



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Relazione per la prova finale

***Analisi dinamica e statica di moltiplicatore di velocità per
bicicletta elettrica***

Tutor Universitario: Nicola Petrone

Tutor Aziendale: Yari Moro

Liam Bortolin

Matricola: 1221812

Anno Accademico 2022/2023

INDICE

INTRODUZIONE.....	2
1. PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO.....	3
1.1 Richieste di progetto.....	5
1.2 Modelli di ispirazione.....	5
1.3 Principio di funzionamento.....	6
1.3.1 Rapporti di velocità.....	8
1.3.2 Selettore a tamburo scanalato.....	10
1.3.3 Albero rinvio.....	14
2. ASSEMBLAGGIO.....	15
2.1 Albero di rinvio.....	15
2.2 Parte con pedaliera.....	22
3. VERIFICA AD USURA.....	25
3.1 Verifica delle ruote dentate.....	25
3.1.1 Verifica dinamica dei denti.....	25
3.1.2 Verifica statica del corpo.....	25
3.2 Scelta e verifica dei cuscinetti.....	26
3.3 Verifica statica dell'albero di rinvio.....	27
4. PRODUZIONE DEI COMPONENTI.....	28
4.1 Scelta dei materiali.....	28
4.2 Processi tecnologici.....	28
5. CONCLUSIONI.....	29

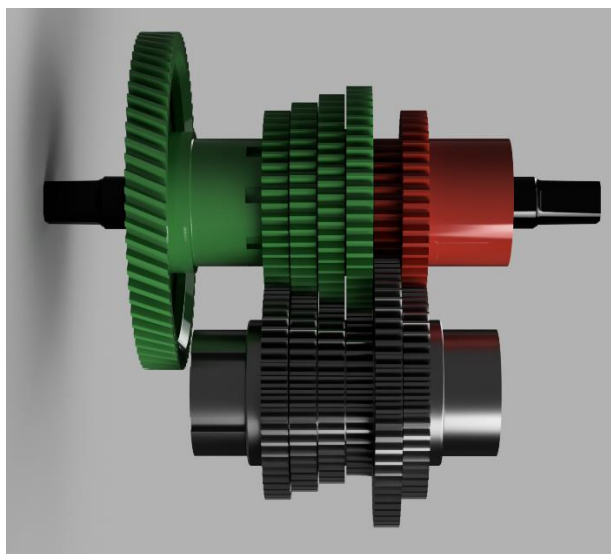
INTRODUZIONE

Il progetto in questione è stato pensato durante lo svolgimento del tirocinio da luglio 2022 a settembre 2022 come da programma per la laurea triennale in ingegneria meccanica (percorso industriale) dell'Università degli studi di Padova. Viene richiesto di progettare un moltiplicatore di velocità per bicicletta elettrica con ingranaggi a denti dritti avente 8 rapporti. Durante il tirocinio sono stati visti vari modelli di cambio già esistenti e si è cercato di trovare la soluzione ottimale. I principali vincoli riguardano la potenza e le coppie del motore che andranno ad influire sul dimensionamento e nella scelta dei materiali utilizzati per i vari componenti, e l'ingombro complessivo del pacco ingranaggi, il quale dovrà essere di dimensioni contenute visto l'utilizzo. La bicicletta è una bicicletta con assistenza per uso off-road con motore da 1000 Watt attualmente provvista di un cambio Shimano con deragliatore. L'utilizzo di un cambio ad ingranaggi garantirebbe una risposta più rapida nelle cambiate e di evitare l'uscita della catena. Inoltre, considerando l'utilizzo, eviterebbe che possibili detriti possano impedire il corretto funzionamento del dispositivo.

CAPITOLO 1 – PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

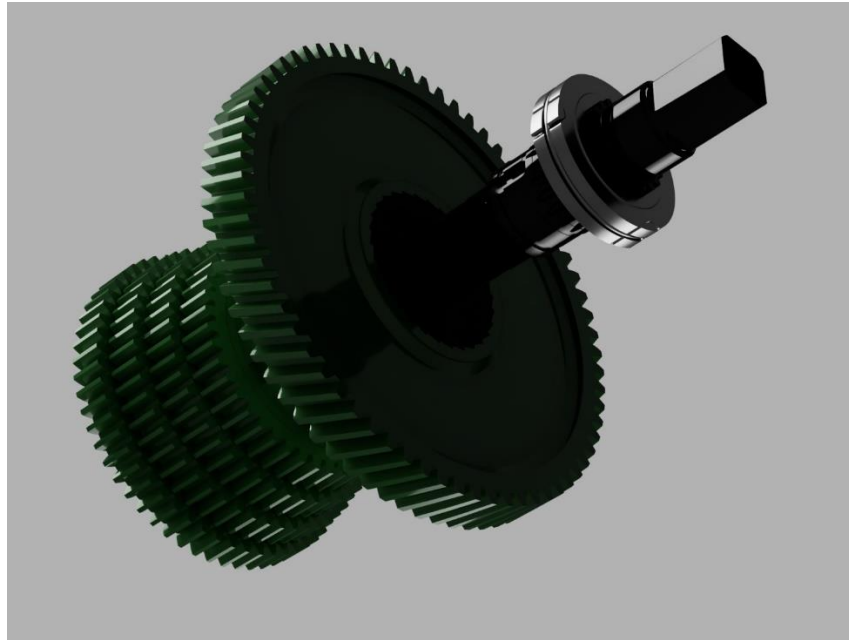
Il moltiplicatore di velocità è composto da un albero di rinvio con 4 ingranaggi che ricevono potenza dal sistema pedaliera-motore, e da 2 ingranaggi inseriti sullo stesso albero che trasmetteranno la potenza ad un albero con ingranaggi collegato alla corona sulla quale è inserita la catena. Tale configurazione permette di avere $4 \times 2 = 8$ rapporti limitando gli ingombri. La selezione degli ingranaggi è possibile grazie all'utilizzo di un tamburo con scanalature in grado di gestire gli ingranaggi di input e di output. Per il collegamento Albero-ingranaggi si è optato per 3 crociere (ogni crociera gestisce 2 ingranaggi). Il selettore a tamburo sarà inserito all'interno dell'albero di rinvio permettendo di ridurre gli ingombri e il peso.

Fig. 1.1 Assemblato



Nell'immagine soprariportata si può vedere il componente verde composto da 1 ingranaggio elicoidale (che riceve il moto dal motore elettrico tramite una serie di ingranaggi) e 4 ingranaggi a denti dritti, i quali forniscono il moto all'albero di rinvio (in Grigio) che a sua volta trasmette il moto corpo rosso, collegato alla corona della bicicletta. In nero è presente la pedaliera la quale è collegata in modo unidirezionale al componente verde (di conseguenza solo la pedaliera è in grado di fornire il moto al componente verde e non viceversa) tramite un dispositivo apposito e completamente svincolata dal componente rosso.

