

**ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÁ di BOLOGNA**

**SCUOLA DI INGEGNERIA  
E ARCHITETTURA**

Sede di Forlì

**CORSO DI LAUREA IN  
INGEGNERIA MECCANICA**

Classe L-9

**Elaborato finale di laurea**

in Disegno Tecnico assistito dal calcolatore

**“Studio e ottimizzazione di un riduttore per un  
convertiplano con eliche controrotanti”**

Candidato

Relatore

Monti Gianluca

Prof. Ing. Piancastelli Luca

Anno Accademico 2014/2015

III° Sessione



# Indice

## **-Introduzione**

## **-Capitolo 1: Componenti aeronautici**

-Capitolo 1.1: I diversi tipi di convertiplano

-Capitolo 1.2: La nascita del

-Capitolo 1.3: L'elica controrotante

-Capitolo 1.4: Il motore AE2100D3

## **-Capitolo 2: Componenti e organi di trasmissione del moto**

-Capitolo 2.1: Ingranaggi

-Capitolo 2.2: Materiali di costruzione delle ruote dentate

-Capitolo 2.3: Alberi di trasmissione del moto

-Capitolo 2.4: Riduttore di velocità

-Capitolo 2.5: L'elica

-Capitolo 2.6: Cuscinetto a sfere

-Capitolo 2.7: Il motore turboelica

## **-Capitolo 3: Disegno delle parti**

-Capitolo 3.1: Il motore turboelica

-Capitolo 3.2: Il primo riduttore di velocità

-Capitolo 3.3: Il secondo riduttore di velocità

-Capitolo 3.4: Albero

-Capitolo 3.5: Eliche

-Capitolo 3.6: Accoppiamento delle parti

## **-Bibliografia**

## **-Sitografia**



## Introduzione

Obiettivo di questa tesi è quello di creare e ottimizzare il riduttore di numero di giri per un convertiplano utilizzante eliche controrotanti, utilizzate per ridurre la dimensione delle pale delle eliche. L'analisi di questa soluzione è stata effettuata in seguito all'insorgere di problemi riscontrati nell'utilizzo di normale eliche singole sul convertiplano americano V22 "Osprey", che sono spesso sfociati in fatali incidenti. In seguito farò riferimento al V22, ma la soluzione adottata può essere estesa a tutti gli altri velivoli simili della medesima categoria, come l'AW609. Si è scelto di utilizzare come propulsore turboelica l'AE2100D3 prodotto dalla Rolls-Royce

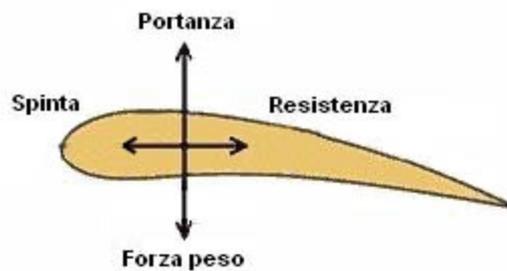


Dopo aver scelto e disegnato (per mezzo del software di disegno SOLIDWORKS 2016) il motore da utilizzare come organo di spinta del velivolo, ho proceduto a dimensionare le ruote dentate per mezzo del software di disegno SOLIDEDGE. Quindi utilizzando SOLIDWORKS ho proceduto accoppiando le ruote dentate del riduttore, conoscendo in partenza la velocità dell'albero all'uscita del motore e la velocità desiderata in uscita alle eliche. Successivamente, ho creato e dimensionato gli alberi di trasmissione del moto tra motore, riduttore ed eliche, e infine ho creato una rappresentazione schematica delle eliche controrotanti. Infine, per assicurarmi un corretto e sicuro funzionamento, ho effettuato una simulazione della sollecitazione a torsione e della deformazione dell'albero in questione utilizzando il software SOLIDWORKS SIMULATION.

# Cap. 1- Componenti aeronautici

## Cap.1.1- I diversi tipi di convertiplano

Viene denominato convertiplano un velivolo in grado di cambiare durante il volo il proprio metodo di spinta, passando da una spinta verticale ad una orizzontale dove la portanza, ovvero la forza diretta contrariamente al peso dell'aereo che consente il sostentamento in volo del medesimo, è sviluppata dal profilo alare.



I convertiplani si suddividono in due diverse classi, ognuna della quali differisce dall'altra in base al modo in cui ottiene la variazione della configurazione di volo:

- TILT WING;
- TILT ROTOR;

Nella classe Wingrotor è l'intera ala dove il motore è fissato a ruotare (TILT) per variare la configurazione. Una modalità che consente di avere, a parità di potenza e in decollo verticale, una spinta maggiore rispetto alla configurazione Tilt Rotor, dato che in quest'ultimo tipo la rotazione del solo motore trova l'interferenza di una porzione di ala. Per contro, durante le operazioni di decollo e atterraggio eventuali raffiche di vento trovano una maggiore superficie su cui esercitare una forza destabilizzante, compromettendo la sicurezza e la stabilità del velivolo. Un esempio appartenente a questa classe è il prototipo americano Hiller X-18.



Il prototipo Hiller X-18, un convertiplano Tilt Wing.

Viceversa, nella classe Tilt Rotor è il solo motore ad effettuare una graduale rotazione per passare da una configurazione a volo orizzontale ad una verticale. Appartiene a questa categoria il V22 Osprey.

## Cap. 1.2- La nascita del V22 Osprey

L'odierna necessità di avere mezzi aerei in grado di soddisfare le molteplici (e talvolta contrastanti) richieste dei reparti dell'esercito statunitense fu ciò che spinse la Boeing, nel 1981, a progettare il V22 "Osprey". Ciò che serviva agli operatori sul campo, era un mezzo in grado di atterrare e decollare in spazi limitati e vicini al punto di interesse, che fosse in grado di trasportare truppe, equipaggiamento o veicoli leggeri, e che avesse una elevata autonomia di volo. Un mezzo quindi che convogliasse insieme i vantaggi del decollo e dell'atterraggio verticali dell'elicottero, e della capacità di carico, della velocità e dell'autonomia tipiche dell'aereo. La soluzione adottata dalla Boeing fu quella di creare un velivolo che fosse in grado di ruotare i propri motori (TILTROTOR), in modo da passare da una configurazione ad un'altra con relativa semplicità: il risultato fu il V22, il primo convertiplano del suo genere ad uscire dalla fase di prototipo e ad essere consegnato ai clienti.



Un V22 in volo. È possibile notare il passaggio dalla configurazione a volo orizzontale a quella verticale.

Utilizzando 2 motori Rolls-Royce AE1107C da 4586 kW l'uno, e con un diametro dei rotori di 11,6 m, l'Osprey ha una velocità massima di 443 Km/h e un'autonomia di 3380 Km. Nonostante i due motori siano tra loro indipendenti, sono collegati ad un albero di trasmissione comune in modo che, in caso di cedimento di uno dei motori, l'altro motore funzionante possa ripartire parte

della potenza, in modo da poter assicurare l'atterraggio o il proseguimento della navigazione.

La soluzione adottata di ricorrere ad un convertiplano tuttavia non è esente da difetti, uno dei quali è quello dell'assenza di possibilità di autorotazione in caso di avaria dei motori. L'autorotazione è una situazione in cui, nel caso di un elicottero, il pilota può escludere il propulsore e lasciare l'elica libera di girare in modo da rallentare la caduta e atterrare. Come dimostrato da prove tecniche, nel V22 questo non è possibile, fattore che pregiudica molto la sicurezza in caso di malfunzionamenti.

Altro principale svantaggio è la dimensione dei rotori, con una lunghezza delle pale di ben 11,6 m. Tale lunghezza pregiudica al V22 la capacità di poter decollare in orizzontale, oltre ad aumentare il rischio di fatali incidenti se dovessero verificarsi rollii eccessivi in fase di decollo o atterraggio. La dimensione è tale che le pale ruotano a pochissimi metri dalla cellula.



In quest'immagine, è possibile vedere le grandi dimensioni dei rotori del V22

### **Cap. 1.3- L'elica controrotante**

Il sistema ad elica controrotante, anche chiamato ad eliche coassiali controrotanti, utilizza la potenza fornita da un motore per mettere in rotazione due eliche disposte sullo stesso albero, ma ruotanti in due differenti versi. Le due eliche sono installate uno dietro l'altra, e i due alberi di trasmissione sono posti uno internamente all'altro, in cui il moto rotatorio contrario viene trasmesso per mezzo di ingranaggi a planetario e satelliti.

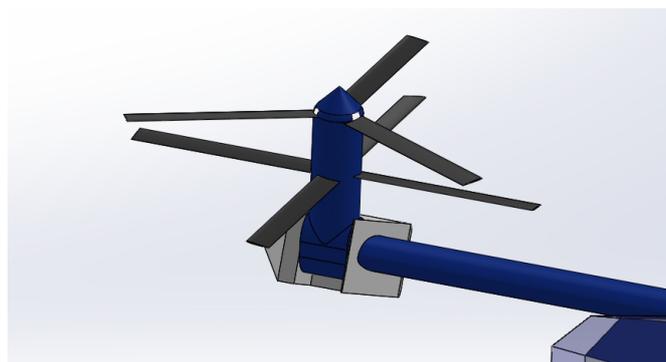


Le eliche controrotanti di un Ka 52.

Nelle applicazioni di volo a bassa velocità, la rotazione delle pale di un'elica fa sì che una sostanziale portata d'aria che fluisce attraverso il disco dell'elica venga trasformata in un flusso d'aria tangenziale. Nello schema classico a singola elica, l'energia di tale flusso è totalmente sprecata e ciò determina un calo nel rendimento dell'elica stessa. Nello schema a doppia elica controrotante invece, la seconda elica posta dietro alla prima è in grado di recuperare tale energia dal flusso d'aria che la investe. Se correttamente progettata, un'elica controrotante non ha componenti tangenziali in uscita, con una conseguente riduzione delle perdite e aumento del rendimento e delle prestazioni. Il flusso d'aria tangenziale inoltre è dannoso per la manovrabilità di un aereo, in quanto se investe uno stabilizzatore verticale porta l'aereo ad imbarcare. Un altro grande vantaggio di questa disposizione, è la riduzione del diametro del disco dell'elica (e conseguentemente della lunghezza delle pale) di valori che arrivano al 40%.

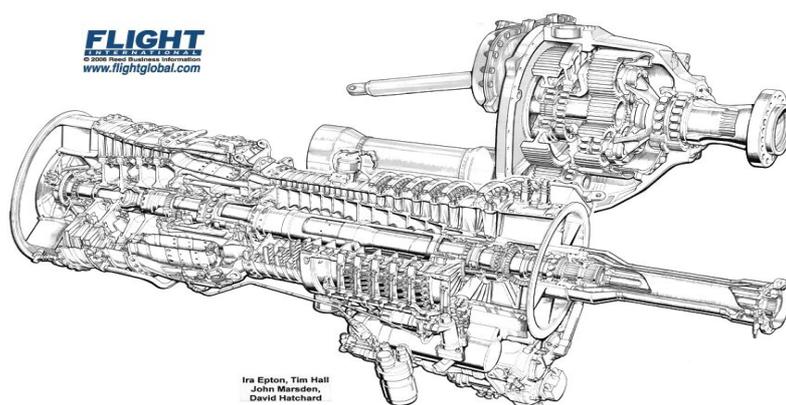
Le dimensioni delle eliche da adottare in questa soluzione quindi sono inferiori: dal normale valore di 11,6 m di diametro del V22 si passa ad un valore di circa 7 m. In questo modo, con ulteriori accorgimenti sarebbe persino possibile atterrare durante la configurazione a volo orizzontale.

Tuttavia, il sistema ad eliche controrotanti non è esente da difetti. Oltre ad essere caratterizzato da una maggiore complessità costruttiva, è anche più rumoroso rispetto allo schema ad elica singola, nonostante sia comunque possibile abbattere parte del rumore in eccesso installando eliche con un diverso numero di pale, maggiore per la seconda elica.



