la mobilità di un robot cambiando la propria configurazione di assemblaggio senza tuttavia dover smontare il manipolatore.

Ulteriore attenzione può essere dedicata alla modifica temporanea della cinematica, mirata allo sfruttamento delle superiori capacità dei cinematismi che per una determinata configurazione risultavano ridondanti e che per questo rimanevano sotto attuate ma che al contrario risultano fondamentali una volta attivata la rispettiva configurazione: in ogni caso un giunto bloccabile utilizzato opportunamente durante il moto possono notevolmente migliorare le performance del manipolatore.

Ad ogni modo, la tipica modularità dei robot di serie può anche essere ricercata nei PKMs riconfigurabili, dove la combinazione di componenti elementari, a volte combinati con giunti bloccabili, può essere sfruttata per assemblare dei manipolatori caratterizzati da molteplici capacità di movimento.

Inoltre, un robot parallelo a piena mobilità con 6 gradi di libertà, dotato quindi di 6 motori possono anche sfruttare i giunti bloccabili per comportarsi come un manipolatore a gambe che può sia eseguire operazioni di lavorazione a 6 assi ma anche camminare e spostarsi in diverse stazioni di lavoro dove vengono richieste dal manipolatore funzionalità differenti.

La letteratura scientifica ci fornisce numerosi esempi di giunti bloccabili, in particolare coppie cinematiche con più gradi di libertà ottenute dalla combinazione di coppie cinematiche elementari, tuttavia il cambio di configurazione del giunto avviene spesso eseguito manualmente, senza curarsi del comportamento del manipolatore in fase di transizione.

Infatti, potrebbe accadere che il robot in fase transitoria acquisti temporaneamente gradi di libertà aggiuntivi: in questo caso il robot sarebbe in grado di mantenere la sua posizione solo ed esclusivamente grazie all'ausilio di un supporto esterno, in quanto non in grado di provvedere al mantenimento della sua posizione dovuto al temporaneo aumento dei gradi di libertà del sistema.

4. Descrizione del Robot e primi accenni sul giunto

L'obiettivo principale di questo sotto capitolo è quello di introdurre la macchina 3-SRU con cinematica parallela azionata che andrà ad utilizzare il giunto sferico bloccabile, progettato appositamente per gestirne la riconfigurazione.

[3] Tale giunto è realizzato come una combinazione di tre cerniere in serie tra loro ortogonali ognuna delle quali permette come unico grado di libertà la rotazione attorno al proprio asse; delle tre cerniere, una viene lasciata libera di ruotare ed il suo movimento viene gestito dal moto combinato di tutti i giunti che guidano la macchina, mentre per le altre due un sistema di bloccaggio consente di bloccare alternativamente una garantendo così la rotazione attorno all'asse dell'ultima cerniera rimasta o viceversa bloccando l'altra permettendo così la mobilitazione della precedente, dando così alla macchina diverse configurazioni cinematiche 3-URU che corrispondono a diversi tipi di mobilità.

Per una comprensione più profonda di come l'articolazione influirà sulla mobilità del robot, una descrizione della sua topologia è fornita di seguito.

L'architettura cinematica di ciascuna gamba è composta da a Catena di giunti sferico-cerniera-universale SRU (dall'inglese spherical-revolute-universal).

La coppia sferica, che deve essere ridotto a un giunto universale per garantire la funzionalità della macchina, collega il primo corpo di ogni gamba al telaio. Il secondo collegamento è collegato al primo uno da una cerniera.

Alla fine, un giunto universale chiude la catena cinematica che collega la parte finale alla gamba.

La mutua disposizione dei giunti, di fondamentale importanza per garantire il corretto funzionamento della macchina, viene mostrata in figura 1.

Come visibile, le tre coppie sferiche sono posizionate in modo tale i loro centri si trovano sugli assi del telaio di riferimento fisso $\{0\}$ alla stessa distanza, chiamata a , dall'origine O_i .

Le tre rotazioni che compongono ciascuna coppia si realizza attraverso tre giunti rotanti perpendicolari, i cui assi concordano in un punto (vale a dire il centro della coppia sferica).

I tre assi sono disposti come segue:

- La prima cerniera è coassiale al rispettivo asse del sistema di riferimento $\{0\}$; nell' i -esimo sistema di riferimento locale della gamba $\{l_{1,i}\}$, il versore che ne descrive l'asse è ${}^{l_{1,i}}r_{1,i} = [1 \ 0 \ 0]^T$.
- La seconda cerniera è perpendicolare alla prima, ed il suo asse coincide con quello della prima asta della gamba nella configurazione di partenza, nel sistema di riferimento locale $\{l_{2,i}\}$ l'asse è ${}^{l_{2,i}}r_{2,i} = [0 \ 1 \ 0]^T$.
- La terza cerniera è quella rimanente che nella configurazione della macchina mostrata in fig. 1 ha l'asse ortogonale a quello delle altre due, rispetto al sistema $\{l_{3,i}\}$ esso è ${}^{l_{3,i}}r_{3,i} = [0 \ 0 \ 1]^T$.

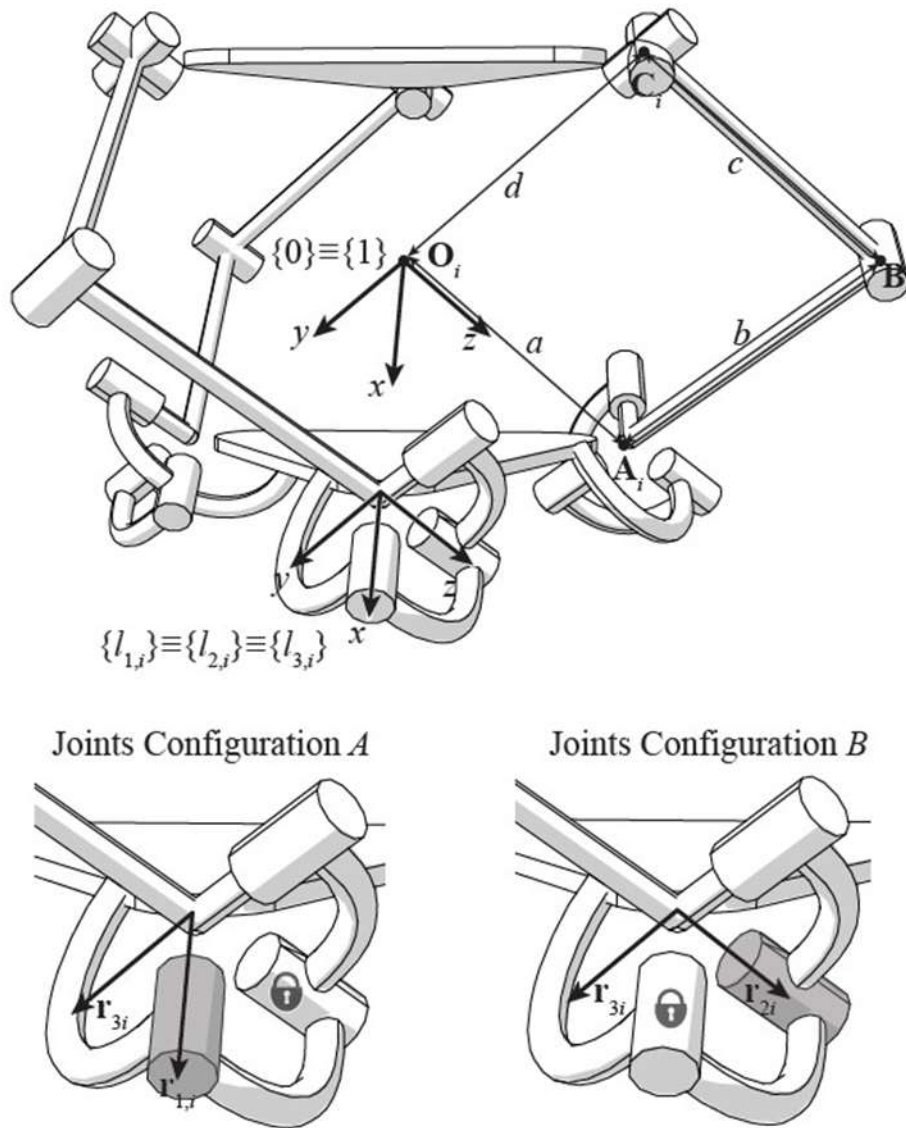


Figura 1: design concettuale della piattaforma con nomenclatura degli assi

Il meccanismo di bloccaggio è utilizzato in questo caso per ottenere due diverse tipologie di configurazioni, una chiamata configurazione A e l'altra configurazione B, entrambe mostrate in figura 1.

Nella configurazione A, la prima rotazione del giunto sferico $r_{1,i}$ è permessa, in particolare, essa rappresenta il grado di libertà dell' i -esima gamba che viene concesso; con i giunti in questa configurazione alla piattaforma corrisponde un movimento di pura traslazione.

Nella configurazione B, la prima rotazione è bloccata, mentre la seconda $r_{2,i}$ viene concessa; con i giunti in questa configurazione al contrario del caso precedente alla piattaforma corrisponde un movimento di pura rotazione; in entrambe le configurazioni la terza rotazione è libera.

Diversamente da quanto si possa pensare, per garantire il corretto funzionamento, la posizione relativa tra le cerniere ad ogni cambio di configurazione deve sempre essere la medesima in cui i rispettivi assi mantengono una condizione di mutua ortogonalità; questo è chiaramente visibile in figura 1, nella configurazione A essendo la prima cerniera del giunto sferico $r_{1,i}$ ad essere movimentata (a causa del collegamento in serie delle tre cerniere all'interno del giunto) la posizione

relativa delle tre non subisce alcuna variazione; al contrario nella configurazione B essendo la seconda cerniera del giunto $r_{2,i}$ ad essere azionata, la posizione relativa tra prima e terza cerniera durante il moto non è costante e poiché la corretta mobilità della piattaforma è possibile solo se gli assi di ogni cerniera di ogni gamba segue la giusta direzione, risulta come da quanto specificato che tra una di configurazione e l'altra il giunto ritorna nella posizione originale.

Questa peculiarità consente non solo di utilizzare innesti a denti frontali, ma anche di fare in modo che, in fase di transizione, l'inizio dell'innesto del cursore con uno degli altri componenti per ottenere una configurazione possa iniziare prima del completo disinnesto dalla configurazione precedente.

Ciò significa che, come spiegato nel precedente capitolo, a differenza della maggior parte delle PKMs che utilizzano giunti riconfigurabili, questa non necessita di alcun supporto esterno per il mantenimento della posizione in fase transitoria.

Il resto della catena cinematica di ogni gamba è composta da una cerniera tra le due metà della gamba ed il cui asse risulta essere parallelo a quello dell'ultima cerniera (che rimane sempre libera); ed infine con un giunto universale che collega la seconda metà della gamba alla piattaforma.

Inoltre al fine di garantire una corretta movimentazione è necessario un accurato posizionamento dell'ultimo giunto della gamba; in particolare una delle due cerniere deve essere parallela a quella della prima rotazione del giunto in modo tale che la distanza tra gli assi entrambi ortogonali al piano π_i (identificato dei punti A_i, B_i e C_i) risulta pari a una distanza c ; la seconda cerniera del giunto universale invece è posizionata in modo da essere ortogonale all'altra in modo che il suo asse giaccia sul piano π_i per andare ad attraversare l'origine del sistema di riferimento totale della macchina identificato come $\{1\}$.

5. Design concettuale del giunto riconfigurabile originale

[3] Il design concettuale del giunto basa il proprio funzionamento combinando insieme una coppia di ruote coniche il cui scopo è quello di trasmettere il moto dai motori alle gambe ad un sistema di cerniere il cui scopo è quello di vincolare, e quindi di impedire, i movimenti superflui ed indesiderati delle gambe della macchina.

Il giunto si compone di 6 organi principali:

- A- Telaio:** è il corpo principale su cui verranno poi sistemati i motori, viene così chiamato non tanto perché fissato a terra, bensì perché su di esso vengono assemblati tutti gli altri componenti.
- B- Culla:** è l'elemento mobile che ruota attorno all'asse x, è fissata al telaio, su di essa vengono assemblati il cursore, le ruote dentate e le forchette.
- C- Cursore:** è l'elemento fondamentale del meccanismo che permette il cambio di configurazione, è montato sulla culla e può impegnarsi con il telaio o con la dentatura posizionata sul sistema di movimentazione principale a seconda della sua posizione; nel design funzionale sarà solamente una parte del meccanismo, in quanto poi dovranno essere presi in considerazione tutte le parti necessarie per la sua movimentazione.
- D- Ruota ed albero di movimentazione principale:** è il sistema di movimentazione principale ed ha una duplice funzione: in primis quella di azionare le cerniere, quando queste sono in condizione di essere movimentate, successivamente la sua seconda funzione è quella di assolvere assieme al telaio a sorreggere gli altri componenti del cinematismo. Questo sistema è composto principalmente da tre componenti: l'albero che trasmette il moto, la ruota dentata principale che trasferisce il moto alla culla e la dentatura che permette al cursore di innestarsi nella configurazione A.
- E- Forchetta pilotata:** è la prima parte della struttura più esterna del giunto, è fissata sulla culla tramite delle cerniere ed è solidale alla ruota condotta mostrata in figura 2.
- F- Forchetta libera:** è la parte più esterna del giunto; è il componente che mette in collegamento la cerniera libera alla prima metà della gamba.

Il funzionamento del meccanismo si basa sulla possibilità o meno di permettere alla ruota di movimentazione principale posizionata all'estremità del componente D di trasferire il moto alla sua ruota condotta.

A tale scopo è presente il cursore C posizionabile nelle due diverse configurazioni A e B mostrate in figura 2.

In entrambe le configurazioni il cursore C risulta sempre impegnato tramite una scanalatura alla culla B, ed alternativamente, in base alla configurazione scelta esso fungerà da collegamento tra la culla B e l'albero di movimentazione principale D oppure tra la culla B ed il telaio A.

Nella configurazione A, il cursore C, che nell'immagine 2.A lo si vede traslato verso l'alto, mette in collegamento diretto tramite la dentatura posta a metà dell'albero principale quest'ultimo con la culla D.

Così facendo i corpi B, C e D si comportano come un unico corpo rigido, le ruote dentate coniche in quanto entrambe innestate alla culla B non possiedono alcun moto relativo e pertanto sono del tutto escluse dal cinematismo ed in questa configurazione ai fini del funzionamento contribuiscono a mantenere ortogonali gli assi della prima e della seconda cerniera del giunto; per cui ad una rotazione q_i impartita all'albero di movimentazione principale dal motore corrisponde una rotazione attorno alla prima cerniera il cui asse è $r_{1,i}$ e che, in accordo con il sistema di riferimento locale, viene chiamata θ_x .

A questa configurazione dei tre giunti che compongono la macchina corrisponde il movimento sferico della piattaforma posizionata al termine delle gambe.

Nella configurazione B, mostrata nell'immagine 2.B, il cursore C risulta invece traslato verso il basso, innestandosi così al telaio; in questa configurazione sono i corpi A, B e C a comportarsi come un unico componente così da bloccare la rotazione attorno all'asse $r_{1,i}$ e lasciando così libere le ruote dentate coniche che entrano a tutti gli effetti a far parte del cinematismo permettendo la rotazione relativa tra culla e forchetta attorno all'asse z ($r_{3,i}$) che per tale motivo viene chiamata θ_z .

A questa seconda configurazione corrisponde il movimento traslatorio della piattaforma.

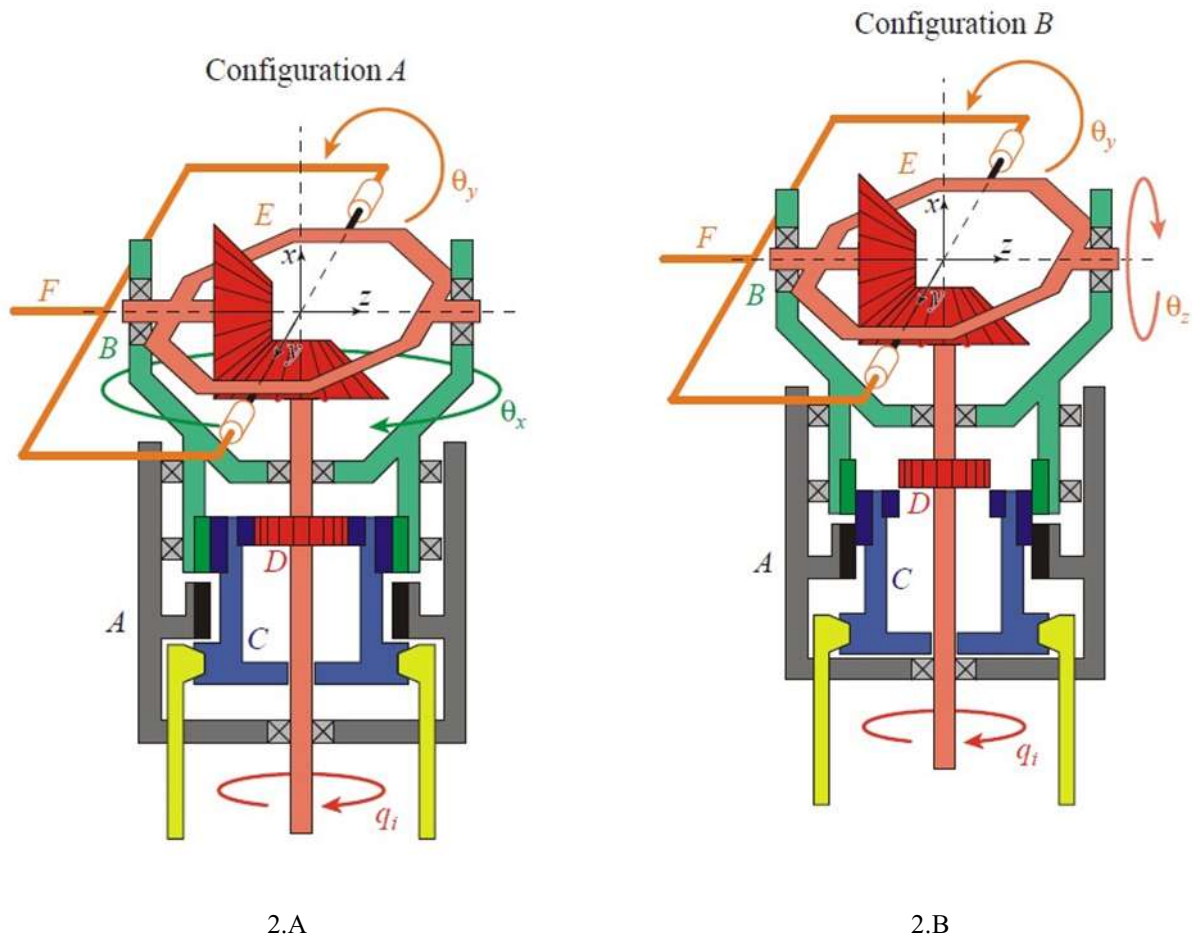


Figura 2: design concettuale nelle due configurazioni

6. Design funzionale del giunto riconfigurabile originale

[3] Da un punto di vista strettamente teorico una volta raggiunto lo sviluppo del design concettuale del giunto nella sua interezza, ovvero del posizionamento dei vari componenti, del calcolo delle geometrie utili e come queste si accoppiano tra di loro il lavoro di progettazione può definirsi concluso.

Tuttavia, nella realtà una volta sviluppato questo design è necessario tener conto che spesso dal punto di vista cinematico esso permette sì tutti i movimenti ma questi risultano non propriamente compatibili per l'applicazione pratica in termini di estensione, bisogna tener conto che l'ingombro del giunto deve essere paragonabile non solo allo spazio strettamente necessario per il suo funzionamento ma anche a quello per il suo posizionamento ed assemblaggio.

Dal punto di vista fisico bisogna tener conto che, in base alle necessità pratiche, il materiale con cui realizzare ogni singola parte ricopre un ruolo altrettanto importante ed in base alle sue caratteristiche è necessario effettuare un opportuno dimensionamento, è necessario tener conto che ogni componente deve poter essere fabbricato nella maniera più semplice possibile e che una volta prodotte, le varie parti devono poter essere assemblate tra loro, per non parlare che, con il tempo, l'usura farà il suo corso e di conseguenza la scelta dei materiali ed il dimensionamento delle parti giocherà un ruolo fondamentale anche solo per riuscire a prevedere quali saranno i primi componenti a cedere.

Inoltre, in caso di guasto, sarà necessario tenere conto del fatto che il giunto dovrà essere smontato dalla macchina e deassemblato per subire tutte le dovute operazioni di manutenzione.

Altro punto cruciale consiste nel tener conto di tutte quelle parti "ausiliarie" per così dire, non strettamente necessarie al funzionamento del giunto ma che senza delle quali il giunto non potrebbe esercitare il suo compito a dovere; nella lista delle parti ausiliarie rientrano i supporti, i cuscinetti ed i meccanismi necessari per la movimentazione del cursore.

Da questa breve descrizione, che altro non è che la punta dell'iceberg della progettazione, si capisce quanta strada bisogna fare per ottenere la forma finale del giunto; ma poiché lo scopo di questo elaborato non è quello di seguire i ragionamenti che hanno portato a definire la forma finale del giunto bensì quello di tentare di correggere alcuni difetti venuti fuori con la realizzazione della prima versione, nella restante parte di questa sezione si cercherà di dare una breve ma il più possibile esauriente descrizione dell'aspetto del prototipo ottenuto al fine di discuterne alcune particolarità.

Una prima vista dell'aspetto finale del giunto è mostrata in figura 3.

Entrambi gli attuatori, sia quello predisposto per l'azionamento del cursore che quello per la movimentazione del giunto, sono fissati esternamente e risultano fissati a terra (questa è una delle possibili modalità di assemblaggio).

Nella fig.3 vengono rappresentati come dei cilindri posizionati a sbalzo rispetto al giunto, ovviamente lo scopo di tale rappresentazione è quello di mostrarne il loro posizionamento, senza scendere nei particolari delle fattezze specifiche e degli ingombri che dipenderanno poi dalla scelta specifica di marca e modello dei rispettivi attuatori.

Globalmente, la mobilità del giunto è caratterizzata da una rotazione dell'asta attorno $r_{3,i}$ che rimane sempre libera, preceduta da una prima rotazione pilotata il cui asse può essere scelto tra $r_{1,i}$ e $r_{2,i}$ movimentando il cursore tramite l'apposito attuatore.