Fig. 1.2 Accoppiamento pedaliera-motore



In questa immagine si può apprezzare come il collegamento tra pedaliera e ingranaggi sia unidirezionale grazie al dispositivo grigio.

1.1 RICHIESTE DI PROGETTO

La bicicletta sarà provvista di un motore per pedalata assistita da 1000W da 3500 giri al minuto. Il motore sarà collegato al cambio tramite una serie di ingranaggi con un rapporto di trasmissione di circa 1 a 29 al fine di limitare il numero di giri a 120 al minuto (valore pensato come la pedalata massima che un ciclista allenato può raggiungere) e di aumentare la coppia trasmessa. Oltre alla potenza data dal motore, il cambio dovrà trasmettere anche la potenza fornita dall'utilizzatore. Un ciclista esperto è in grado di trasmettere circa 500W (tale valore è fornito su consiglio dall'azienda ed è frutto della loro esperienza nel settore). Complessivamente, dunque, il moltiplicatore dovrà trasmettere (a piena potenza) 1500W a 120 rpm, con una coppia di 120 N m. Oltre ai valori relativi alle potenze, il moltiplicatore dovrà essere il più compatto possibile.

1.2 MODELLI DI ISPIRAZIONE

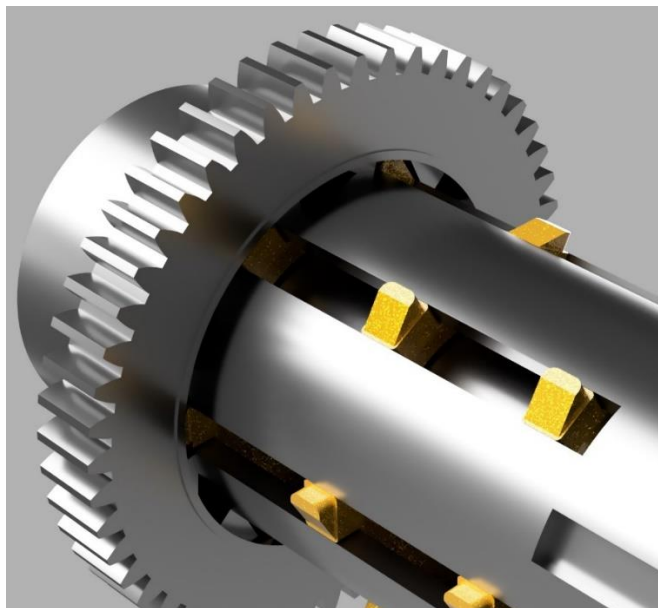
Come suggerito dal tutor aziendale, per la realizzazione di tale progetto si sono presi in considerazione due modelli principali. Il primo sono i moltiplicatori per biciclette prodotti dalla Pinion, aventi un sistema di rinvio che permette di ridurre il numero complessivo degli ingranaggi (e quindi degli ingombri), il secondo è il cambio a crociera prodotto per le Vespe fino agli anni 80. Viene preso come modello il cambio delle Vespe in quanto di ingombri molto contenuti e in grado di trasmettere potenze paragonabili (seppur maggiori) a quelle richieste dal progetto. Il progetto finale è l'unione di questi 2 modelli.

1.3 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

La potenza in ingresso viene trasmessa ad un albero cavo avente ad una estremità un ingranaggio utilizzato per ridurre il rapporto finale del motore. A tale albero vengono inseriti 4 ingranaggi che forniranno la potenza in ingresso al sistema di rinvio. L'albero risulta cavo al fine di poter inserire la pedaliera senza renderla perennemente solidale ad esso, ma solo quando il ciclista sta pedalando. Tale configurazione è possibile grazie ad un dispositivo che trasmette la potenza in modo unidirezionale, permettendo quindi al ciclista di far avanzare la bici per inerzia senza dover costantemente pedalare durante le fasi di discesa o di riposo.

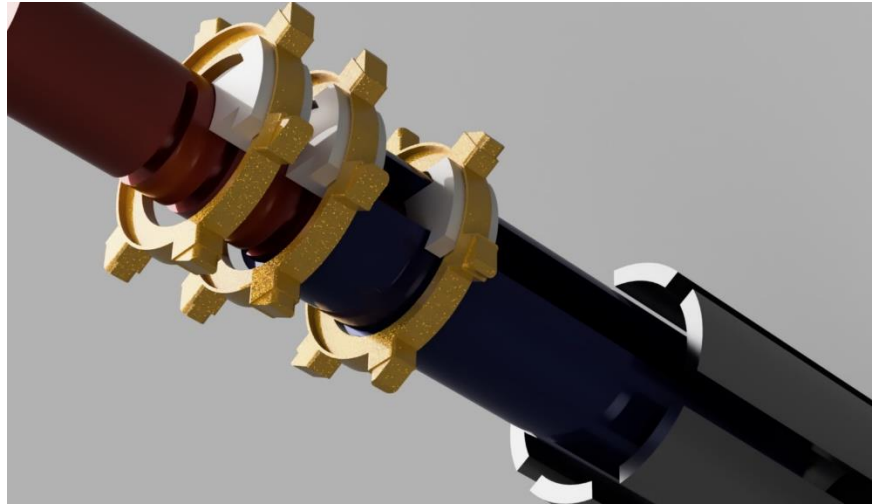
La potenza viene dunque trasmessa agli ingranaggi dell'albero di rinvio il quale, grazie alle crociere, viene collegato ad un ingranaggio, permettendo così di trasmettere il moto. L'inserimento dei vari rapporti è possibile grazie allo scorrimento delle varie crociere lungo l'albero comandate dal tamburo scanalato.

Fig. 1.3 Accoppiamento crociere-ingranaggi



Nell'immagine soprariportata si possono vedere le 3 crociere (in giallo) e come esse fungano da collegamento tra ingranaggi e albero. Inoltre, si può notare come una delle crociere (Quella per gli ingranaggi di rinvio) abbia la parte a contatto con gli ingranaggi invertita rispetto alle altre 2. Questo è dovuto al fatto che 2 crociere ricevono potenza dagli ingranaggi, mentre la terza la trasmette.

Fig. 1.4 Componenti per la selezione delle marce



Nell'immagine sopraripotata si può apprezzare i vari componenti all'interno dell'albero di rinvio (in grigio). Il componente in rosso è il tamburo selettore che permette il movimento delle forcelle (in bianco) che a sua volta muovono le crociere (in giallo). In blu vi è una guida per forcelle che consente loro di scorrere solo in una direzione e permette di mantenere in posizione il tamburo scanalato.

