



**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

**NUMERO: 2150**

**ANNO: 2017**

# **A P P U N T I**

**STUDENTE: Polizzi Fabio**

**MATERIA: Macchine Formulario - Domande Orale - Prof. Mittica**

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.  
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.

## RIASSUNTO/FORMULARIO

• 1° PRINCIPIO – Lagrangiano (Sostanziale – per sys chiusi) Motrici e Operatrici.....	pag.1
• 1° PRINCIPIO – Euleriano (Locale– per sys aperti) Motrici e Operatrici.....	pag.1
• 2° PRINCIPIO – Lagrangiano (Sostanziale – per sys chiusi) Motrici e Operatrici.....	pag.1
• 2° PRINCIPIO – Euleriano (Locale– per sys aperti) Motrici e Operatrici.....	pag.1
• EQUAZIONE ENERGIA MECCANICA Lagrangiana (Sostanziale).....	pag.1
• EQUAZIONE ENERGIA MECCANICA Euleriana (Sostanziale).....	pag.1
• <b>TURBINE IDRAULICHE</b> .....	pag.1
○ Turbina PELTON.....	pag.3
○ Turbina FRANCIS.....	pag.4
○ Turbina KAPLAN e ELICA.....	pag.6
• <b>TURBOPOMPE IDRAULICHE</b> .....	pag.9
○ Centrifughe.....	pag.11
○ Assiali.....	pag.13
• <b>TRASMISSIONI IDROSTATICHE</b> .....	pag.16
• <b>GIUNTI IDRODINAMICI</b> .....	pag.19
• <b>CONVERTITORI DI COPPIA</b> .....	pag.23
• <b>POMPE VOLUMETRICHE</b> .....	pag.29
• <b>COMPRESSORI ALTERNATIVI</b> .....	pag.30
○ A Stantuffo.....	pag.30
○ Rotativi.....	pag.40
○ A Ingranaggi.....	pag.42
• <b>TURBOCOMPRESSORI</b> .....	pag.45
○ Centrifughi.....	pag.45
○ Assiali.....	pag.55
• <b>COMBUSTIONE</b> .....	pag.56
○ A VOLUME =COST.....	pag.56
○ A PRESSIONE = COST.....	pag.58
○ IN FLUSSO PERMANENTE.....	pag.59
• <b>MOTORI ALTERNATIVI A COMBUSTIONE INTERNA</b> .....	pag.60
○ Dimensionamento di massima.....	pag.64
○ Analisi dei rendimenti.....	pag.65
○ CORREZIONE DELLA POTENZA.....	pag.72
○ SOVRALIMENTAZIONE.....	pag.73
• <b>IMPIANTI A VAPORE</b> .....	pag.77
○ LAMINAZIONE.....	pag.82
○ PARZIALIZZAZIONE.....	pag.83
• <b>IMPIANTI A GAS</b> .....	pag.84
○ Regolazione a $T_3 \downarrow$ e $\eta = \text{COST}$ .....	pag.87

TAB. 5.16

Vapore acqueo saturo allo stato limite.

