

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

***Relazione per la prova finale***  
***PROGETTAZIONE STATICA E A FATICA E MODELLAZIONE***  
***CAD 3D DI UN RIDUTTORE BISTADIO***

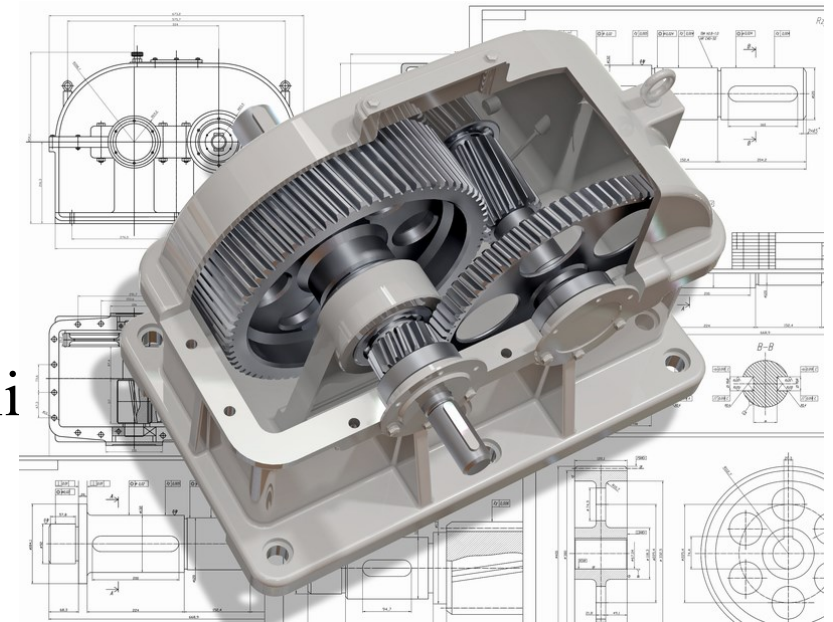
Tutor universitario: Prof. Alberto Campagnolo

Laureando: *Matterazzo Riccardo*

Padova, 14/07/2022

Il riduttore riduce la velocità di rotazione da un albero in ingresso a un albero in uscita e serve per aumentare la coppia prodotta dal motore.

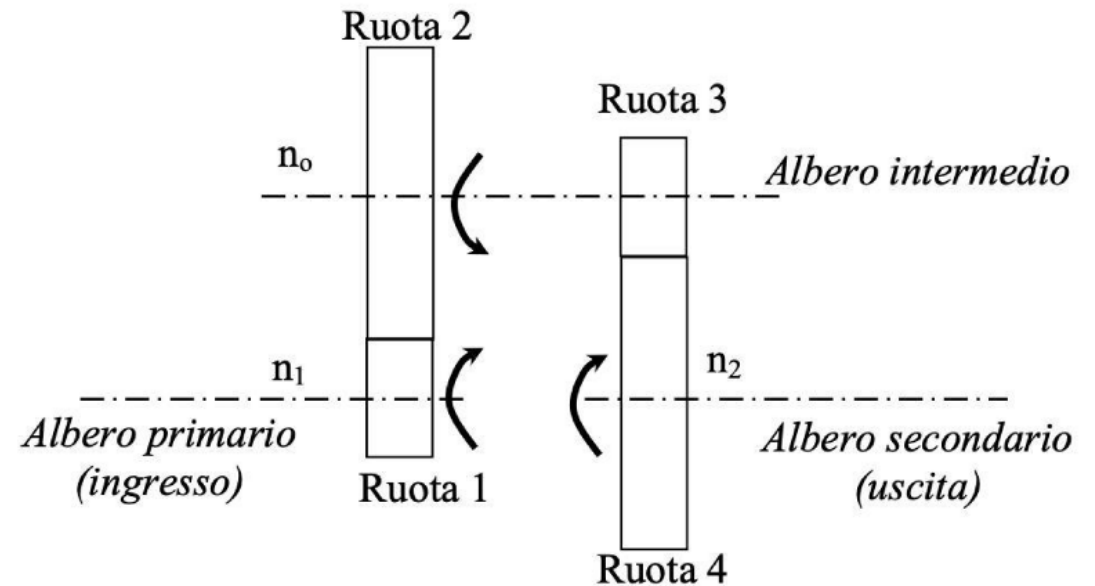
- Progettazione completa delle ruote dentate secondo ISO 6336
- Progettazione completa degli alberi
- Verifica degli alberi secondo normativa CNR UNI 10011
- Selezione e verifica dei cuscinetti e linguette
- Selezione dei componenti ausiliari
- Definizione delle tolleranze degli accoppiamenti principali
- Progettazione della cassa del riduttore
- Modellazione CAD 3D di tutti i componenti