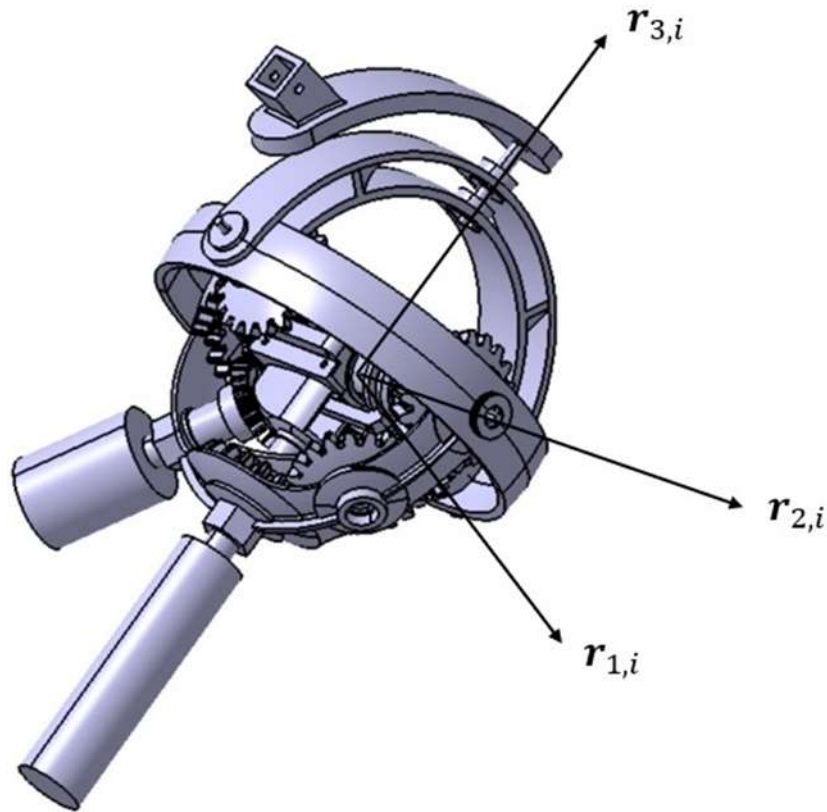


Figura 3: nomenclatura degli assi visti nel design funzionale

Come si può facilmente notare dalle figure 3 e 4, il design funzionale differisce da quello concettuale principalmente per il gran numero di ruote dentate presenti all'interno del giunto, questo perché, con l'intento di massimizzare lo spazio interno per favorire l'inserimento di tutti gli organi necessari all'azionamento del cursore, sono state scelte per le parti strettamente strutturali del giunto delle forme di archi di circonferenza in modo tale che una volta assemblati diano forma ad una sfera dove all'interno risiede il sistema di bloccaggio.

Per fare ciò l'albero principale elencato nella sezione precedente (il cui asse coincide con $r_{2,i}$) è stato collegato indirettamente al relativo motore inserendo una trasmissione di 3 ingranaggi conici (ruota motrice, ruota oziosa e ruota condotta) dimensionati in modo tale da mantenere un rapporto di trasmissione di 1:1 che seguono la forma anulare del telaio e visibili in primo piano in figura 3.

Stessa cosa vale per la catena cinematica che in figura 2.B era rappresentata dalle due uniche ruote dentate presenti nello schema concettuale; come si può vedere in figura 4 la coppia di ruote è stata convertita in una terna del tutto analoga a quella che collega il motore alla ruota principale.

Per ridurre al minimo gli effetti torsionali che si manifesterebbero nella forchetta quando il giunto opera nella configurazione B ovvero quando la rotazione comandata corrisponde all'asse $r_{1,i}$, sfruttando l'albero di movimentazione

principale (non visibile nelle varie viste in quanto attraversa internamente il sistema di azionamento del cursore) la catena cinematica che mette in collegamento la ruota principale alla forchetta è stata duplicata specularmente rispetto l'origine degli assi di rotazione ottenendo così due trasmissioni che lavorano in parallelo e per garantirne il corretto funzionamento la ruota dentata conica speculare alla principale viene assemblata all'albero principale in modo che i tre elementi si comportino come un unico componente.

Come già descritto nella sezione precedente, nella configurazione A, il cursore si innesta alla ruota principale, per cui culla e forchetta rimangono ferme tra loro, così come tutti i componenti fissati sulla prima in quanto esclusi dalla catena cinematica che si limita in questo caso ad essere limitata alle tre ruote che mettono in collegamento il motore all'albero di trasmissione principale garantendo così una rotazione relativa tra telaio e culla.

Nella configurazione B, il cursore vincola la culla al telaio rendendoli solidali tra loro e scollegandosi dalla ruota principale tutte le ruote dentate precedentemente descritte entrano a far parte della catena cinematica permettendo così la rotazione relativa tra culla e forchetta.

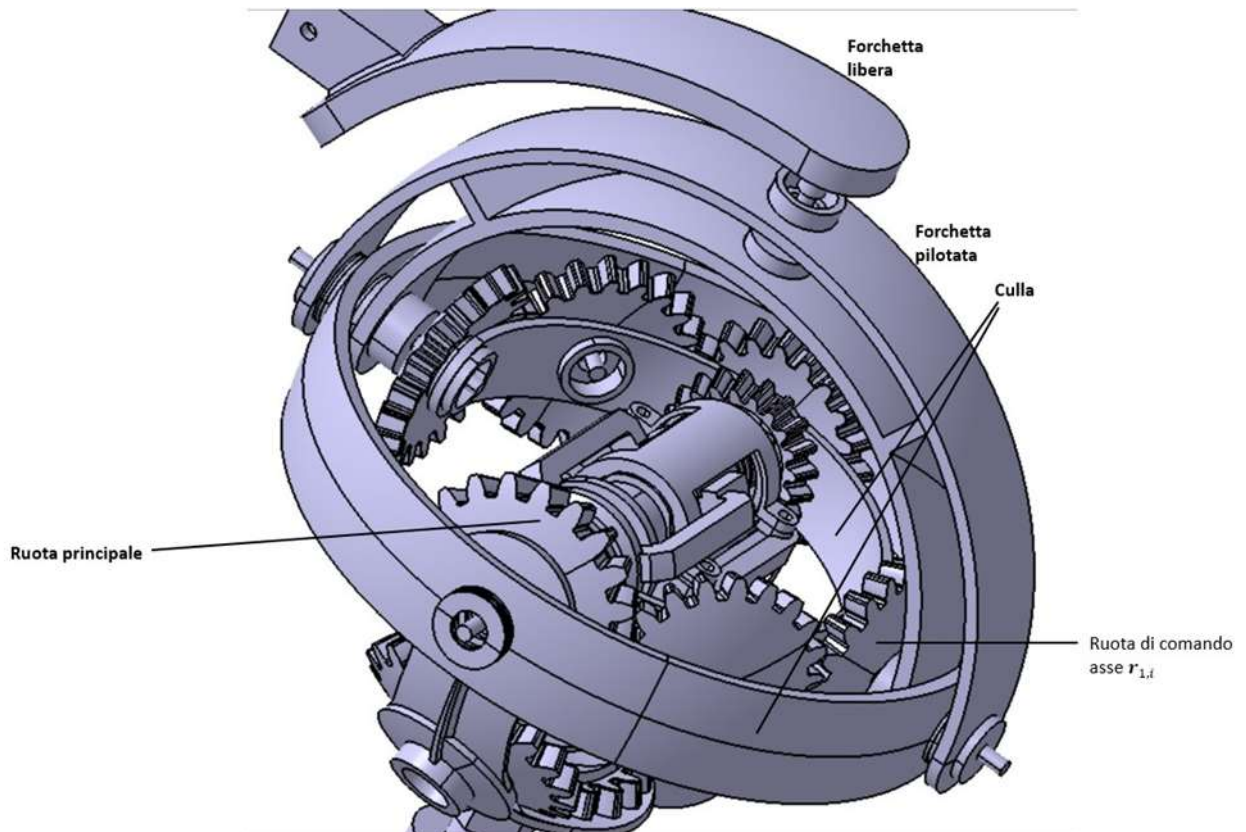


Figura 4: particolari del design funzionale

All'interno del giunto, disposto lungo $r_{1,i}$, è presente il sistema di bloccaggio che è di fatto il cuore del meccanismo, grazie a questo è possibile passare da una configurazione all'altra (la vista in sezione del meccanismo nelle due configurazioni è mostrata dalla figura 5).

L'azionamento di questo è garantito dal secondo attuatore visibile in figura 3 che entra obliquamente nel giunto e che si innesta con la ruota dentata indicata con la lettera "a" in figura 5, in costante presa con quello che sulla stessa immagine è indicato come corpo "b": una vite con filetto a sezione trapezoidale alla cui estremità posteriore è fissata la ruota dentata che le trasferisce il moto dal proprio attuatore; questa risulta coassiale all'albero di trasmissione principale e mantenuti separati da due cuscinetti che ne garantiscono l'indipendenza dei movimenti, mentre a mantenerla in posizione è il telaio e la culla che fungono da spallamenti.

La conversione del moto rotatorio in traslatorio è possibile grazie alla madrevite a cui sono fissate le tre braccia indicate con la lettera "c" le quali si innestano grazie ad una gola direttamente al cursore "d".

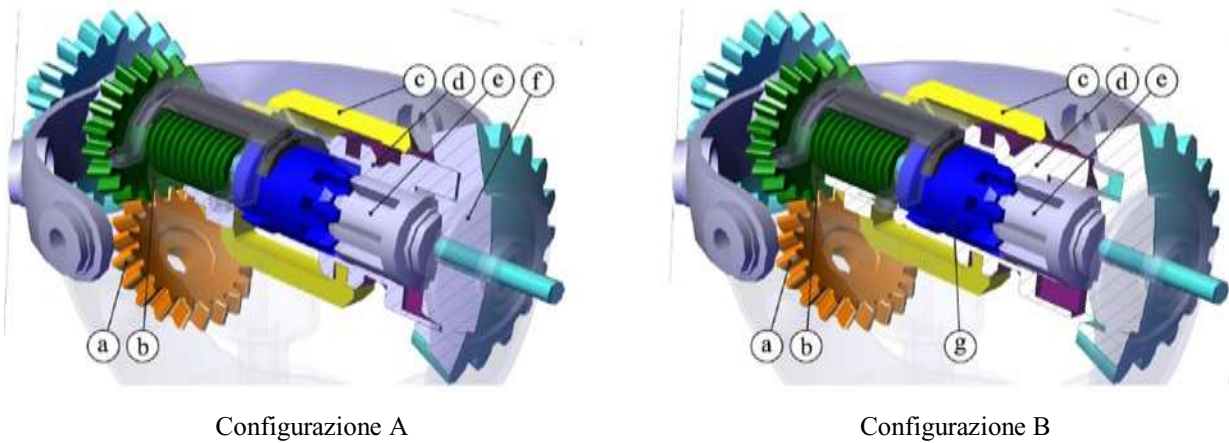


Figura 5: vista sezionata del nucleo nelle due configurazioni

In figura 5 è possibile vedere la dentatura "e" posta sulla culla che in entrambe le configurazioni rimane in contatto con il cursore, per quanto riguarda la dentatura che sul design concettuale era posizionata a metà dell'albero principale è stata integrata all'interno della ruota principale indicata con la lettera "f" difficilmente visibile dall'immagine ma il cui posizionamento rimane chiaro osservando la differenza di posizione del cursore in figura; la dentatura sul telaio al contrario risulta ben distinguibile in quanto evidenziata con la lettera "g".

7. Difetti del Giunto

7.0.1. Generalità sulla natura dei difetti

Come detto all'inizio del precedente paragrafo, alla progettazione concettuale che permette di capire le necessità di un qualsiasi meccanismo e definirne quindi i componenti necessari per farlo funzionare come voluto segue la progettazione funzionale che permette di definire materiali, forme, superfici, geometrie e volumi necessari per reggere i carichi esterni, per resistere ai fenomeni di usura, per poterlo assemblare, deassemblare e far lavorare la macchina con continuità per lunghi periodi di tempo garantendo affidabilità e sicurezza riducendone così gli interventi di manutenzione ai soli interventi periodici di routine.

Tuttavia, spesso una volta realizzata la prima versione è necessario tornare sui propri passi e rivedere i progetti in quanto nonostante la bontà teorico-pratica di questi ultimi il prodotto finito mostra dei difetti che ne impediscono il corretto funzionamento oppure il suo assemblaggio.

La natura di questi difetti può essere causata da:

- **Tipo di materiale:** a materiali differenti corrispondono diverse proprietà che ne descrivono il comportamento, in base alla loro natura anche il numero di parametri necessari per descrivere in maniera completa un materiale cambiano notevolmente: si passa dai materiali isotropi le cui proprietà fisiche rimangono costanti lungo ogni direzione come avviene per i metalli a quelli ortotropi le cui caratteristiche vengono influenzate da delle direzioni privilegiate, i legni ed i materiali compositi ne sono un perfetto esempio; nell'ingegneria è difficile trovare il materiale perfetto che risponda a tutte le necessità, per cui una volta soddisfatti i requisiti fondamentali è probabile che proprio a causa del materiale si manifestano criticità laddove rispetto una proprietà se ne predilige un'altra (classico esempio sono cuscinetti ed ingranaggi, in cui si ricerca durezza superficiale e resistenza al cuore); in molti casi queste necessità già sono del tutto note in fase di progettazione quindi una volta scelto il materiale con cui realizzare il prodotto è possibile scegliere delle contromisure tali da non doversi aspettare altro che il corretto funzionamento della parte, ma in alcuni casi questo non è possibile per cui i pezzi realizzati manifestano in fase di test dei comportamenti indesiderati nonostante una corretta progettazione della parte; la soluzione di questi problemi va da ricercarsi nel dettaglio di volta in volta nel caso specifico.
- **Errore delle misure:** i componenti che teoricamente avrebbero dovuto lavorare insieme presentano mobilità ridotta o limitata a causa di geometrie non abbastanza estese, in questo caso il meccanismo si riesce ad assemblare come da progetto, tuttavia lo spazio delle configurazioni assumibili risulta ridotto rispetto quello teorico; oppure non si riescono ad assemblare in quanto le superfici coincidenti possiedono quote differenti per cui vincoli e riferimenti non coincidono, in questo caso l'errore si presenta già in fase di montaggio vista l'incompatibilità dei pezzi, in questo caso il problema deve necessariamente essere risolto correggendo le quote sul progetto e rifabbricare di conseguenza la parte da nuovo, in casi particolari in termini di prototipazione è possibile evitare il rifacimento dell'intera parte costruendo dei pezzi ad hoc (qualora le geometrie siano

particolarmente semplici e le misure da correggere abordabili) che vadano a “riempire” gli spazi vuoti senza dover aggiungere ulteriori pezzi di fissaggio, anche se quest’ultima soluzione è fortemente sconsigliata in quanto poi queste correzioni di ripiego potrebbero influire sui risultati finali dell’analisi del prototipo.

- **Errore nelle tolleranze:** anche in questo caso i difetti potrebbero manifestarsi sia in fase di montaggio che durante i test di funzionamento, il primo caso si verifica quando l’errore della tolleranza è grossolana, i componenti che andrebbero assemblati tra loro con interferenza presentano tolleranze eccessive che ne impediscono l’assemblamento oppure presentano giochi mentre nel caso contrario per i componenti da accoppiarsi con gioco l’errore solitamente si nota in fase di montaggio qualora le tolleranze comportino invece incertezza o interferenza; il secondo caso si verifica invece quando l’errore della tolleranza è fine, in questo caso risulta difficile riconoscere il problema in fase di assemblaggio mentre al contrario si manifesta più palesemente durante i test di funzionamento quando i giochi eccessivi causano movimenti non previsti e vibrazioni mentre i giochi ridotti o le interferenze non previste si manifestano sotto forma di forze resistenti più elevate del previsto in un primissimo momento ed in fenomeni di usura eccessivi nel lungo periodo.
- **Errore nelle lavorazioni:** scegliendo parametri di lavorazione non adatti per il grado di finitura che si vuole raggiungere è possibile ottenere dei difetti simili a quelli del caso precedente ma che interessano in questo caso la rugosità delle superfici che si manifestano sottoforma di fenomeni dissipativi e di usura maggiorati nel caso di utilizzo di tecniche sottrattive (tornitura, fresatura ecc.) oppure nel caso di tecniche additive (stampa 3D, fonderia dei metalli, iniettofusione delle materie plastiche ecc.) i difetti possono manifestarsi sottoforma di particolari deformati a causa del ritiro del materiale oppure del tutto mancanti nella geometria a causa di bolle d’aria nello stampo, sotto forma di bave oppure a causa dei supporti non facilmente removibili; la correzione di questo genere di errori non è affatto scontata e varia da semplici interventi di post-produzione come la rimozione delle bave fino alla riprogettazione totale del processo tecnologico nei casi più drastici.

Risolvere tutti questi errori in maniera completa è pressoché impossibile, ciò è correlato al fatto che su carta è possibile parlare di dimensioni nominali ovvero realizzare pezzi con assoluta precisione, mentre nella realtà esiste sempre un margine di errore dovuto all’incertezza.

In questo capitolo verranno elencati ed analizzati i principali difetti che sono emersi dal primo prototipo e si cercherà di proporre delle soluzioni allo scopo di far avvicinare il comportamento reale del giunto a quello ideale pensato durante la progettazione concettuale.

7.1. Difetto 1: slittamento degli alberi di comando

Il primo difetto nel giunto è stato riscontrato negli alberi di comando che trasferiscono il moto dai motori alle relative ruote dentate: queste come visibile dalla figura 6 sono posizionate alla base del telaio, gli alberi nascosti alla vista sono stati evidenziati da due linee tratteggiate.

Gli alberi e le rispettive ruote dentate, al fine di garantire una corretta trasmissione del moto e della potenza, dovrebbero comportarsi come un unico corpo unico, tuttavia per motivi pratici non è possibile realizzarli come un unico componente in quanto che:

- 1) Come già specificato all'inizio di questo elaborato per la realizzazione di tutte le parti non classificabili come componenti meccanici standard unificati è stata scelta una tecnica additiva che prevede l'utilizzo di una resina che favorisce una facile e relativamente veloce produzione di un esiguo numero di componenti a scapito delle scarse proprietà meccaniche; quindi proprio a causa di quest'ultime le geometrie snelle come gli alberi soffrono di un'eccessiva sensibilità a deformazione e rottura.
- 2) Per motivi di assemblaggio del giunto, gli alberi devono necessariamente essere separati dalle ruote; questo perché il telaio è composto da due parti: la prima è il telaio vero e proprio messo a terra e su cui vengono montati i motori, le ruote dentate di comando del cursore e del giunto, la prima ruota oziosa della catena cinematica, la culla, l'albero e la ruota principale; mentre la seconda parte del telaio sorregge il sistema di azionamento del cursore e viene mantenuto in posizione rispetto la prima grazie al layout a doppi cuscini alle estremità degli alberi che collegano gli elementi fissati tra le due metà.
- 3) Normalmente gli attuatori possiedono già di loro un albero su cui fissare il primo elemento della catena cinematica che sia una ruota dentata, una puleggia ecc. scegliendo di rendere solidale un albero a questo primo componente ci si ritroverebbe costretti a prevedere una giunzione aggiuntiva per il collegamento che andrebbe ad introdurre un'ulteriore cedevolezza all'intero sistema, oltre al fatto che così facendo per garantire la migliore coassialità possibile tra le due parti sono necessarie tolleranze più restrittive che ne complica la fabbricazione; al contrario di quanto avverrebbe qualora si scegliesse di fabbricare albero e ruota separatamente, ottenendo così la possibilità di usufruire dello stesso albero dell'attuatore senza dover ricorrere quindi ad altri collegamenti ed a tolleranze restrittive.

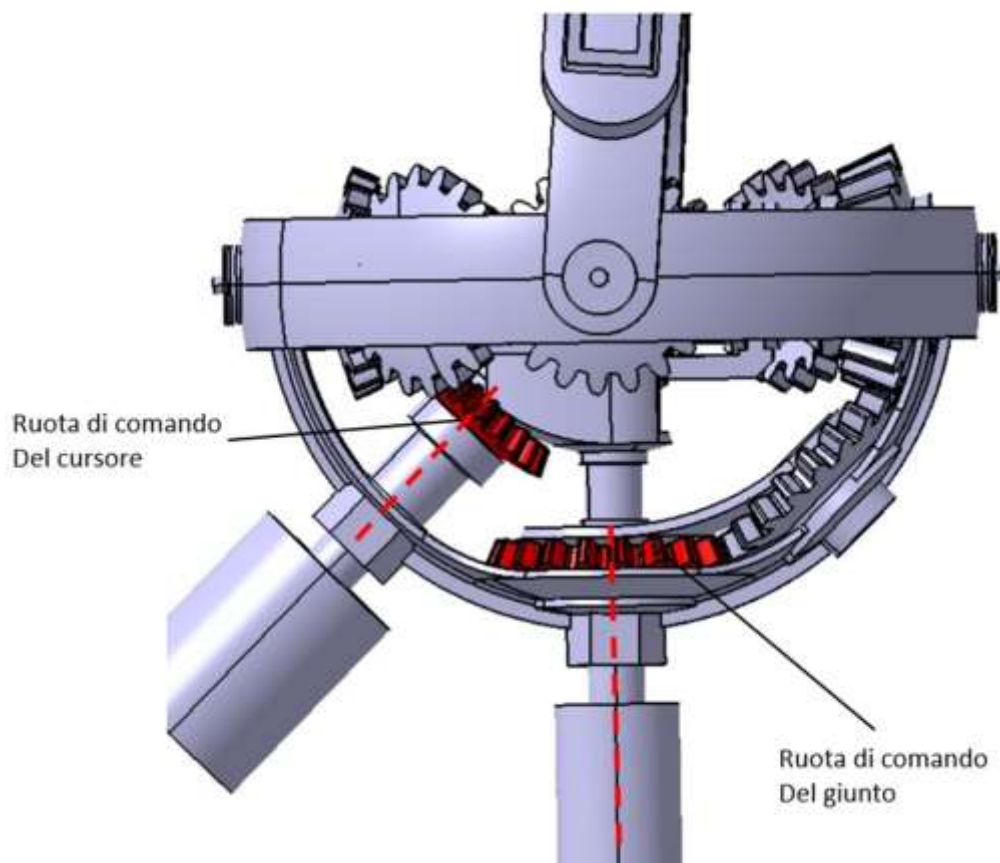


Figura 6: posizioni delle ruote interessate dallo slittamento

Nonostante alberi e ruote dovrebbero essere solidali tra loro, in presenza di carichi esterni che ne ostacolano il movimento questa solidità viene meno e quella che sarebbe dovuta essere un'unica rotazione del corpo che permetteva l'azionamento delle altre ruote si trasforma in un fenomeno di slittamento tra l'albero che continua il suo moto rotatorio sotto l'azione del motore e la rispettiva ruota dentata che invece resta ferma sotto l'azione dei carichi esterni.

La causa di questo slittamento va ricercata nella natura dell'accoppiamento tra le parti e dei materiali scelti; l'accoppiamento è di tipo incerto ottenuto dimensionando il foro con lo stesso diametro nominale dell'albero forti del fatto che la stampa 3D comporta normalmente una leggera espansione dei volumi solidi che porta ad avere una leggera interferenza tra il diametro del foro e quello dell'albero sufficiente per mantenere le due parti in posizione e movimentare il giunto quando questo è completamente scarico e scollegato da altri componenti ma non quando questo viene caricato; mentre l'elevata elasticità della resina comporta delle scarse forze di attrito tra l'albero e ruota dentata nonostante vengano applicate interferenze con valori elevati, ma poiché l'interferenza è ridotta per il motivo di cui sopra l'attrito risulta eccessivamente basso per evitare lo slittamento delle parti.

Definito ora il problema si vada ad analizzare in maniera dettagliata tutte le possibili modalità di accoppiamento degli alberi alle rispettive ruote dentate: per rendere solidale un organo rotante ad un albero si può scegliere di unirli utilizzando un accoppiamento di forza o di forma, in entrambi i modi il processo va sotto il nome di calettamento.

L'accoppiamento di forza basa il proprio principio di funzionamento sull'attrito statico che si sviluppa tra le superfici quando queste entrano in contatto, il vantaggio di utilizzare questo sistema risiede nel fatto che nel mondo che ci circonda i fenomeni dissipativi sono sempre presenti, in particolar modo tra due corpi in contatto diretto, per cui questo tipo di accoppiamento vede l'utilizzo di geometrie semplici come cilindri e coni; tuttavia questo sistema possiede numerosi svantaggi originati dal fatto che la forza di attrito tra due superfici ha un valore limite, superato il quale si innesca lo strisciamento, ed essendo il modulo della forza di attrito dinamico sempre inferiore a quello della forza di attrito statico, anche nella condizione di equilibrio in cui forze attive e dissipative si annullano a vicenda una volta innescato il moto, il sistema non può più essere riportato alla condizione di partenza se non intervenendo dall'esterno.