Fig. 1.5 Guida per forcelle e tamburo



Nell'immagine sopraripotata si può apprezzare meglio la guida. Nella cava cilindrica vi è inserito il tamburo, mentre la cava rettangolare fungerà da guida per le forcelle. Per mantenere il tutto in posizione, la parte terminale sarà collegata in modo rigido alla scatola del cambio.

1.3.1 RAPPORTI DI VELOCITÀ

Gli ingranaggi sono a denti dritti di modulo 1.25 con angolo di pressione di 20° e spessore 8mm. L'interasse è di 60 mm.

Vengono riportati i rapporti tra i vari ingranaggi:

Tab. 1.1 Rapporti ingranaggi input

Rapporti di trasmissione Ingresso		
Motrice	Condotta	Rapporto
44	52	1,18181818
48	48	1
52	44	0,84615385
56	40	0,71428571

Tab. 1.2 Rapporti ingranaggi output

Rapporti di trasmissione Uscita		
Motrice	Condotta	Rapporto
66	30	0,454545
52	44	0,846154

Le marce saranno la combinazione tra i rapporti in ingresso e quelli in uscita con i seguenti valori:

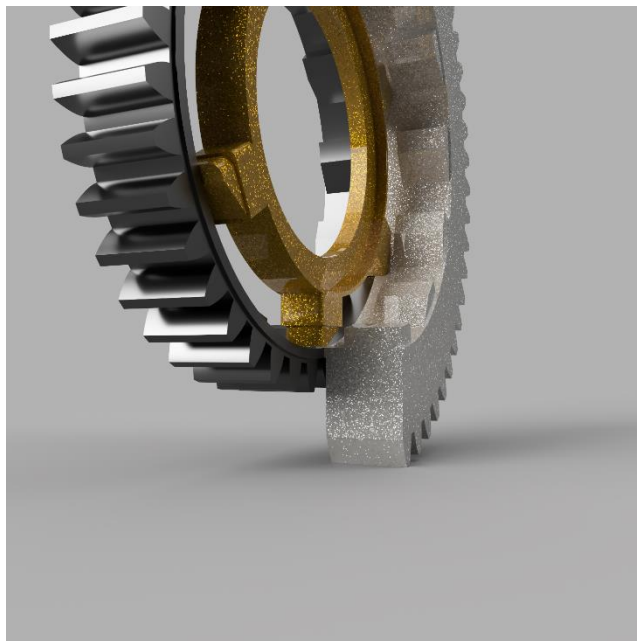
Tab. 1.3 Rapporti delle varie marce

Rapporti Finale		
Marcia	Rapporto Di trasmissione	Rapporto Di velocità
1	1	1
2	0,846154	1,181818
3	0,715976	1,396694
4	0,604396	1,654545
5	0,53719	1,861538
6	0,454545	2,2
7	0,384615	2,6
8	0,324675	3,08

La selezione delle marce avviene grazie allo scorrimento delle crociere. Per garantire il moto, per ogni marcia una delle due crociere degli ingranaggi d'ingresso dovrà essere inserita su un ingranaggio, mentre l'altra non dovrà essere inserita in nessun ingranaggio. La crociera per gli ingranaggi di uscita dovrà essere inserita su uno dei due ingranaggi.

Per garantire alle crociere di non ingranare 2 ingranaggi contemporaneamente e in certi casi di non essere collegate a nessun ingranaggio, nelle ruote dentate la parte che funge da contatto tra crociera e ruota non è profonda quanto l'altezza dell'ingranaggio, ma solo per $\frac{2}{3}$ di essa e il restante $\frac{1}{3}$ è un foro di diametro superiore alla lunghezza della crociera. Dato che la crociera scorre tra 2 ingranaggi e il suo spessore è poco inferiore a $\frac{2}{3}$ dello spessore degli ingranaggi, i due fori permettono alla crociera una posizione in "folle".

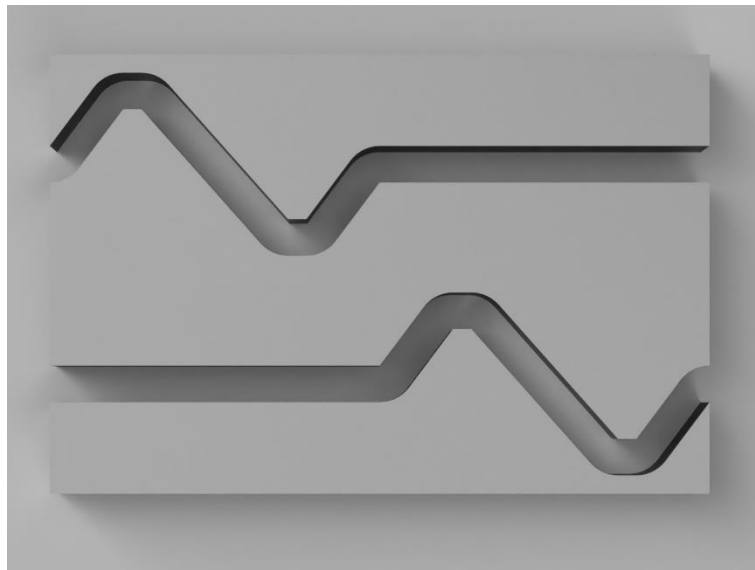
Fig. 1.6 Geometria ingranaggi



1.3.2 SELETTORE A TAMBURO SCANALATO

Il selettore dovrà guidare le forcelle che controllano le crociere. Le forcelle dovranno quindi scorrere in un'unica direzione. Per garantire il corretto movimento si sfrutta anche una guida fissa. La forma della guida garantisce supporto al selettore e garantisce il giusto scorrimento delle forcelle. Il tamburo garantisce alle forcelle di scorrere di $\pm 4\text{mm}$ rispetto alla posizione neutrale tra le due ruote. Nel tamburo vi sono 3 scanalature che fungono da guide, una per ogni crociera. Le guide per gli ingranaggi che ricevono potenza sono disegnate per garantire il ritorno alla posizione iniziale dopo un giro completo. Essendo il cambio basato su un sistema con 2 ingranaggi di rinvio, infatti, le marce che ricevono potenza dovranno essere inserite 2 volte durante un completo passaggio dalla prima all'ultima marcia. Le marce di rinvio invece dovranno eseguire un cambio solo una volta. Con lo schema sotto riportato (si tratta dello sviluppo su piano del selettore) si può apprezzare meglio il funzionamento.