Utilizzare un numero maggiore di pale per la seconda elica  
permette di abbattere parte del rumore sviluppato.

## Cap. 1.4- Il motore AE2100D3

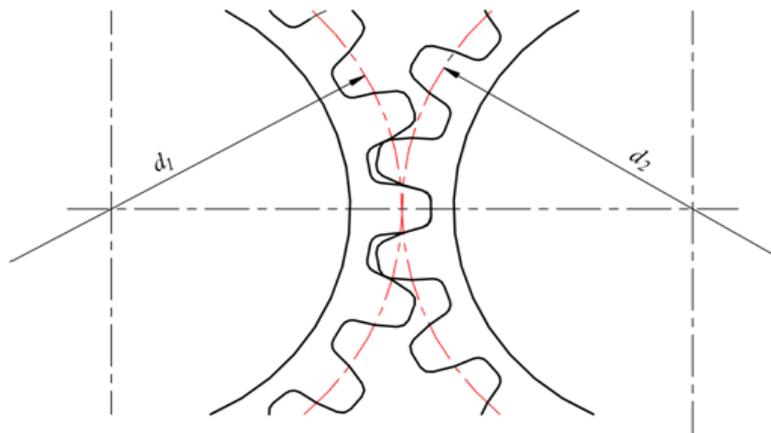


Il motore scelto per questa soluzione è un propulsore turboelica prodotto dalla Rolls-Royce, l'AE2100D3, esso è una diretta derivazione del modello installato sul V22 Osprey, l'AE1107C-Liberty e mantiene il medesimo gruppo di compressione a 14 stadi. La scelta di cambiare il propulsore montato di serie ricade sul maggiore numero di aerei su cui l'AE2100D3 è installato, rispetto all'AE1107C-Liberty che è installato sul solo V22. L'albero di alta pressione collega un compressore assiale a 14 stadi con due stadi di turbina di alta pressione. Altri due stadi di turbina sono invece dedicati all'albero di potenza che muove l'elica mediante un gruppo riduttore ad ingranaggi.

## Cap. 2- Componenti e organi di trasmissione del moto

### Cap. 2.1-Ingranaggi

Vengono chiamati ingranaggi i dispositivi meccanici atti a trasmettere il moto da un oggetto ad un altro, costituiti da due o più ruote dentate il cui asse di rotazione è fisso. La ruota dentata più piccola prende il nome di *pignone*, mentre quella più grande è denominata *corona*. La ruota che trasmette il moto è chiamata *ruota conduttrice* e la ruota che riceve il movimento prende il nome di *ruota condotta*. La loro classificazione avviene in base alla sezione di base (circolare o no), in base all'andamento di tale sezione rispetto all'asse a essa perpendicolare (cilindriche o coniche), e in base al profilo dei denti (dritti o elicoidali). A sua volta, la dentatura di una ruota può essere esterna (come nel più classico dei casi) oppure interna. La distanza tra due omologhi punti di due denti consecutivi (misurata lungo una circonferenza) viene chiamata *passo*. Perché due ruote vengano correttamente accoppiate tra loro (ovvero perché ingranino), devono presentare lo stesso passo sulle *primitive*. Tali primitive del moto sono circonferenze concentriche alle rispettive basi, e tra loro tangenti nel centro di istantanea rotazione, dove viene anche fatto coincidere il punto di contatto tra i denti per impedire lo strisciamento.



Per poter definire se un ingranaggio si comporta da riduttore o moltiplicatore della velocità in ingresso, si ricorre all'uso del parametro chiamato “*rapporto di trasmissione*”: esso è il rapporto matematico ottenuto tra la velocità angolare della ruota condotta divisa la velocità angolare della ruota conduttrice; in alternativa, è pari al rapporto tra il numero di denti della ruota conduttrice e quello della ruota condotta. Il rapporto di trasmissione può avere segno positivo o negativo, a seconda che l'ultima ruota condotta abbia verso di rotazione uguale o contrario a quello della ruota conduttrice.

## Cap. 2.2- Materiali di costruzione delle ruote dentate

Nella costruzione di una ruota dentata bisogna prestare particolare attenzione nella scelta dei materiali più consoni a sopportare gli sforzi a cui è sottoposta. La scelta del materiale ricade (tranne che per particolari applicazioni) sull'acciaio, che deve soddisfare molteplici requisiti quali:

- un'elevata resistenza alla fatica e all'usura;
- un'elevata resistenza agli urti;
- una buona lavorabilità per asportazione di truciolo;
- una buona attitudine ai trattamenti termici superficiali;

Le tipologie di acciaio più comunemente utilizzate prendono il nome dal procedimento utilizzato per ottenerne una maggiore durezza in superficie e sono:

- 1) Acciai per tempra superficiale;
- 2) Acciai da cementazione;
- 3) Acciai da nitrurazione;



La tempra superficiale consiste in un riscaldamento superficiale del pezzo seguito da tempra in acqua o in un bagno d'olio e rinvenimento. Durante il riscaldamento la struttura interna del materiale subisce delle trasformazioni, e dopo aver raggiunto la temperatura stabilita la ruota viene immersa in acqua o in un bagno d'olio in modo che il rapido raffreddamento impedisca al materiale di tornare alle condizioni iniziali. Così facendo si ottiene una particolare struttura dell'acciaio chiamata *martensite* che presenta un'elevata durezza e fragilità. Per annullare tale fragilità si prosegue con un processo di rinvenimento, trattamento che consiste nel riscaldare il pezzo ad una temperatura inferiore a quella di formazione di un'altra struttura dell'acciaio, l'*austenite* (caratterizzata da un'elevata tenacità, ovvero una elevata resistenza alla deformazione senza giungere alla rottura), mantenerla a tale temperatura per un certo tempo e successivamente raffreddarla.

La cementazione è un processo che ha lo scopo di ottenere un materiale che presenti un durissimo strato superficiale resistente all'usura ed una buona tenacia interna. Essa consiste nella carburazione (ossia la formazione di

carburi, composti contenenti carbonio molto duri) di acciai a basso tenore di carbonio, ottenuta mediante lungo mantenimento ad alta temperatura in mezzi capaci di cedere tale elemento. Dopo aver temprato la superficie del pezzo cementato, si ottiene la struttura e la durezza propria degli acciai temprati, mentre al cuore si ha un basso tenore di carbonio che dona tenacità e resistenza.

La nitrurazione è un'operazione di indurimento simile alla cementazione. In questo caso l'elemento assorbito è l'azoto e lo scopo è arricchire la superficie del materiale di nitruri, caratterizzati da un'elevata durezza. A differenza della cementazione, essa viene eseguita su materiale già bonificato (che ha già subito tempra e rinvenimento) e non richiede trattamenti successivi.

### **Cap. 2.3- Alberi di trasmissione del moto**

L'albero di trasmissione è un dispositivo atto a trasmettere il moto rotatorio tra due elementi separati. Durante l'esercizio, l'albero è sottoposto ad uno sforzo torsionale e, se vi sono collegate delle masse, anche ad uno sforzo flessionale. Il materiale più comunemente utilizzato è l'acciaio, e la realizzazione dell'albero può anche essere effettuata rendendolo cavo: in questo modo, è possibile avere una struttura più leggera senza pregiudicare la resistenza della stessa durante la torsione.



Un esempio di albero di trasmissione

### **Cap. 2.4- Riduttore di velocità**

Si chiama riduttore un dispositivo meccanico il cui scopo è quello di trasmettere un moto rotatorio da un albero ad un altro con riduzione del numero di giri in uscita rispetto a quello in entrata. I riduttori vengono utilizzati soprattutto nei casi in cui, dovendo le due parti funzionare a velocità differenti, non è possibile usare un accoppiamento diretto. Elemento caratteristico essenziale di un riduttore è il valore del rapporto di trasmissione,

cioè del rapporto fra le velocità angolari dell'albero condotto e dell'albero conduttore, inferiore all'unità.

Si possono distinguere vari tipi di riduttori, secondo la natura degli organi di cui sono essenzialmente costituiti. La riduzione delle velocità mediante trasmissioni a ingranaggio è estremamente diffuso, potendosi questi adattare alle più svariate esigenze di funzionamento; inoltre tutti i tipi di ingranaggi trovano applicazione nella costruzione dei riduttori.

Generalmente i rotismi costituenti il riduttore vengono contenuti entro un involucro chiuso, rendendo con ciò possibile l'impiego di dispositivi atti ad assicurare le migliori condizioni di lubrificazione, siano essi attraverso bagno d'olio, circolazione forzata del lubrificante, ingrassamento ecc.. Con questi particolari accorgimenti di lubrificazione, si possono così raggiungere elevati rendimenti e limitare notevolmente le vibrazioni, i rumori e i logoramenti delle superficie dei denti. L'elevato grado di perfezione raggiunto nelle moderne costruzioni meccaniche ha consentito d'impiegare riduttori a ingranaggi anche quando sono in gioco grandissime potenze, con alte velocità, oppure con notevoli coppie resistenti.



Un esempio di riduttore di velocità impiegato in una turbina Kaplan.  
In questa configurazione è utilizzato un accoppiamento tra ingranaggi conici a denti elicoidali, disposti ortogonalmente tra loro.

## Cap. 2.5- L'elica

L'elica è un componente capace di trasformare la potenza meccanica proveniente da un motore, in una variazione della quantità di moto di un fluido e generando così una propulsione in accordo con il terzo principio della dinamica, secondo cui ad ogni azione, corrisponde una reazione uguale in modulo e contraria nel verso. L'elica ruota secondo moto circolare conferitogli da un albero a essa collegato e imprime al fluido un moto elicoidale, ossia una combinazione di moto rotazionale e assiale. I componenti principali di un elica sono le pale e il mozzo sul quale sono calettate (di forma a ogiva per ridurre al massimo la resistenza con l'aria), a sua volta collegato all'albero di rotazione.

Le pale sono una sorta di “ali rotanti”, con la differenza che queste rispetto alle ali convenzionali trasmettono la quantità di moto nella stessa direzione della velocità di avanzamento. Il fluido nel quale le eliche per uso aeronautico sono progettate e ottimizzate per operare è, ovviamente, l'aria atmosferica, considerata come un miscuglio di gas e vapori di diversa natura.

Data la scarsa densità dell'aria, le pale sono caratterizzate da alte velocità di rotazione e dallo spessore delle pale, più sottili rispetto alle controparti per uso navale dovendo queste operare in acqua, caratterizzata da una densità molto maggiore rispetto all'aria (circa 1000 volte più grande).



Un elica ricreata con software di disegno. È possibile notare la sottigliezza delle pale.

Le eliche inoltre devono presentare la medesima portanza lungo tutta la pala, quindi devono fornire la medesima spinta. Generalmente, il numero di eliche installata varia a seconda del tipo di motore utilizzato e alla potenza che esso

può sviluppare. Nel caso dei turboelica generalmente il numero varia da quattro a sei, mentre per gli elicotteri varia da due a sei. Di fondamentale importanza è che la velocità alle estremità (e quindi il numero di giri) delle pale non raggiunga mai quella del suono nell'aria, pena un calo nel rendimento e un aumento delle sollecitazioni. I piccoli motori generalmente non raggiungono un elevato numero di giri, ma per i turboelica, che raggiungono in uscita dal motore tra i 5000 e 6000 giri al minuto, si rende necessario un riduttore per evitare che ciò accada. I materiali utilizzati per la costruzione di un'elica sono principalmente legno e leghe leggere di alluminio. Le prime vengono utilizzate per regimi di rotazione più bassi, mentre le seconde ovunque vi siano condizioni di alti regimi di rotazione ed elevati diametri.