Per garantire quindi solidità tra le parti è necessario quindi assicurarsi che la massima forza trasmessa tra le superfici in contatto non superi mai quella di attrito statico, per cui è di fondamentale importanza fare in modo che quest'ultima sia la più elevata possibile forzando l'albero al mozzo su cui deve essere fissato.

Il forzamento può essere realizzato principalmente in due modalità: per forzamento longitudinale, in cui albero ed il rispettivo componente vengono accoppiati tramite l'applicazione di una forza alla pressa, oppure per forzamento trasversale, che implica la modifica del diametro del foro, dell'albero oppure nei casi più drastici di entrambi per effetto termico (riscaldamento o raffreddamento); in quest'ultimo caso il forzamento si manifesta quando la temperatura delle parti ritorna a quella ambiente; tuttavia essendo le parti del giunto fabbricate in materiale termoplastico questo secondo metodo risulta improponibile pensando di voler surriscaldare la ruota dentata causa lo scioglimento di quest'ultima, meno critico è il caso in cui si decidesse di sottoraffreddare l'albero anche se l'operazione risulta dal punto di vista operativo altrettanto complessa e delicata; una terza modalità alternativa consiste in un accoppiamento conico il cui principale vantaggio consiste nel riuscire ad ottenere una forza di attrito il cui modulo è direttamente proporzionale al carico assiale con cui vengono assemblate le parti.

La soluzione di un calettamento forzato conico per il caso del giunto assumerebbe la seguente forma mostrata in figura 8, come si può notare dall'immagine in corrispondenza della superficie di contatto tra albero e ruota dentata la sezione

trasversale dell'albero assume forma conica, la cui geometria è riprodotta in maniera speculare sul foro nella ruota, l'utilizzo di questa soluzione ridurrebbe drasticamente il rischio di slittamento tra i componenti, permetterebbe di mantenere l'attuale layout degli alberi di tipo passante anche se si dovrebbe ricorrere ad un albero non cilindrico e di conseguenza sarebbe necessario l'utilizzo di cuscinetti di diverso diametro e bisognerebbe garantire un carico assiale in grado di mantenere l'aderenza.

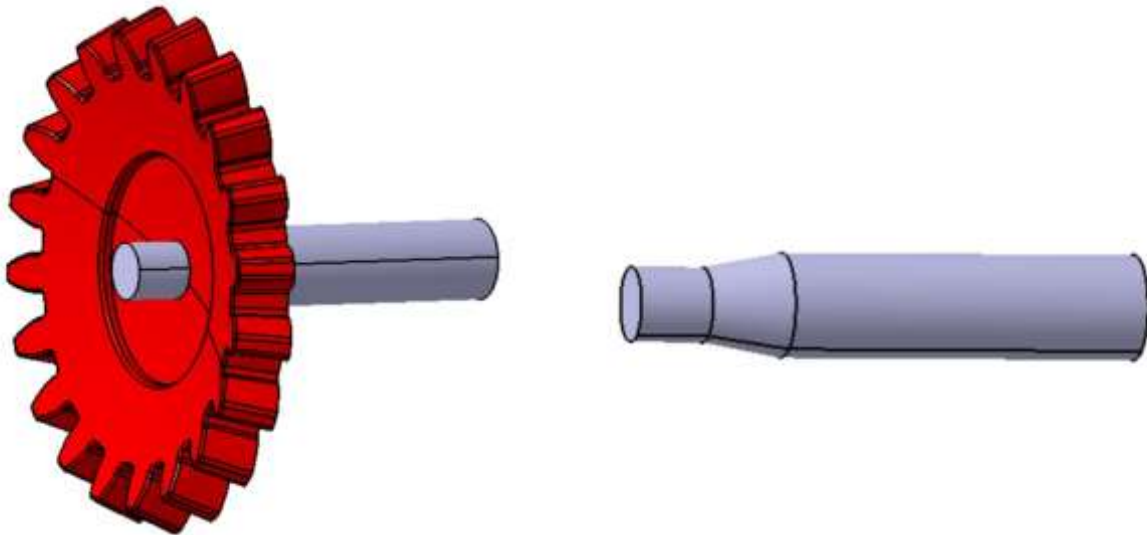


Figura 8: albero con coppia conica

Al contrario di quanto descritto nelle precedenti pagine l'accoppiamento di forma consiste nel fare in modo che la geometria della sezione sia diversa da quella circolare in modo che ruotando in profilo dell'albero funga da ostacolo che impedisca lo slittamento ed esercitare così una pressione sulla superficie coniugata della ruota dentata in modo da trasferire la potenza tra gli organi; scegliendo questa soluzione si può ricorrere a:

1. **Profili delle sezioni unificati:** con questo termine si fa riferimento a quelle forme appositamente pensate a tale scopo e per questo unificate secondo le normative internazionali, vengono realizzati scavando delle cave sulla superficie dell'albero le cui dimensioni dipendono dal diametro nominale di quest'ultimo, gli esempi più famosi sono il *profilo millerighe* ed il *profilo scanalato*, in particolare quest'ultimo si presenta come un albero con una dentatura particolare, costituita da denti disposti radialmente al profilo che vanno ad inserirsi negli spazi vuoti ricavati nell'altro membro.

I vantaggi nell'utilizzo di questo genere di profili sono: l'elevato momento torcente trasmissibile, elevata robustezza degli organi che si manifesta in una vita utile più lunga e la facilità di montaggio; per quanto riguarda gli svantaggi dell'utilizzo di queste soluzioni questi sono: la complessità della lavorazione e la sua estensione che deve necessariamente essere maggiore di quella necessaria a causa della modalità di fabbricazione, inoltre per il caso in esame questa soluzione non può essere soddisfatta in quanto che il diametro nominale più piccolo di questo genere di profili nelle normative si aggira attorno ai 14 mm contro i 3 mm di tutti gli alberi utilizzati dal giunto.

2. **Profili delle sezioni speciali:** questa soluzione ricalca la precedente con la differenza che la geometria della sezione viene disegnata appositamente e non rientra tra quelle unificate, potendo così scegliere un compromesso tra vantaggi e svantaggi in modo da avvicinarsi il più possibile al caso ideale ad esempio scegliendo una sezione meno elaborata a favore di una realizzazione più semplice ed economica.

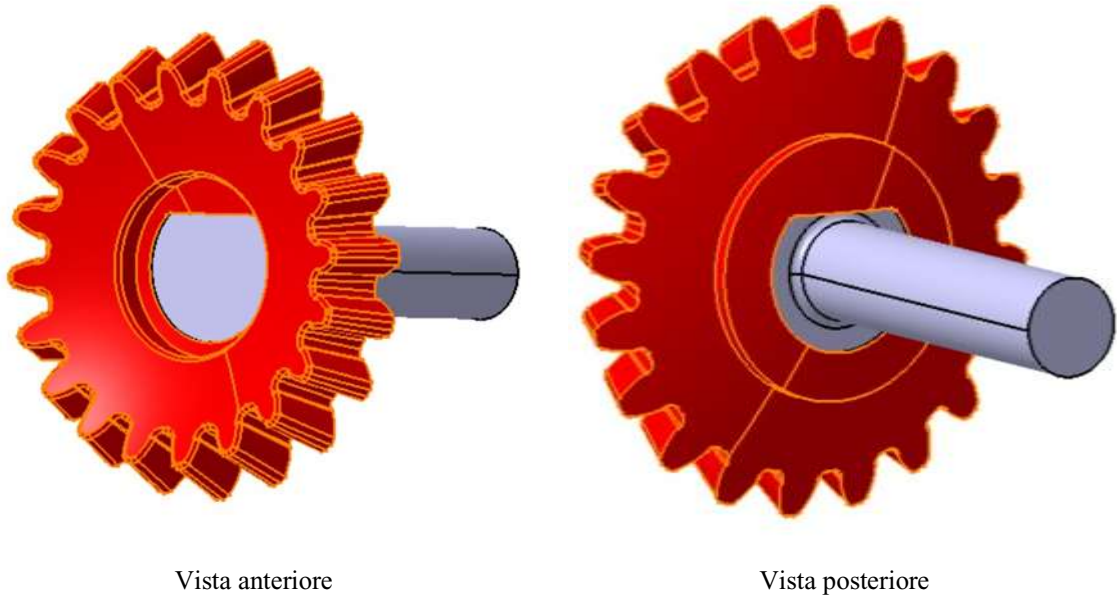


Figura 9: albero con profilo speciale

Come si può notare dall'immagine sopra nel caso in questione l'utilizzo di un profilo speciale è possibile utilizzando una geometria più estesa del diametro dell'albero che risolverebbe egregiamente il problema, tuttavia questa soluzione ha notevoli ripercussioni in termini di assemblaggio del giunto e successiva stabilità dell'assieme montato: innanzi tutto prevede l'utilizzo di un albero necessariamente diverso da quello dell'attuatore con le conseguenti problematiche descritte ad inizio capitolo, poi lo scorrimento assiale delle due ruote è impedito dalle due parti di telaio che fungono da spallamento quindi è necessario accoppiare prima la ruota dentata al proprio albero e successivamente inserire i due nella parte inferiore del telaio, tuttavia poiché i due alberi che presentano lo slittamento vanno assemblati sui medesimi componenti ed i loro assi non sono paralleli, al fine di garantire il montaggio è necessario cambiare il layout dell'albero da quello passante sorretto da due cuscinetti ad un layout con albero a sbalzo retto da un unico cuscinetto, ciò comporta un aumento della sollecitazione sull'unico cuscinetto rimasto che deve essere contrastata aumentando il diametro dell'albero.

3. **Componenti intermediari:** questo è il caso in cui si decide di utilizzare un componente che non è parte integrante né dell'albero né dell'organo da fissare per ostacolare lo scorrimento angolare, i componenti più utilizzati in questo caso sono le spine e le linguette, entrambi dispositivi di collegamento unificati, la prima consiste in un prisma a sezione circolare che viene assemblata diametralmente agli organi, quindi anche il montaggio e lo smontaggio avviene lungo quella direzione; la seconda consiste normalmente in un prisma a sezione rettangolare (anche se può essere anche a forma di mezzaluna) e viene montata all'interno di due sedi, scavate sulla superficie esterna dell'albero e su quella interna della ruota dentata, dette cave; in modo che i fianchi aderiscano a quelle di quest'ultime fungendo da ostacolo; il principale difetto di questi componenti è dato dal fatto che lavorando a taglio la forza trasmissibile risulta limitata rispetto un albero scanalato che nel suo funzionamento può essere considerato come un sistema di linguette che lavorano contemporaneamente in parallelo; i principali vantaggi dell'utilizzo di questa soluzione sono: una maggiore semplicità e velocità di realizzazione ed un minor costo rispetto gli alberi scanalati, l'estensione della lavorazione ristretta alla zona in cui viene collocata la linguetta o la spina; gli svantaggi sono invece: il momento torcente trasmissibile limitato, la limitata durabilità del componente intermedio in quanto lavorando sotto una condizione di taglio puro

questo è soggetto a frequente rottura; inoltre in maniera analoga per quanto riguardava gli alberi scanalati anche l'utilizzo di spine e linguette è limitato a diametri che non scendono sotto determinati valori.

4. **Soluzioni miste:** prevede l'utilizzo di un componente intermedio tra l'albero e l'organo che viene tuttavia assemblato ad uno dei due utilizzando un accoppiamento di forza; questa è una soluzione fortemente sconsigliata in quanto gli svantaggi dei due tipi di accoppiamento si sommano ed in molti casi questi superano di gran lunga i pregi: primo tra tutti quando uno dei due componenti è fatto di un materiale che a causa delle sue proprietà rende problematica la trasmissione di coppie tramite calettamento forzato per cui utilizzando un materiale compatibile a questo tipo di accoppiamenti l'elemento intermedio funge da tramite per la trasmissione del moto.

Come si può notare dalla figura 10, questa soluzione permetterebbe un accoppiamento di interferenza tra l'albero cilindrico e la boccia a sezione quadrata entrambi realizzati in metallo quindi con una migliore tenuta rispetto al binomio acciaio-resina in quanto possibile praticare delle interferenze maggiori, mentre tra boccia e ruota ricadrebbe la scelta dell'accoppiamento di forma che eliminerebbe definitivamente il problema dello slittamento a causa dell'ostacolo tra le parti, altro vantaggio sta nell'utilizzo di un albero a sezione costante che comporterebbe a sua volta l'utilizzo di cuscinetti identici tra loro, come contro si avrebbe che per quanto l'accoppiamento di interferenza cilindrico tra albero e boccia entrambi metallici sia migliore rispetto a quello che attualmente si ha nel giunto (perché potendo scegliere il tipo di materiale della boccia questo può tranquillamente essere selezionato tra una vasta gamma con qualità più elevate della resina) questo non garantisce comunque il mantenimento della sincronia qualora il momento torcente raggiungesse quello critico.

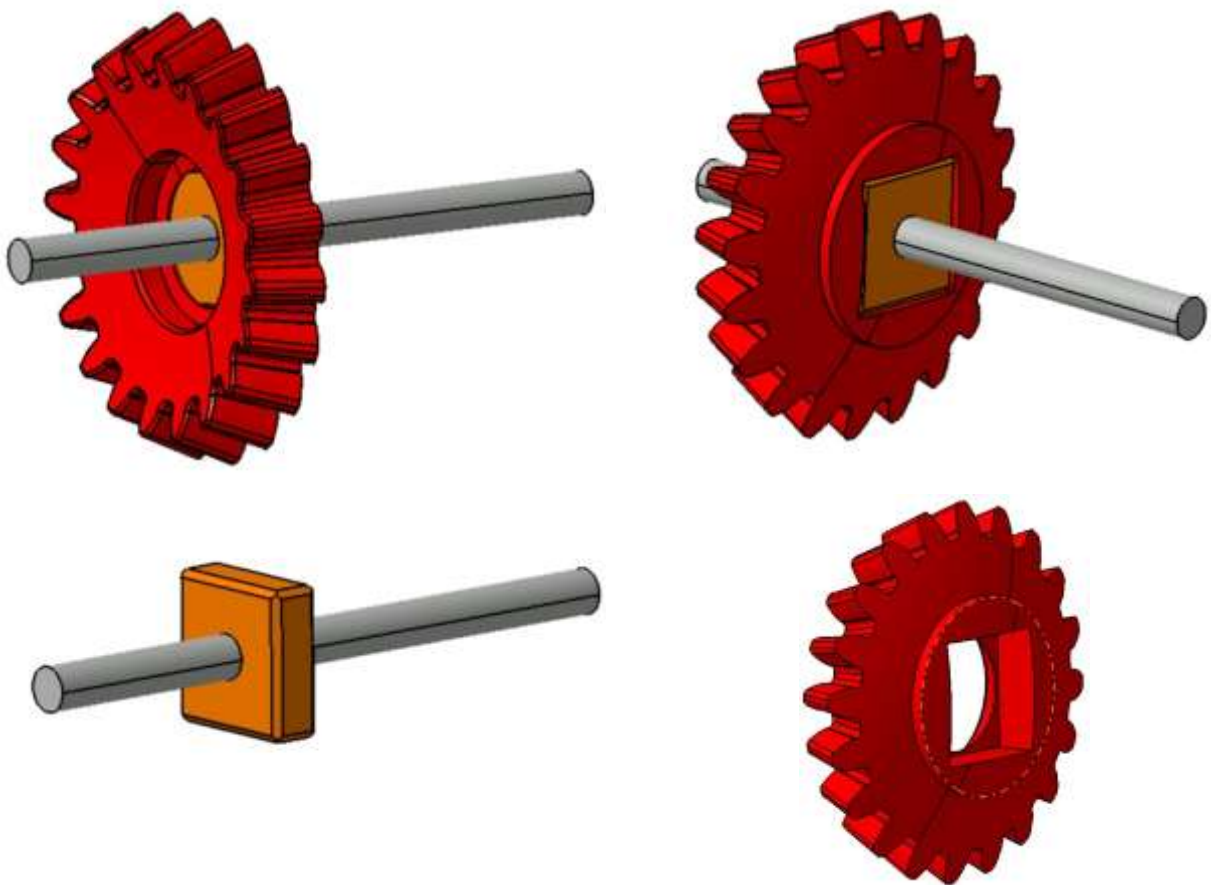


Figura 10: viste della soluzione mista con boccia

7.1.1. Equazioni per il calcolo dimensionale dei calettamenti con forza

[4] Se si volesse effettuare un calcolo dimensionale, si può partire da due relazioni empiriche che legano le dimensioni indicative del mozzo (lunghezza L_M e spessore t_M) alla coppia trasmessa C espressa in N/mm:

$$L_M = a^3 \sqrt[3]{C/100}$$

$$t_M = b^3 \sqrt[3]{C/100}$$

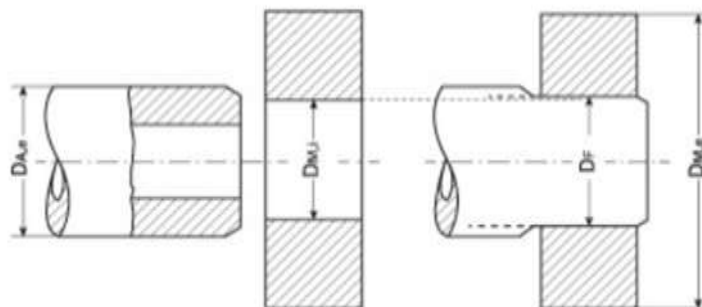
dove **a** e **b** sono coefficienti che dipendono dal materiale con cui viene realizzato il pezzo da fissare sull'albero e dal tipo di accoppiamento (con pressa, termico o conico); restituendoci delle misure indicative queste dovranno poi essere adattate al caso in esame per garantire la giusta condizione di resistenza.

Successivamente, si passa al calcolo della coppia massima trasmissibile tramite sforzi tangenziali il cui valore dipende dalla pressione di contatto **p** e dal coefficiente di attrito **μ** e che per un elemento cilindrico al limite dello slittamento vale:

$$C_{max} = \frac{\pi}{2} D^2 L \mu p$$

Questo valore va poi corretto dividendo per un coefficiente di sicurezza che varia da 1,5 qualora si abbia momento costante a 3,5 per carichi fortemente variabili con ulteriori maggiorazioni nel caso di ulteriori carichi assiali aggiuntivi o di fatica.

Una volta calcolata la pressione di contatto necessaria a trasmettere il momento torcente, bisogna calcolare l'interferenza necessaria al fine di garantirla calcolata come somma algebrica delle due variazioni di diametro; il concetto di interferenza viene mostrato in figura 7.



Diametri di albero e mozzo prima e dopo il calettamento

Figura 7

Il calcolo dell'interferenza si rifà alla teoria dei tubi pressurizzati a grande spessore, sia per la trattazione dell'albero che del componente da calettare:

- ALBERO: la variazione del diametro esterno dell'albero $\Delta D_{A,e}$ viene espresso tramite la seguente formula:

$$\Delta D_{A,e} = -\frac{p_e}{E_A} D_{A,e} \left(\frac{1 + Q_A^2}{1 - Q_A^2} - \nu_A \right)$$

Con il rapporto di diametro Q_A definito come $D_{A,i}/D_{A,e}$

- MOZZO: la variazione del diametro interno $\Delta D_{M,i}$ viene invece espresso come:

$$\Delta D_{M,i} = \frac{p_i}{E_M} D_{M,i} \left(\frac{1 + Q_M^2}{1 - Q_M^2} - \nu_M \right)$$

Con il rapporto di diametro Q_M definito come $D_{M,i}/D_{M,e}$

Ad accoppiamento effettuato pressioni di montaggio e diametri esterno dell'albero ed interno del foro si equivalgono: $p_i = p_e = p$; $D_{A,e} = D_{M,i} = D_f$ potendo così calcolare l'interferenza come segue:

$$I = \Delta D_{M,i} + \Delta D_{A,e} = p D_f \left[\frac{1}{E_M} \left(\frac{1 + Q_M^2}{1 - Q_M^2} - \nu_M \right) + \frac{1}{E_A} \left(\frac{1 + Q_A^2}{1 - Q_A^2} - \nu_A \right) \right]$$

Questa formula è di validità generale, nel caso in cui i materiali con cui vengono realizzate le due parti fossero gli stessi questa subirebbe una drastica semplificazione:

$$I = D_f \frac{p}{E} \left(\frac{2}{1 - Q_M^2} \right)$$

Calcolato il valore di interferenza dell'accoppiamento, conoscendo i coefficienti di dilatazione termica lineare dei due materiali si può ottenere il gradiente termico necessario all'assemblaggio di uno o di entrambi i membri invertendo la seguente formula:

$$I = D_f [\alpha_A \Delta T_A - \alpha_M \Delta T_M]$$

Tuttavia, non possedendo tutti i dati necessari per il calcolo relativi alla resina, questo non può essere eseguito in maniera strettamente matematica ma i risultati vanno ricercati per via empirica.

Se al posto del calettamento tradizionale si decidesse di accoppiare le superfici mediante un accoppiamento conico forzato si otterrebbe un aumento del momento torcente trasmesso con un aumento della semplicità di montaggio con una distribuzione delle forze di attrito più uniforme e meno soggetta a slittamenti.

Il calcolo della coppia trasmissibile, del precarico assiale ed interferenza nel caso di coppia conica si esegue partendo con i parametri di conicità ed area di contatto superficiale:

$$C = \frac{D - d}{L} = 2 \tan \frac{\alpha}{2}$$

$$A = \frac{\pi D_m}{\cos \frac{\alpha}{2}} L$$

La conicità è necessaria al fine di verificare che l'accoppiamento conico tenga, e questo avviene in generale se $\frac{c}{2} < \mu$; mentre l'area di contatto permette di stabilire la coppia massima trasmissibile:

$$C_{max} = \frac{1}{2} \mu p A D_m$$

Che differisce dal caso cilindrico unicamente per il contributo dell'angolo di inclinazione il quale a sua volta fa sì che per ottenere un determinato valore di pressione sia necessario un carico assiale:

$$F_a = p \pi D_m L \left(\tan \frac{\alpha}{2} + \mu \right)$$

Mentre l'interferenza quindi il forzamento viene ottenuto spingendo assialmente le due parti l'una sull'altra in termini di spostamento assiale e.

$$e = \frac{\Delta D_{M,i} + \Delta D_{A,e}}{2 \tan \frac{\alpha}{2}}$$

7.2. Difetto 2: interruzione della catena cinematica del cursore

Il secondo difetto del giunto è stato riscontrato sulla vite che ha lo scopo di trasferire il moto dall'attuatore al cursore che permette il cambio di configurazione del giunto: questo componente, come visibile in figura 11, è posizionato nel baricentro del meccanismo del giunto ed insieme alla madre vite permette la conversione del moto puramente rotatorio caratteristico dei comuni attuatori nel moto traslatorio necessario per lo scorrimento del cursore; all'estremità posteriore della vite è posizionata una ruota dentata che altro non è che la condotta della ruota di comando del cursore evidenziata in figura 6.