Fig. 1.7 Scanalature ingranaggi input



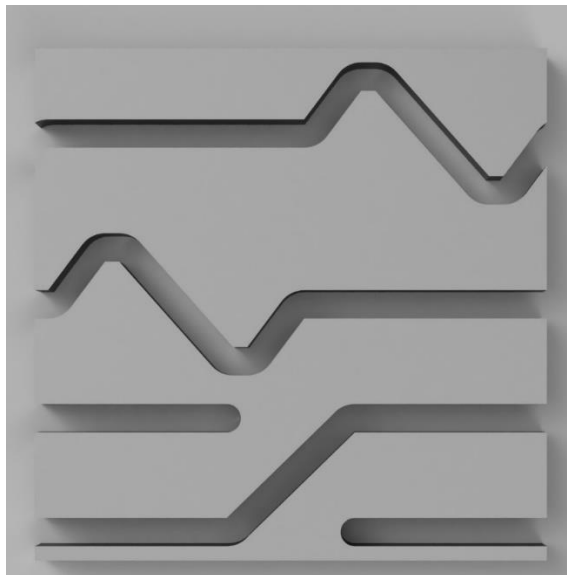
Nell'immagine soprariportata si possono notare le guide che permettono alle forcelle per gli ingranaggi di ingresso di muoversi. La guida superiore comanda la crociera per la prima e la seconda (che diventeranno la quinta e la sesta inserendo il secondo ingranaggio di rinvio) mentre la seconda comanda la crociera per la terza e la quarta (che diventeranno settima e ottava). Da notare come dopo un giro completo le forcelle saranno tornate alla configurazione iniziale. Ciò che sarà cambiato è la posizione forcilla della crociera di rinvio.

Fig. 1.8 Scanalatura ingranaggi di rinvio



Nell'immagine sopraripotata si può notare come vengono selezionate le marce di rinvio. La parte inferiore inserisce la marcia lenta. Dopo un giro completo il tamburo porta la forcella nella parte superiore della guida inserendo così la marcia veloce.

Fig. 1.9 Scanalature tamburo 2D



Nell'immagine sopraripotata si può vedere la pianta completa del tamburo che verrà poi resa cilindrica tramite rotazione attorno al proprio asse.

Fig. 1.10 Guida forcelle con componenti inseriti



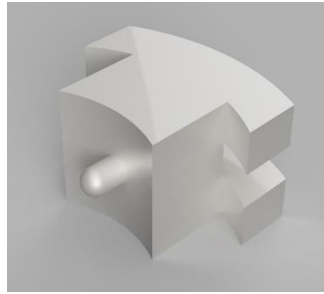
Nell'immagine sopraripotata si può apprezzare la guida per forcelle e tamburo. Nella configurazione dell'immagine la marcia inserita è la seconda.

Fig. 1.11 Tamburo e Guida



Nell'immagine sopraripotata si può notare com'è inserito il tamburo nella guida, e come la sua rotazione permetta di selezionare le varie marce.

Fig. 1.12 Forcella

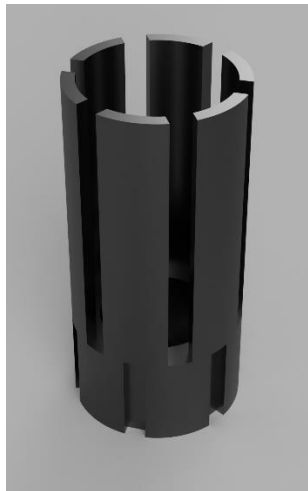


Nell'immagine sopraripotata è raffigurata la forcella. La parte cilindrica alla base viene inserita in una delle scanalature del tamburo.

1.3.2 ALBERO DI RINVIO

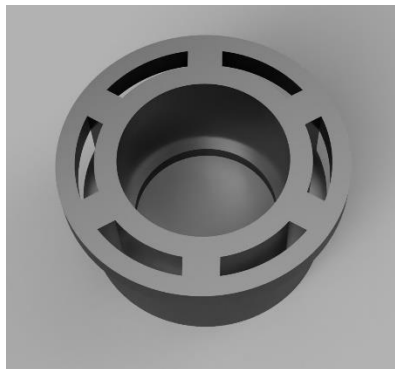
Come già detto, per ridurre al minimo gli ingombri si è deciso di inserire il selettore di marcia all'interno dell'albero di rinvio. L'albero risulta quindi cavo, con delle scanalature che permettono alle crociere di scorrere, e di trasmettere potenza.

Fig. 1.13 Albero di rinvio



Nell'immagine sopraripotata vi è il corpo principale dell'albero di rinvio. Una volta inseriti i vari componenti che vi dovranno stare all'interno verrà inserita una copertura per mantenere il tutto in posizione.

Fig. 1.14 Copertura albero



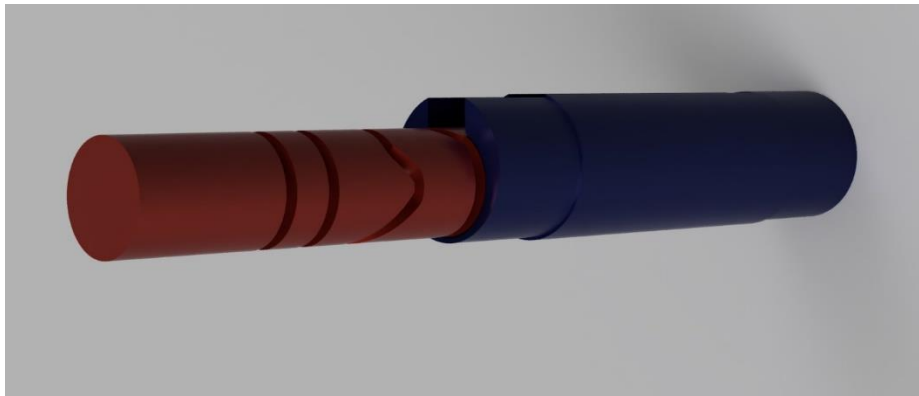
Per ridurre l'attrito volvente tra albero e la guida delle crociere vengono inseriti alle 2 estremità 2 boccole cilindriche Igus in materiale apposito.