## Cap. 2.6- Cuscinetto a sfere

Il cuscinetto a sfere è un dispositivo che utilizza una serie di piccole sfere metalliche intrappolate tra due anelli per ridurre l'attrito tra due componenti in moto rotatorio tra loro, e per sostenere i carichi radiali e/o assiali che vi agiscono. Gli anelli sono denominati *ralle*, e oltre a mantenere in sede le sfere e a sostenere la struttura hanno il compito di impedire l'ingresso di polvere o altri detriti dannosi e di ridurre l'attrito generato dalla rotazione. L'interposizione di elementi rotanti tra le due superfici genera un attrito di tipo volvente, inferiore rispetto a quello che si avrebbe se due superfici piane strisciassero tra loro.



Un cuscinetto a sfera obliquo, adatto a sopportare contemporaneamente carichi assiali e radiali.

Per quanto riguarda la lubrificazione, essa è un'operazione fondamentale in quanto in sua assenza il cuscinetto andrebbe incontro ad un forte danneggiamento e alla sua distruzione in brevissimo tempo. La lubrificazione deve assolvere ad molteplici compiti: deve agevolare lo scorrimento delle sfere riducendo sensibilmente gli attriti e il consumo delle parti in movimento; deve proteggere il cuscinetto dalla corrosione degli agenti esterni e dalle impurità eventualmente infiltratesi; deve dissipare il calore che inevitabilmente si crea a causa degli attriti generati dallo scorrimento. A seconda dell'impiego del cuscinetto si può utilizzare sia una lubrificazione ad olio sia a grasso.

La lubrificazione a grasso presenta alcuni vantaggi rispetto a quella ad olio: data l'elevata densità e viscosità il grasso è facilmente mantenuto in sede, è economico e protegge efficacemente gli elementi del cuscinetto dalla polvere e dai detriti. Tuttavia, presenta anche alcuni non trascurabili svantaggi, in quanto a causa della sua elevata viscosità non è in grado di raggiungere supporti difficilmente accessibili, e non è utilizzabile in applicazioni ove sono richieste alte velocità di rotazione. La lubrificazione viene generalmente effettuata una sola volta nei cuscinetti di piccole dimensioni, al momento del montaggio in sede; mentre per quelli di medie e grandi dimensioni va effettuata regolarmente.



Un'operazione di ingrassamento manuale di un cuscinetto radiale a sfere.

La lubrificazione ad olio viene invece effettuata ogni volta che non è possibile ricorrere a quella a grasso, ovvero quando si presentano elevate velocità di rotazione, quando è necessario asportare elevate quantità di calore, quando i supporti sono difficilmente accessibili o qualora i corpi volventi siano di piccole dimensioni. Gli svantaggi di una lubrificazione ad olio sono invece rappresentati da una maggiore complessità costruttiva e un maggiore costo dei componenti, che devono presentare caratteristiche di tenuta migliori.

Vi sono 4 tipi differenti di lubrificazione:

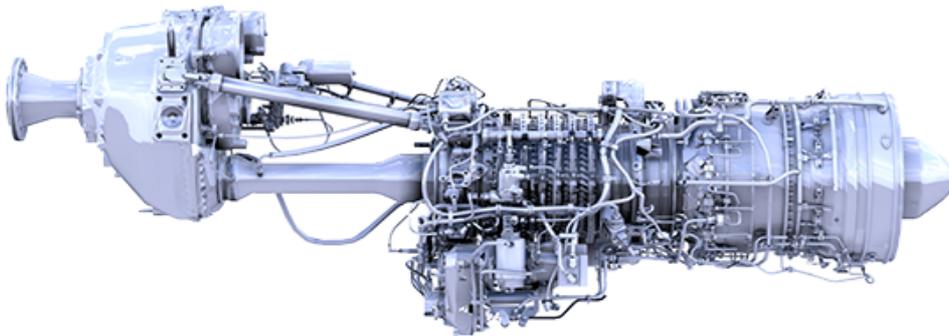
1. Lubrificazione a bagno d'olio;
2. Lubrificazione a circolazione;
3. Lubrificazione a nebbia d'olio;
4. Lubrificazione a iniezione sotto pressione;

Nel primo caso si tratta di una soluzione semplice ed economica adatta alle basse velocità, in cui il cuscinetto viene immerso fino a poco meno di metà della sua altezza in un bagno d'olio lubrificante. Durante la rotazione, i corpi volventi distribuiscono l'olio in tutto il cuscinetto. Nel secondo caso, delle bussole coniche iniettano grazie all'alta velocità piccole quantità di olio direttamente sui corpi volventi. Nel terzo caso, l'olio viene nebulizzato in una quantità d'aria pressurizzata e precedentemente filtrata, miscela che viene poi iniettata all'interno del cuscinetto. Questa soluzione assicura un'elevata asportazione di calore, in più mantiene l'ambiente a pressione leggermente superiore al valore atmosferico, impedendo l'ingresso di detriti o polvere dall'esterno. Nell'ultimo caso, una pompa si occupa di iniettare direttamente sui corpi volventi un getto di olio pressurizzato.

## Cap. 2.7- Il motore turboelica

### AE2100

The AE 2100 turboprop is a two shaft gas turbine with a 14-stage high pressure (HP) compressor driven by a two-stage HP turbine.

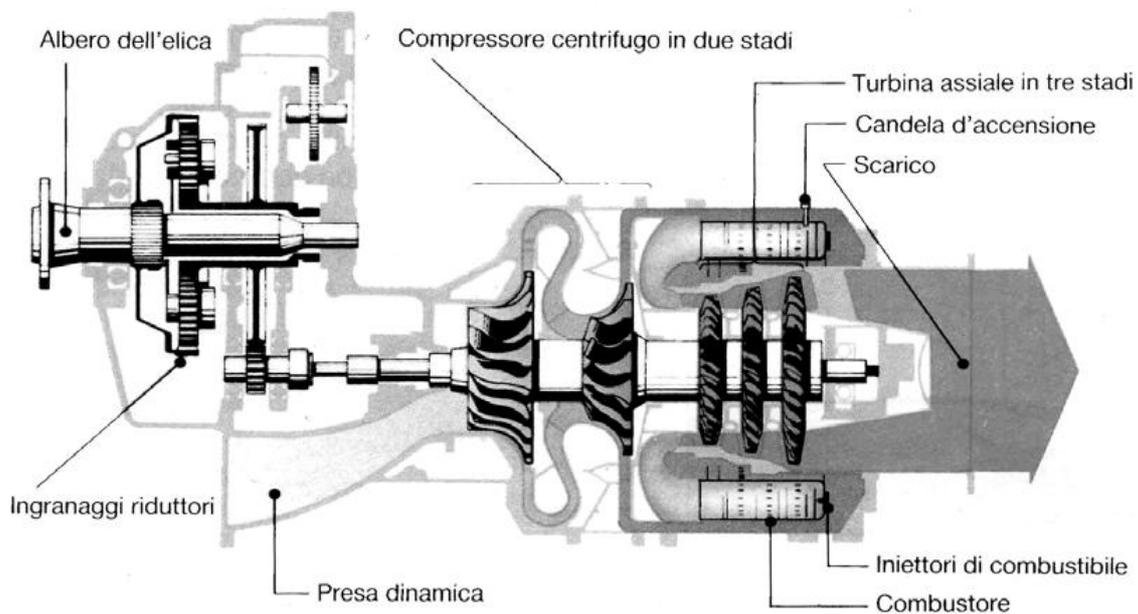


Specification	AE 2100D2	AE 2100D3	AE 2100J	AE 2100P
Power shp (kW)	4,637 (3,410)	4,637 (3,410)	4,591 (3,376)	4,152 (3,054)
Dry weight lb (Kg)	1,776 (806)	1,740 (789)	1,666 (756)	1,627 (738)
Length in (m)	117.0 (2.97)	124.1 (3.15)	118.1 (3.00)	118.1 (3.00)
Height in (m)	52.5 (1.33)	46.3 (1.18)	52.9 (1.34)	52.9 (1.34)
Width in (m)	31.8 (0.81)	28.7 (0.73)	32.8 (0.83)	32.8 (0.83)
Pressure ratio	16.6	16.6	16.6	16.6
Compressor	14 HP	14 HP	14 HP	14 HP
Turbine	2HP, 2PT	2HP, 2PT	2HP, 2PT	2HP, 2PT
Applications	Lockheed Martin C-130J Hercules, Alenia C-27J Spartan, Saab 2000 AEW&C, ShinMaywa US-2 Kai			

Una tabella dei dati tecnici delle varie versioni del turboreattore AE2100.

Il motore turboelica è un motore aeronautico costituito da un'elica messa in movimento da una turbina. Differisce rispetto ai motori a getto nella modalità di spinta, in quanto a differenza di questi ultimi essa avviene per mezzo delle pale dell'elica, e non per un getto di gas di scarico. Rispetto ai motori a getto consentono velocità di crociera inferiori, ma hanno un minore consumo di combustibile e una maggiore spinta in fase di decollo.

Il suo principio di funzionamento prevede che inizialmente un compressore assiale comprime l'aria aspirata, che successivamente passa nella camera di combustione. La miscela ottenuta di aria e gas combustibili uscenti aziona la turbina, composta generalmente da un minimo di due stadi ed esce quindi all'esterno. La turbina assorbe la maggior parte dell'energia del salto termico disponibile, e mentre una parte di questa energia viene ceduta al compressore, la rimanente viene ceduta all'albero collegato all'elica. Poiché la frequenza di rotazione dell'elica è minore (nell'ordine dei 1000 rpm) rispetto a quella della turbina (nell'ordine dei 10.000 rpm), è necessaria l'interposizione tra di essi di un riduttore di velocità. La parte dell'energia termica che non viene assorbita dalla turbina si trasforma in energia cinetica nel condotto di efflusso allo scarico; la miscela di aria e gas combustibili esce quindi dall'ugello di scarico, con velocità superiori a quella d'ingresso. In aggiunta quindi alla forza propulsiva dell'elica si ha così una spinta supplementare (a getto), generalmente dell'ordine del 10-20% della spinta propulsiva dell'elica.



Lo schema di funzionamento di motore turboelica a 2 stadi di compressione.

L'impiego dei propulsori a turboelica consente spinte con elevati rendimenti propulsivi: l'elica infatti, potendo elaborare grandi portate d'aria, con piccola

accelerazione permette di raggiungere rendimenti propulsivi dell'ordine di 85%, superiori a quelli caratteristici del turboreattore e con consumi inferiori. A fronte di tale significativo vantaggio, la presenza dell'elica comporta tuttavia qualche limitazione alla sua utilizzazione: il turboelica infatti può essere impiegato solo su velivoli che non superino velocità dell'ordine di 700 km/h, poiché in tali condizioni di volo le estremità delle pale dell'elica raggiungerebbero velocità molto prossime a quella del suono, con conseguente drastico decadimento del rendimento di propulsione e aumento delle vibrazioni delle pale. Nel caso occorra ottenere spinte rilevanti con elevato rendimento, si fa ricorso a più gruppi propulsori dotati di eliche a più pale e/o di lunghezza contenuta.

Il turboelica subentrò ai motori a pistoni a ciclo Otto per l'impossibilità pratica di realizzare motori alternativi in grado di operare al di sopra dei 2000 kW. Per questo motivo è divenuto il propulsore ottimale per i velivoli di media grandezza adibiti al trasporto civile regionale e al trasporto militare tattico: in tali campi di utilizzazione le caratteristiche di basso consumo specifico del turboelica prevalgono sulle penalizzazioni nei tempi di percorrenza, dovute alla relativamente bassa velocità di volo consentita.



Un turboelica AE2100D3. A sinistra è possibile notare il voluminoso riduttore.