p bar	t °C	v' m³/kg	v'' m³/kg	ρ'' kg/m³	i' kJ/kg	i'' kJ/kg	r kJ/kg	s' kJ/kg · K	s'' kJ/kg · K
0,010	6,9828	0,0010001	129,20	0,007739	29,34	2514,4	2485,0	0,1060	8,9787
0,015	13,036	0,0010006	87,98	0,01137	54,71	2525,5	2470,7	0,1957	8,8288
0,020	17,513	0,0010012	67,01	0,01492	73,46	2533,6	2460,2	0,2607	8,7248
0,025	21,096	0,0010020	54,26	0,01843	88,45	2540,2	2451,7	0,3119	8,6440
0,030	24,100	0,0010027	45,87	0,02190	101,00	2545,6	2444,6	0,3544	8,5785
0,035	26,694	0,0010033	39,48	0,02533	111,85	2550,4	2438,5	0,3907	8,5232
0,040	28,983	0,0010040	34,80	0,02873	121,41	2554,5	2433,1	0,4225	8,4755
0,045	31,035	0,0010046	31,14	0,03211	129,99	2558,2	2428,2	0,4507	8,4335
0,050	32,898	0,0010052	28,19	0,03547	137,77	2561,6	2423,8	0,4763	8,3960
0,055	34,605	0,0010058	25,77	0,03880	144,91	2564,7	2419,8	0,4995	8,3621
0,060	36,183	0,0010064	23,74	0,04212	151,50	2567,5	2416,0	0,5209	8,3312
0,065	37,651	0,0010069	22,02	0,04542	157,64	2570,2	2412,5	0,5407	8,3029
0,070	39,025	0,0010074	20,53	0,04871	163,38	2572,6	2409,2	0,5591	8,2767
0,075	40,316	0,0010079	19,24	0,05198	168,77	2574,9	2406,2	0,5763	8,2523
0,080	41,534	0,0010084	18,10	0,05523	173,86	2577,1	2403,2	0,5925	8,2296
0,085	42,689	0,0010089	17,10	0,05848	178,69	2579,2	2400,5	0,6079	8,2082
0,090	43,787	0,0010094	16,20	0,06171	183,28	2581,1	2397,9	0,6224	8,1881
0,095	44,833	0,0010098	15,40	0,06493	187,65	2583,0	2395,3	0,6361	8,1691
0,10	45,833	0,0010102	14,67	0,06814	191,83	2584,8	2392,9	0,6493	8,1511
0,11	47,710	0,0010111	13,42	0,07454	199,68	2588,1	2388,4	0,6738	8,1177
0,12	49,446	0,0010119	12,36	0,08089	206,94	2591,2	2384,3	0,6963	8,0872
0,13	51,062	0,0010126	11,47	0,08722	213,70	2594,0	2380,3	0,7172	8,0592
0,14	52,574	0,0010133	10,69	0,09351	220,02	2596,7	2376,7	0,7367	8,0334
0,15	53,997	0,0010140	10,02	0,09977	225,97	2599,2	2373,2	0,7549	8,0093
0,16	55,341	0,0010147	9,433	0,1060	231,59	2601,6	2370,0	0,7721	7,9869
0,17	56,615	0,0010154	8,911	0,1122	236,93	2603,8	2366,9	0,7883	7,9658
0,18	57,828	0,0010160	8,445	0,1184	241,99	2605,9	2363,9	0,8036	7,9460
0,19	58,982	0,0010166	8,027	0,1246	246,83	2607,9	2361,1	0,8182	7,9272
0,20	60,086	0,0010172	7,650	0,1307	251,45	2609,9	2358,4	0,8321	7,9094
0,21	61,145	0,0010178	7,307	0,1368	255,88	2611,7	2355,8	0,8453	7,8925
0,22	62,162	0,0010183	6,995	0,1430	260,14	2613,5	2353,3	0,8581	7,8764
0,23	63,139	0,0010189	6,709	0,1490	264,23	2615,2	2350,9	0,8702	7,8611
0,24	64,082	0,0010194	6,447	0,1551	268,18	2616,8	2348,6	0,8820	7,8464
0,25	64,992	0,0010199	6,204	0,1612	271,99	2618,3	2346,4	0,8933	7,8322
0,26	65,871	0,0010204	5,980	0,1672	275,67	2619,9	2344,2	0,9041	7,8188
0,27	66,722	0,0010209	5,772	0,1732	279,24	2621,3	2342,1	0,9146	7,8058