2. ASSEMBLAGGIO

2.1 ALBERO DI RINVIO

Di seguito vengono riportati i vari passaggi per l'assemblaggio dell'assieme:

Fig. 2.1 Assemblaggio Step 1



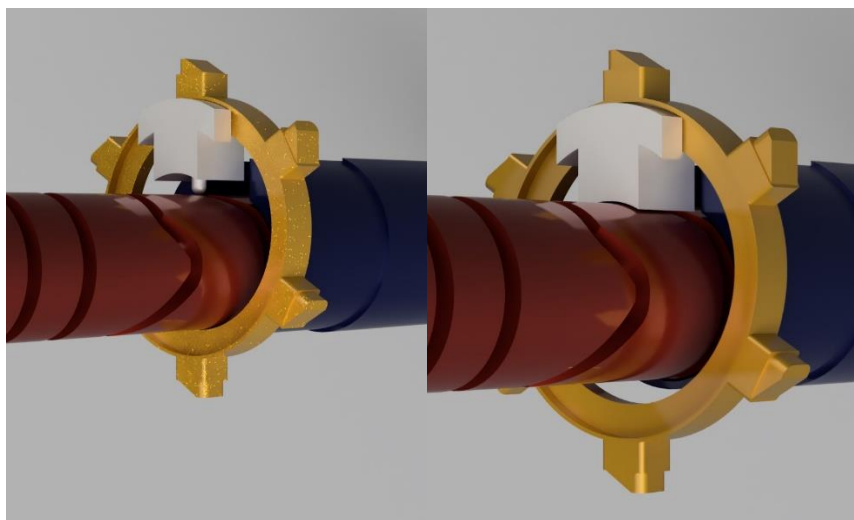
Viene inserito per qualche millimetro il tamburo all'interno della guida (il tamburo ha un piccolo cilindro in testa, esso indica il lato da inserire).

Fig. 2.2 Assemblaggio Step 2



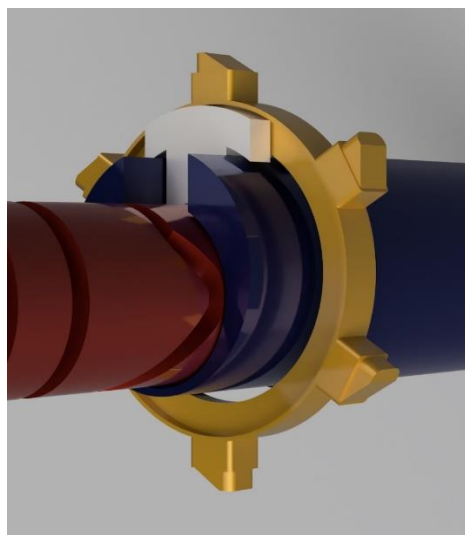
A parte viene inserita la crociera nella forcella.

Fig. 2.3 Assemblaggio Step 3



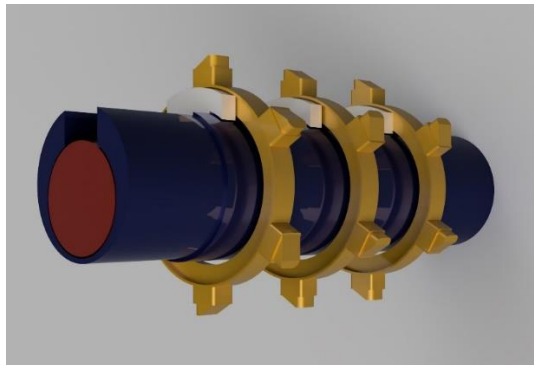
Forcella e crociera vengono fatte scorrere lungo il tamburo finché non si trovano in posizione per essere inseriti nella prima scanalatura.

Fig. 2.4 Assemblaggio Step 4



Si fanno scorrere tamburo, forcella e crociera per 10mm lungo la guida e si ripete la stessa procedura per le altre tre scanalature.

Fig. 2.5 Assemblaggio Step 5



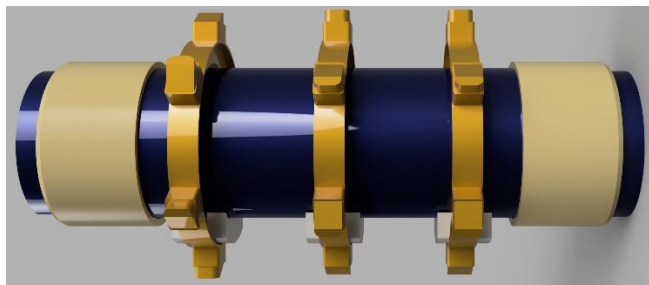
Questo è il risultato con tutte le forcelle e crociere inserite. Da notare i versi con cui le crociere vengono inserite per garantire il corretto funzionamento dell'insieme.

Fig. 2.6 Assemblaggio Step 6



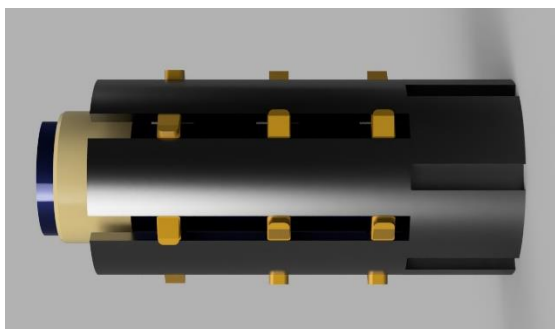
Si sfruttano gli spallamenti su entrambi i lati della guida per inserire le boccole che permetteranno di ridurre l'attrito tra guida e albero.

Fig. 2.7 Assemblaggio Step 7



Si passa ora all'inserimento dell'albero.

Fig. 2.8 Assemblaggio Step 8



L'albero è provvisto di uno spallamento al suo interno che non permette spostamenti eccessivi tra albero e boccola.