Rispetto al motoelica, il turboelica gode di alcuni vantaggi tecnici:

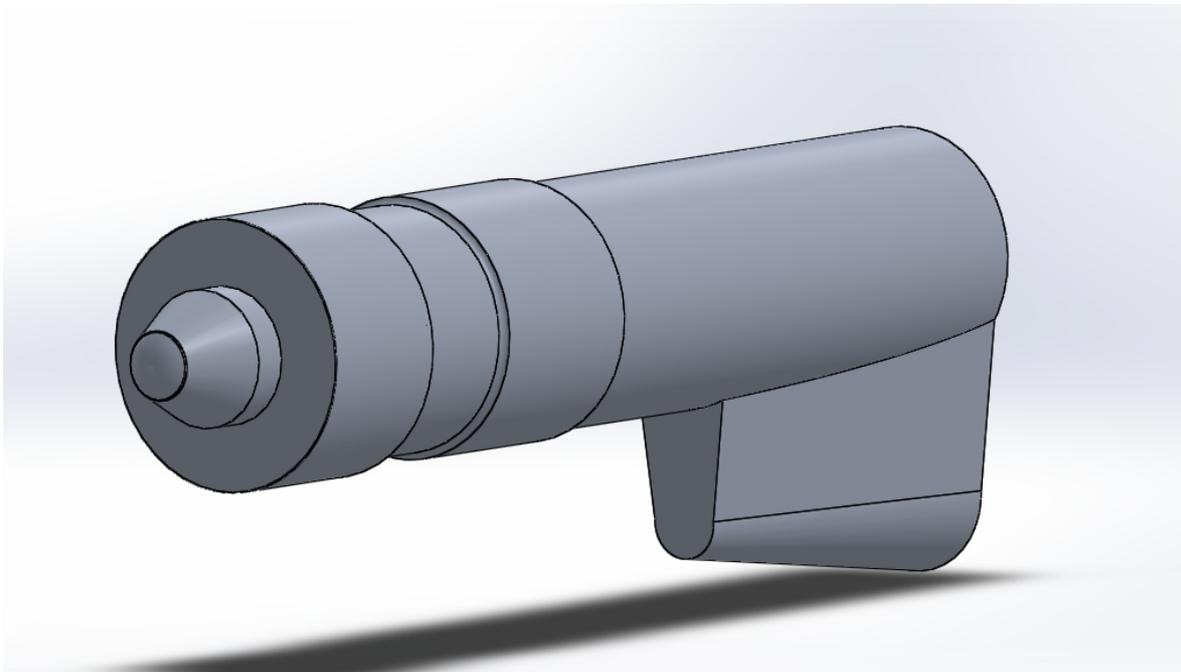
- è più leggero a parità di volume e offre un minor ingombro frontale;
- ha un maggiore rapporto peso potenza;
- non dà luogo a forze alternative d'inerzia (consentendo una maggiore durata di funzionamento delle strutture del velivolo);

- Utilizza cherosene come combustibile, più economico della benzina ad alto numero di ottano e meno infiammabile;
- ha un consumo di lubrificante del tutto trascurabile;

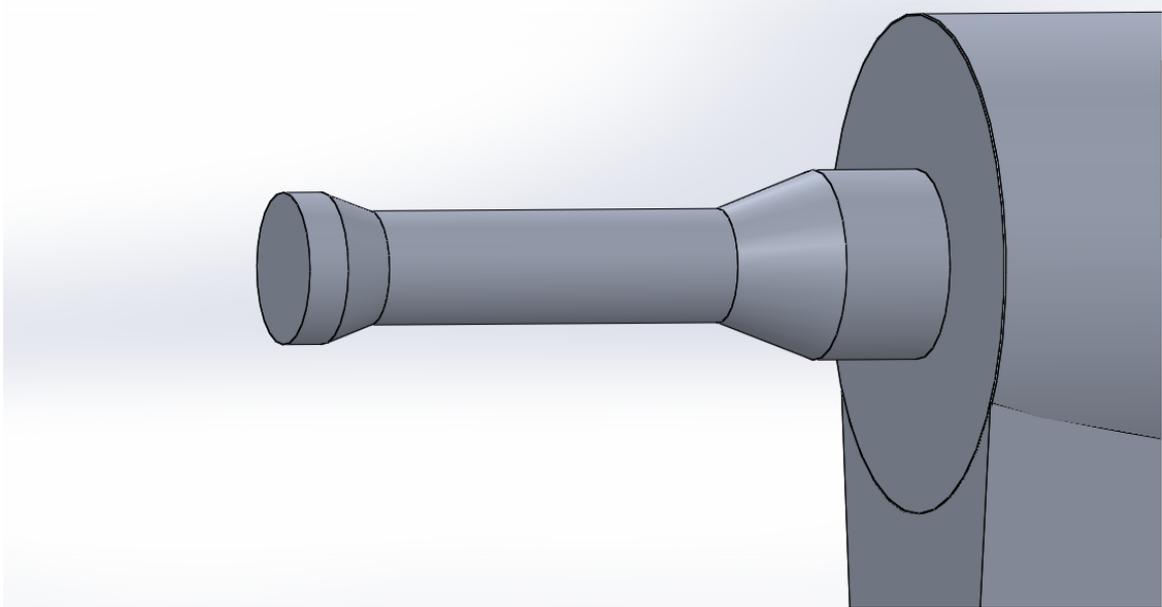
## **Cap. 3- Disegno delle parti**

### **Cap. 3.1- Il motore turboelica**

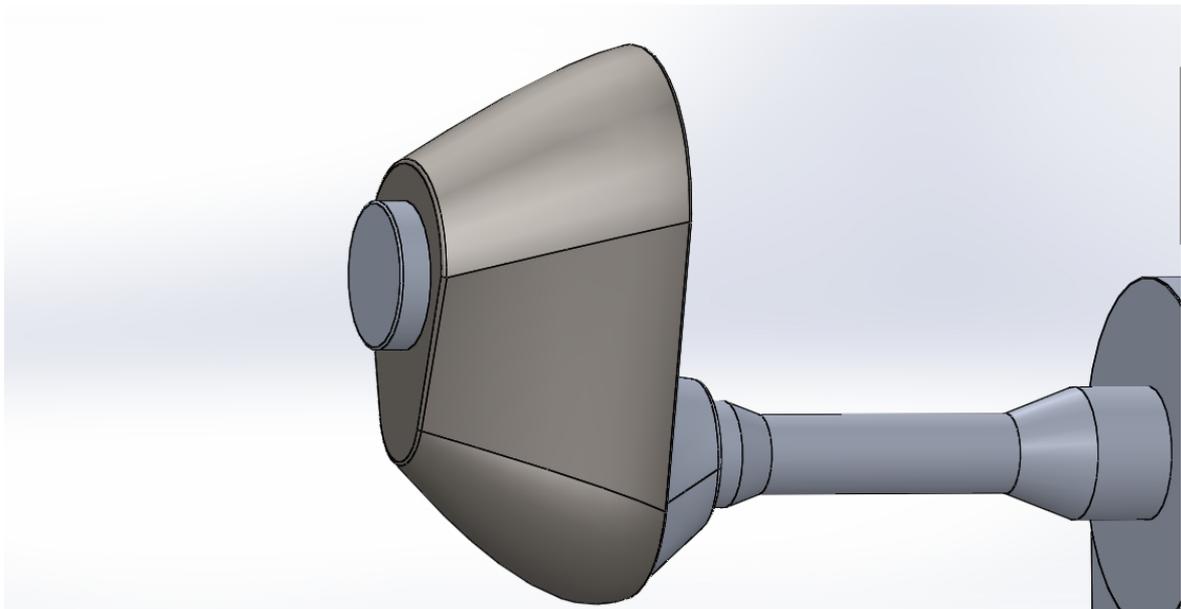
Dopo aver consultato le specifiche tecniche nel catalogo fornito dal produttore, procedo con il disegno del dimensionamento approssimativo del motore a turboelica scelto, l'AE2100D3.



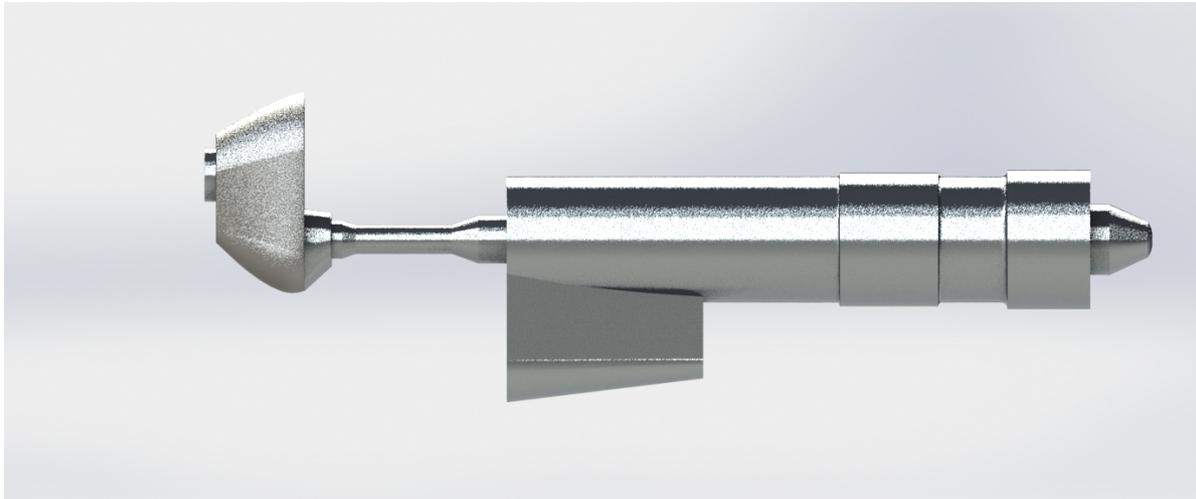
In seguito ho provveduto a dimensionare l'albero motore collegato al primo riduttore.



Infine ho dimensionato il riduttore integrato al motore...



Per ottenere questo risultato finale.



### Cap. 3.2- Il primo riduttore di velocità

Nella costruzione degli ingranaggi del primo stadio di riduzione, il software di disegno SOLIDEDGE mi restituisce in uscita i seguenti parametri:

Gear Ratio = 1.0909

Tangential Pressure Angle  $\alpha = 20^\circ$

Addendum  $a^* = 0.8$  (= 20 mm)

Clearance  $c^* = 0.157$  (= 3.925 mm)

Root Fillet = 0.239 (= 5.975 mm)

Addendum of Basic Rack = 0.957 (= 23.925 mm)

Helix Angle  $\beta = 40^\circ$

Shaft Angle =  $90^\circ$

Tangential Module  $m_{et} = 25$  mm

Normal Module in Middle Plane  $m_{mn} = 16.0877$  mm

Normal Pressure Angle  $\alpha_{pn} = 15.5794^\circ$

Base Helix Angle  $\beta_{pb} = 38.2556^\circ$

Virtual Gear Ratio  $u_v = 1.19$

Virtual Center Distance  $a_v = 343.165$  mm  
Pitch Cone Radius  $R_e = 203.485$  mm  
Pitch Cone Radius in Middle Plane  $R_m = 170.935$  mm  
Whole Depth of Tooth  $h_e = 43.925$  mm  
Facewidth = 65.1 mm  
Facewidth Ratio = 0.3199  
Contact Ratio = 1.9499 (1.2461 + 0.7038)

Precision Specification 6

Limit Deviation of Helix Angle  $F_b = 0.015$  mm  
Limit Deviation of Axis Parallelity  $f_x = 0.015$  mm  
Limit Deviation of Axis Parallelity  $f_y = 0.0075$  mm

Una volta scelto un materiale compatibile con lo standard utilizzato per le ruote dentate, procedo dimensionando la prima ruota. I parametri utilizzati per sono i seguenti:

Number of Teeth = 11  
Helix Direction = Right  
Unit Correction = 0.0646 (= 1.614 mm)  
Tang. Displacement = 0.1331 (= 3.327 mm)  
Pitch Diameter  $d_e = 275$  mm  
Pitch Diameter in Middle Plane  $d_m = 231.01$  mm  
Outside Diameter  $d_{ae} = 306.866$  mm  
Outside Diameter at Small End  $d_{ai} = 208.692$  mm  
Root Diameter  $d_{fe} = 242.107$  mm  
Vertex Distance = 135.395 mm  
Vertex Distance at Small End = 92.078 mm  
Pitch Cone Angle  $\delta = 42.5104^\circ$   
Outside Cone Angle  $\delta_{aa} = 48.5737^\circ$   
Cutting Angle  $\delta_{af} = 36.2534^\circ$   
Tooth Thickness at Large End  $s_e = 36.843$  mm  
Outside Tooth Thickness = 0.8478

Chordal Thickness  $s_c = 32.533$  mm

Chordal Thickness Height  $h_c = 15.694$  mm

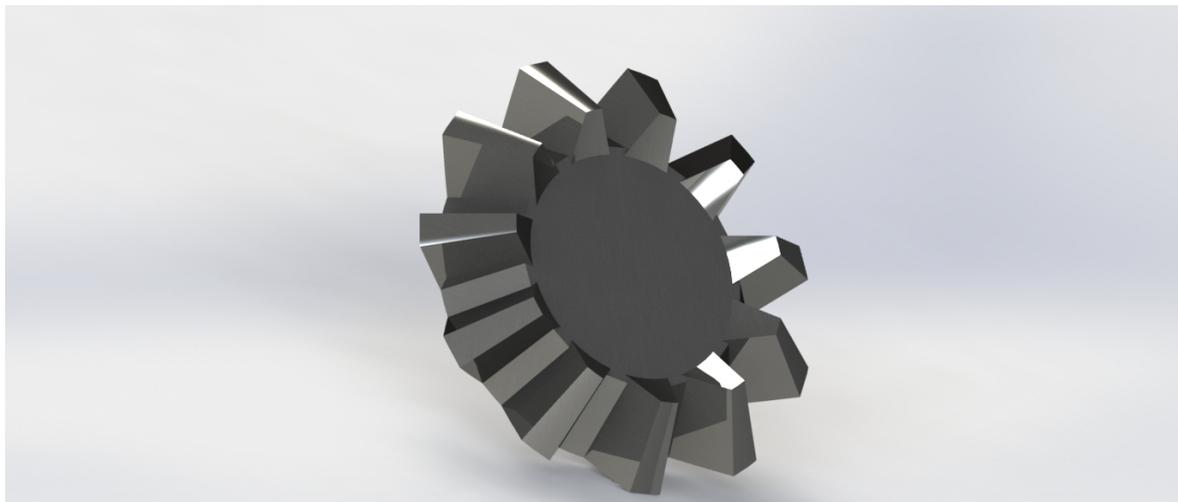
Comparative Number of Teeth  $z_v = 14.9223$

Equivalent Teeth No.  $z_{vn} = 33.195$

Limit Circumferential Run-out  $F_r = 0.034$  mm

Limit Deviation of Axial Pitch  $f_{pt} = \pm 0.016$  mm

Limit Deviation of Basic Pitch  $f_{pb} = \pm 0.015$  mm



Mentre per la seconda ruota sono stati utilizzati i seguenti parametri:

Number of Teeth = 12

Helix Direction = Left

Unit Correction =  $-0.0646$  (=  $-1.614$  mm)

Tang. Displacement =  $-0.1331$  (=  $-3.327$  mm)

Pitch Diameter  $d_e = 300$  mm

Pitch Diameter in Middle Plane  $d_m = 252.011$  mm

Outside Diameter  $d_{ae} = 324.847$  mm

Outside Diameter at Small End  $d_{ai} = 220.92$  mm

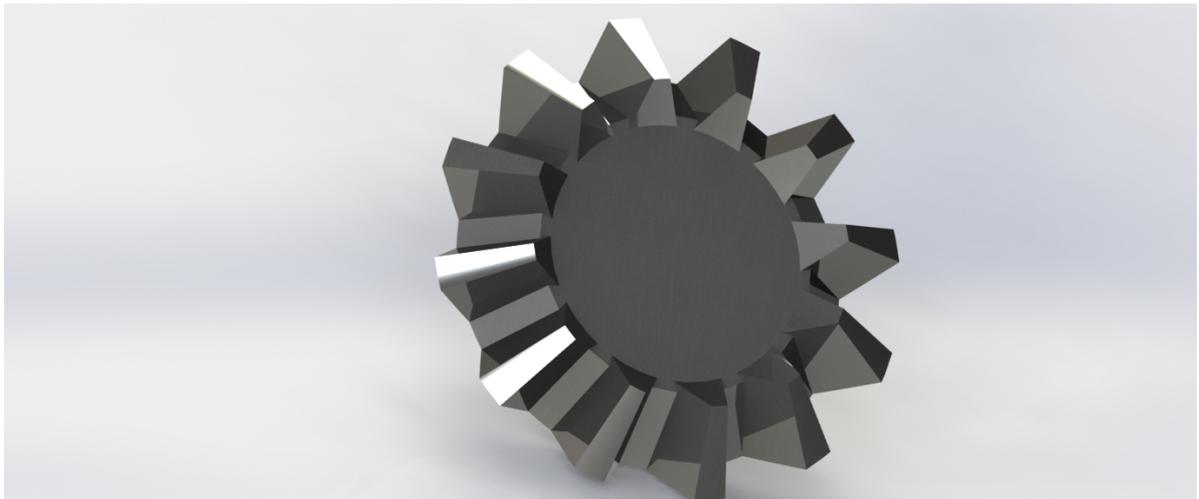
Root Diameter  $d_{fe} = 265.485$  mm

Vertex Distance =  $123.947$  mm

Vertex Distance at Small End =  $84.293$  mm

Pitch Cone Angle  $\delta = 47.4896^\circ$

Outside Cone Angle  $\delta_{aa} = 52.6524^\circ$   
Cutting Angle  $\delta_{af} = 40.3358^\circ$   
Tooth Thickness at Large End  $s_e = 29.263$  mm  
Outside Tooth Thickness = 0.6455  
Chordal Thickness  $s_c = 25.84$  mm  
Chordal Thickness Height  $h_c = 13.683$  mm  
Comparative Number of Teeth  $z_v = 17.7587$   
Equivalent Teeth No.  $z_{vn} = 39.5048$   
Limit Circumferential Run-out  $F_r = 0.034$  mm  
Limit Deviation of Axial Pitch  $f_{pt} = \pm 0.016$  mm  
Limit Deviation of Basic Pitch  $f_{pb} = \pm 0.015$  mm



Per quel che concerne i parametri di resistenza del materiale utilizzato, le due ruote presentano le stesse caratteristiche:

Durability  $L_h = 3000$  hour

-- Material Values

Tensile Strength = 640; 640 MPa

Yield Point in Tensile = 390; 390 MPa

Contact Fatigue Limit  $\sigma_{Hlim} = 1140$ ; 1140 MPa

Bending Fatigue Limit  $\sigma_{Flim} = 605$ ; 605 MPa

Hardness in Tooth Core = 200; 200 HV

Hardness in Tooth Side = 600; 600 HV

Base Number of Load Cycles in Contact  $[10^6] = 100$ ; 100

Base Number of Load Cycles in Bending  $[10^6] = 3$ ; 3

Wöhler Curve Exponent for Contact = 10; 10

Wöhler Curve Exponent for Bending = 9; 9

Modulus of Elasticity in Tension  $[10^3] = 206$ ; 206 MPa

Poisson's Ratio = 0.3; 0.3

--- Factors for Contact

Application Factor  $K_A = 1$

Dynamic Factor  $K_{Hv} = 1.022$

Face Load Factor  $K_{Hb} = 1.65$

Transverse Load Factor  $K_{Ha} = 1$

Total  $K_H = 1.686$

One-time Overloading Factor  $K_{AS} = 1$

Elasticity Factor  $Z_e = 189.81$

Zone Factor  $Z_h = 2.211$

Bevel Gear Factor  $Z_k = 0.85$

Helix Angle Factor  $Z_{\beta} = 0.875$

Contact Ratio Factor  $Z_{\epsilon\psi} = 0.737$

Single Pair Tooth Contact Factor  $Z_B = 1.034$ ; 1.018

Life Factor  $Z_n = 1$ ; 1

Lubricant Factor  $Z_l = 0.962$

Roughness Factor  $Z_r = 1$

Velocity Factor  $Z_v = 1.014$

Size Factor  $Z_x = 1$ ; 1

--- Factors for Bending

Application Factor  $K_A = 1$

Dynamic Factor  $K_{Fv} = 1.022$

Face Load Factor  $K_{Fb} = 1.65$

Transverse Load Factor  $K_{Fa} = 1$

Total KF = 1.686

One-time Overloading Factor KAS = 1

Form Factor YFa = 2.233; 1.877

Stress Correction Factor YSa = 1.765; 1.578

Teeth with Grinding Notches Factor YSag = 1; 1

Bevel Gear Factor Yk = 1

Helix Angle Factor Yb = 0.824

Contact Ratio Factor Yeps = 0.625

Alternating Load Factor Ya = 1; 1

Production Technology Factor Yt = 1; 1

Life Factor Yn = 1; 1

Notch Sensitivity Factor Yd = 1.118; 1.113

Size Factor Yx = 1; 1

Tooth Root Surface Factor Yr = 1

--- Results

Factor of Safety from Pitting SH = 0.835; 0.848

Factor of Safety from Tooth Breakage SF = 1.365; 1.807

Static Safety in Contact SHst = 1.803; 1.83

Static Safety in Bending SFst = 3.052; 4.059

La velocità angolare  $\omega_1$  (espressa in giri al minuto, rpm “round per minute”) della prima ruota dentata è di 1250 rpm, e il suo numero di denti  $Z_1$  è pari a 11. Della seconda ruota invece conosciamo soltanto il numero di denti  $Z_2$ , pari a 12. Utilizzando le formule del rapporto di trasmissione, è possibile ricavarsi la velocità angolare  $\omega_2$  della seconda ruota, quella che collegata ad un albero trasmetterà il moto rotatorio all'ingranaggio del secondo stadio di riduzione. Il rapporto di trasmissione  $\tau$  è pari al numero di denti della ruota condotta diviso quello della ruota conduttrice. Allo stesso tempo, esso è pari alla velocità angolare della ruota conduttrice diviso quella della ruota condotta.

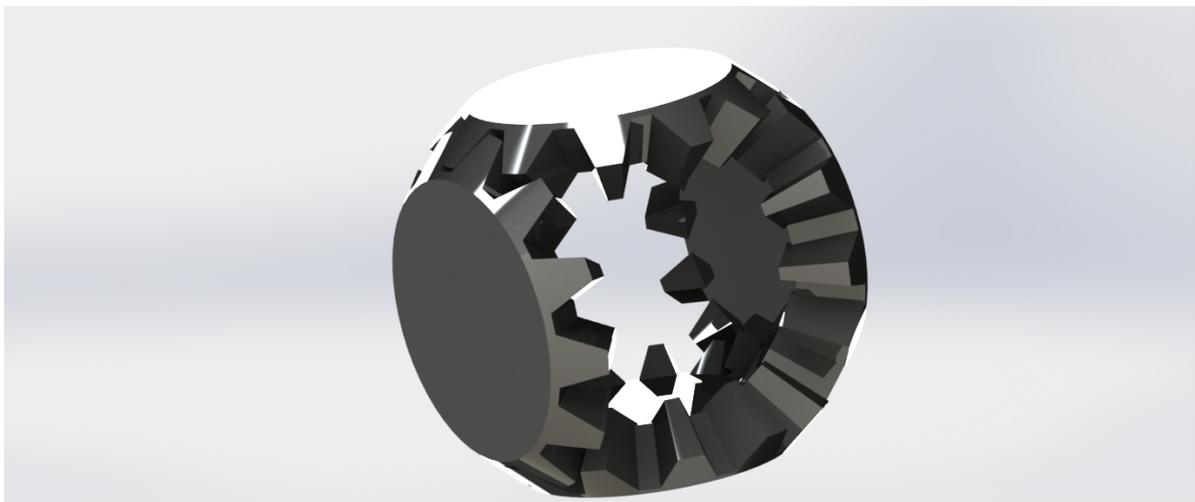
$$\tau = \omega_2/\omega_1$$

$$\tau = Z_1/Z_2$$

$$\omega_2/\omega_1 = Z_1/Z_2$$

$$\omega_2 = \omega_1 * Z_1 / Z_2 = 1250 * 11 / 12 = 1145,83 \text{ rpm}$$

Il primo stadio di riduzione assemblato è...