0,28	67,547	0,0010214	5,579	0,1793	282,69	2622,7	2340,0	0,9248	7,7933
0,29	68,347	0,0010219	5,398	0,1852	286,05	2624,1	2338,1	0,9346	7,7812
0,30	69,124	0,0010223	5,229	0,1912	289,30	2625,4	2336,1	0,9441	7,7695
0,32	70,615	0,0010232	4,922	0,2032	295,55	2628,0	2332,4	0,9623	7,7474
0,34	72,029	0,0010241	4,650	0,2150	301,48	2630,4	2328,9	0,9795	7,7266
0,36	73,374	0,0010249	4,408	0,2269	307,12	2632,6	2325,5	0,9958	7,7070
0,38	74,658	0,0010257	4,190	0,2387	312,60	2634,8	2322,3	1,0113	7,6884
0,40	75,886	0,0010265	3,993	0,2504	317,65	2636,9	2319,2	1,0261	7,6709
0,45	78,743	0,0010284	3,576	0,2796	329,64	2641,7	2312,0	1,0603	7,6307
0,50	81,345	0,0010301	3,240	0,3088	340,56	2646,0	2305,4	1,0912	7,5947
0,55	83,737	0,0010317	2,964	0,3374	350,61	2649,9	2299,3	1,1194	7,5623
0,60	85,954	0,0010333	2,732	0,3661	359,93	2653,6	2293,6	1,1454	7,5327
0,65	88,021	0,0010347	2,535	0,3945	368,62	2656,9	2288,3	1,1696	7,5055
0,70	89,959	0,0010361	2,365	0,4229	376,77	2660,1	2283,3	1,1921	7,4804
0,75	91,785	0,0010375	2,217	0,4511	384,45	2663,0	2278,6	1,2131	7,4570
0,80	93,512	0,0010387	2,087	0,4792	391,72	2665,8	2274,0	1,2330	7,4352
0,85	95,152	0,0010400	1,972	0,5071	398,63	2668,4	2269,8	1,2518	7,4117
0,90	96,713	0,0010412	1,869	0,5350	405,21	2670,9	2265,6	1,2698	7,3954
0,95	98,204	0,0010423	1,777	0,5627	411,49	2673,0	2261,7	1,2865	7,3771
1,0	99,632	0,0010434	1,694	0,5904	417,51	2675,4	2257,9	1,3027	7,3598
1,1	102,32	0,0010455	1,549	0,6455	428,84	2679,6	2250,8	1,3330	7,3277
1,2	104,81	0,0010476	1,428	0,7002	439,36	2683,4	2244,1	1,3609	7,2984
1,3	107,13	0,0010495	1,325	0,7547	449,19	2687,0	2237,8	1,3868	7,2715
1,4	109,32	0,0010513	1,236	0,8088	458,42	2690,3	2231,9	1,4109	7,2465
1,5	111,37	0,0010530	1,159	0,8628	467,13	2693,4	2226,2	1,4336	7,2234
1,6	113,32	0,0010547	1,091	0,9165	475,38	2696,2	2220,9	1,4550	7,2017
1,7	115,17	0,0010563	1,031	0,9700	483,22	2699,0	2215,7	1,4752	7,1813
1,8	116,93	0,0010579	0,9772	1,023	490,70	2701,5	2210,8	1,4944	7,1622
1,9	118,62	0,0010594	0,9290	1,076	497,85	2704,0	2206,1	1,5127	7,1440
2,0	120,23	0,0010608	0,8854	1,129	504,70	2706,3	2201,6	1,5301	7,1268
2,1	121,78	0,0010623	0,8459	1,182	511,29	2708,5	2197,2	1,5468	7,1105
2,2	123,27	0,0010636	0,8098	1,235	517,62	2710,6	2193,0	1,5627	7,0949
2,3	124,71	0,0010650	0,7768	1,287	523,73	2712,6	2188,9	1,5781	7,0800
2,4	126,09	0,0010663	0,7465	1,340	529,64	2714,5	2184,9	1,5929	7,0657
2,5	127,43	0,0010675	0,7184	1,392	535,34	2716,4	2181,0	1,6071	7,0520
2,6	128,73	0,0010688	0,6925	1,444	540,87	2718,2	2177,3	1,6209	7,0389
2,7	129,98	0,0010700	0,6684	1,496	546,24	2719,9	2173,6	1,6342	7,0262
2,8	131,20	0,0010712	0,6460	1,548	551,44	2721,5	2170,1	1,6471	7,0140
2,9	132,39	0,0010724	0,6251	1,600	556,51	2723,1	2166,6	1,6595	7,0023