- Riduttore bistadio ad ingranaggi cilindrici a denti dritti
- Assi di ingresso e uscita coassiali
- Collegamento tra motore elettrico e nastro trasportatore
- Modellazione CAD 3D

Dati di progetto	
$M_2$	2770 Nm
$n_2$	120 rpm
$\tau_2$	12

Dati risultanti	
Albero intermedio	
$P_0$	54,3 kW
$M_0$	1250 Nm
$n_0$	415 rpm
Albero di ingresso	
$P_1$	56,6 kW
$M_1$	376 Nm
$n_1$	1437 rpm



- Calcolo numero di denti
- Progettazione a fatica secondo ISO 6336
  - Calcolo del modulo minimo per la resistenza a flessione della ruota 3

$$m_n \geq \sqrt[3]{\frac{2M_0}{\lambda_3 z_3 \sigma_{FP}} \cdot Y_{F,3} Y_{S,3} K_{F\beta,3}} ; \sigma_{FP} = \frac{\sigma_{Flim} Y_{NT,3} Y_{ST}}{S_{Fmin}} \cdot Y_{\delta relT,3} Y_{RrelT,3} Y_{X,3} Y_{M,3}$$

- Calcolo del modulo minimo per la resistenza a pitting della ruota 3

$$m_n \geq \sqrt[3]{\left(\frac{Z_{B,3} Z_{H,3} Z_{E,3}}{z_3 \sigma_{HP}}\right)^2 \cdot \left(\frac{2M_0}{\lambda_3}\right) \cdot K_{H\beta,3} \cdot \frac{u+1}{u}} ; \sigma_{HP} = \frac{\sigma_{Hlim} Z_{NT,3}}{S_{Hmin}} \cdot Z_L Z_R Z_V Z_W$$

<b>Materiale ruote dentate</b>	
<b>16CrNi4</b>	
$\sigma_{Flim}$	461 MPa
$\sigma_{Hlim}$	1500 MPa
$\sigma_{adm,s}$	220 MPa

<b>ISO 6336</b>					
Ruota	$z$ [mm]	$m_n$ [mm]	$D_p$ [mm]	$\lambda$ [ ]	$b$ [mm]
1	18	6,5	117	8	52
2	62	6,5	403	8	52
3	18	6,5	117	10	65
4	62	6,5	403	10	65

<b>LEWIS</b>					
Ruota	$z$ [mm]	$m_n$ [mm]	$D_p$ [mm]	$\lambda$ [ ]	$b$ [mm]
1	17	7	119	6	42
2	59	7	413	6	42
3	17	7	119	12	84
4	59	7	413	12	84

- Lunghezza degli alberi:  $L_a \cong 3b_r$
- Progettazione completa alberi
  - Determinazione delle forze in gioco
  - Calcolo del diametro minimo necessario a sola flessione

$$d_a = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_{f_2}}{\pi \cdot \sigma_{adm}}}$$