Fig. 2.9 Assemblaggio Step 9

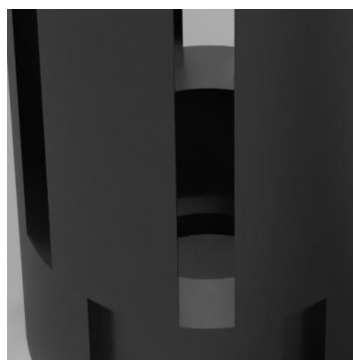
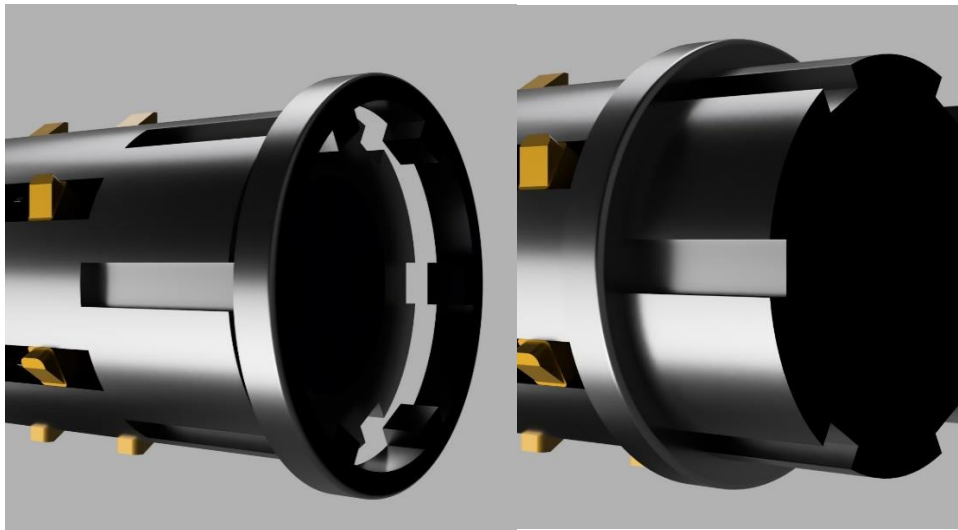
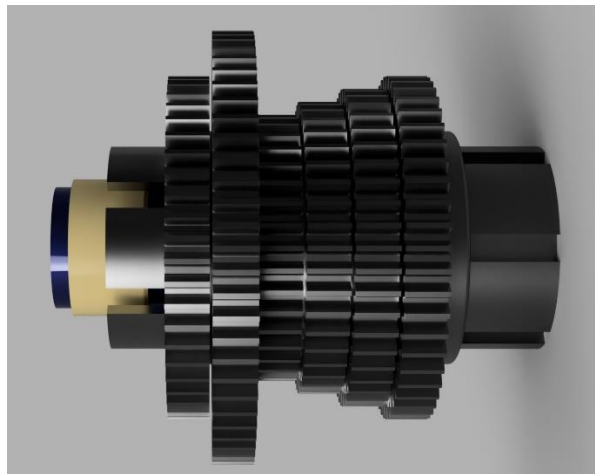


Fig. 2.10 Assemblaggio Step 10



Viene inserito un anello con denti interni nelle scanalature dell'albero che fungerà da blocco per gli ingranaggi che verranno inseriti.

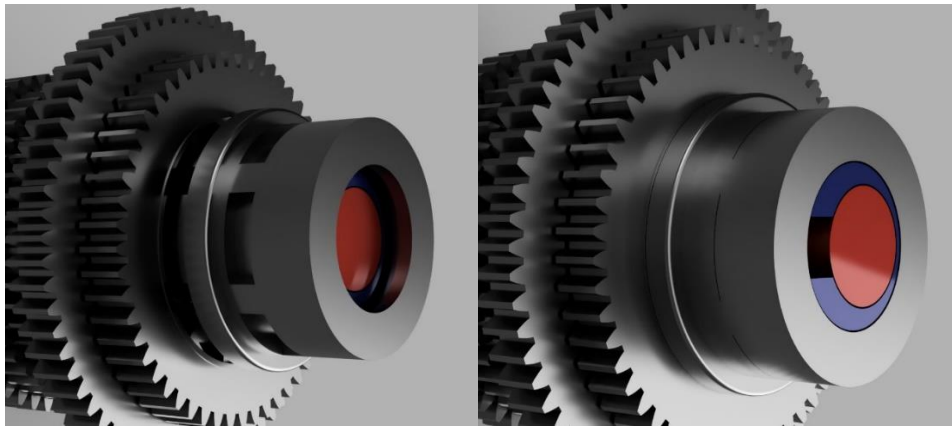
Fig. 2.11 Assemblaggio Step 11



Vengono ora inseriti i vari ingranaggi nel seguente ordine: 52, 48, 44, 40, 66, 52 denti.

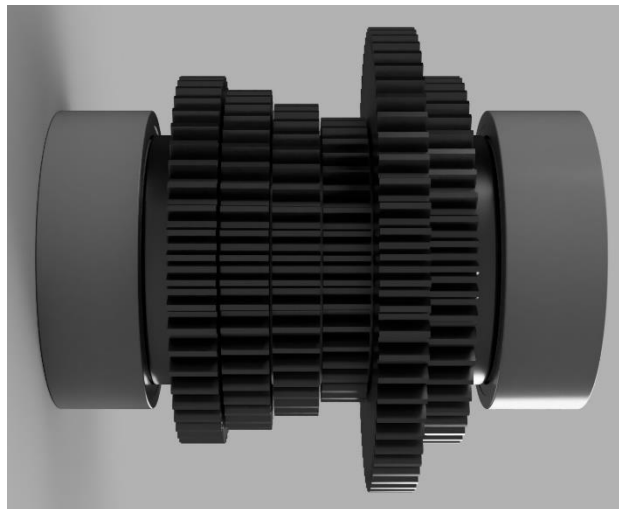
Oltre che all'ordine è importante il verso degli ingranaggi per garantire ad ogni crociera uno spazio di "folle".

Fig. 2.12 Assemblaggio Step 12



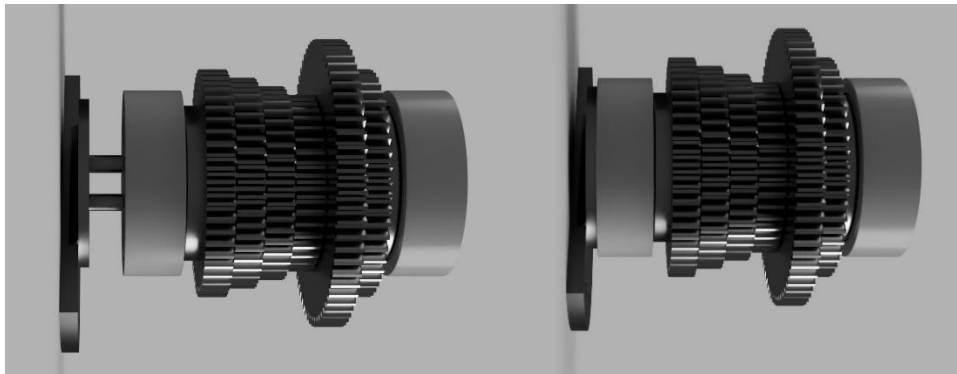
Si può ora inserire la parte superiore dell'albero. La copertura va inserita finché non vi è contatto tra essa e l'albero.