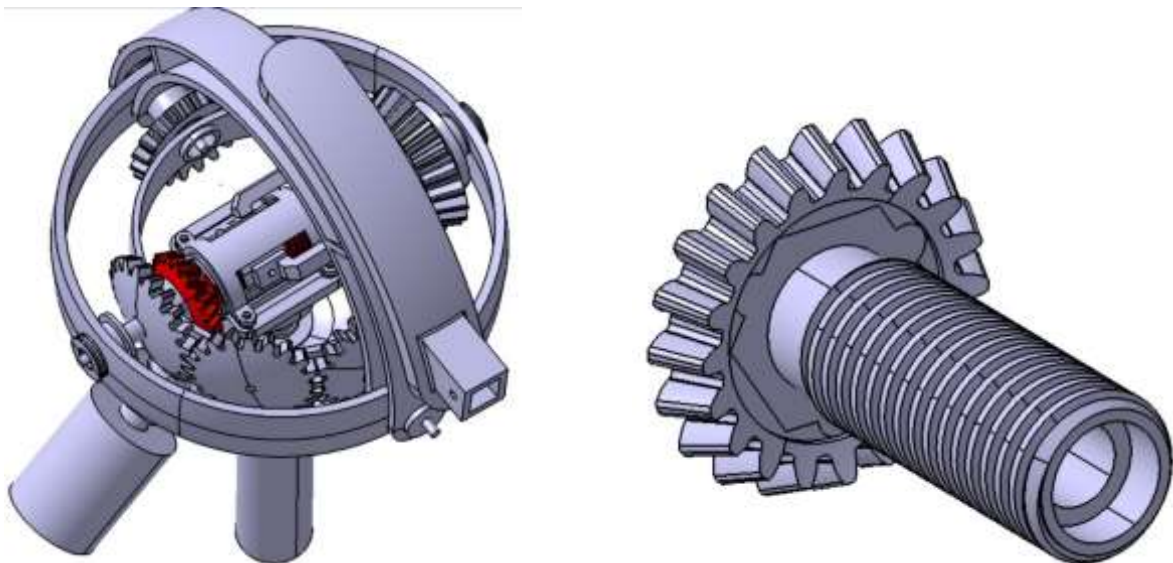


Figura 11: particolare che interessa l'interruzione della catena cinematica del cursore

Il mantenimento della posizione della vite è garantito assialmente dalla culla e dal telaio che fungono da battuta mentre in direzione radiale ad impedire il movimento è la duplice combinazione della madrevite vincolata a scorrere lungo le apposite guide posizionate sul telaio e dei cuscinetti che servono a ridurre al minimo l'attrito tra vite ed albero di trasmissione principale che la attraversa internamente e che al contempo mantengono coassiali i due componenti; la sede del primo cuscinetto è visibile nella figura 11, mentre per il secondo cuscinetto una sede del tutto analoga è presente posteriormente, nascosta da una battuta e visibile quando si separano le due metà in cui è diviso il componente, come mostrato in figura 12.

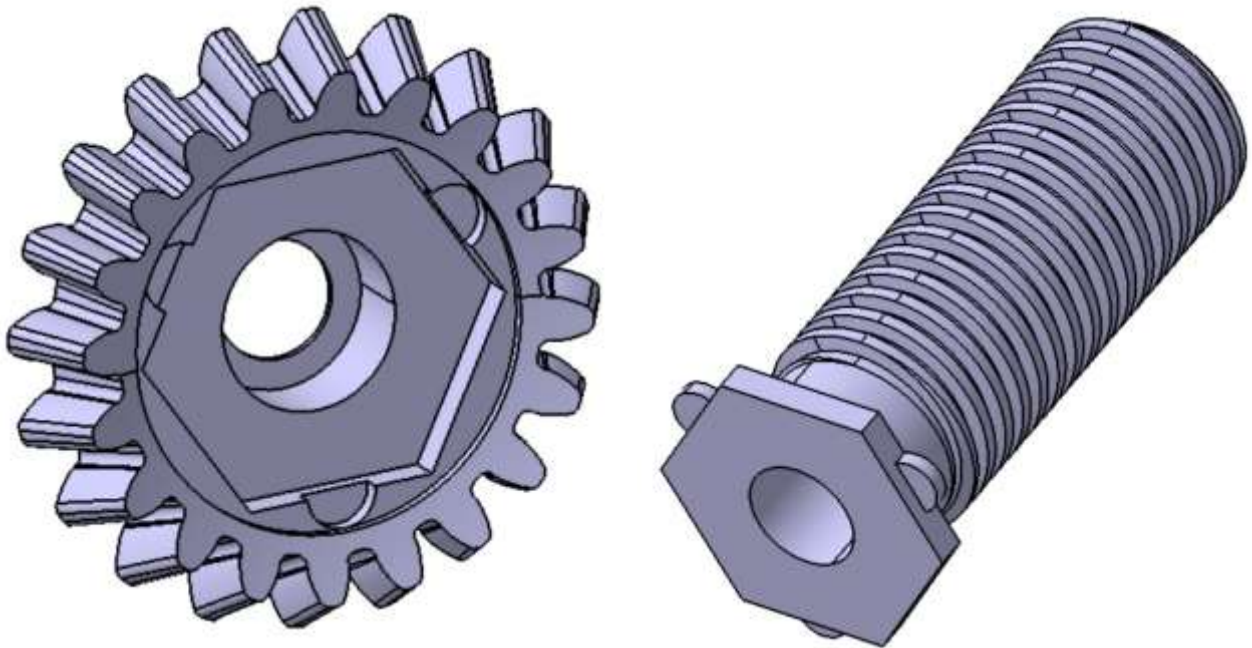


Figura 12: particolare dell'innesto e della sede del cuscinetto tra ruota dentata e vite

[5] Normalmente se si hanno più cuscinetti, le forze assiali devono essere assorbite da un unico cuscinetto fisso i cui anelli interno ed esterno sono rispettivamente fissati (nel caso in esame) all'albero di trasmissione principale ed alla vite, mentre le tolleranze di fabbricazione ed i valori di dilatazione termica saranno invece compensati dall'altro cuscinetto che viene detto cuscinetto libero in quanto solo uno dei due anelli viene fissato al rispettivo corpo al fine di prevenire sovraccarichi tensionali aggiuntivi all'interno del materiale dovuti al surriscaldamento che sommandosi a quelli di normale esercizio causino il cedimento strutturale del componente.

Tuttavia ogni qual volta si decida di utilizzare cuscinetti obliqui, fondamentali per sopportare (come nel nostro caso) carichi assiali dovuti alla presenza della vite combinati a quelli radiali dovuti invece alla ruota dentata, il gioco radiale è funzione di quello assiale, per tale motivo in questo caso entrambi i cuscinetti devono essere montati come cuscinetti fissi; questa soluzione è applicabile quindi solo ad "alberi corti" in cui grazie all'estensione ridotta le dilatazioni termiche rimangono contenute e proprio per questo di fondamentale importanza è la regolazione del gioco realizzata attraverso lo spostamento dell'anello interno qualora si scelga una configurazione di montaggio ad "O" oppure di quello esterno quando si sceglie una configurazione di montaggio ad "X".

Nel nostro caso, essendo la vite in battuta da entrambi i lati e che questa possa definirsi come "albero corto", la scelta tra l'utilizzo di cuscinetti radiali o conici non comporta grandi differenze in quanto che, se il carico assiale è limitato

oppure scaricato solo parzialmente sui cuscinetti come in questo caso, anche i comuni cuscinetti a sfera possono sopportarlo poiché la sezione della pista di rotolamento sugli anelli approssima un arco di circonferenza; questa forma garantisce una reazione vincolare composta sia dal contributo radiale che assiale, almeno fin quanto questa ricade all'interno della superficie stessa della pista.

Da un punto di vista teorico la scelta di realizzare vite e ruota dentata separate in modo da poter intrappolare il cuscinetto posteriore all'interno del corpo quando le due metà vengono congiunte garantisce il fissaggio del cuscinetto senza dover ricorrere a calettamenti con interferenza o boccole.

Anche in questo caso la presenza di giochi imprevisti causati dall'imprecisione delle lavorazioni comportano un malfunzionamento che si manifesta tutte le volte che si aziona il cursore per passare dalla configurazione A del giunto alla configurazione B; nel dettaglio tale malfunzionamento consiste nella separazione della vite dalla ruota dentata che impedisce di portare a compimento l'operazione ed ogni successivo azionamento del meccanismo, dovendo necessariamente intervenire manualmente riallineando il maschio e la femmina dell'innesto esagonale ruotando la vite ed infine riportarla in contatto con la ruota dentata.

La soluzione più semplice per evitare la separazione delle due metà è quella di unirle insieme e realizzare la sede del cuscinetto posteriore speculare a quella anteriore così da semplificare sia la realizzazione che il montaggio del pezzo; ciò permette il funzionamento del giunto e la possibilità di cambiare configurazione con continuità senza interventi di manutenzione esterni; di seguito (figura 13) è possibile vedere la vite resa solidale alla ruota rimuovendo l'innesto esagonale, le sedi dei cuscinetti sono visibili nella vista in sezione nella figura 14.

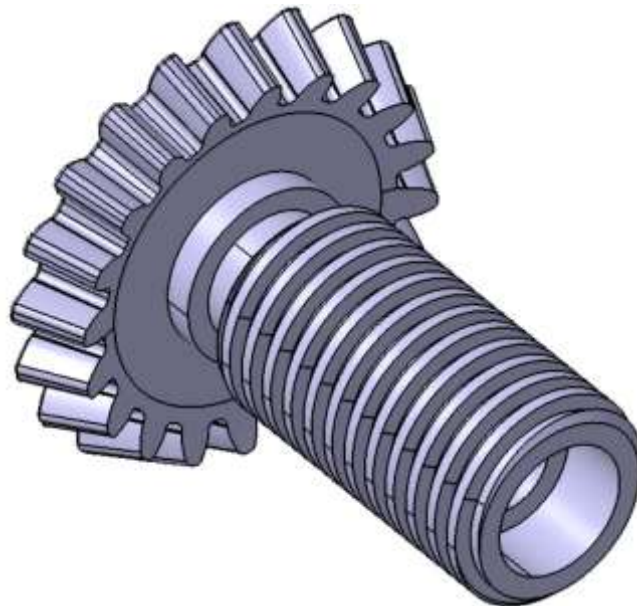


Figura 13: prospettiva della vite ottimizzata

Mentre il problema della separazione è risolvibile senza grandi difficoltà, tutt'altro discorso vale per l'eliminazione dei giochi eccessivi (legati come detto prima all'imprecisione delle lavorazioni) che con il cambio di forma della sede del cuscinetto posteriore, sotto l'azione dei carichi assiali della vite, potrebbero causare il disallineamento del cuscinetto comportando a sua volta un aumento delle forze dissipative, delle vibrazioni e con il tempo fenomeni di usura; per risolvere tutto ciò si può:

1. Revisionare le quote di tutti i componenti che contribuiscono al mantenimento in posizione della vite al fine di migliorarle e restringere poi le tolleranze agendo direttamente sul processo produttivo.
2. Trovare una soluzione esclusivamente di tipo geometrico che renda la vite poco suscettibile a giochi e cedimenti vincolari.

Tra i due quello più facilmente realizzabile è il secondo: sfruttando la distanza che intercorre tra la dentatura della ruota conica e l'inizio della filettatura della vite, necessariamente presente per dare spazio alla parte del telaio che funge da finecorsa allo scorrimento della madrevite, è possibile introdurre (come si vede in figura 13) una gola che in fase di assemblaggio funge da sede al finecorsa che in questo caso fa anche da supporto al fine di contrastare i carichi durante la fase transitoria del giunto.

In figura 14 è invece possibile vedere oltre la forma speculare delle sedi dei cuscinetti anche lo spazio tra ruota e vite sfruttato per la gola.

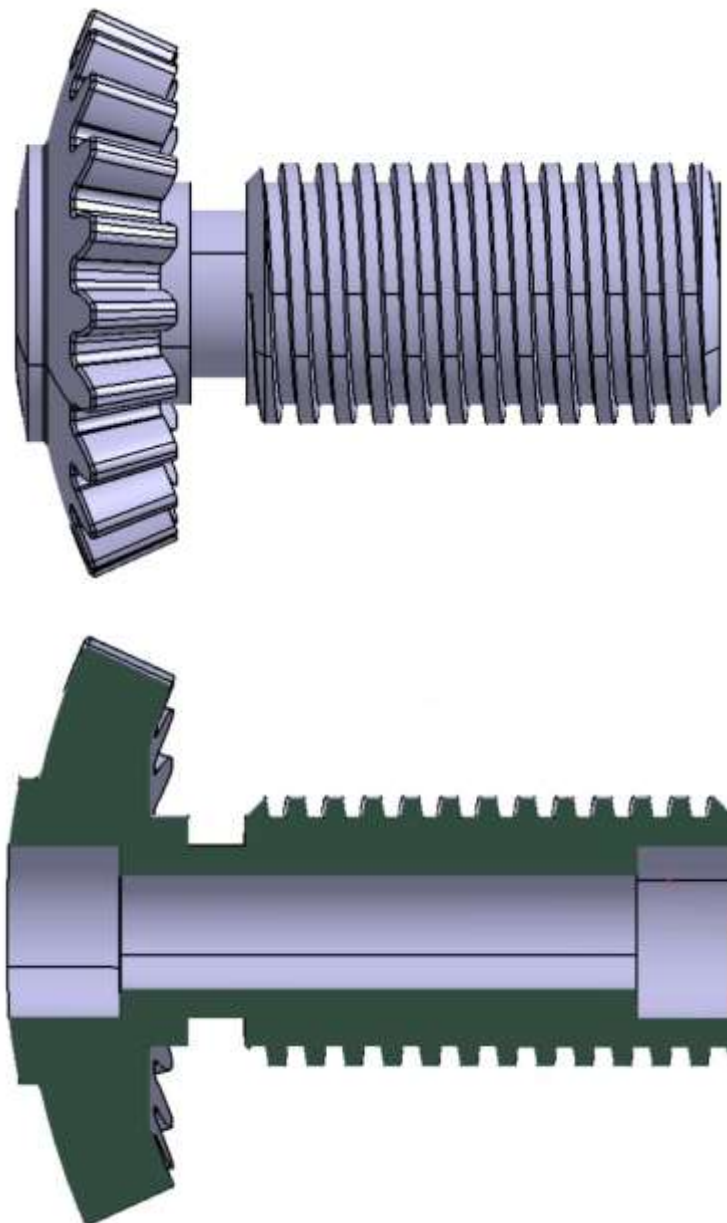


Figura 14: vite ottimizzata, vista laterale e sezione

Questa nuova geometria del tutto simile alla precedente risolve in maniera definitiva le problematiche riscontrate con la precedente offrendo inoltre una maggiore robustezza dovuta alla continuità del materiale; per quanto riguarda il cambio di geometria del telaio necessario per la compatibilità del nuovo pezzo sarà trattato nella prossima sezione in quanto parte integrante del difetto successivo.

L'ultima potenziale minaccia è costituita dalla sede del cuscinetto posteriore rimasta aperta da un lato, così facendo, a garantire il bloccaggio assiale dell'anello esterno del cuscinetto è soltanto l'attrito che si sviluppa tra le superfici.

Nonostante il rischio che il cuscinetto esca dalla propria sede sia lontano dal potersi verificare avendo impedito i movimenti assiali di tutto il pezzo, volendo ad ogni modo garantirne la solidità a montaggio effettuato, è possibile:

- Vista la presenza dello spallamento protruso esternamente nella parte posteriore, pensare di trasformarlo in una boccia avvitabile sulla ruota dentata; operativamente questa ricalcherebbe la forma dello spallamento originale e prevederebbe il montaggio del cuscinetto su di essa ed il successivo avvitamento al pezzo, così da garantire il serraggio; tuttavia questo comporterebbe la realizzazione di due pezzi e per evitare un eccessivo indebolimento del corpo principale (l'unico a subire la torsione) sarebbe necessario realizzare una boccia composta unicamente da pareti sottili, con diverse criticità nella realizzazione e fortemente sensibile a deformazione durante il serraggio, anche quest'ultimo critico non solo in termini di forze da applicare ma anche geometricamente viste le quote altamente ridotte difficilmente compatibili sia con le comuni chiavi inglesi che con le chiavi a doppio perno pensate appositamente per questo tipo di soluzioni; in figura 15 è visibile la forma della boccia in cui risaltano le pareti sottili e una volta montata disegna una geometria del tutto identica alla vite originale, ad eccezione dei tagli per la chiave.

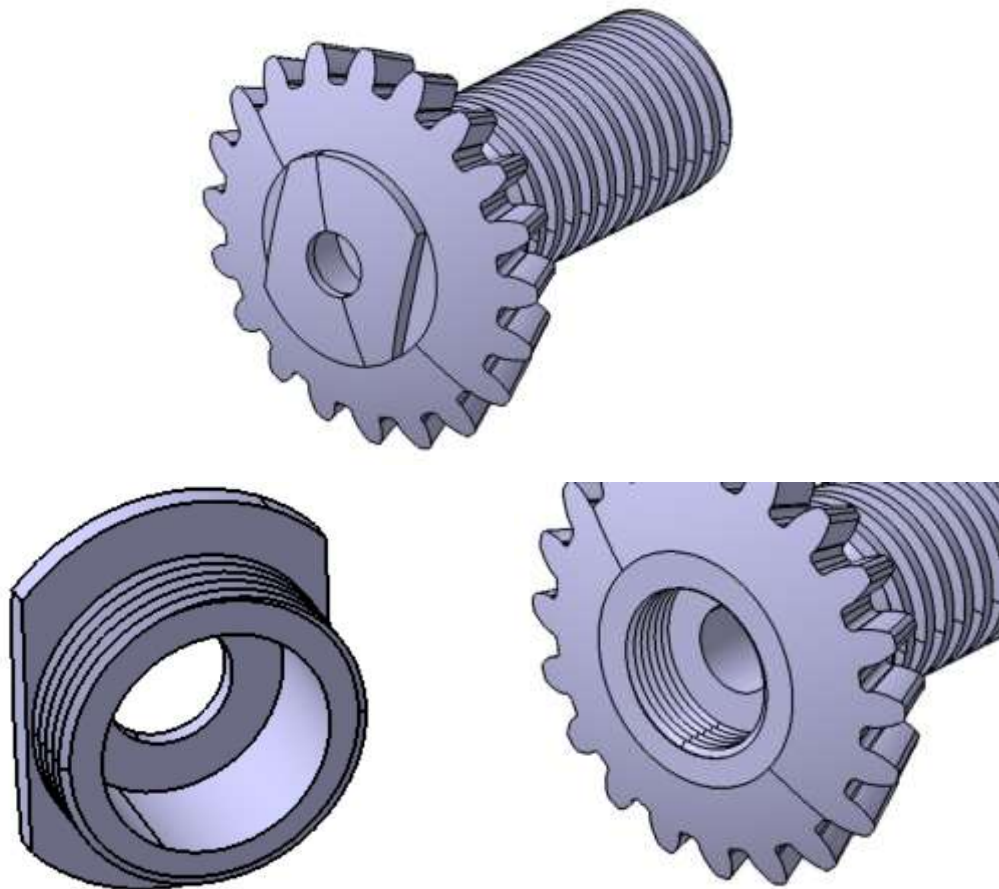


Figura 15: aspetto della boccia

- Alternativamente una soluzione più esotica, ma spesso utilizzata nei componenti realizzati in materiale plastico (a maggior ragione utilizzabile nel caso in esame in quanto la stampa 3D non risente dei problemi di lavorazione in presenza dei sottosquadri), che eviterebbe la necessità di ridividere il pezzo in due parti sarebbe quella di introdurre una molla la cui forma ricorda la sezione di una chiavetta con nasello visibile in figura 16; operativamente quando il cuscinetto viene inserito la forma del naso causerebbe la flessione della molla che spostandosi ne permette l'ingresso nella sede, mentre in direzione opposta il naso farebbe da ostacolo impedendone l'estrazione a meno di un azionamento della molla dall'esterno; criticità di questa soluzione sta nel dimensionare opportunamente la sezione della molla per evitarne la rottura dovuta alla flessione, nell'inserire opportuni raccordi alla base per prevenire l'insorgere delle fratture e nello scegliere un giusto posizionamento del pezzo in fase di stampa in modo da non dover ricorrere a supporti che vista la geometria del particolare sarebbero difficili poi da rimuovere.

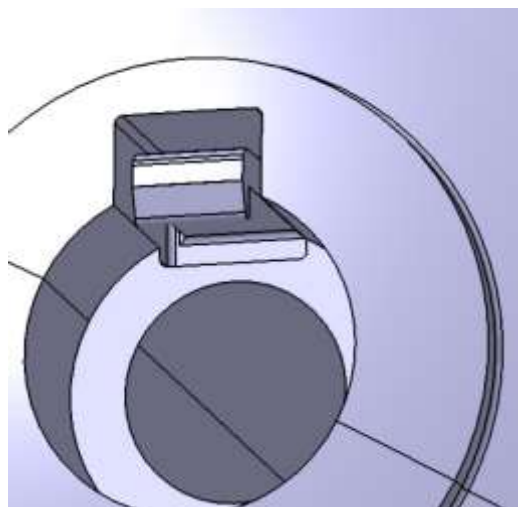
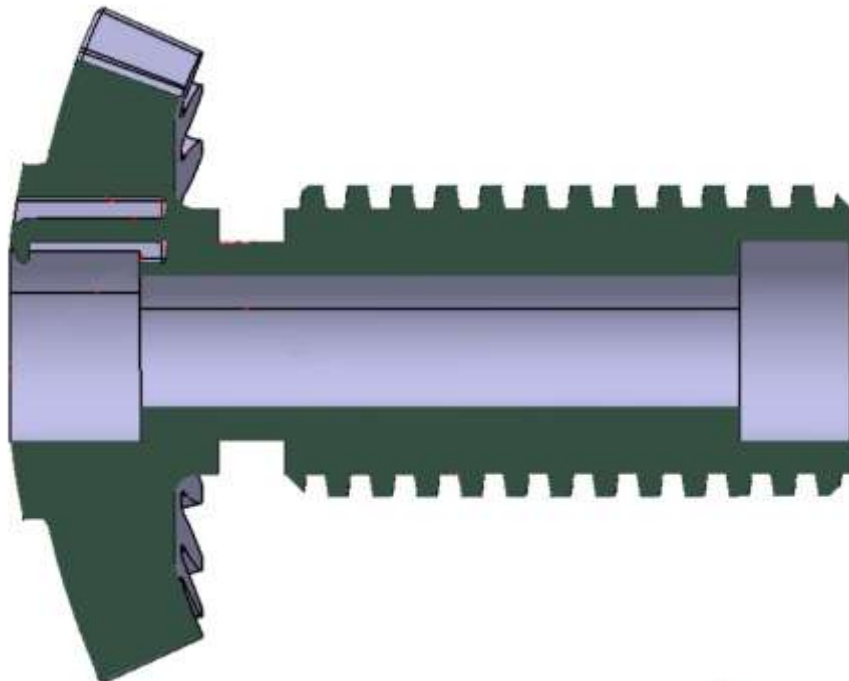


Figura 16: sezione della vite e particolare della molla

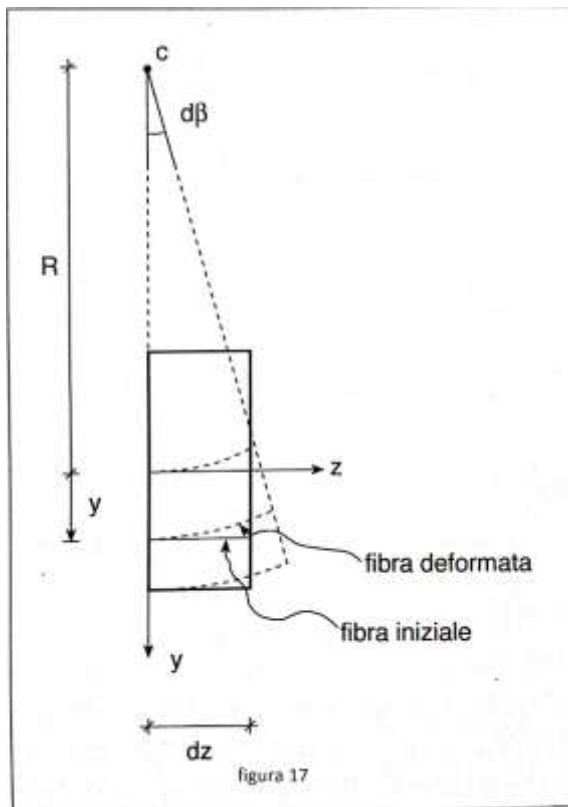
7.2.1. Dimensionamento della molla

[6] Per un dimensionamento preliminare della molla si può ricorrere all'utilizzo delle equazioni della linea elastica a flessione, applicabili perché:

1. La molla è costituita da una trave rettilinea a sezione costante.
2. Il materiale, seppur condizionato dalla direzione dei piani di stampaggio, può essere considerato linearmente elastico, omogeneo ed isotropo.
3. Le forze di volume sono trascurabili rispetto i carichi esterni ed il mantello è scarico.