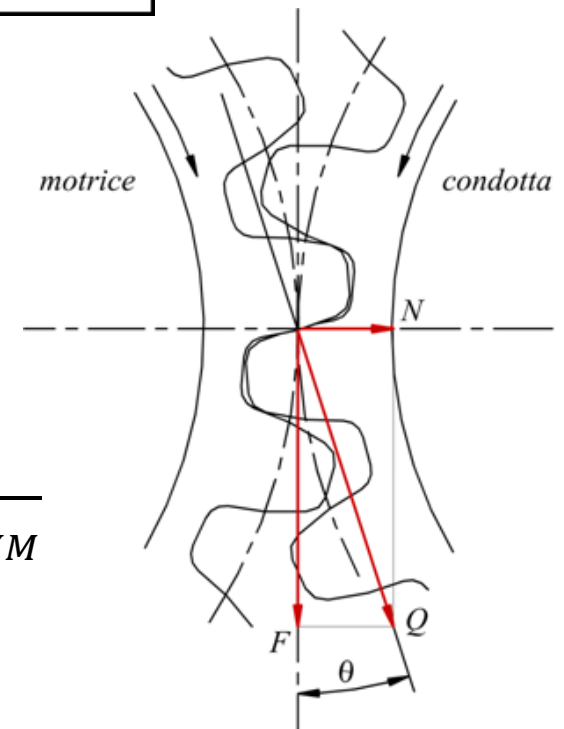
- Calcolo del diametro minimo necessario a sola torsione

$$d_a = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_2}{\pi \cdot \tau_{adm}}}$$

- Verifica a condizione di carico completa

$$\sigma_f = \frac{32 \cdot M_{f_2}}{\pi \cdot d_a^3} \rightarrow \sigma_f = \frac{32 \cdot M_{f_2}}{\pi \cdot d_a^3} \rightarrow \sigma_{id,VM} = \sqrt{\sigma_f^2 + 3 \cdot \tau_{tors}^2} \rightarrow v_{st} = \frac{v_S}{\sigma_{id,VM}}$$

Materiale alberi	
C40	
$\sigma_R$	590 MPa
$\sigma_S$	370 Mpa
$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_S}{v_S}$	
$\tau_{adm} = \frac{\sigma_{adm}}{\sqrt{3}}$	



$$F_{t_i} = \frac{2M_a}{D_r}$$

$$F_{r_i} = F_{t_i} \cdot \tan\theta$$

$$\theta = 20^\circ$$

Materiale alberi	
C40	
$\sigma_R$	590 MPa
$\sigma_S$	370 Mpa

Risultati ottenuti:

Albero 1	
<i>Ipotesi</i>	Tozzo
$v_S$	6
$F_{t_1}$	6432 N
$F_{r_1}$	2341 N
$L_1$	155 m
<b>d</b>	40 mm

Albero 2	
<i>Ipotesi</i>	Tozzo
$v_S$	6
$F_{t_2}$	20620 N
$F_{r_2}$	7505 N
$L_2$	195 mm
<b>d</b>	85 mm

Albero 0	
<i>Ipotesi</i>	Snello
$v_S$	8
$F_{t_2}$	6205 N
$F_{r_2}$	2259 N
$F_{t_3}$	21374 N
$F_{r_3}$	7780 N
$L_0$	390 mm
<b>d</b>	75 mm

- Scelta dei cuscinetti secondo la durata d'esercizio del riduttore
  - Scelti da catalogo SKF in funzione del coefficiente di carico dinamico

$$L_{10} = \left( \frac{C}{P} \right)^p = \frac{L_{10h} \cdot n \cdot 60}{10^6}$$

$$P = X \cdot F_R + Y \cdot F_A$$

$$C = P \cdot (L_{10})^{1/p}$$

- Dimensionamento linguette

$$p = \frac{M_t}{d/2} \cdot \frac{1}{t_1 \cdot l} = \frac{2M_t}{d \cdot t_1 \cdot l} \leq p_{amm}$$

$$\tau = \frac{M_t}{d/2} \cdot \frac{1}{b \cdot l} = \frac{2M_t}{d \cdot b \cdot l} \leq \tau_{adm}$$