Fig. 2.13 Assemblaggio Step 13



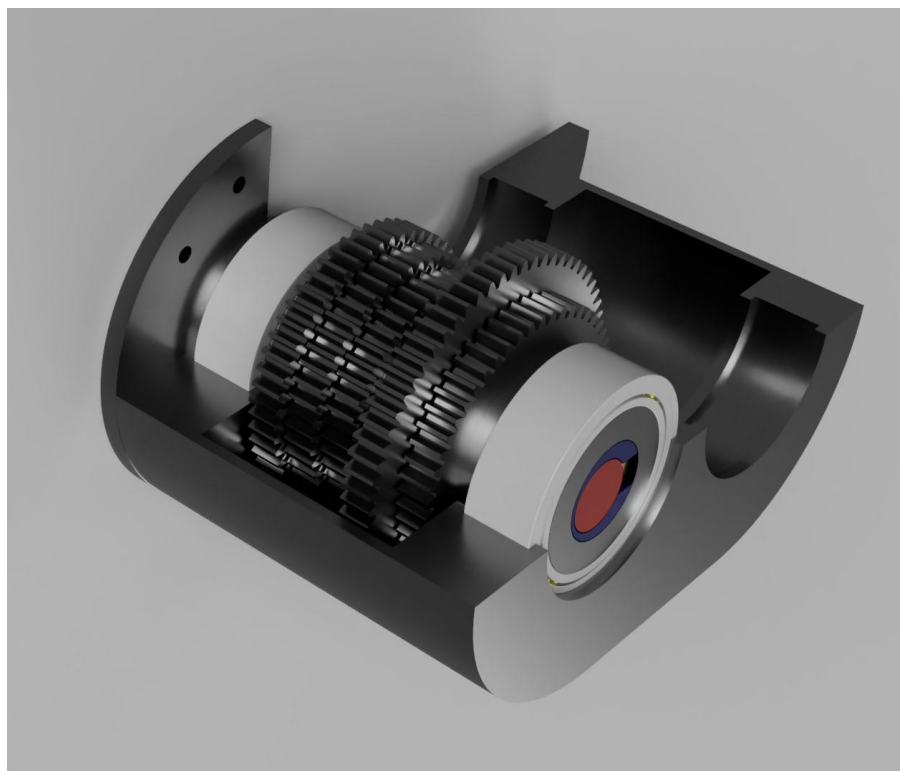
Si inseriscono ora i cuscinetti (SKF NAO 40X55X17) ai due capi dell'albero.

Fig. 2.14 Assemblaggio Step 14



Viene poi inserita una lamiera avente 4 cilindri che andrà accoppiata (ad incastro per interferenza) con la guida per forcelle.

Fig. 2.15 Assemblaggio Step 15

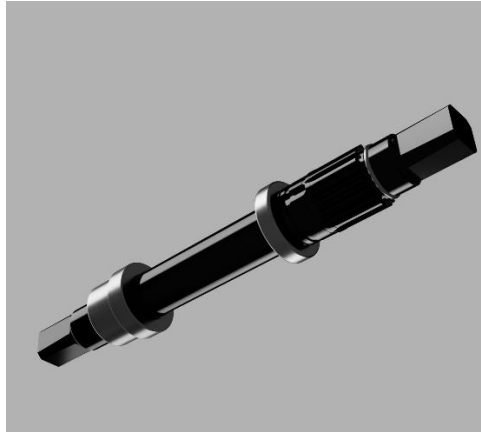


L'albero di rinvio può ora essere inserito (dall'alto) nella parte inferiore della scatola del cambio.

2.2 PARTE CON PEDALLIERA

Si passa ora all'assemblaggio del lato pedaliera.

Fig. 2.16 Assemblaggio Step 16



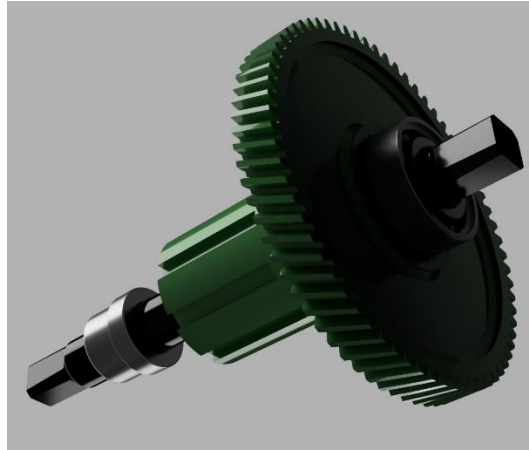
Si inseriscono prima i cuscinetti sulla pedaliera (anche in questo caso sfruttando gli spallamenti)

Fig. 2.17 Assemblaggio Step 17



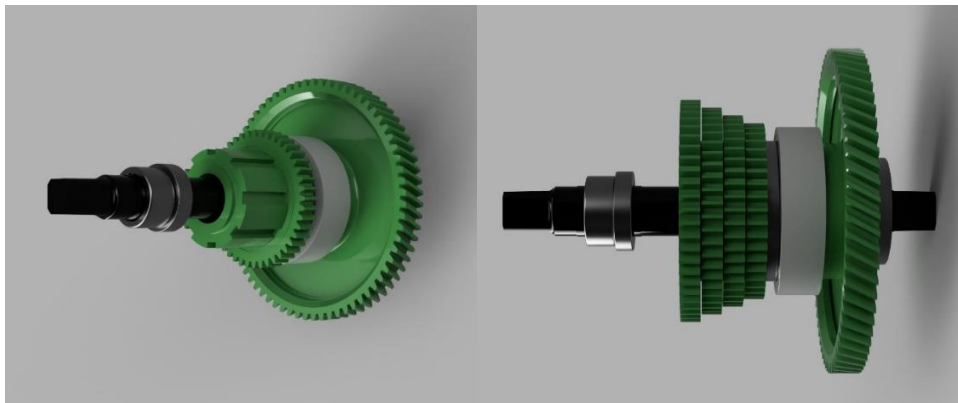
Successivamente si inserisce l'ingranaggio che riceve il moto dal motore

Fig. 2.18 Assemblaggio Step 18



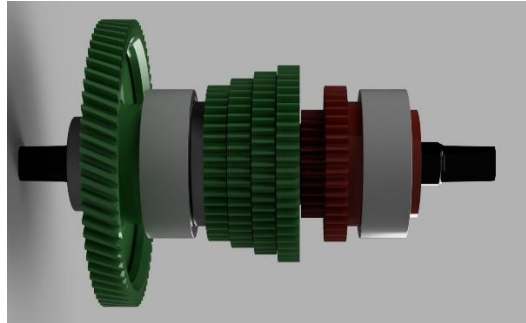
Si inseriscono poi il dispositivo di collegamento tra pedaliera e ruota e un cuscinetto.