Tuttavia, queste non sono sufficienti per descrivere nella sua interezza il problema elastico in quanto viene meno il principio dei piccoli spostamenti e delle piccole deformazioni su cui si basa il postulato di De Saint Venant (D.S.V.).

Per completezza della trattazione verranno sia illustrati il caso ipotetico in cui la deformazione della molla rientri nel caso delle piccole deformazioni, potendo così utilizzare le equazioni della linea elastica, che il caso reale in cui, non rientrando nel caso delle piccole deformazioni è necessario usare le più accurate formule per il dimensionamento delle molle.



Definendo il corpo della molla come una trave isostatica incastrata ad un'estremità, applicando un carico trasversale si innescano al suo interno fenomeni flessionali e di taglio, essendo questi ultimi trascurabili e matematicamente più complessi da analizzare rispetto a quelli dovuti alla sola flessione saranno trascurati; alla luce di ciò isolando un concio di trave e mantenendo fissa la sezione di sinistra questo si deforma come in figura 17.

Come si può notare le due sezioni rimangono piane, incontrandosi idealmente in un punto C detto centro di curvatura e formando tra di loro un angolo di curvatura infinitesimo $d\beta$.

Il concio si incurva, e l'asse, inizialmente rettilineo, diventa un arco di circonferenza di raggio R.

Essendo l'asse neutro per definizione quello che non subisce variazioni di lunghezza, possiamo definire la lunghezza iniziale come $l_i = dz = R d\beta$.

A deformazione avvenuta invece $l_f = (R + y)d\beta$ che

conduce al risultato $\varepsilon_z = \frac{y}{R} = k_x y$ dove $1/R$ è la curvatura nel piano perpendicolare ad x.

Dalla legge di Hooke, sapendo che $M_x = Ek_x I_x$ si ottiene la *formula di Navier*: $\sigma_z = \frac{M_x}{I_x} y$.

Da questa formula sapendo che, la distanza di ogni punto dell'asse neutro, si trova a distanza costante da C è possibile scrivere lo spostamento verticale del generico punto a distanza z dall'origine come:

$$v(z) = -\frac{1}{2} \frac{M_x}{EI_x} z^2.$$

Nel caso in esame eseguendo tutti i calcoli otteniamo che:

$$v(z) = \frac{3\delta z^2}{2l^2} - \frac{\delta z^3}{2l^3}$$

Con $\delta = Fl^3/EI$

La derivata seconda vale invece:

$$v'' = \frac{3\delta}{l^2} - \frac{3\delta z}{l^3}$$

Sapendo che, in generale il momento vale $M = -EIV''$ e che quello massimo si ha all'incastro quindi per $z = 0$ si ottiene:

$$M_0 = -\frac{3EI\delta}{l^2}$$

$$y_{MAX} = -h/2$$

$$\sigma = \frac{3E\delta h}{2l^2}$$

$$\sigma_{amm} = \frac{\sigma_s}{n}$$

Da cui trovo che lo spessore della molla, ipotizzando che si rientri nelle piccole deformazioni, vale:

$$h = \frac{2L^2\sigma_s}{3E\delta n}$$

[7] Mente, tenendo conto invece che, lo spostamento verticale massimo della molla ha lo stesso ordine di grandezza della sua lunghezza, la formulazione precedente non è più valida in quanto si rientra nel caso dei grandi spostamenti e quindi delle grandi deformazioni; in questo caso la formulazione più corretta per il dimensionamento è quella che passa per la definizione di coefficiente di utilizzo (che per una molla a flessione a sezione rettangolare vale 1/9):

$$C_u = \frac{\text{Energia effettivamente immagazzinata dalla molla}}{\text{Massima energia teoricamente immagazzinabile}}$$

Dove l'energia effettivamente immagazzinata altro non è che l'area sottostante alla curva che descrive (nel caso delle molle a flessione) il valore della forza F applicata all'estremità della molla in funzione dello spostamento $v(l)$, questa in particolare vale:

$$E_{reale} = \frac{1}{2} F v(l)$$

Concordante con il fatto che, lavorando nella zona elastica del materiale, il grafico ha andamento lineare, per cui l'area sottesa dalla curva corrisponde a quella di un triangolo; mentre la massima energia teoricamente immagazzinabile corrisponde al grafico che si avrebbe se il materiale rispondesse fin dall'inizio della deformazione con il massimo della tensione che nella realtà si raggiunge solamente alla fine; la massima energia teoricamente immagazzinabile vale:

$$E_{MAX} = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E} V$$

Dove V corrisponde al volume del materiale ed è pari a: $V = Lbh$.

Sapendo inoltre che $\sigma_{MAX} = M/W_f = 6PL/bh^2$ è possibile riscrivere E_{MAX} come segue:

$$E_{MAX} = \frac{18F^2L^3}{Ebh^3}$$

Che permette di scrivere:

$$\frac{\frac{1}{2}F v(l)}{\frac{18F^2L^3}{Ebh^3}} = \frac{1}{9}$$

Da cui si ricava:

$$h = \sqrt{\frac{4\sigma_s L^3}{Ev(l)n}}$$

7.3. Difetto 3: eccessiva complessità e numero di componenti di telaio e cursore

A differenza dei difetti precedenti, l'eccessivo numero di componenti di cui è composto il telaio non impedisce il corretto funzionamento del giunto per cui si potrebbe, al solo scopo di farlo funzionare in maniera coerente alle specifiche, limitarsi a correggere quelle parti che, a causa delle proprie cedevolezza, ne impediscono il corretto funzionamento.

Tuttavia, maggiore è il numero di componenti, maggiori sono le cedevolezza che si introducono nel sistema, in quanto che dato lo spazio limitato in cui è racchiuso il telaio, aumentando di numero si riducono le dimensioni di ogni singolo componente che a parità di carichi esterni comportano una maggiore intensità delle azioni interne che il materiale subisce, avvicinandoli così alla crisi.

Oltre al fatto che assemblando inutilmente un maggior numero di componenti le rispettive quote si sommano, comportando così un aumento dell'incertezza complessiva sulle misure e di conseguenza dei giochi dovendo così

restringere le tolleranze; riducendo invece al minimo il numero di componenti, oltre ad avere la possibilità di aumentarne le dimensioni, a parità di spazio disponibile si riducono il numero di tolleranze che si sommano tra loro e di conseguenza i giochi senza dover aumentare la precisione delle lavorazioni.

Questo giustifica il fatto che, nonostante non sia strettamente necessario, semplificare le parti arrechi vantaggio non solo alla loro realizzazione, ma anche alla risoluzione degli altri difetti e all'assemblaggio finale dell'insieme.

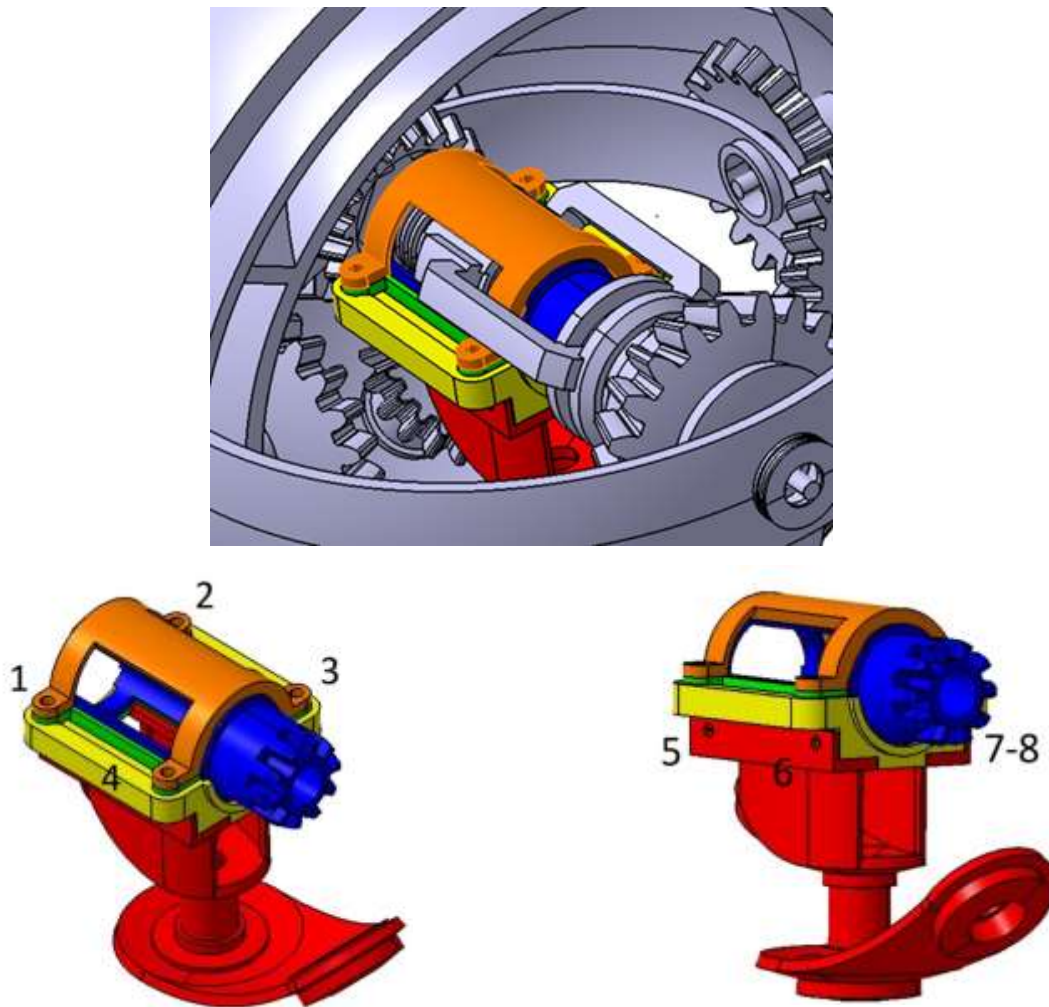
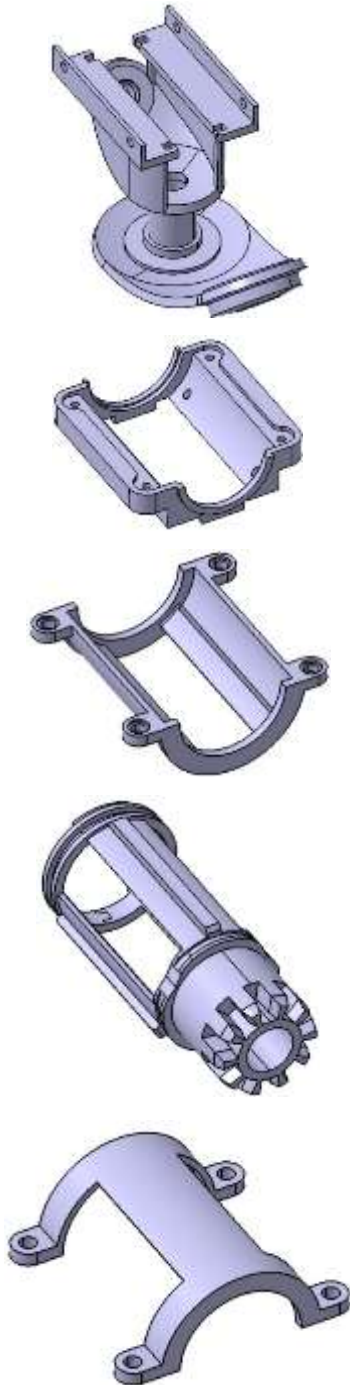


Figura 18: particolari della struttura della parte superiore del telaio

Come illustrato in figura 18, il telaio è composto da cinque componenti collegati tra loro da ben otto viti M3, la prime quattro uniscono quelle parti che, collegate tra loro, sorreggono e fungono da guida a vite e madrevite, le seconde quattro invece collegano il blocco centrale alla base colorata in rosso (le sedi delle viti 7 ed 8 non si vedono ma sono speculari rispetto alla 5 e 6).



La parte principale è costituita dalla base in cui si trovano le sedi dei cuscinetti delle ruote motrici e della prima condotta della catena cinematica principale alla base e l'armatura di supporto della parte superiore; questa è la parte fissa, che come spiegato nei precedenti capitoli è solidale al sotto-telaio grazie agli alberi che sorreggono le ruote dentate.

A seguire si trova il supporto primario sulla quale sono realizzati i fori di tutte le viti; il suo scopo è quello di collegare tutti gli altri componenti alla base.

Questo si fissa alla base tramite le viti 5,6,7,8.

Il supporto secondario ha lo scopo di mantenere in posizione la gabbia, impedendole di traslare e ruotare lungo il proprio asse; questo viene fissato al supporto primario tramite le viti 1,2,3,4.

La gabbia ha una duplice funzione: fungere da guida alla madrevite in modo da impedirle il moto rotatorio, imponendole così la traslazione e fungere da innesto al cursore quando questo si trova nella configurazione B; questo viene mantenuto in posizione tramite incastro in quanto bloccato tra il supporto secondario ed il coperchio che si fissano al supporto primario grazie alle viti 1,2,3,4. Il coperchio ha lo scopo di mantenere in posizione la gabbia ad evitare che questa ruoti quando il cursore si innesta al telaio ed evitare che in fase di assemblaggio le varie parti si disallineino; è fissato al supporto primario grazie alle viti 1,2,3,4 sul quale vengono poste in battuta.

Osservando la gabbia è possibile inoltre notare come non ci siano vincoli atti ad ostacolare la traslazione della vite; come spiegato nella precedente sezione relativa al difetto della stessa, questo sta alla base del problema della separazione delle due parti di cui è composta, con la relativa conseguenza dell'interruzione della catena cinematica che collega l'attuatore al cursore.

Stessa cosa vale per la madrevite e le braccia che soffrono dello stesso problema e che a causa sia del numero di componenti che dell'ordine di montaggio del telaio costringono queste parti ad essere innanzi tutto divise tra loro con la conseguente necessità di assemblarle tramite una vite per ogni braccio e successivamente "ridotte all'osso" per permettergli di lavorare negli spazi ristretti che gli rimangono; come si può notare a figura 19.

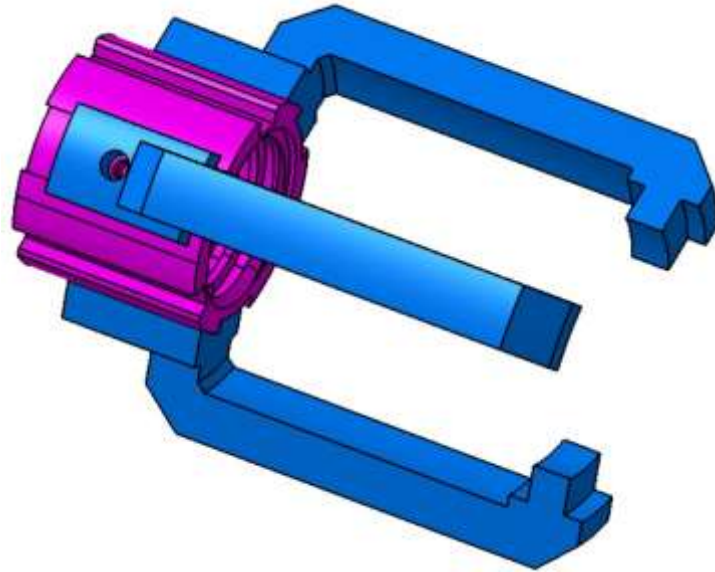


Figura 19: braccia e madrevite originali

Come si evince dalla precedente figura, la geometria snella delle braccia non solo le rende particolarmente delicate ma anche sensibili al fenomeno del carico di punta e i bruschi cambi di forma diventano zone di concentrazione delle tensioni che in fase transitoria del giunto potrebbero comportarne la rottura.

Avendo ora introdotto tutti i componenti imputabili per le criticità dovute alla complicatezza del sistema pensato con questo layout, prima ancora di procedere con le dovute considerazioni per migliorare questi componenti, si riporta l'ordine di montaggio della parte interna del giunto:

1. Dopo aver posizionato tutti i cuscinetti nelle rispettive sedi, collocare il supporto primario sulla base, facendo attenzione di allineare i fori (essendo il supporto simmetrico, con c'è rischio di errore); ed avvitare le due parti inserendo le viti nelle posizioni 5, 6, 7, 8.
2. Posizionare il supporto secondario sul primario (anche in questo caso la simmetria del componente rende inequivocabile il corretto posizionamento).
3. Avvitare la madrevite sulla vite di comando (mostrata figura 13).
4. Infilare vite e madrevite nella gabbia finché vite e gabbia non arrivino in battuta.
5. Posizionare e successivamente avvitare un primo braccio alla madrevite, in modo che questo sia rivolto verso la dentatura della gabbia.
6. Sistemare il blocco vite-madrevite-braccio-culla sul blocco base-supporti in modo che il braccio già assemblato passi internamente alla luce presente sui supporti così da avere la base e la gabbia posizionati come da figura 18.
7. Posizionare il coperchio ed avvitarlo ai supporti tramite le viti 1, 2, 3, 4 così da fissare tutte le parti.
8. Posizionare il cursore in modo che il dente posto all'estremità del braccio penetri sulla gola del cursore stesso e che questo sia rivolto in modo tale che la dentatura frontale a mezzaluna sia rivolta esternamente all'insieme che si sta assemblando.
9. Assemblare le restanti braccia avvitandole alla madrevite in modo che siano posizionate in maniera analoga al braccio già montato, assicurandosi del corretto allineamento dei denti delle braccia con la gola del cursore.

Nella lista precedente, sono stati elencati unicamente gli elementi che si vogliono analizzare per la risoluzione di questo difetto, la sequenza di montaggio reale prevederebbe alcuni passaggi intermedi aggiuntivi, tuttavia essendo lo scopo di questa tesi quella di ottimizzare il prototipo del giunto già esistente, non verrà riportata la sequenza di montaggio completa del prototipo originale, bensì nel prossimo capitolo ci si dedicherà alla sequenza di montaggio completa, con le nuove parti ridisegnate e proposte in questo capitolo riguardante i difetti.

Questa lista di operazioni evidenzia come, nonostante questo layout non causi problematiche di funzionamento, la scelta di semplificarne al massimo la geometria, lasciando inalterate le funzionalità, possa comportare un notevole miglioramento non solo dal punto di vista meccanico-strutturale ma anche di montaggio, in quanto che la sequenza sopra riportata mette in mostra la difficoltà di eseguire le operazioni con solamente due mani tenendo conto della dimensione dei pezzi e della necessità di utilizzare anche l'attrezzatura necessaria ad avvitare le diti.

Alla luce di ciò un buon modo di proporre un layout alternativo è quello di partire con l'idea di semplificare la sequenza delle operazioni di montaggio agendo innanzi tutto sulla geometria della parte più complessa da assemblare e camminare a ritroso al fine di trovare il giusto compromesso.

L'operazione più complessa tra tutte è decisamente legata alla madre vite ed alle braccia e che allo stesso tempo corrispondono alle parti che più hanno bisogno di un rinforzo strutturale.

L'idea è quella di rendere madre vite e braccia come un unico componente, ridurre il numero di braccia da tre a due così da poterne aumentare l'area della sezione come in figura 20 e da qui partire per sviluppare un nuovo design per il telaio.

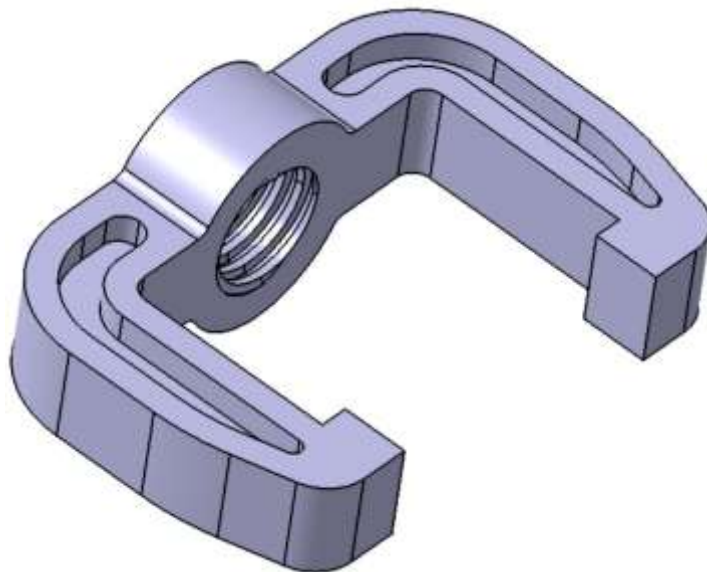
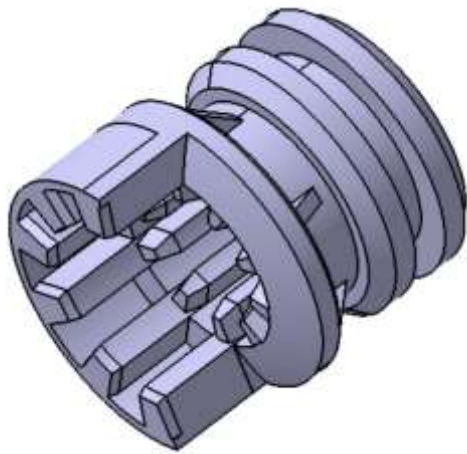


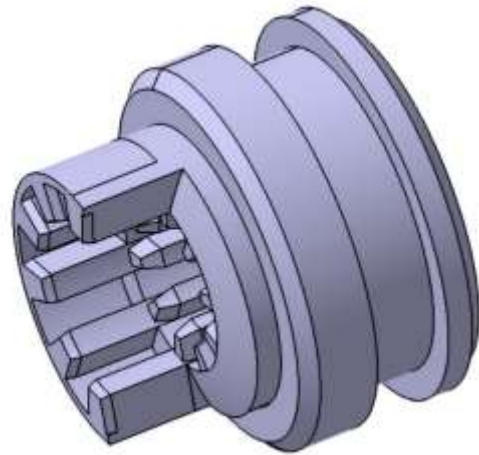
Figura 20: braccia e madre vite monoblocco

Questo nuovo design prevede il sovradimensionamento di tutta la parte in modo da renderla il meno suscettibile possibile alle sollecitazioni interne, in particolare avendo ridotto di un'unità il numero delle braccia è stato possibile sovradimensionarle, la nuova sezione da H delle braccia consente inoltre di alleggerire il corpo aumentando la resistenza a flessione; e per garantire la buona tenuta, anche la madre vite è stata inspessita.