$$l > \frac{2M_t}{d \cdot t_1 \cdot p_{amm}}$$

Si verifica poi con  $\tau$

ALBERO 1						
Tipologia	$L_{10}$	$F_r$	$P$	$p$	$C$	Codice SKF
[ ]	[mil. giri]	[N]	[N]	[ ]	[N]	[ ]
Sfere	3447,82	3422	3422	3	51704	SKF 6311
Rulli	3447,82	3422	3422	3,33	39410	SKF NU 206 ECP
ALBERO 0						
Tipologia	$L_{10}$	$F_r$	$P$	$p$	$C$	Codice SKF
[ ]	[mil. giri]	[N]	[N]	[ ]	[N]	[ ]
Sfere	996,48	3773	3773	3	37685	SKF 6210
Rulli	996,48	16076	16076	3,33	127563	SKF NU 2212 ECP
ALBERO 2						
Tipologia	$L_{10}$	$F_r$	$P$	$p$	$C$	Codice SKF
[ ]	[mil. giri]	[N]	[N]	[ ]	[N]	[ ]
Sfere	288,00	10972	10972	3	72457	SKF 6218
Rulli	288,00	10972	10972	3,33	59993	SKF NU 1012 ECP

Albero	Linguetta	$l_{min}$	$l$	$\tau$	$\tau_{adm}$
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]
1	12x8	40	40	39	162
0	20x12	47	56	30	162
2	22x14	114	120	37	162

ALBERO 1	Posizione	Distanza	Diametro	$M_{f,tot}$	$M_t$	$W_f$	$W_t$	$\sigma_f$	$\tau_{tors}$	$\sigma_{id}$	$v_s$
Sezione	[ ]	[mm]	[mm]	[Nmm]	[Nmm]	[mm <sup>3</sup> ]	[mm <sup>3</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[ ]
A-A	Spallamento cuscinetto	13,5	50	46204	376283	12272	24544	3,77	15,33	26,82	14
B-B	spallamento ruota 1	51,5	40	176259	376283	6283	12566	28,05	29,94	58,96	6
C-C	mezzeria ruota 1	77,5	40	265243	376283	6283	12566	42,21	29,94	66,87	6
D-D	gola di scarico	105,5	36	169414	0	4580	-	36,99	0	36,99	10
E-E	Spallamento cuscinetto	147	30	27380	0	2651	-	10,33	0	10,33	36

ALBERO 0	Posizione	Distanza	Diametro	$M_{f,XY}$	$M_{f,XZ}$	$M_{f,tot}$	$M_t$	$W_f$	$W_t$	$\sigma_f$	$\tau_{tors}$	$\sigma_{id}$	$v_s$
Sezione	[ ]	[mm]	[mm]	[Nmm]	[Nmm]	[Nmm]	[Nmm]	[mm <sup>3</sup> ]	[mm <sup>3</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[ ]
A-A	Spallamento cuscinetto	10	50	3713	37546	37729	0	12272	-	3,07	0	3,07	120
B-B	gola di scarico	49,5	71	18377	185854	186761	0	35138	-	5,32	0	5,32	70
C-C	mezzeria ruota 2	77,5	75	28773	290984	292403	1250382	41417	82835	7,06	15,09	27,08	14
D-D	spallamento ruota 2	103,5	75	199765	329882	385653	1250382	41417	82835	9,31	15,09	27,75	13
E-E	spallamento ruota 3	260	75	1229008	564015	1352248	1250382	41417	82835	32,65	15,09	41,83	9
F-F	mezzeria ruota 3	292,5	75	1442749	612637	1567434	1250382	41417	82835	37,84	15,09	46,00	8
G-G	gola di scarico	327	71	932238	395858	1012803	0	35138	-	28,82	0	28,82	13
H-H	Spallamento cuscinetto	376	60	207164	87968	225067	0	21206	-	10,61	0	10,61	35

ALBERO 2	Posizione	Distanza	Diametro	$M_{f,tot}$	$M_t$	$W_f$	$W_t$	$\sigma_f$	$\tau_{tors}$	$\sigma_{id}$	$v_s$
Sezione	[ ]	[mm]	[mm]	[Nmm]	[Nmm]	[mm <sup>3</sup> ]	[mm <sup>3</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[ ]
A-A	Spallamento cuscinetto	15	60	164578	0	21206	-	7,76	0	7,76	48
B-B	gola di scarico	63	81	691227	0	52174	-	13,25	0	13,25	28
C-C	mezzeria ruota 4	97,5	85	1069756	4155000	60292	120583	17,74	34,46	62,26	6
D-D	spallamento ruota 4	130	85	713171	4155000	60292	120583	11,83	34,46	60,84	6
E-E	Spallamento cuscinetto	186	90	98747	4155000	71569	143139	1,38	29,03	50,30	7