### Cap. 3.2- Il secondo riduttore di velocità

Anche in questo caso, nella costruzione degli ingranaggi del secondo stadio di riduzione, il software di disegno SOLIDEDGE mi restituisce in uscita i seguenti parametri:

Gear Ratio = 1.6364

Tangential Pressure Angle  $\alpha = 20^\circ$

Addendum  $a^* = 0.8$  (= 17.6 mm)

Clearance  $c^* = 0.157$  (= 3.454 mm)

Root Fillet = 0.239 (= 5.258 mm)

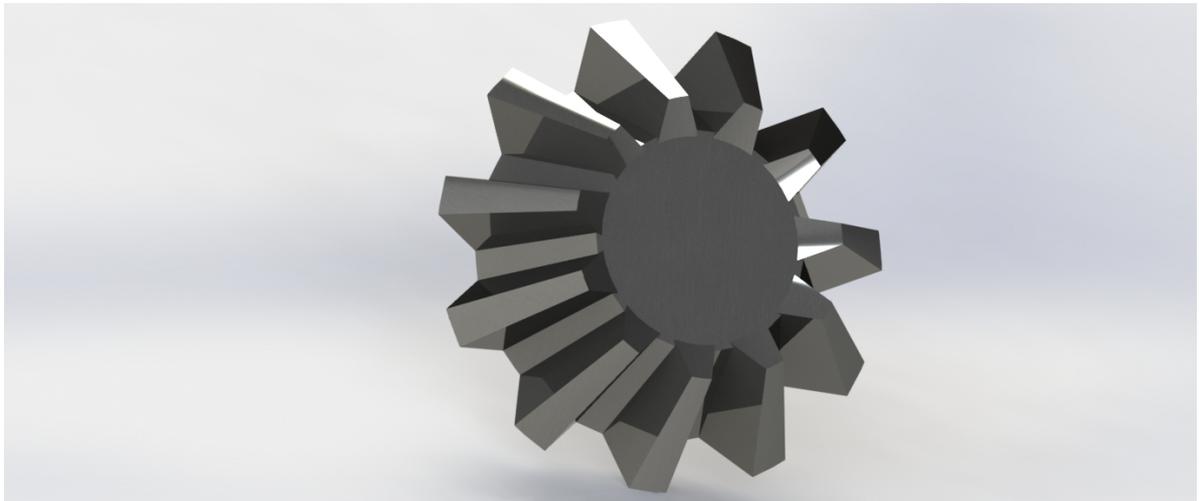
Addendum of Basic Rack = 0.957 (= 21.054 mm)  
Helix Angle beta = 40°  
Shaft Angle = 90°  
Tangential Module met = 22 mm  
Normal Module in Middle Plane m<sub>mn</sub> = 13.483 mm  
Normal Pressure Angle alphan = 15.5794°  
Base Helix Angle betab = 38.2556°  
Virtual Gear Ratio uv = 2.678  
Virtual Center Distance av = 417.233 mm  
Pitch Cone Radius Re = 232.045 mm  
Pitch Cone Radius in Middle Plane Rm = 185.645 mm  
Whole Depth of Tooth he = 38.654 mm  
Facewidth = 92.8 mm  
Facewidth Ratio = 0.3999  
Contact Ratio = 2.4379 (1.2409 + 1.197)

Limit Deviation of Helix Angle Fb = 0.017 mm  
Limit Deviation of Axis Parallelity fx = 0.017 mm  
Limit Deviation of Axis Parallelity fy = 0.0085 mm

Una volta scelto un materiale compatibile con lo standard utilizzato per le ruote dentate, procedo dimensionando la prima ruota dentata del secondo stadio di riduzione. I parametri utilizzati per sono i seguenti:

Number of Teeth = 11  
Helix Direction = Right  
Unit Correction = 0.2533 (= 5.573 mm)  
Tang. Displacement = 0.1396 (= 3.072 mm)  
Pitch Diameter de = 242 mm  
Pitch Diameter in Middle Plane dm = 193.609 mm  
Outside Diameter dae = 281.546 mm  
Outside Diameter at Small End dai = 168.95 mm  
Root Diameter dfe = 215.581 mm

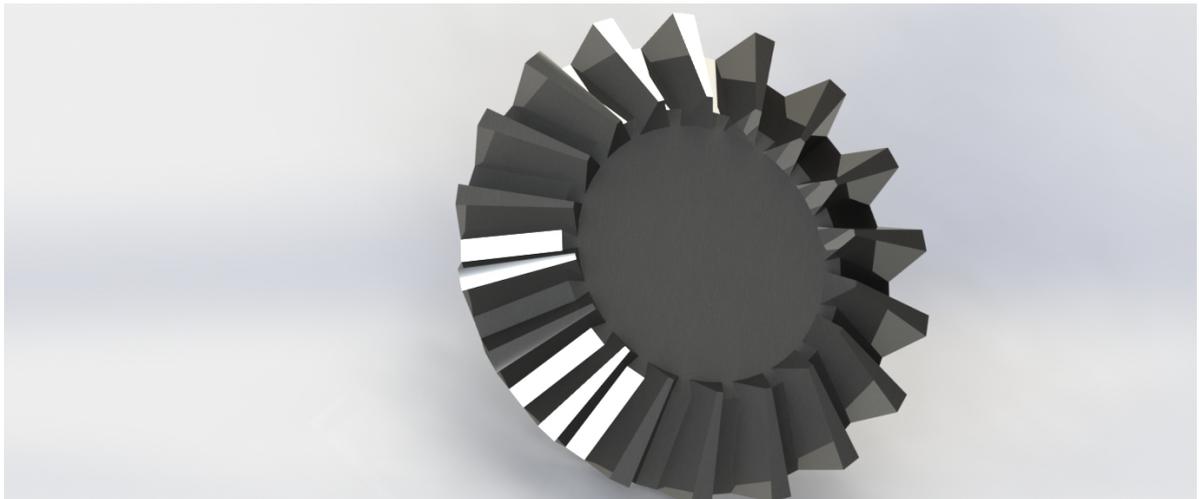
Vertex Distance = 185.916 mm  
Vertex Distance at Small End = 111.564 mm  
Pitch Cone Angle  $\delta = 31.4296^\circ$   
Outside Cone Angle  $\delta_{aa} = 37.1324^\circ$   
Cutting Angle  $\delta_{af} = 27.6127^\circ$   
Tooth Thickness at Large End  $s_e = 35.752$  mm  
Outside Tooth Thickness = 0.7267  
Chordal Thickness  $s_c = 31.57$  mm  
Chordal Thickness Height  $h_c = 17.428$  mm  
Comparative Number of Teeth  $z_v = 12.8914$   
Equivalent Teeth No.  $z_{vn} = 28.6773$   
Limit Circumferential Run-out  $F_r = 0.032$  mm  
Limit Deviation of Axial Pitch  $f_{pt} = \pm 0.013$  mm  
Limit Deviation of Basic Pitch  $f_{pb} = \pm 0.013$  mm



Mentre per la seconda ruota sono stati utilizzati i seguenti parametri:

Number of Teeth = 18  
Helix Direction = Left  
Unit Correction = -0.2533 (= -5.573 mm)  
Tang. Displacement = -0.1396 (= -3.072 mm)  
Pitch Diameter  $d_e = 396$  mm

Pitch Diameter in Middle Plane  $d_m = 316.815$  mm  
Outside Diameter  $d_{ae} = 408.543$  mm  
Outside Diameter at Small End  $d_{ai} = 245.158$  mm  
Root Diameter  $d_{fe} = 368.231$  mm  
Vertex Distance = 110.738 mm  
Vertex Distance at Small End = 66.451 mm  
Pitch Cone Angle  $\delta = 58.5704^\circ$   
Outside Cone Angle  $\delta_{aa} = 61.5374^\circ$   
Cutting Angle  $\delta_{af} = 52.0244^\circ$   
Tooth Thickness at Large End  $s_e = 23.524$  mm  
Outside Tooth Thickness = 0.7557  
Chordal Thickness  $s_c = 20.772$  mm  
Chordal Thickness Height  $h_c = 8.247$  mm  
Comparative Number of Teeth  $z_v = 34.5191$   
Equivalent Teeth No.  $z_{vn} = 76.7888$   
Limit Circumferential Run-out  $F_r = 0.04$  mm  
Limit Deviation of Axial Pitch  $f_{pt} = \pm 0.014$  mm  
Limit Deviation of Basic Pitch  $f_{pb} = \pm 0.013$  mm



Per quel che concerne i parametri di resistenza del materiale utilizzato, anche in questo caso le due ruote presentano le stesse caratteristiche:

Durability  $L_h = 3000$  hour

--- Material Values

Tensile Strength = 640; 640 MPa

Yield Point in Tensile = 390; 390 MPa

Contact Fatigue Limit  $\sigma_{Hlim} = 1140$ ; 1140 MPa

Bending Fatigue Limit  $\sigma_{Flim} = 605$ ; 605 MPa

Hardness in Tooth Core = 200; 200 HV

Hardness in Tooth Side = 600; 600 HV

Base Number of Load Cycles in Contact  $[10^6] = 100$ ; 100

Base Number of Load Cycles in Bending  $[10^6] = 3$ ; 3

Wöhler Curve Exponent for Contact = 10; 10

Wöhler Curve Exponent for Bending = 9; 9

Modulus of Elasticity in Tension  $[10^3] = 206$ ; 206 MPa

Poisson's Ratio = 0.3; 0.3

Type of Treatment = 4; 4

--- Factors for Contact

Application Factor  $K_A = 1$

Dynamic Factor  $K_{Hv} = 1.018$

Face Load Factor  $K_{Hb} = 1.65$

Transverse Load Factor  $K_{Ha} = 1$

Total  $K_H = 1.68$

One-time Overloading Factor  $K_{AS} = 1$

Elasticity Factor  $Z_e = 189.81$

Zone Factor  $Z_h = 2.211$

Bevel Gear Factor  $Z_k = 0.85$

Helix Angle Factor  $Z_{\beta} = 0.875$

Contact Ratio Factor  $Z_{\epsilon\psi} = 0.705$

Single Pair Tooth Contact Factor  $Z_B = 1$ ; 1

Life Factor  $Z_n = 1$ ; 1

Lubricant Factor  $Z_l = 0.962$

Roughness Factor  $Z_r = 1$

Velocity Factor  $Z_v = 1.008$

Size Factor  $Z_x = 1; 1$

--- Factors for Bending

Application Factor  $K_A = 1$

Dynamic Factor  $K_{Fv} = 1.018$

Face Load Factor  $K_{Fb} = 1.65$

Transverse Load Factor  $K_{Fa} = 1$

Total  $K_F = 1.68$

One-time Overloading Factor  $K_{AS} = 1$

Form Factor  $Y_{Fa} = 2.199; 1.782$

Stress Correction Factor  $Y_{Sa} = 1.951; 1.153$

Teeth with Grinding Notches Factor  $Y_{Sag} = 1; 1$

Bevel Gear Factor  $Y_k = 1$

Helix Angle Factor  $Y_b = 0.75$

Contact Ratio Factor  $Y_{eps} = 0.625$

Alternating Load Factor  $Y_a = 1; 1$

Production Technology Factor  $Y_t = 1; 1$

Life Factor  $Y_n = 1; 1$

Notch Sensitivity Factor  $Y_d = 1.14; 1.125$

Size Factor  $Y_x = 1; 1$

Tooth Root Surface Factor  $Y_r = 1$

--- Results

Factor of Safety from Pitting  $S_H = 1.042; 1.042$

Factor of Safety from Tooth Breakage  $S_F = 1.411; 2.908$

Static Safety in Contact  $S_{Hst} = 2.262; 2.262$

Static Safety in Bending  $S_{Fst} = 3.094; 6.462$

La velocità angolare  $\omega_3$  della ruota conduttrice è la stessa della ruota condotta della prima riduzione, ossia 1145,83 rpm, mentre il suo numero di denti  $Z_3$  è pari a 11. Ciò che ci interessa è la velocità  $\omega_4$  della ruota condotta della seconda riduzione, poiché questa è collegata (per mezzo di un albero) all'elica

responsabile della propulsione. Sapendo la velocità della ruota conduttrice e sapendo il numero di denti di entrambe le ruote dentate, si procede come prima nel calcolo del rapporto di trasmissione  $\tau$ .