A causa di questo nuovo design anche il cursore deve essere ridisegnato esternamente al fine di renderlo compatibile con le nuove proporzioni delle braccia, questo adattamento è mostrato in figura 21.



Cursore originale



Cursore adattato

Figura 21

Per quanto riguarda il telaio invece, avendo ora ridisegnato le braccia con questa nuova forma, è necessario trovare un design tale da permettere l'assemblaggio delle nuove parti: l'idea più promettente è quella di fare in modo di avvitare prima vite e madrevite come accadeva in precedenza per poi posizionarli su una sede scavata nella base lungo la direzione radiale piuttosto che assiale.

In particolare, per fare ciò la gabbia viene rimossa del tutto, in quanto avendo reso solidali le braccia alla madrevite, a fungere da guida può essere il telaio stesso con delle apposite superfici; inoltre avendo eliminato il braccio che passava internamente al sistema, è possibile pensare di sopprimere le luci sui supporti così da creare la superficie di appoggio per la madrevite e rendere questi un pezzo unico con la base, anche la dentatura del telaio viene resa solidale ad esso e poiché internamente alla vite passa l'albero di trasmissione principale fissati tra loro da cuscinetti, anche la copertura non è strettamente necessaria per cui removibile.

Così facendo si ottiene un telaio (figura 22) e delle braccia (figura 20) formati da un unico componente ciascuno che non richiedono l'utilizzo di bulloneria per il loro assemblaggio; in particolare con la nuova sequenza di montaggio la sede della vite sul telaio ha la possibilità di presentare uno spallamento aggiuntivo, precedentemente mancante, che come introdotto nel sotto-capitolo relativo al difetto della vite impedisce ogni rischio di traslazione assiale grazie alla presenza della gola in prossimità della ruota dentata.

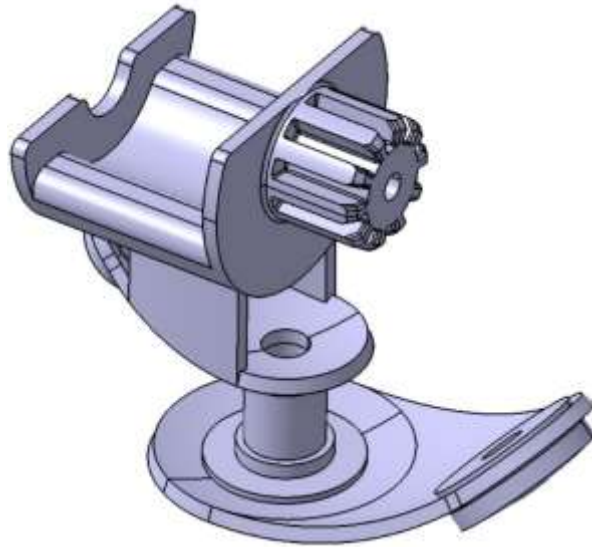


Figura 22: Parte superiore del telaio con design monoblocco semplificato

Unico potenziale difetto di questa nuova forma del telaio può essere data dalla complessità della sua realizzazione con tecniche diverse da quelle additive; nell'eventualità si decida di realizzare la parte con tecniche sottrattive (asportazione di truciolo) è sempre possibile dividere in due parti il telaio: base inferiore e sede per la vite superiore e pensare così ad un collegamento avvitato che viene eseguito in fase preliminare al montaggio delle parti in quanto quest'eventuale suddivisione ha il solo scopo di facilitare la fabbricazione del pezzo.

7.3.1. Sequenza di montaggio del nuovo telaio

La sequenza di montaggio del nuovo telaio è notevolmente più semplice rispetto alla precedente tuttavia richiede prima l'assemblaggio di varie parti in preparazione dell'assemblaggio finale, per semplicità di trattazione in questa sezione ci si limita a descrivere la sequenza di montaggio dei componenti che sono stati precedentemente nominati fingendo di non avere ulteriori componenti (in realtà necessari per il posizionamento) come già fatto per la sequenza di montaggio del telaio originale, mentre la sequenza di assemblaggio totale sarà trattata nel prossimo capitolo.

Ipotizzando che la sequenza di assemblaggio si limiti ai componenti nominati precedentemente, questa consiste in:

1. Dopo aver posizionato tutti i cuscinetti nelle relative sedi, avvitare la vite alle braccia.
2. Posizionare la vite sulla sede nel telaio in modo che lo spallamento posteriore del telaio penetri nella gola della vite.
3. Se non è già in posizione, portare le braccia in configurazione A.
4. Allineare il cursore alle braccia, facendo sì che i perni di quest'ultime penetrino nell'apposita gola.
5. Inserire l'albero di trasmissione principale per bloccare le varie parti.

Il vantaggio del nuovo layout consiste proprio nella semplicità della sequenza di montaggio, tuttavia mentre con il telaio originale tutti gli organi potevano essere assemblati tra loro come un'unica parte e questi rimanevano in posizione, con il nuovo layout per l'assemblaggio dei vari componenti in pianta stabile, è necessario assemblare tutto il giunto.

7.4. Difetto 4: difficoltà di innesto del cursore

Difetto più critico in assoluto del giunto, ma anche quello più semplice da affrontare, è la difficoltà che il cursore trova nell'innestarsi durante il cambio di configurazione specialmente al passaggio dalla configurazione B alla A in cui il cursore si disimpegna dal telaio per andarsi ad innestare alla ruota di comando principale.

L'origine di questo difetto è da attribuirsi:

- All'inevitabile presenza di piccoli giochi tra le ruote dentate necessari per il loro corretto funzionamento; questo perché nonostante da un punto di vista teorico, avendo ruote dentate che si accoppiano per formare ingranaggi con rapporti di trasmissione pari a 1:1 per cui i fenomeni di intaglio non presentano alcun rischio, per garantire che durante il moto solo le superfici rivolte lungo il verso della rotazione (per la ruota motrice) e quelle rivolte lungo il verso opposto (per la condotta) siano in contatto tra loro è necessario che, lo spazio cavo tra i denti di una ruota sia leggermente maggiore dello spazio spazzato dal volume del dente dell'altra, al fine di evitare ad ogni costo l'intersezione dei volumi.

In caso contrario, l'intersezione dei volumi causa, qualora questa sia di piccola entità, un elevato aumento delle perdite e delle forze dissipative, della rumorosità e delle vibrazioni in un primissimo momento che degenera poi in gravi fenomeni di usura localizzati; invece qualora questa sia di grande entità, impedisce il funzionamento e la trasmissione del moto dell'ingranaggio.

Per garantire il miglior funzionamento possibile del giunto, allo scopo di non introdurre ulteriori giochi, è necessario che gli innesti tra cursore, telaio e ruota principale, riducano per quanto possibile ogni tipo di cedimento vincolare interno.

- Alla forma dei denti: come visibile in figura 21 i denti frontali del cursore che hanno lo scopo di impegnarsi con la ruota, sono dotati di superfici piane che impediscono in caso di disallineamento l'innesto; per cui è necessario trovare il modo di agevolare l'ingranamento; la soluzione migliore sarebbe quella di utilizzare dei denti con superfici angolate in modo da ridurre l'ampiezza del dente alla cresta ed aumentarla alla base, tuttavia questa soluzione ha lo svantaggio di scomporre la risultante delle forze scambiate tra le superfici in contatto durante il moto in una componente ortogonale ed una assiale.

In particolare, quella assiale rischia proprio a causa delle superfici angolate di comportarsi durante il moto come il filetto di una vite per cui scegliendo questa soluzione è necessario assicurarsi, proprio come per le viti, l'irreversibilità della geometria che dipende dall'angolo della superficie e dal coefficiente di attrito statico che si sviluppa tra le parti.

Non potendo in alcun modo assicurarsi che al cambio di configurazione ci sia il perfetto allineamento è necessario che questo si crei in fase di innesto; per fare ciò, volendo evitare di angolare le superfici dei denti per non creare spinte assiali (inoltre dovendo verificare l'irreversibilità della geometria poiché a materiali diversi corrispondono coefficienti di attrito differenti, una volta ultimato il prototipo in resina, volendo realizzarne una versione in metallo sarebbe necessario ricalcolare ed eventualmente riadattare la geometria delle superfici), è possibile intervenire su tutti gli spigoli che interessano l'innesto del cursore lavorando sulla geometria degli smussi, e dove già presenti ridimensionarne gli angoli a valori più compatibili con l'allineamento necessario per far fronte ai piccoli giochi sotto spinte assiali anche ipoteticamente limitate.

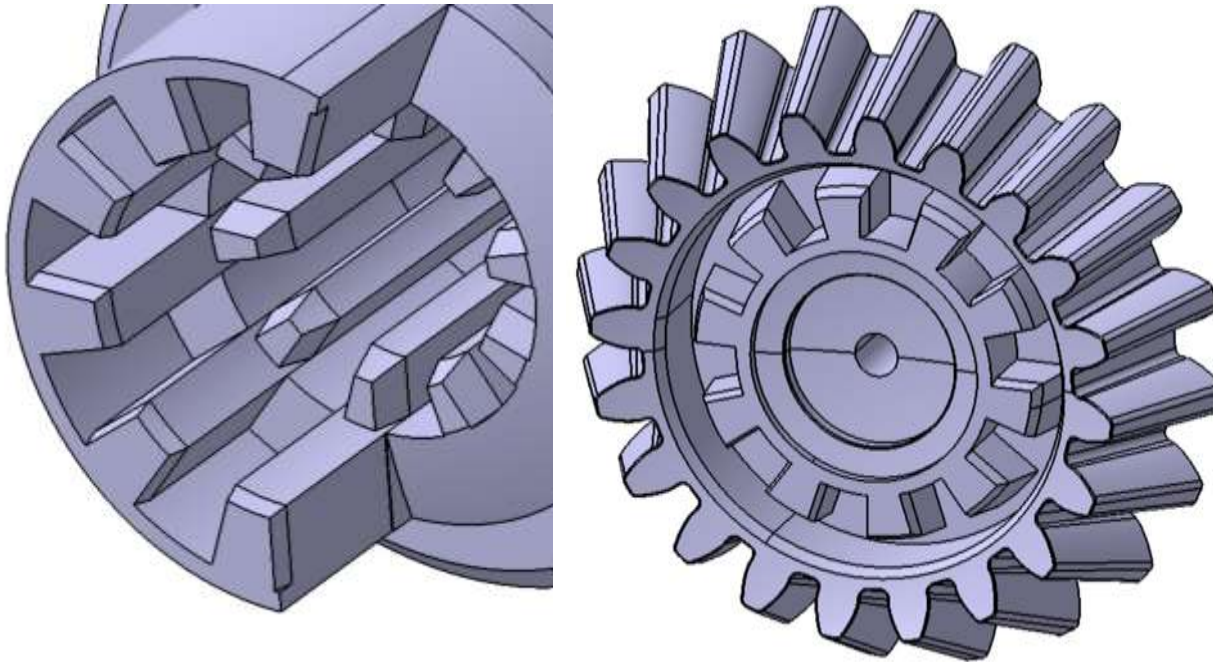


Figura 23: particolare della dentatura frontale sul cursore e sulla ruota di comando principale

Come si vede dalla figura qui sopra, molti spigoli già presentano degli smussi, tuttavia questi non sono sufficienti, in quanto che il disallineamento che si vuole contrastare è quello angolare ma non bisogna dimenticarsi che anche la coassialità tra ruota e cursore è sottoposta a delle tolleranze che conseguono alla precisione delle lavorazioni, per cui è necessario prevedere anche degli smussi in tutti gli spigoli posti circonferenzialmente al fine di allineare anche gli assi dei due componenti qualora questi già non lo siano.

In figura 24 è possibile vedere la modifica agli smussi pensata appositamente per contrastare il disallineamento e poiché l'utilizzo dello smusso ha lo scopo di addolcire uno spigolo introducendone altri due, per agevolare ulteriormente l'ingranamento, dopo lo smusso ogni spigolo rimanente è stato raccordato.

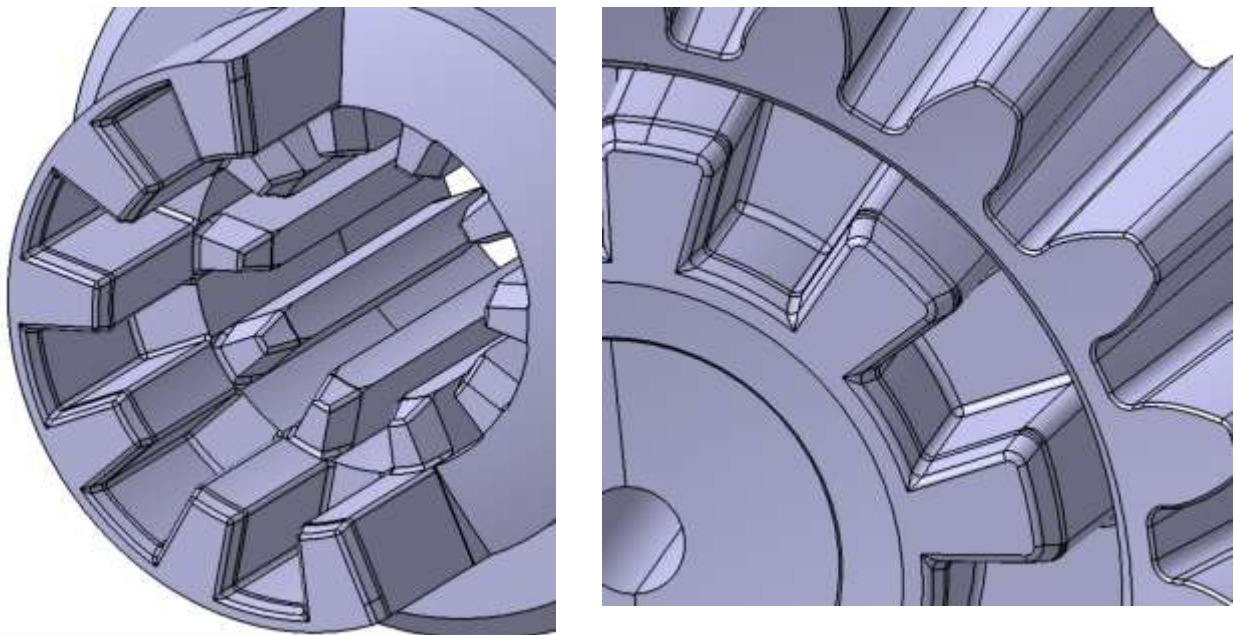


Figura 24: smussi ottimizzati e raccordati

8. Sequenza di assemblaggio del giunto modificato

La sequenza di montaggio del nuovo giunto non è molto differente da quella precedente; tuttavia, avendo sconvolto totalmente parte del layout del telaio un nuovo elenco ricco di immagini è doveroso.

Al fine di un corretto montaggio è necessario riuscire a riconoscere le varie ruote dentate presenti nel giunto: al suo interno sono presenti nove ruote caratterizzate tutte dallo stesso modulo e numero di denti, tuttavia distinguibili tra loro in base al tipo di albero con cui sono accoppiate, lo spessore e la lunghezza della generatrice; in particolare possiamo suddividerle in cinque categorie differenti:

- 1) **Ruote motrici di comando:** si distinguono da tutte le altre per il diverso sistema di accoppiamento con i rispettivi assi; tra i vari sistemi di accoppiamento proposti a pagina 27 quello scelto per questo giunto è stato quello con accoppiamento conico; si distinguono tra loro per le seguenti caratteristiche:

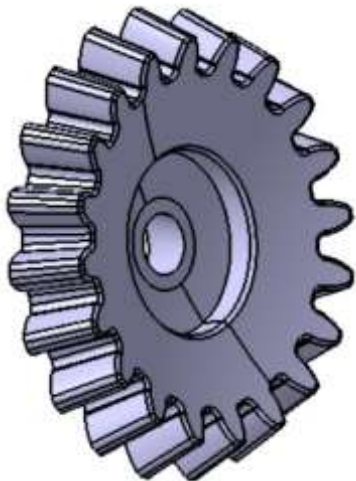


Figura 25:

Ruota motrice di comando del cursore: possiede un diametro medio e lunghezza della generatrice minori tuttavia ha uno spessore maggiore; nel giunto è presente un'unica ruota con queste caratteristiche.

Essa è collocata tra le due metà del telaio nella parte posteriore e trasmette il moto alla ruota con la vite.



Figura 26:

Ruota motrice di comando del giunto: caratterizzata da un minore spessore, il diametro medio è maggiore, inoltre la profondità degli spallamenti è inferiore rispetto la precedente; nel giunto con caratteristiche simili è presente anche la prima ruota oziosa.

È collocata alla base del giunto tra le due metà ed è in collegamento con la prima ruota oziosa.

2) **Ruota di comando principale:**

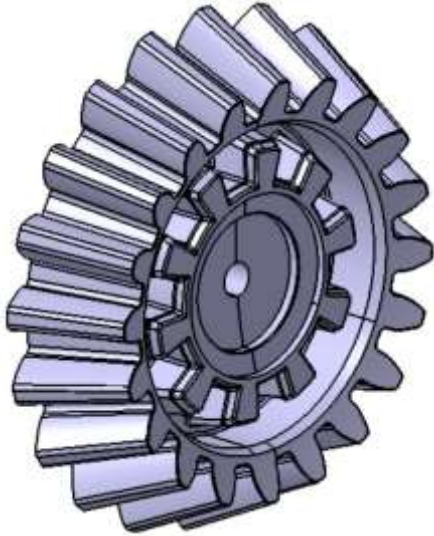


Figura 27:

La ruota di comando principale è immediatamente riconoscibile vista la sua geometria anomala rispetto le altre: tra tutte ha lo spessore maggiore e presenta al suo interno una dentatura per l'innesto del cursore.

Essa funge da ruota condotta per la prima parte della catena cinematica sempre in presa, mentre funge da motrice per la seconda parte posizionata lungo la culla e costituita dalle ruote comuni.

Questa è posizionata tra culla e telaio e l'albero che la sostiene è quello principale; questa è collegata ad altre tre ruote: la prima ruota oziosa da cui riceve il moto, la seconda ruota oziosa e la sua gemella posta dall'altro lato dell'albero di trasmissione principale a cui trasmette il moto.

3) **Ruota con vite:**

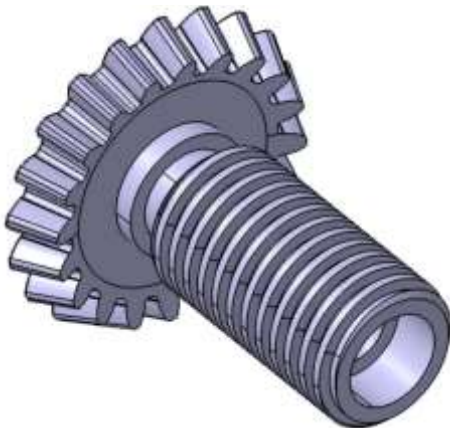


Figura 28:

Come nel caso precedente anche questa ruota è immediatamente riconoscibile per la presenza della filettatura, tra le varianti proposte quella scelta è la seconda dotata posteriormente della boccola per bloccare il cuscinetto; relativamente alla ruota dentata questa è identica in termini di caratteristiche a quella motrice di comando del cursore in quanto viene accoppiata ad essa svolge il ruolo della condotta.

Questo componente è presente in un'unica unità ed è collocato tra il telaio e la culla nella parte posteriore.

4) **Prima ruota oziosa:**

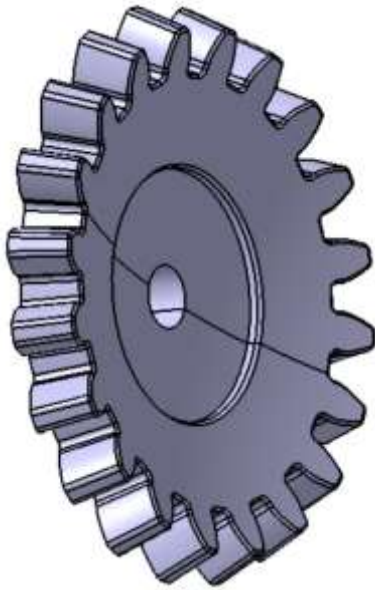


Figura 29:

Questa ruota ha lo scopo di trasmettere il moto dalla ruota motrice del giunto alla ruota di comando principale, è posizionata tra le due metà del telaio ed è identica in tutto e per tutto alla motrice a cui va connessa, tuttavia essendo la sua funzione quella di trasmettere il moto ad una ruota condotta, l'assoluta necessità che questa sia solidale al proprio albero manca e di conseguenza è distinguibile dalla motrice per via del calettamento cilindrico con il proprio albero.

5) Ruote comuni:

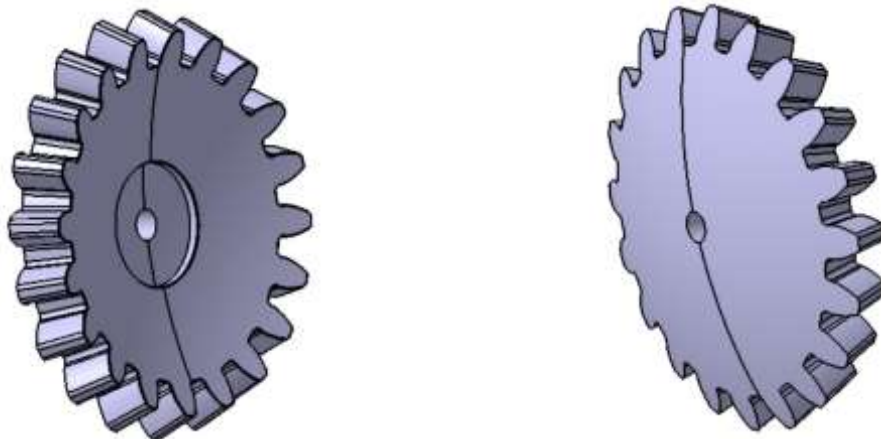


Figura 30:

Questa ruota è detta "comune" in quanto nel giunto è presente in cinque unità ed utilizzate per tre scopi differenti, è riconoscibile da tutte le altre soprattutto per il retro totalmente sferico così fatto perché è l'unica tipologia di ruota in cui solo la superficie anteriore è a contatto diretto con l'elemento che la sorregge, per cui non necessita di nessun spallamento posteriore mentre le altre ne possiedono tutte uno.

Una di queste ruote viene usata come ruota motrice gemella alla ruota di comando principale e collegata allo stesso albero dalla parte opposta, due di queste sono utilizzate come seconda ruota oziosa entrambe montate sulla culla specularmente una all'altra mentre le ultime due sono usate come ruote motrici e collegate tramite un apposito albero alla forchetta pilotata.

Descritto ora nel dettaglio le differenze tra le varie ruote si procede ora alla descrizione della sequenza di montaggio (nelle immagini che accompagnano la descrizione mancano i cuscinetti):

1. La prima fase consiste nel collocare tutti i cuscinetti nelle rispettive sedi, nel farlo è necessario per il loro posizionamento applicare pressione laddove previsto; così da posizionarli correttamente e bloccarli in posizione; una particolare attenzione va al cuscinetto posteriore della vite: se non è posizionato correttamente all'interno della propria boccole prima che questa venga avvitata, quest'ultima non arriva a battuta nella parte posteriore della vite, ciò comporta il rischio di interferenza durante la fase di montaggio.

L'utilizzo di un lubrificante specifico per favorire il montaggio è consigliato.

2. Posizionare le ruote motrici di comando del cursore, del giunto e la prima ruota oziosa tra le due parti del telaio; le ruote motrici di comando sono riconoscibili dalle altre in quanto sono le uniche due il cui foro è conico, in particolare quella di comando del cursore è riconoscibile in quanto più piccola della precedente; la prima ruota oziosa differisce dalla motrice per via dell'accoppiamento cilindrico con il proprio asse.