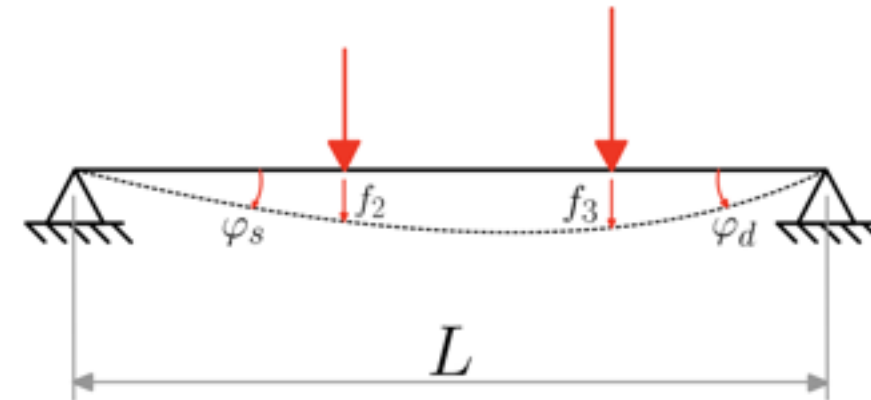


ALBERO 1	Posizione	d	D	r	D/d	r/d	a	q	$K_{tn}$	$K_f$	$K_d$	$K_l$	$\sigma^*_{a,inf,-1}$	$\sigma_f$	$v_\sigma$
Sezione	[]	[mm]	[mm]	[Nmm]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[MPa]	[MPa]	[]
A-A	Spallamento cuscinetto	50	66	2	1,32	0,040	0,2173	1	2,2	2,2	1,23	1,05	103,83	3,77	27,6
B-B	spallamento ruota 1	50	66	2	1,32	0,040	0,2173	1	2,2	2,2	1,23	1,12	97,34	28,05	3,5
C-C	mezzeria ruota 1	50	50	0	1,00	0,000	0,2173	-	1,95	1,95	1,23	1,12	109,82	42,21	2,6
D-D	gola di scarico	46	50	2	1,09	0,043	0,2173	1	1,92	1,92	1,19	1,12	115,28	36,99	3,1
E-E	Spallamento cuscinetto	35	50	0,6	1,43	0,017	0,2173	0,734	3	2,47	1,19	1,05	95,65	10,33	9,3

ALBERO 0	Posizione	d	D	r	D/d	r/d	a	q	$K_{tn}$	$K_f$	$K_d$	$K_l$	$\sigma^*_{a,inf,-1}$	$\sigma_f$	$v_\sigma$
Sezione	[]	[mm]	[mm]	[Nmm]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[MPa]	[MPa]	[]
A-A	Spallamento cuscinetto	50	65	1	1,30	0,020	0,2173	0,821	2,76	2,45	1,23	1,05	93,39	3,07	30,4
B-B	gola di scarico	71	75	2	1,06	0,028	0,2173	1	2,58	2,58	1,29	1,12	79,14	5,32	14,9
C-C	mezzeria ruota 2	75	75	0	1,00	0,000	0,2173	-	1,95	1,95	1,3	1,12	103,90	7,06	14,7
D-D	spallamento ruota 2	75	85	3	1,13	0,040	0,2173	1	1,96	1,96	1,3	1,12	103,37	9,31	11,1
E-E	spallamento ruota 3	75	85	3	1,13	0,040	0,2173	1	1,96	1,96	1,3	1,12	103,37	32,65	3,2
F-F	mezzeria ruota 3	75	75	0	1,00	0,000	0,2173	-	1,96	1,96	1,3	1,12	103,37	37,84	2,7
G-G	gola di scarico	71	75	2	1,06	0,028	0,2173	1	2,58	2,58	1,29	1,12	79,14	28,82	2,7
H-H	Spallamento cuscinetto	60	74	1,5	1,23	0,025	0,2173	0,873	2,5	2,31	1,26	1,05	96,52	10,61	9,1