$$\tau = \omega_3/\omega_4$$

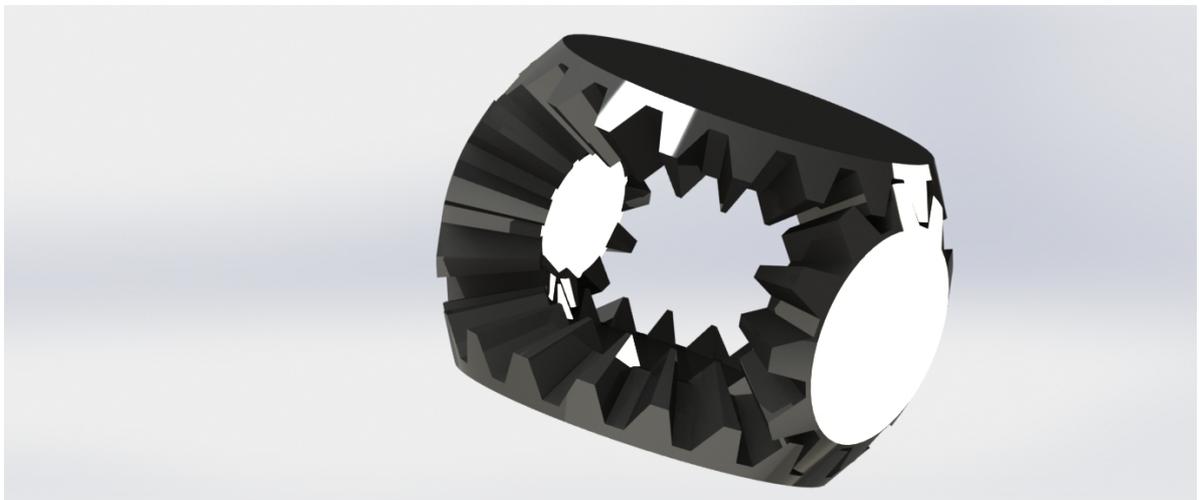
$$\tau = Z_4/Z_3$$

$$Z_4/Z_3 = \omega_3/\omega_4$$

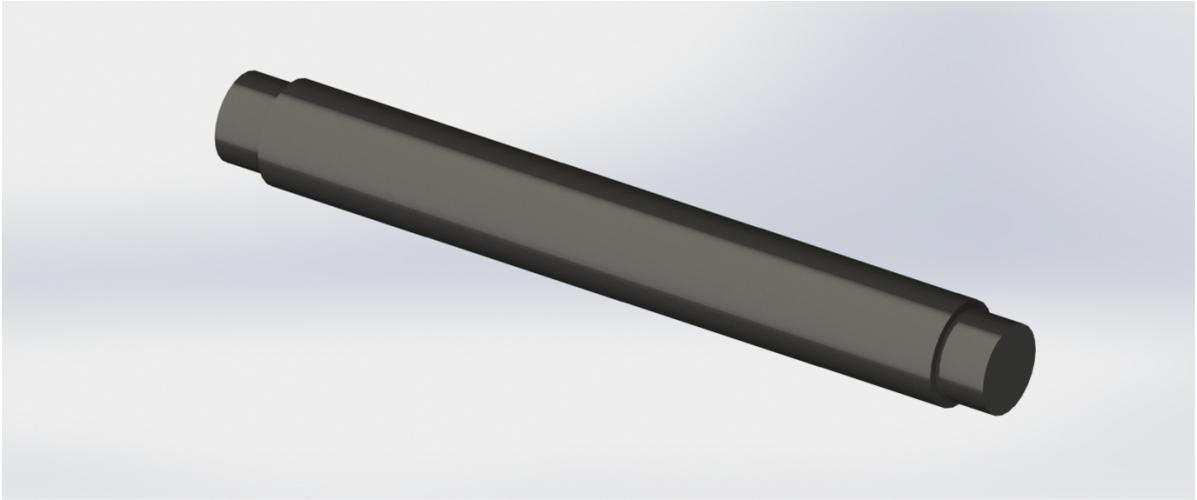
$$\omega_4 = \omega_3 * Z_3/Z_4 = 1145,83 * 11/18 = 700,23 \text{ rpm}$$

Un valore molto vicino alla desiderata velocità di uscita di 710 rpm.

Il secondo stadio di riduzione assemblato è...



### Cap. 3.3 Albero



Una volta scelto un materiale appropriato adatto a sopportare le forze torsionali che vi gravano, procedo con il dimensionamento dell'albero, prevedendo una riduzione di diametro con adeguato spallamento per l'alloggiamento dei cuscinetti a sfere.

Successivamente, per assicurarmi che l'albero non cedesse e non si deformasse troppo utilizzo la funzione di simulazione dei carichi SOLIDWORKS SIMULATION.

Per determinare l'entità della torsione agente sull'albero che collega il motore alla prima riduzione, bisogna fornire come input la coppia che vi agisce. Essa può essere ricavata sapendo la potenza  $P$  del motore e il numero di giri  $N$ :

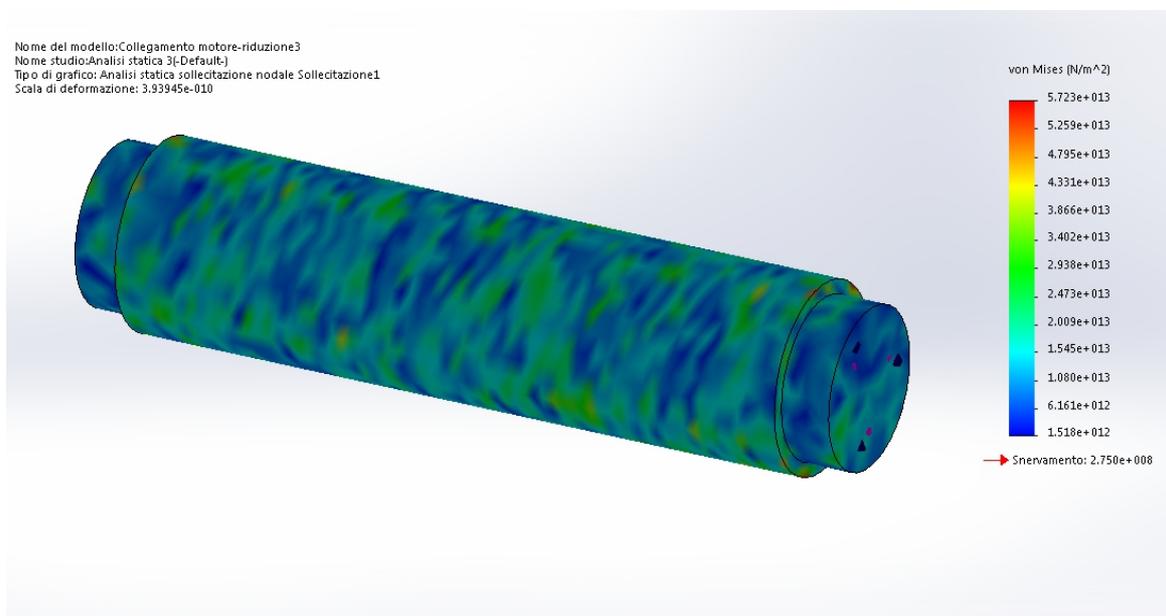
$$C = (60 \cdot P) / (2\pi \cdot N)$$

La potenza fornita dal motore turboelica è pari a 3410 kW, mentre il numero di giri  $N$  è 1250 rpm.

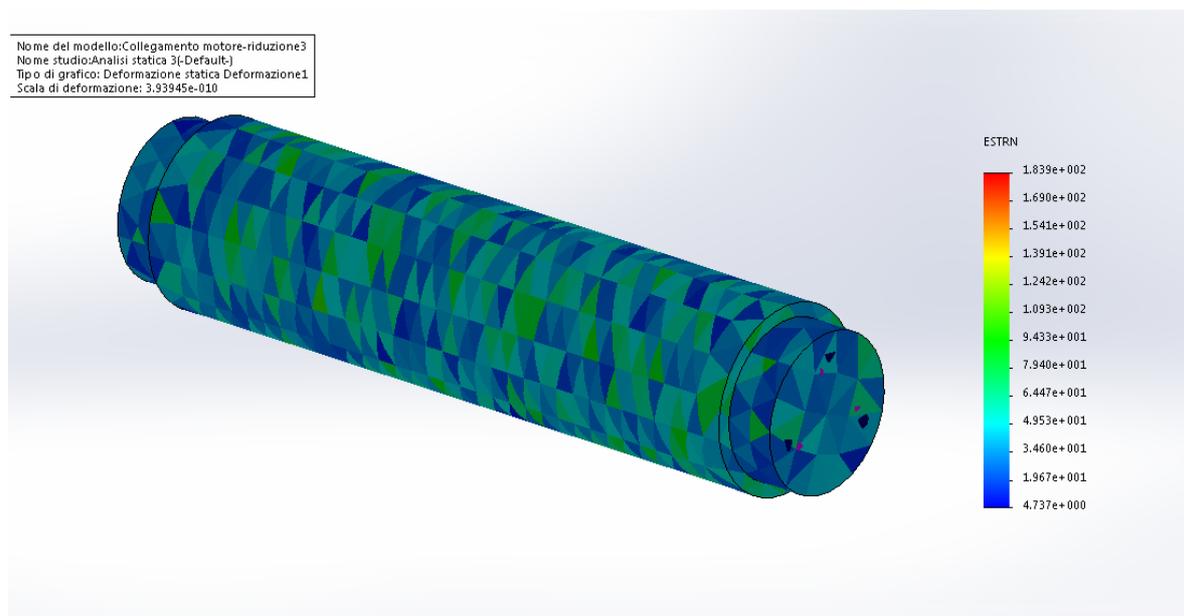
La coppia è quindi pari a:

$$C = (60 \cdot 3410 \cdot 10^3) / (2\pi \cdot 1250) = 26050 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Per la sollecitazione ottengo questi risultati.



Mentre per la deformazione ottengo un'altra serie di risultati.



Gli stessi tipi di grafici si ottengono anche per l'albero che collega la seconda riduzione con l'elica. Per questo infatti:

$$C = (60 \cdot 3410 \cdot 10^3) / (2\pi \cdot 700) = 46520 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Dato che il valore della coppia agente sull'albero che collega le due riduzioni è inferiore:

$$C = (60 \cdot 3410 \cdot 10^3) / (2\pi \cdot 1145,83) = 28420 \text{ rpm}$$

ne consegue che i grafici della deformazione e della sollecitazione sono simili.