Fig. 2.19 Assemblaggio Step 19



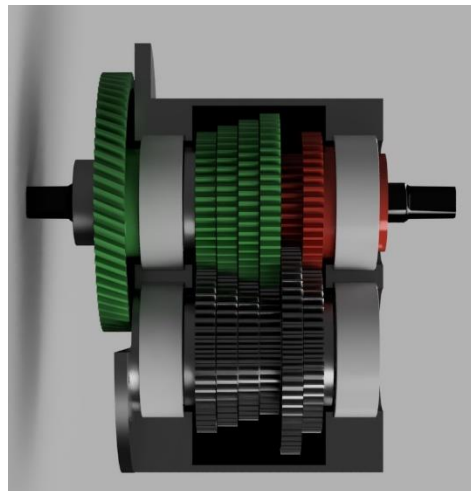
Vengono successivamente inseriti (nell'ordine): Cuscinetto (SKF), distanziale cuscinetto-ingranaggi e ingranaggi. Gli ingranaggi hanno una geometria che li rende solidali alla ruota inserita sulla pedaliera. Inoltre gli ingranaggi vengono inseriti dal più piccolo al più grande.

Fig. 2.20 Assemblaggio Step 20



Successivamente viene inserito il corpo con gli ingranaggi collegati alla corona della catena e il cuscinetto che lo supporta.

Fig. 2.21 Assemblaggio Step 21



Anche la parte della pedaliera può essere inserita nella parte inferiore della scocca.

I restanti componenti (di copertura) relativi principalmente alla scocca verranno completati dai colleghi di reparto.

3. VERIFICA AD USURA

3.1 Verifica delle ruote dentate

3.1.1 Verifica dinamica dei denti

Si è optato per ingranaggi a denti dritti con angolo di pressione di 20°.

Per una pre-verifica sul modulo viene applicata la formula di Lewis:

$$m = \sqrt[3]{\frac{2 M_t \cos \beta}{\lambda z \sigma_{am} y}}$$

Successivamente viene eseguita la verifica tramite il programma KissSoft. Il modulo che garantisce il funzionamento (per 10000 ore) dei denti in questione e delle potenze in gioco è 1.25. Il numero relativamente basso di ore richieste è stato pensato considerando un utilizzo principalmente estivo, o comunque nei periodi caldi. Inoltre trattandosi di una bicicletta da off-road è stato ipotizzato un utilizzo principalmente nei weekend o per viaggi durante le vacanze, comunque non per un utilizzo quotidiano.

3.1.2 Verifica statica del corpo

Avendo gli ingranaggi una geometria particolare, si è utilizzato il programma Fusion360 per eseguire una verifica statica. Tutti gli ingranaggi vengono sollecitati in 2 modi possibili, ovvero come ruote motrici o ruote mosse. Per le ruote motrici si idealizza la parte a contatto con le crociere come vincolo e si applica al corpo un momento torcente pari alla coppia trasmessa. Per le cedenti si idealizza che venga applicata una forza (in funzione del momento trasmesso) nei punti a contatto con le crociere, e il vincolo risulti il corpo stesso.

La coppia da verificare per ogni ingranaggio è quella che essa trasmette quando la bicicletta è a pieno regime (120 N m) e il coefficiente di sicurezza minimo è pari a 2. Tale valore (generalmente considerabile basso) viene ritenuto sufficiente in quanto difficilmente e per poco tempo si raggiungeranno tali valori di potenza (ricordiamo che solo un ciclista molto allenato è in grado di sviluppare 500W e comunque per un tempo limitato).

La forma inclinata dell'accoppiamento ingranaggi-crociera permette un miglior scarico delle tensioni per entrambi i componenti.

3.2 Scelta e verifica dei cuscinetti

In questo caso si è optato (per semplicità) di utilizzare 4 cuscinetti tutti uguali e di scegliere quello che in primis rispettasse il carico massimo (12 kN) e che fosse di dimensioni congrue al progetto. Il catalogo di scelta è quello della SKF. Il cuscinetto più congruo (soprattutto per le dimensioni relativamente contenute) è il NAO 40x55x17.

La formula per la verifica è la seguente:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

Dove L rappresenta il numero di cicli (vengono calcolati a piena potenza con per le varie marce per 10000 ore di attività), P il carico risultante al cuscinetto (in questo caso è solo radiale in quanto ingranaggi a denti dritti e viene calcolato come l'equilibrio dato da una struttura isostatica composta da trave e cerniera), C è il carico statico del cuscinetto e p in questo caso vale 10/3 in quanto si è optato per un cuscinetto a rullini (i quali sono in grado di sopportare più carico a parità di diametro ma hanno uno spessore maggiore). La probabilità di rottura in questo caso è del 10%.

3.3 Verifica statica dell'albero di rinvio

Per la verifica in questo caso viene mantenuta come vincolo la base dell'albero e vengono applicate le forze (tangenziali e normali) dovute all'ingranamento delle marce. Anche in questo caso il coefficiente di sicurezza da rispettare è pari a 2. Nella disposizione degli ingranaggi si è deciso che per la prima marcia la ruota che trasmette moto all'albero sia la prima, mentre quella che riceve potenza da esso è l'ultima. In questo modo le forze agenti saranno il più vicine possibile ai cuscinetti, riducendo così il momento flettente a cui l'albero è soggetto. Inoltre va verificata la deformazione dell'albero, verificandone la freccia massima che non superi 0.1 mm, e che l'angolo di flessioni non superi l'angolo massimo concesso dai cuscinetti ($5,8 \cdot 10^{-4}$ rad in questo caso).

4. PRODUZIONE DEI COMPONENTI

4.1 Scelta dei materiali

Per la verifica a fatica degli ingranaggi è richiesta una pressione di snervamento di circa 500 N/mm^2 . A tal riguardo sarà l'azienda a occuparsi della scelta dell'acciaio più adatto. Discorso analogo per gli altri componenti che necessitano di un acciaio dalle stesse caratteristiche. Verosimilmente è stato preso in considerazione un acciaio da bonifica, in particolare 25CrMo4 (EN 10083-3).

4.2 Processi tecnologici

Essendo il prodotto in questione non diretto ad una ampia fetta di mercato, per la produzione dei componenti si sfruttano tecniche che non richiedano stampi o macchinari poco flessibili optando quindi per cicli di tornitura e fresatura, pur sapendo i costi e i tempi (in particolare per degli acciai da bonifica). Un'accortezza particolare per l'albero; esso, una volta ottenuta la forma cilindrica tramite tornitura, verrà sottoposto a taglio laser per ottenere gli intagli sui quali passeranno le crociere.

5. CONCLUSIONI

Questa esperienza è stata utile da un punto di vista didattico, in quanto permette di prendere più confidenza con programmi di disegno 3D e per la verifica a fatica dei vari componenti. Permette inoltre di dare maggior consapevolezza sulle caratteristiche (in particolare la resistenza a fatica) dei vari componenti in relazione alle loro geometrie.

Risulta anche utile da un punto di vista relazionale in quanto permette di affacciarsi a realtà aziendali dove è fondamentale la comunicazione tra i vari reparti e tra tutor e stagista. Ciò si è tradotto anche in un arricchimento del vocabolario del settore.