ALBERO 2	Posizione	d	D	r	D/d	r/d	a	q	$K_{tn}$	$K_f$	$K_d$	$K_l$	$\sigma^*_{a,inf,-1}$	$\sigma_f$	$v_\sigma$
Sezione	[]	[mm]	[mm]	[Nmm]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[MPa]	[MPa]	[]
A-A	Spallamento cuscinetto	60	74	1	1,23	0,017	0,2173	0,821	2,76	2,45	1,26	1,05	91,17	7,76	11,7
B-B	gola di scarico	81	85	2	1,05	0,025	0,2173	1	1,42	1,42	1,3	1,12	142,68	13,25	10,8
C-C	mezzeria ruota 4	85	85	0	1,00	0,000	0,2173	-	1,95	1,95	1,32	1,12	102,33	17,74	5,8
D-D	spallamento ruota 4	85	101	3	1,19	0,035	0,2173	1	2,24	2,24	1,32	1,12	89,08	11,83	7,5
E-E	Spallamento cuscinetto	90	101	2	1,12	0,022	0,2173	1	2,28	2,28	1,32	1,05	93,35	1,38	67,7

<b>ALBERO 0</b>				
Piano X-Y				
1 <sup>a</sup> Condizione	$f_{2,XY'}$	$f_{3,XY'}$	$\varphi_{S,XY'}$	$\varphi_{D,XY'}$
	[mm]	[mm]	[rad]	[rad]
	0,00486	0,00349	0,00007	-0,00005
2 <sup>a</sup> Condizione	$f_{2,XY''}$	$f_{3,XY''}$	$\varphi_{S,XY''}$	$\varphi_{D,XY''}$
	[mm]	[mm]	[rad]	[rad]
	-0,01201	-0,01675	-0,00016	0,00024
Sovrapposizione degli effetti	$f_{2,XY}$	$f_{3,XY}$	$\varphi_{S,XY}$	$\varphi_{D,XY}$
	[mm]	[mm]	[rad]	[rad]
	-0,00715	-0,01326	-0,00009	0,00020
Piano X-Z				
1 <sup>a</sup> Condizione	$f_{2,XZ'}$	$f_{3,XZ'}$	$\varphi_{S,XZ'}$	$\varphi_{D,XZ'}$
	[mm]	[mm]	[rad]	[rad]
	0,00177	0,00127	0,00003	-0,00002
2 <sup>a</sup> Condizione	$f_{2,XZ''}$	$f_{3,XZ''}$	$\varphi_{S,XZ''}$	$\varphi_{D,XZ''}$
	[mm]	[mm]	[rad]	[rad]
	0,00437	0,00609	0,00006	-0,00009
Sovrapposizione degli effetti	$f_{2,XZ}$	$f_{3,XZ}$	$\varphi_{S,XZ}$	$\varphi_{D,XZ}$
	[mm]	[mm]	[rad]	[rad]
	0,00614	0,00736	0,00008	-0,00011
Combinazione deformazioni	$f_{2,tot}$	$f_{3,tot}$	$\varphi_{S,tot}$	$\varphi_{D,tot}$
	[mm]	[mm]	[rad]	[rad]
	0,00942	0,01517	0,00012	0,00022
Valori limite	0,12700	0,12700	0,00291	0,00058



<b>ALBERO 1</b>	$f_1$	$\varphi_S$	$\varphi_D$
	[mm]	[rad]	[rad]
	0,00083	0,00002	-0,00002
Valori limite	0,05167	0,00291	0,00058

<b>ALBERO 2</b>	$f_4$	$\varphi_S$	$\varphi_D$
	[mm]	[rad]	[rad]
	0,00499	0,00008	-0,00008
Valori limite	0,06500	0,00058	0,00291

- La cassa deve contenere alberi e ruote e fungere da supporto per i cuscinetti
- Riduzione degli ingombri, facilità di montaggio, ispezione e manutenzione