Le due simulazioni danno esito positivo, l'albero è correttamente dimensionato per sopportare gli sforzi a torsione e per deformarsi minimamente durante il periodo di funzionamento.

Infine, una volta appurata la resistenza dell'albero, alloggio i cuscinetti a sfera.



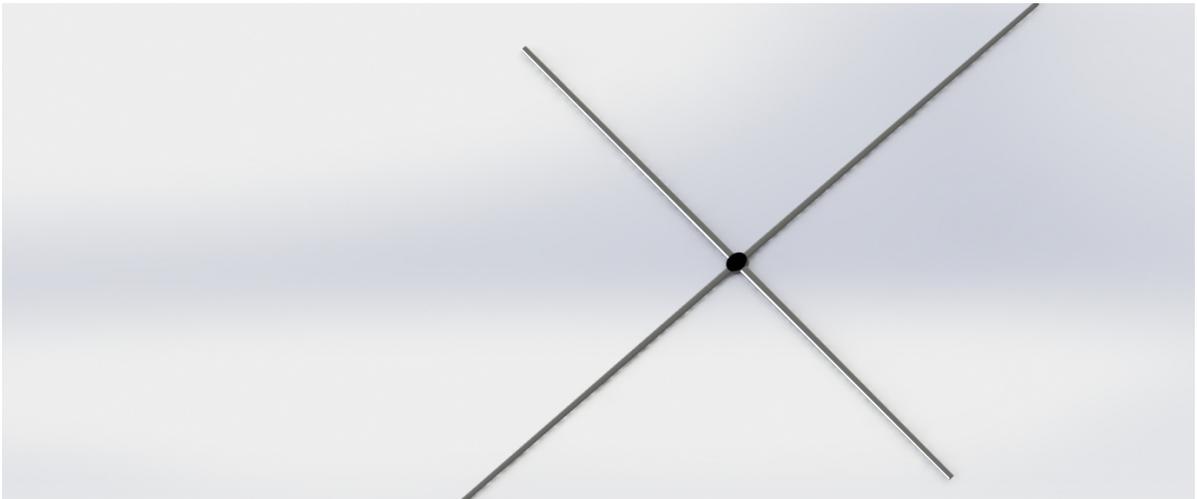
### Cap. 3.4- Eliche

Non essendo l'obiettivo principale di questa tesi l'analisi e la creazione di modelli di eliche adeguate ad essere utilizzate sulla soluzione ad eliche controrotanti, ho proceduto effettuando un dimensionamento di massima delle stesse.

Partendo dall'elica propulsiva più lontana dal motore...



E successivamente creando una seconda elica, che girerà in senso opposto alla prima.

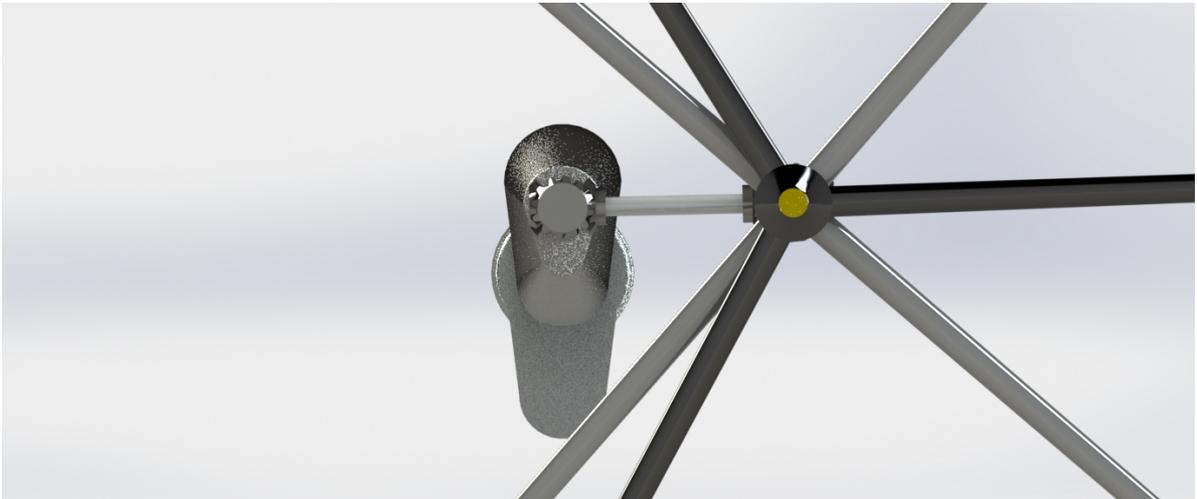


Per questa elica, si è scelta una generica configurazione a quattro pale avente lo scopo di abbattere il rumore in eccesso della prima. Una volta assemblate, le eliche controrotanti sono pronte per essere accoppiate con il riduttore.

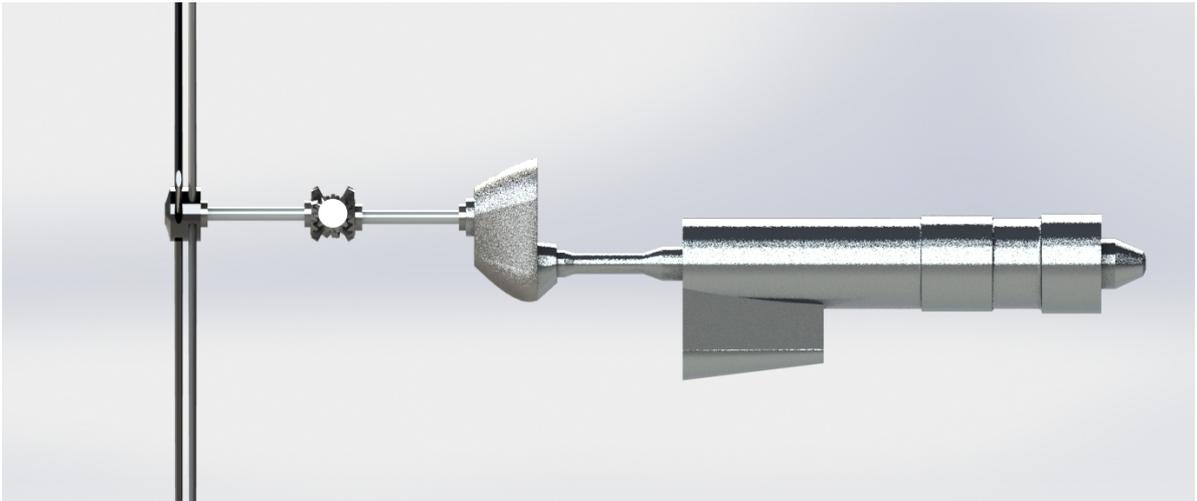


### Cap. 3.5- Accoppiamento delle parti

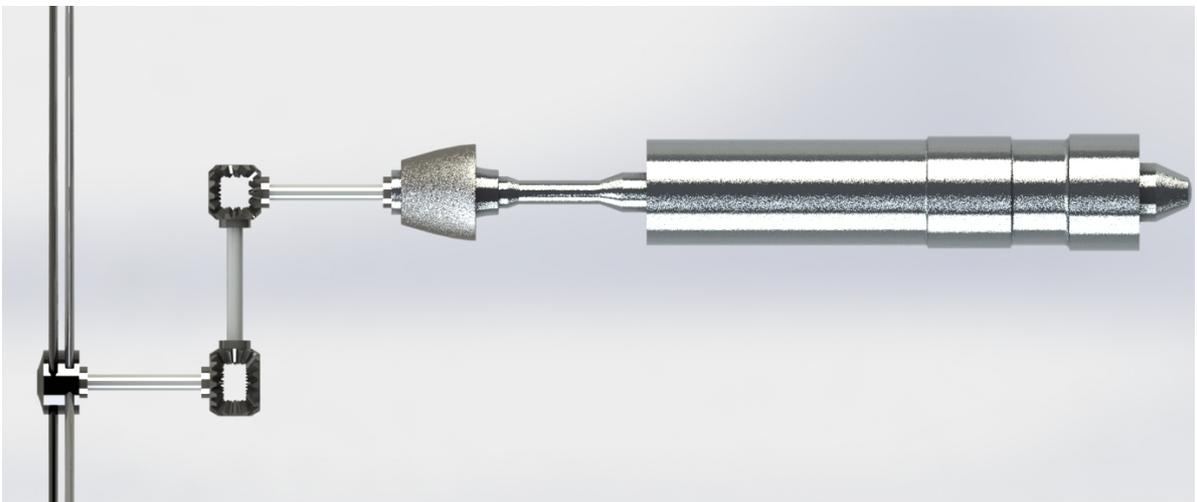
A questo punto, una volta creato e dimensionato ogni componente, accoppio tra loro tutti gli elementi.



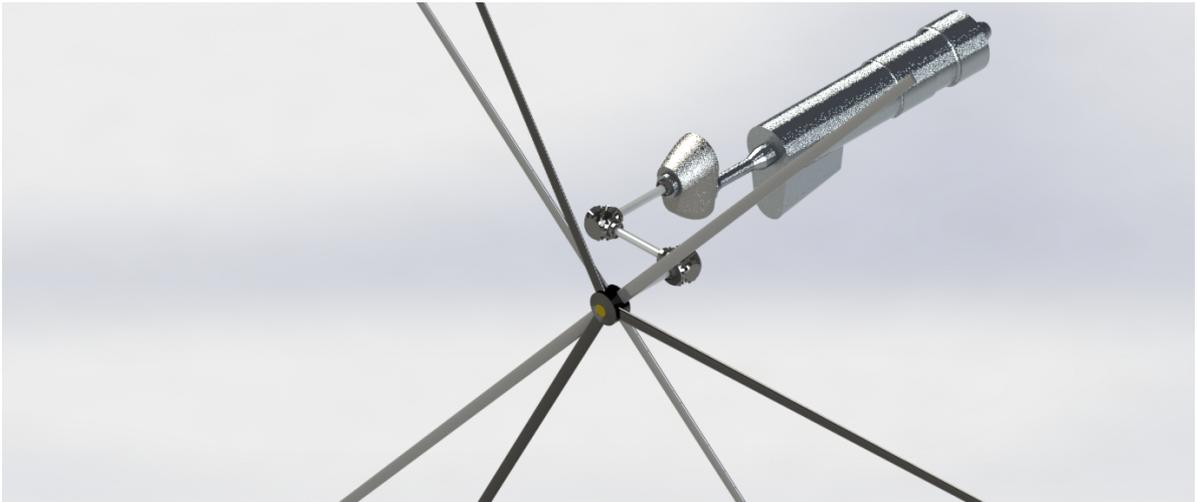
Vista frontale dell'assieme



Vista laterale dell'assieme.



Vista superiore dell'assieme.



Un vista completa dell'assieme.

## **Bibliografia**

- “*Fondamenti di motori endotermici alternativi*”, Giuseppe Cantore
- Dispense di Tecnologia Meccanica A, Lorenzo Donati

## **Sitografia**

- <http://www.boeing.com/defense/v-22-osprey/>
- <http://www.airforce-technology.com/projects/osprey/>
- [http://stec173902.blogspot.it/2011/06/materiali-per-ruote-dentate\\_23.html](http://stec173902.blogspot.it/2011/06/materiali-per-ruote-dentate_23.html)
- <http://www.treccani.it>
- <http://www.rolls-royce.com>
- [http://www.md80.it/immagini/approfondimenti/turboelica/Articolo\\_Turboeliche.pdf](http://www.md80.it/immagini/approfondimenti/turboelica/Articolo_Turboeliche.pdf)