Ad ogni spallamento in risalto corrisponde una rispettiva sede, per un corretto posizionamento è sufficiente quindi far combaciare le varie parti, in figura 31 è visibile le due parti del telaio e le tre ruote posizionate; è di estrema importanza assicurarsi che la ruota motrice di comando del giunto non venga invertita con la prima ruota oziosa.

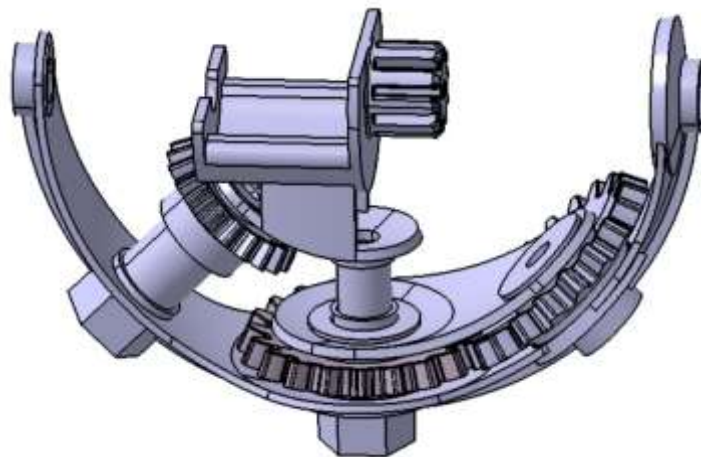


Figura 31: risultato della fase 2

3. Unire insieme le parti inserendo i rispettivi alberi, dopodiché mettere da parte il pezzo.

Nella seguente immagine sono visibili i due alberi di comando con accoppiamento conico, l'albero che mantiene in posizione la prima ruota oziosa non è visibile in quanto totalmente immerso nel giunto; per il loro corretto posizionamento posizionare "a testa in giù" il giunto, appoggiarlo su un piano di lavoro stabile, inserire gli alberi fino a quando non si percepisce una resistenza all'inserimento per poi forzarli nella posizione finale esercitando una moderata pressione con l'ausilio di un martello o di una pressa; iniziando dall'albero della ruota oziosa (il cui posizionamento finale è facilmente intuibile, una volta raggiunta la totale penetrazione nelle sedi); a seguire l'albero di comando del cursore ed infine l'albero di comando del giunto.

Anche in questo caso l'utilizzo di lubrificante è consigliato purché ci si assicuri che non raggiunga gli accoppiamenti conici degli alberi di comando.

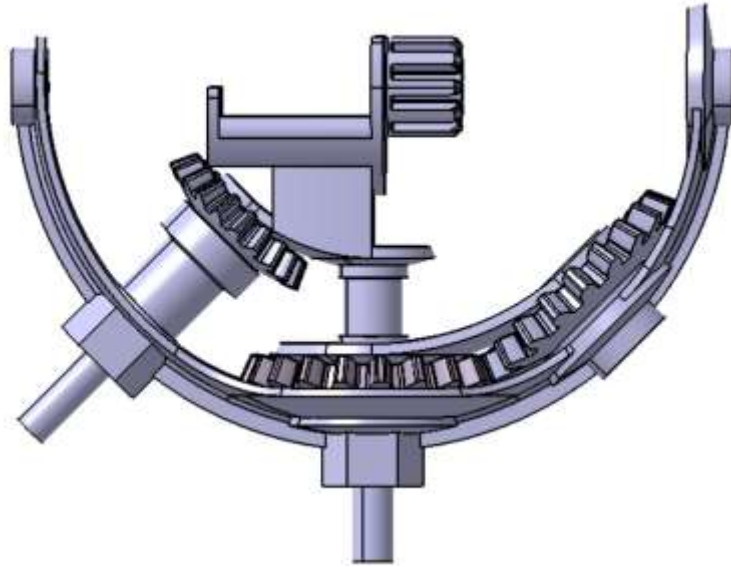


Figura 32: risultato della fase 3

4. Prendere vite e madrevite ed avvitarle tra loro.

Per non avere eccessive difficoltà nelle fasi successive è consigliabile, come mostrato in figura 33, posizionare la madrevite in punta alla vite.

Essendo le superfici di contatto dei filetti delle due parti soggette a forti fenomeni di attrito, è consigliabile cospargere la cave della filettatura esterna possibilmente con un lubrificante solido (grasso).

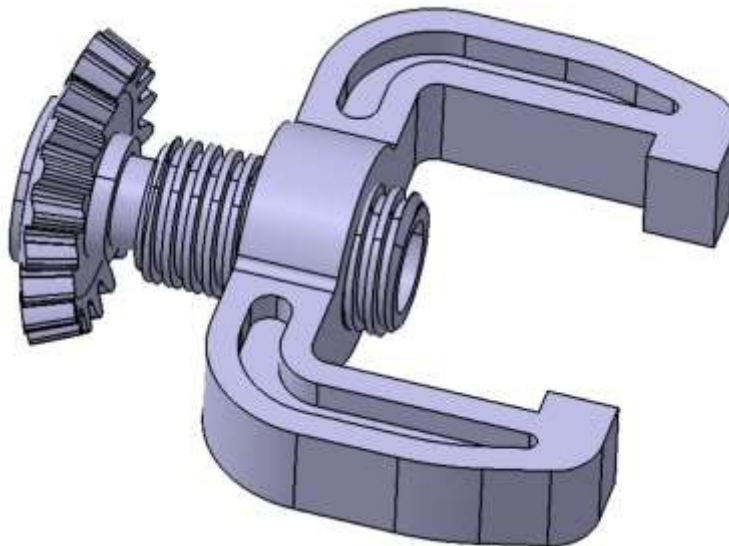


Figura 33: risultato della fase 4

5. Posizionare vite e madrevite sul telaio.

Per il corretto posizionamento è sufficiente allineare la gola della vite al proprio spallamento.

Anche in questo caso per ridurre gli attriti è consigliabile come nel caso precedente ingrassare le superfici, in particolare le guide sul telaio, la gola sulla vite e soprattutto il foro presente al centro della scanalatura sul telaio, in quanto funge da supporto comportandosi come un cuscinetto radente per l'albero di comando principale.

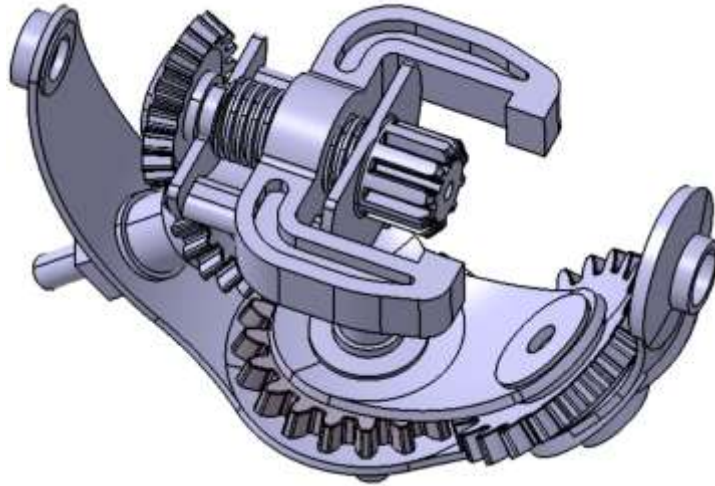


Figura 34: risultato della fase 5

6. Fissare le seconde ruote oziose sulla culla.

Montare tramite una pressa gli alberi sulle seconde ruote oziose in modo da renderli solidali tra loro, dopodiché fissarli sulla culla accoppiando gli alberi ai rispettivi cuscinetti precedentemente montati in fase 1.

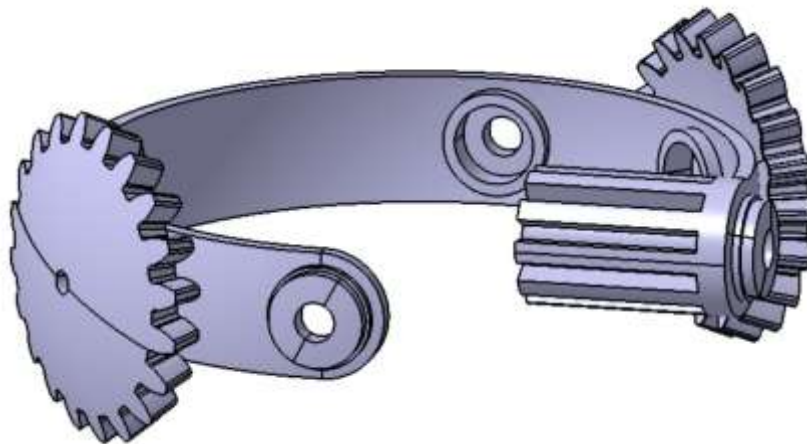


Figura 35: risultato della fase 6

7. Innestare il cursore sulla culla.

Assicurarsi che il cursore una volta innestato sulla culla scorra liberamente da un estremo all'altro della scanalatura, in particolare assicurarsi che la dentatura frontale del cursore superi l'anello della culla come da immagine 36.

Anche in questo caso le superfici in contatto sarebbero da ingrassare per ridurre l'attrito ed i fenomeni di usura.

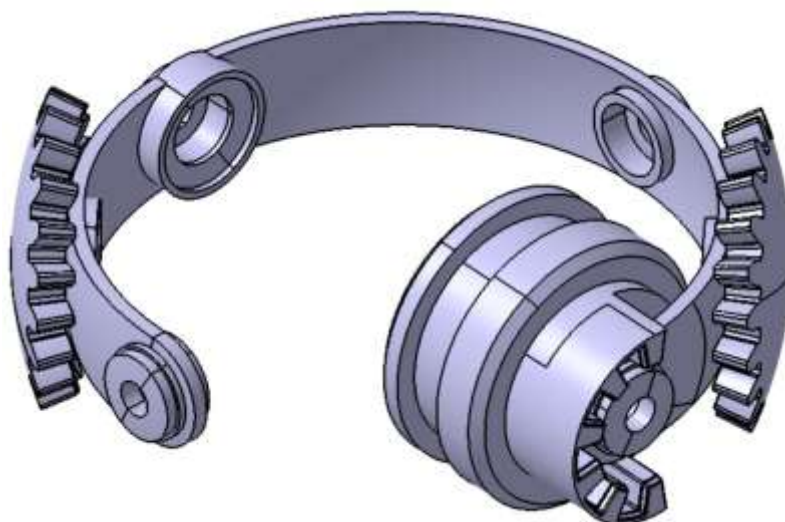


Figura 36: risultato della fase 7

8. Allineare la ruota di comando principale al cursore innestandoli tra loro; nel farlo assicurarsi che il cursore sia a finecorsa come da figura 37, poi aggiungere la ruota facendola ingranare con la seconda ruota oziosa; una volta fatto controllare il corretto allineamento della ruota principale con la propria sede sulla culla e gli eventuali giochi.

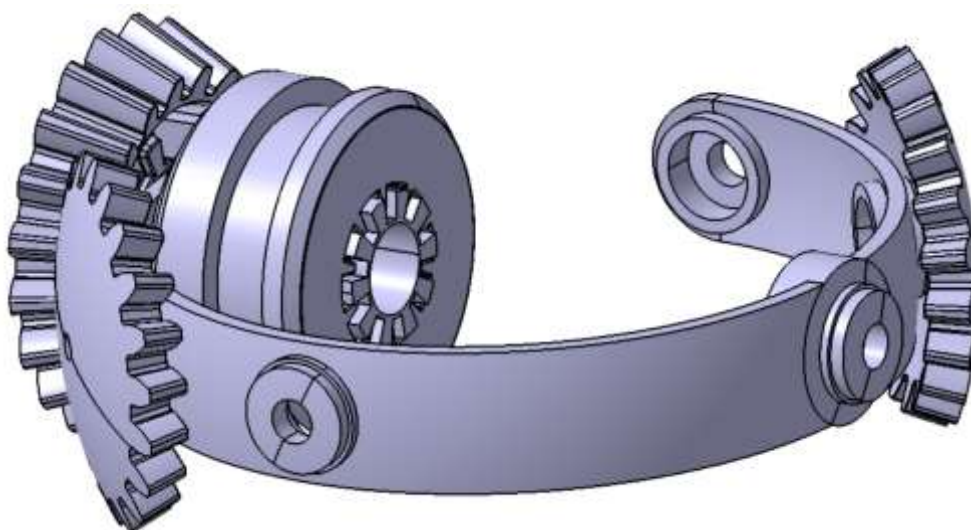


Figura 37: risultato della fase 8

9. Allineare ora le parti preparate precedentemente come in figura 38; nel farlo assicurarsi della corretta posizione delle braccia così come delle ruote dentate già presenti sul telaio, una volta in posizione, agendo sulla vite, è possibile arretrare di qualche millimetro il cursore così da metterlo in una posizione intermedia in modo da bloccare in posizione tutti i pezzi prima delle fasi successive.

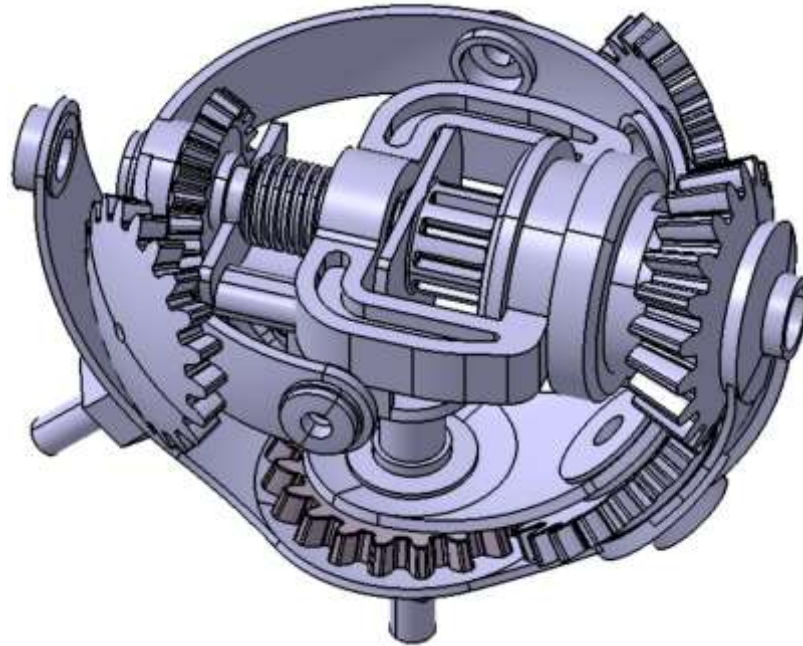


Figura 38: risultato della fase 9

10. Inserire l'albero di trasmissione principale partendo da lato in cui è posizionata la ruota principale, poiché albero e ruota di trasmissione principali ad assemblaggio terminato devono essere solidali tra loro, l'inserimento dell'albero deve essere fatto tramite una pressa così da forzare l'inserimento. Prima che l'albero esca dalla parte opposta della culla si inserisca la ruota gemella della principale e la boccola distanziatrice (facendo in modo che la parte piatta di quest'ultima sia in contatto con la superficie esterna della ruota, mentre il lato opposto con il gradino sia rivolto verso il cuscinetto) come da immagine 39; dopodiché terminare l'inserimento in modo che l'albero esca da entrambi i lati del sotto-telaio della stessa distanza.

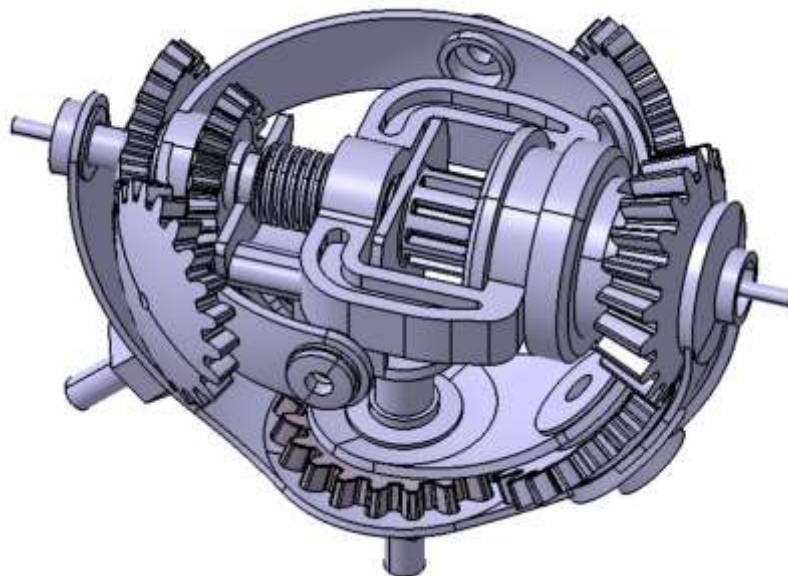


Figura 39: risultato della fase 10

11. Completare l'assemblamento del giunto con le parti rimanenti seguendo il procedimento usato anche per il giunto originale, ottenendo il completamento del meccanismo come da figura 40.

Per farlo come prima cosa innestare la forchetta libera sulla forchetta pilotata con l'ausilio di una pressa, a seguire allineare le ultime due ruote dentate rimaste alla culla tramite le rispettive sedi scavate nella superficie interna di esse ed assicurarle in tale posizione allineando la forchetta al resto del giunto; dopodiché posizionare una delle due metà dell'anello esterno tra le braccia della forchetta pilotata, in modo che la superficie di congiunzione dell'anello sia rivolta verso le estremità, come da posizione finale.

Tramite l'ausilio della pressa innestare a turno i due alberini che dovranno passare tra le forcelle poste all'estremità delle braccia della forchetta, la ruota dentata e la culla, avendo cura nel mentre di posizionare il rispettivo cuscinetto tra le forcelle che sarà poi inglobato nell'anello esterno una volta assemblato.

A questo punto montare sull'albero principale gli ultimi due cuscinetti rimasti utilizzando la metà dell'anello che già si trova vincolata sul giunto come riferimento.

L'operazione di montaggio si conclude con l'allineamento della seconda metà dell'anello esterno alla prima già vincolata bloccandole tra loro tramite seeger da esterni.

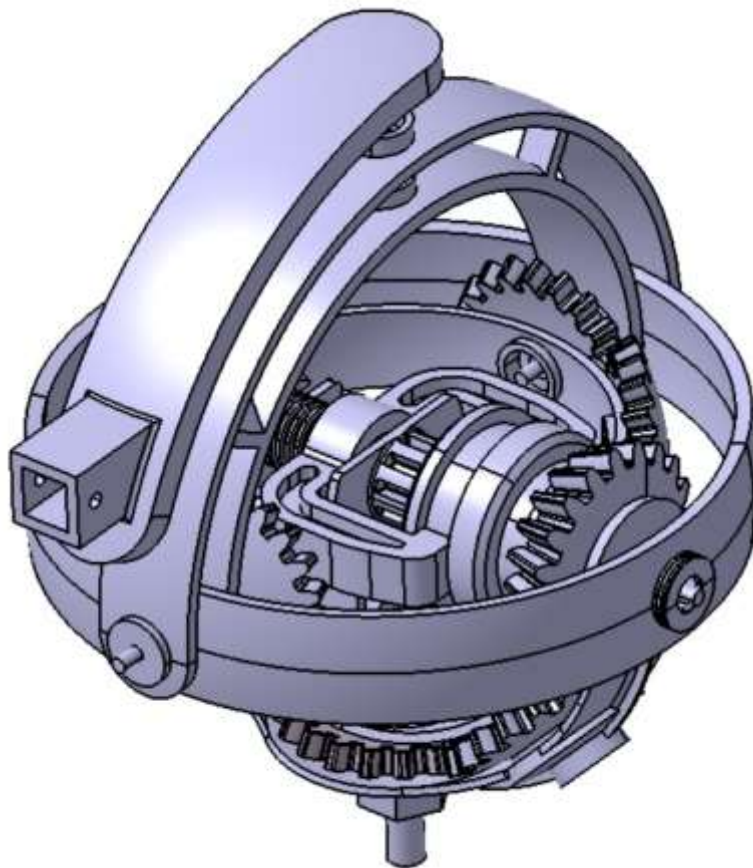


Figura 40: risultato della fase 11

9. Sviluppi futuri

In questo ultimo capitolo verranno in breve descritte alcune potenziali soluzioni che permetterebbero al giunto sferico riconfigurabile di operare in condizioni di funzionamento “estese” rispetto quelle in cui attualmente rientra il suo campo operativo.

Attualmente il giunto è stato pensato per operare in gruppo insieme ad altri due giunti identici tra loro all'interno di una complessa catena cinematica per movimentare una piattaforma; sarebbe tuttavia ingenuo non pensare di ampliare in suo utilizzo anche per altri tipi di manipolatori, in particolare quelli costituiti da catene cinematiche aperte in cui la possibilità di alternare con un unico giunto l'asse attorno al quale far ruotare un braccio ne aumenterebbe di gran lunga la sua versatilità.

Tuttavia, per permettere tutto ciò e di lavorare quindi in autonomia senza cooperare insieme ad altri giunti è necessario innanzi tutto eliminare la terza cerniera libera in quanto di intralcio per una catena cinematica aperta (problema risolvibile rimuovendo semplicemente la forchetta libera lasciando solo quella pilotata) e successivamente è necessario che il passaggio da una configurazione all'altra possa avvenire in ogni occasione, qualunque sia la posizione relativa tra culla e telaio.

Attualmente infatti il giunto prima di cambiare configurazione ritorna sempre alla posizione di partenza, ciò implica che l'utilizzo di un semplice innesto a denti frontali porta a compimento tale scopo garantendo un'elevata robustezza del cinematismo vista la solidità delle parti.

Ciò nonostante un semplice innesto a denti frontali esegue un collegamento nel momento che i suoi denti sono perfettamente allineati, questo fatto impedisce il cambio di configurazione quando l'angolo tra telaio e culla ha un valore diverso da quelli noti fissati dal numero di denti: in questo caso essendo presenti dieci denti tra le varie parti dell'innesto, dalla posizione di partenza è possibile ottenere un corretto cambio di configurazione ogni 36° .

Per risolvere tale problematica e permettere quindi il cambio di configurazione in qualunque condizione si potrebbe ricorrere a:

1. **Frizione assiale a disco:** tipologia di innesto privo di denti che sfrutta dei dischi realizzati con materiali ad elevato coefficiente di attrito per trasmettere il moto; questo sistema risolverebbe il problema, tuttavia ha numerose controindicazioni: richiede l'utilizzo di uno o più componenti aggiuntivi realizzati con materiali speciali, le dimensioni ridotte ne complicano la realizzazione, non garantisce il mantenimento della sincronizzazione tra le parti a collegamento avvenuto, richiede una costante spinta assiale per la trasmissione del momento torcente e la sua entità dovrebbe avere un ordine di grandezza paragonabile alle forze da trasmettere.
2. **Coppia conica:** tipologia analoga alla precedente che sfrutta geometrie coniche al posto dei dischi, con questa soluzione l'entità della spinta assiale rispetto la coppia da trasmettere è inversamente proporzionale alla conicità; seppur migliore della precedente la coppia conica continua a non garantire la sincronia delle parti, inoltre la conicità per essere efficiente richiede variazioni di diametro estremamente ridotte oppure altezze del cono elevate che non sono compatibili ne con le dimensioni ristrette a cui devono sottostare le parti del giunto né con il materiale con cui è realizzato il prototipo.

3. **Soluzione mista:** soluzione particolare che risulta una via intermedia tra le due soluzioni senza denti già proposte e quelle con dentature che seguiranno, il risultato è quello di ottenere un accoppiamento in cui la spinta assiale è proporzionale al momento torcente trasmesso, il suo principio di funzionamento è quello delle ruote libere con accoppiamento di forza in cui dei rulli posizionati in delle sedi disegnate con una speciale geometria permettono la trasmissione della coppia entrando in funzione qualunque sia la posizione tra le parti, riuscendo così a mantenere l'allineamento.

In questo caso, a differenza delle ruote libere, dovendo trasmettere la coppia in entrambe le direzioni di rotazione le sedi dovrebbero avere geometrie speculari rispetto l'asse del cursore e non sarebbero presenti delle molle per il posizionamento dei rulli.

Questo sistema da un punto di vista concettuale soddisfa in pieno le necessità di cui si hanno bisogno, tuttavia da un punto di vista funzionale e costruttivo ha notevoli svantaggi: si richiedono componenti intermedi di piccole dimensioni, la corsa del cursore verrebbe ridotta a pochi millimetri, sarebbe necessario introdurre una gabbia che permetterebbe durante la traslazione del cursore di trascinarsi dietro i rulli senza che questi escano dalle loro sedi e anche in questo caso il materiale dei vari componenti deve essere tale da non deformarsi eccessivamente come avviene con le parti in resina vista la sua elasticità.

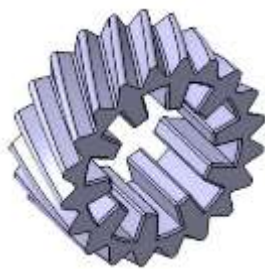
4. **Innesto con denti deformabili:** questa soluzione prevederebbe il mantenimento delle dentature sia sul telaio che sulla ruota principale, anche se con una geometria migliorata, mentre il cursore verrebbe realizzato con una geometria tale da potersi adattare a qualunque posizione relativa tra le parti, purtroppo questa è una soluzione estremamente complessa, che prevederebbe un elevato numero di calcoli strutturali e simulazioni FEM necessari al dimensionamento delle parti, il materiale con cui realizzare il cursore dovrebbe avere elevate proprietà (superiori a quelle della resina) che garantiscano un'elasticità sufficiente alla deformazione in fase di ingranamento ma non abbastanza da permettere la perdita di sincronia o lo scollegamento durante la movimentazione e dovrebbe inoltre sopportare fenomeni di fatica non indifferenti.
5. **Innesto con denti mobili:** questa soluzione prevederebbe l'utilizzo di un cursore composto da più componenti tali per cui, in fase di transizione da una configurazione all'altra, muovendosi possano adattarsi alla posizione della dentatura sulla ruota in un caso o sul telaio nell'altra.

Unico difetto di questa soluzione sta nella potenziale complessità delle geometrie del cursore che potrebbe essere un ostacolo nella realizzazione del prodotto finale (ragionando in termini di prototipo invece la stampa 3D non da problemi).

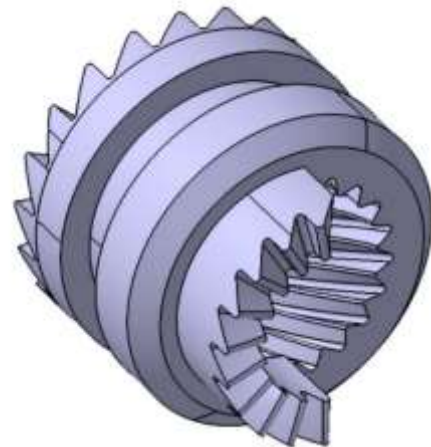
Delle cinque tipologie proposte, l'unica proponibile per essere realizzata con la tecnica della stampa 3D è quella di realizzare un innesto a denti mobili.

L'idea di base è quella di realizzare un cursore tale che, nel caso si abbia già il giusto allineamento tra i denti dell'innesto, si comporti come un unico blocco traslando fino a quando non arriva in battuta; mentre qualora le dentature tra le parti non siano allineate questo metta in atto una rototraslazione che permetta alle dentature di impegnarsi tra loro senza influire sulle posizioni relative tra i vari componenti.

Per fare ciò, come visibile in figura 41, il cursore è stato suddiviso in due parti concentriche: quella più interna collegata alla culla tramite una coppia prismatica consente la traslazione, quella più esterna su cui sono presenti le dentature d'innesto e collegata a quella interna tramite una coppia elicoidale permette la rototraslazione ed il collegamento; da un punto di vista teorico l'unico difetto che questa soluzione presenta è l'impossibilità del cursore in fase transitoria di mantenere il giunto bloccato in quanto la forma angolata del dente causa un aumento dei giochi tra le parti.



Cursore interno

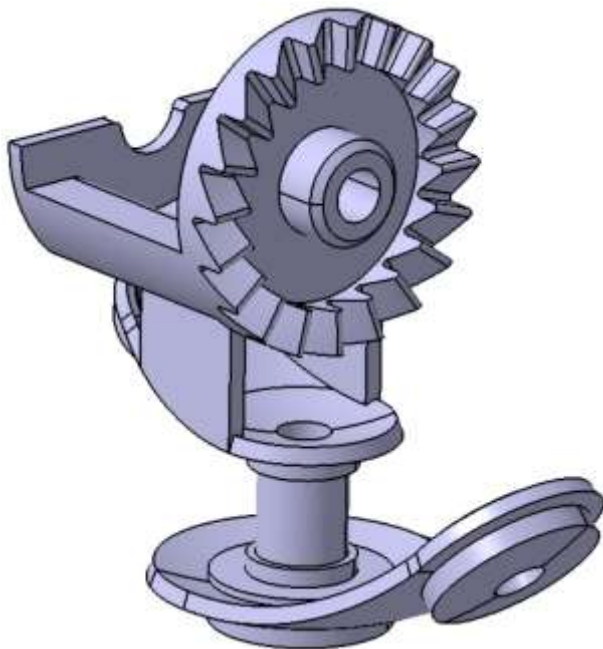


Cursore esterno

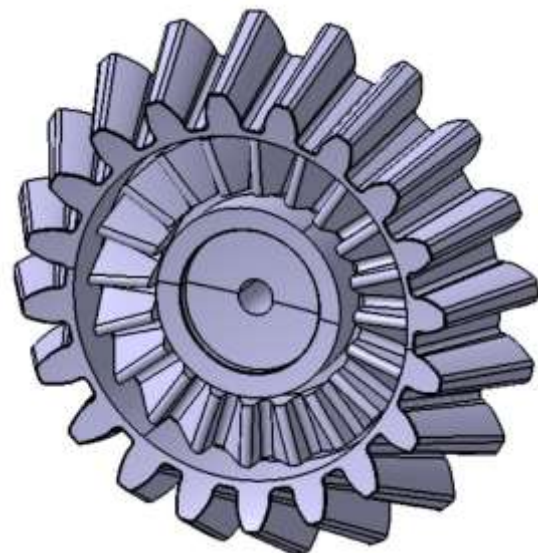
Figura 41: parti del cursore

Ai fini dell'assemblaggio delle due metà del cursore, è necessario che le dentature dell'innesto siano esposte a diametri differenti, in quanto che quella che si deve impegnare con la ruota è obbligata a stare nello spazio libero disponibile tra il diametro della scanalatura presente sulla culla ed il profilo della ruota dentata, mentre dal lato opposto, è necessario che la dentatura che si deve impegnare con il telaio deve trovarsi ad un diametro maggiore dell'elica presente tra le due metà del cursore.

Per permettere il corretto ingranamento durante la fase transitoria in assenza del buon allineamento dei denti, è necessario che questi abbiano una forma tale per cui sotto l'azione della spinta assiale provocata dalla vite, affinché si inneschi una corretta rototraslazione tra cursore interno ed esterno, è necessario che le dentature abbiano una forma opportuna con superfici angolate in modo da ricalcare il passo dell'elica presente tra i cursori e le stesse dentature devono essere riportate in forma complementare sia sul telaio che sulla ruota principale (come visibile in figura 42).



Telaio con dentatura angolata



Ruota principale con dentatura angolata

Figura 42: elementi con dentature modificate

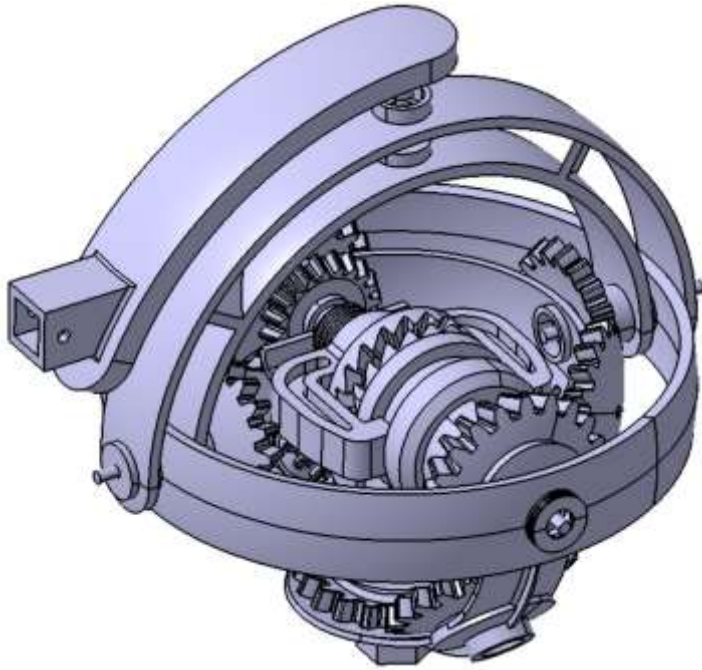


Figura 43: aspetto del giunto modificato

Come visibile nella figura qui a fianco, l'aspetto finale del giunto non cambia, se non per la particolare dentatura visibile tra telaio e cursore. Anche con questa soluzione la sequenza di montaggio riportata nel capitolo precedente è ancora valida, ad eccezione del fatto che per il corretto funzionamento dell'innesto, è necessario prima accoppiare le due metà del cursore, assicurandosi che quella interna non sia posizionata all'estremità della parte esterna, per poi accoppiare il tutto alla culla tornando così alla sequenza di montaggio già spiegata.

9.1. Irreversibilità dell'elica

[8] Per garantire che, durante il moto, le posizioni relative degli organi collegati dall'innesto non varino a causa della presenza del cursore interno, è necessario assicurarsi che questo possa mettersi in movimento solo se sottoposto a forze assiali e non per le coppie resistenti che potrebbero manifestarsi a causa di carichi esterni elevati.

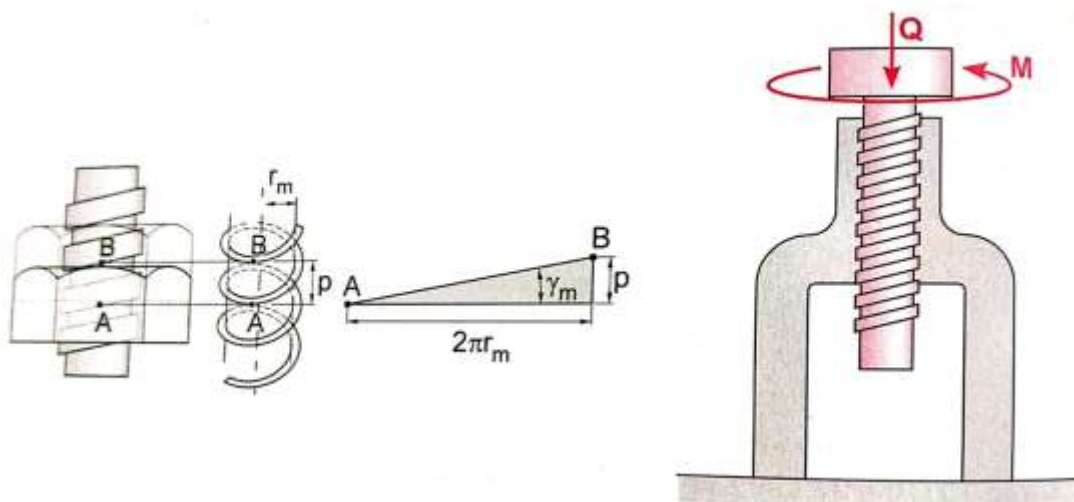


Figura 44: carichi che possono movimentare un profilo elicoidale

Nel caso in esame, contrariamente a quanto si cerca di evitare in presenza delle viti, si vuole che l'elica tra i cursori, abbia delle caratteristiche tali da permettere la movimentazione unicamente sotto quella che (in figura 44) viene chiamata Q piuttosto che con M ; nonostante ciò il procedimento di verifica è del tutto analogo a quello delle viti.

Generalmente partendo dall'equazione di equilibrio, per l'irreversibilità di una vite come quella in figura 44 si ha:

$$\begin{cases} P - R \sin(\gamma_m - \varphi) = 0 \\ R \cos(\gamma_m + \varphi) - Q = 0 \end{cases}$$

Con $P = M/r_m$, ed R la risultante della forza di attrito e quella dovuta al contatto.

In particolare l'irreversibilità dell'elica si ha quando l'angolo ϕ formato tra la perpendicolare alla superficie di contatto e la risultante della somma delle forze parallele ed ortogonali scambiate in superficie risulta maggiore dell'angolo di avvolgimento dell'elica γ_m .

Il caso in esame risulta simile ma invertito a quello appena mostrato con alcune differenze: l'angolo di avvolgimento è particolarmente elevato e la coppia M è assente, essendo inoltre l'angolo ϕ , a parità di altri parametri, dipendente dal coefficiente di attrito, per la verifica è sufficiente solo la seconda equazione e l'irreversibilità garantita quando $\varphi < \gamma_m$; per le caratteristiche geometriche dell'elica date da un passo pari a 150 mm, un raggio medio di 13 mm ed un coefficiente di attrito statico pari a 0,6 l'elica soddisfa le richieste per un angolo di avvolgimento superiore a 60°.

9.2. Difetto del cursore a denti mobili

Da un punto di vista teorico il sistema del doppio cursore assolve perfettamente al compito per cui è stato pensato (ad eccezione per quanto riguarda la fase transitoria), tuttavia tenendo conto che il movimento e la posizione del cursore interno dipendono dall'allineamento delle dentature e che la scanalatura sulla culla ha una lunghezza limitata si giunge alla conclusione che dopo un certo numero di innesti in cui le dentature non sono perfettamente allineate, la parte interna del cursore raggiunge l'estremità dell'albero su cui è vincolata riducendosi così ad avere unicamente la movimentazione del cursore esterno lungo una traiettoria elicoidale che riconduce anche questa soluzione al problema del giunto originale con gli angoli d'innesto noti.

Se si volesse risolvere definitivamente il problema dell'ingranamento (almeno tra cursore e ruota principale) tralasciando tutte le varie problematiche che ne scaturirebbero e che comprometterebbero totalmente le funzionalità del giunto, una potenziale soluzione sarebbe quella di eliminare la scanalatura sulla culla, permettendo al cursore interno di ruotare invece di traslare e posizionare tra telaio e cursore una spalletta.

Questa soluzione farebbe sì che prima che i denti del cursore arrivino in contatto con quelli sulla ruota, l'innesto si muova di moto elicoidale, a contatto avvenuto anche il cursore interno si metterebbe in movimento per accompagnare opportunamente la fase di ingranamento, così da potersi impegnare in qualunque posizione e tutte le volte che lo si desidera e per garantire l'eventuale riposizionamento del cursore quando questo viene scollegato, a causa dell'assenza della scanalatura, sarebbe necessario porre tra cursore e telaio una spalletta, affinché dopo un certo numero di collegamenti non ci sia il rischio che il cursore arrivi ad urtare la culla.

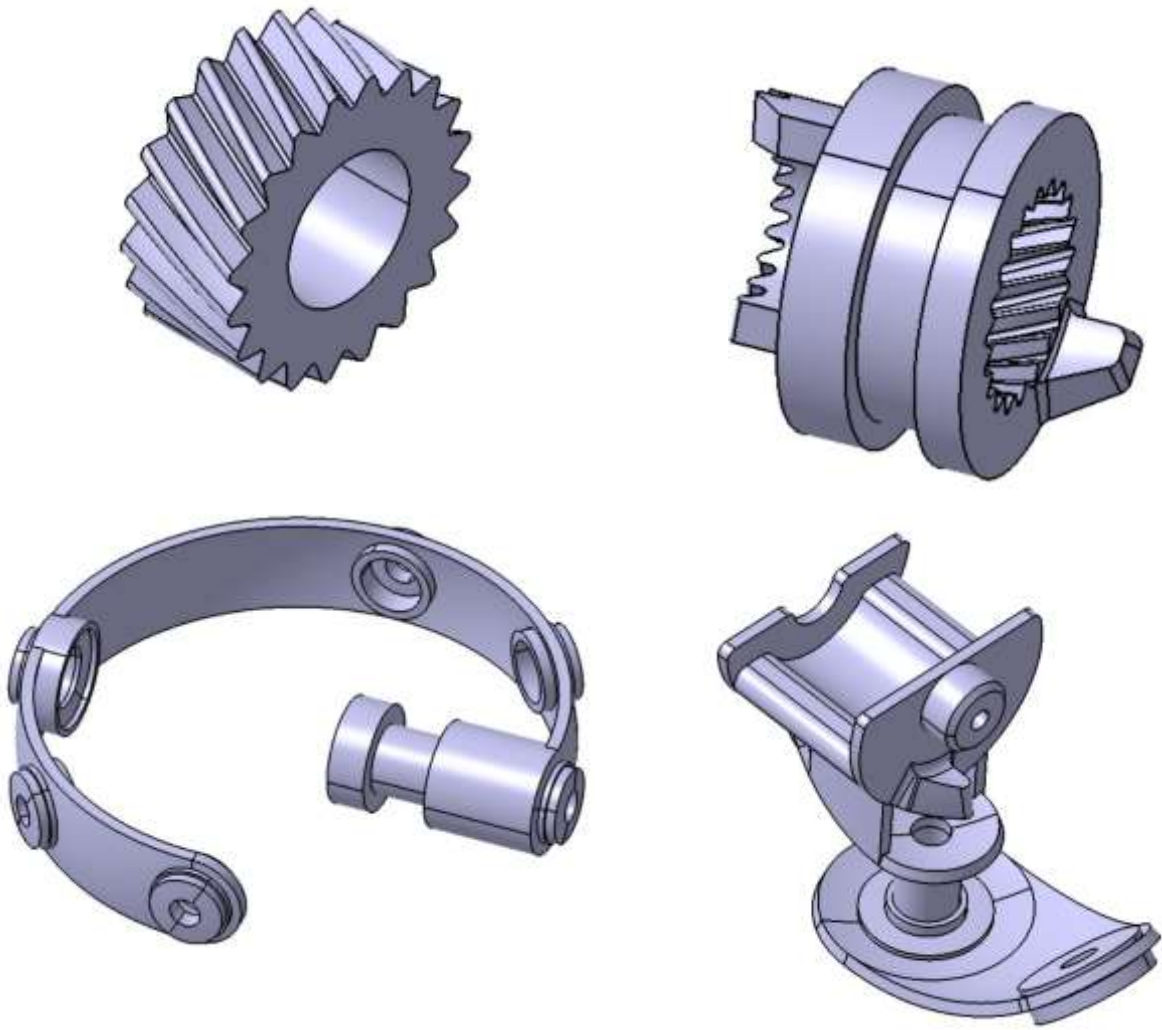


Figura 46: dettagli di un'eventuale soluzione per l'ingranamento

10. Conclusioni

Questa tesi ha cercato di proporre delle potenziali soluzioni ai difetti di “natura pratica” del giunto che dal punto di vista teorico non presentava nessun difetto di funzionamento ma che al contrario celava in sé diverse criticità che si sono manifestate non a causa di un errata progettazione, bensì a causa della normale successione degli eventi che portano alla realizzazione di un’idea.

I difetti presenti nel giunto non causano problemi di carattere strutturale bensì cinematici: questi riguardano soprattutto la parte che aziona il cursore; per alleviare e risolvere tali problematiche sono state descritte, per ogni problematica, tutte le potenziali soluzioni applicabili e qui di seguito verranno ora elencate quelle più promettenti.

La prima problematica riscontrata sul prototipo è stata la limitata capacità di trasmissione della coppia degli alberi di azionamento verso le ruote motrici di comando del giunto e del cursore che una volta superato il loro limite portano ad un conseguente slittamento tra le parti; a seguito di ciò la soluzione più promettente è quella di sostituire il calettamento cilindrico tra alberi e ruote con uno conico più performante.

La seconda problematica riscontrata riguarda invece la vite che aziona le braccia dell’innesto, in particolare la ruota dentata posta alla sua estremità tende a separarsi durante il funzionamento; in questo caso si è deciso di convertire le due parti collegate tra loro in un unico corpo e di posizionare esternamente la sede del cuscinetto che sosteneva la ruota e per evitare che questo possa fuoriuscire a causa delle spinte assiali è stata introdotta una boccola.

La terza problematica che si è voluta affrontare consiste nel numero di componenti in cui è suddiviso il telaio del giunto originale e di come questi siano montati assieme tramite viti, il loro elevato numero ha delle ripercussioni negative sulla solidità totale del meccanismo causata dalla complessità e dalle dimensioni delle geometrie; la soluzione più promettente è stata trovata volendo innanzi tutto semplificare la sequenza di montaggio e partendo da questa si è ridotto il numero di componenti inglobandoli tra loro e massimizzandone le dimensioni.

Quarta ed ultima problematica è legata al cursore dell’innesto, che a causa di giochi e disallineamenti non sempre riesce ad innestarsi sulla ruota di comando principale; per facilitarne il collegamento si è intervenuto su smussi e raccordi delle dentature, aumentandoli di numero e correggendone lievemente le misure.

L’ultimo capitolo getta invece le basi per un possibile utilizzo del giunto al di fuori del suo attuale scopo e si limita ad elencare delle potenziali soluzioni con i loro pro e contro senza ulteriori approfondimenti.

Partendo dalle soluzioni raccolte in questa tesi è possibile realizzare un ulteriore prototipo che porterà alla luce i progressi raggiunti e magari anche alla fase successiva della realizzazione del manipolatore che si sta sviluppando.

11. Bibliografia

[1] AA. VV., *Guida Completa alle Tecnologie di Stampa 3D*, in “stampa 3D store” <http://stampa3dstore.com/>, 12 ottobre 2016

[2] AA. VV., *Clear-DataSheet Photopolymer Resin for Form 1+ and Form 2*, in FormLabs, <http://formlabs.com/>, 04 aprile 2016

[3] Palpacelli M. C., *Design of a Lockable Spherical Joint for a Reconfigurable 3-URU Parallel Platform*, a cura di Callegari M., Carbonari L. e Palmieri G., in “Robotics”, a. III, doi: 10.3390, 2018

[4] Crivelli D., *Calettamento Forzato e Collegamento Albero-Mozzo: Cosa c'è da Sapere*, in “Progettista industriale”, a. XII, <http://ilprogettistaindustriale.it/>, 01 dicembre 2019

[5] AA. VV., *Tecnica dell'Automobile*, edizione italiana a cura di Casartelli M. e Minini M., Bergamo, Editrice San Marco, XXVII edizione, 2001

[6] Lenci S., *Lezioni di Meccanica Strutturale*, Bologna, Pitagora Editrice, II edizione, 2004

[7] Budynas R. G., *Shigley Progetto e Costruzione di Macchine*, edizione italiana a cura di Amodio D. e Santucci G., Milano, Mc Graw Hill, III edizione, 2014

[8] Callegari M., *Meccanica Applicata alle Macchine*, di Callegari M., Fanghella P. e Pellicano F., Milano, Città Studi Edizioni, II edizione, 2017