Segue TAB. 5.16

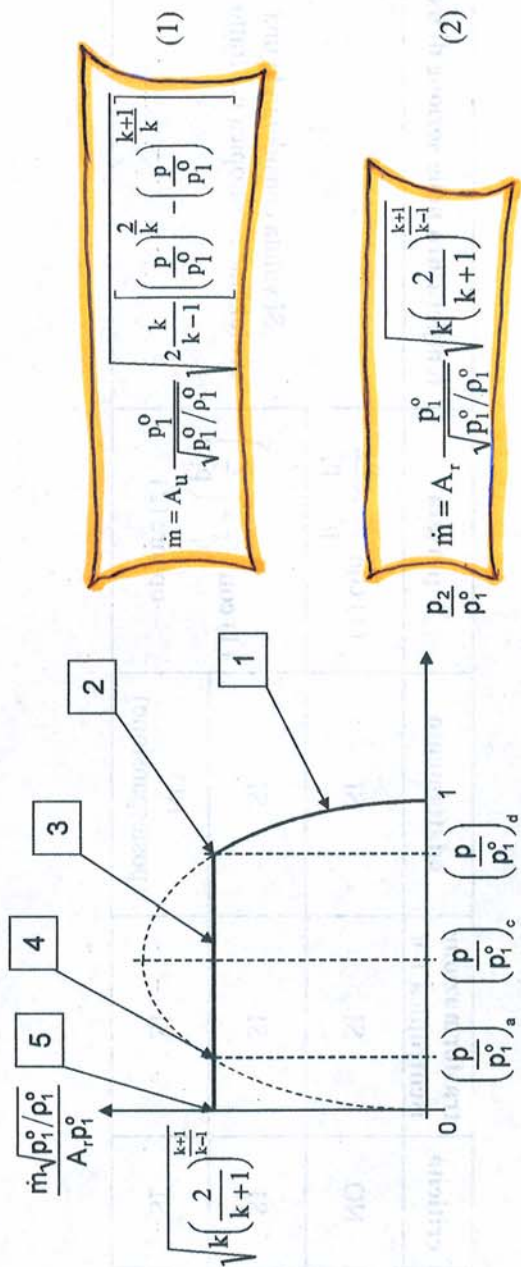
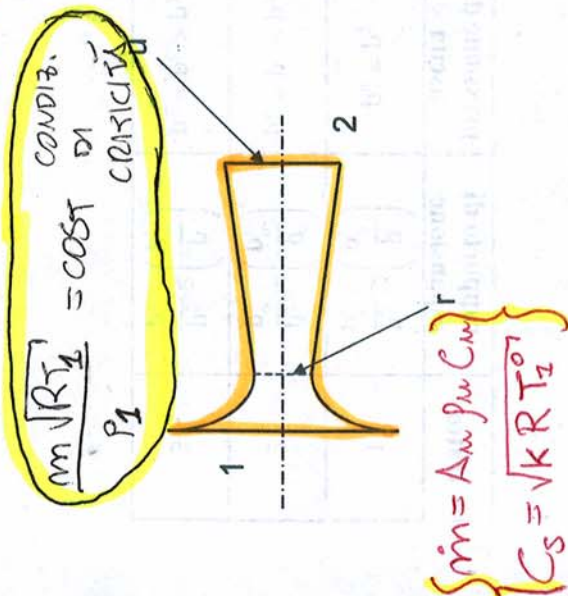
Vapore acqueo saturo allo stato limite.

p bar	t °C	v' m³/kg	v'' m³/kg	ρ'' kg/m³	i' kJ/kg	i'' kJ/kg	r kJ/kg	s' kJ/kg · K	s'' kJ/kg · K
25,0	223,04	0,0011972	0,07991	12,51	961,96	2800,9	1830,0	2,6543	6,2536
25,5	225,00	0,0011991	0,07835	12,76	966,87	2801,2	1834,3	2,6640	6,2461
26,0	226,04	0,0012011	0,07689	13,01	971,72	2801,4	1829,6	2,6736	6,2387
26,5	227,06	0,0012031	0,07541	13,26	976,50	2801,6	1825,0	2,6831	6,2315
27,0	228,07	0,0012050	0,07402	13,51	981,22	2801,7	1820,5	2,6924	6,2244
27,5	229,07	0,0012069	0,07268	13,76	985,88	2801,9	1816,0	2,6016	6,2173
28,0	230,05	0,0012088	0,07139	14,01	990,48	2802,0	1811,5	2,6108	6,2104
28,5	231,01	0,0012107	0,07014	14,26	995,03	2802,1	1807,1	2,6195	6,2036
29,0	231,97	0,0012126	0,06893	14,51	999,53	2802,2	1802,6	2,6283	6,1969
29,5	232,91	0,0012145	0,06776	14,76	1004,0	2802,2	1798,3	2,6370	6,1903
30	233,84	0,0012163	0,06663	15,01	1008,4	2802,3	1793,9	2,6455	6,1837
31	235,67	0,0012200	0,06447	15,51	1017,0	2802,3	1785,4	2,6623	6,1709
32	237,45	0,0012237	0,06244	16,02	1025,4	2802,3	1776,9	2,6786	6,1585
33	239,18	0,0012274	0,06053	16,52	1033,7	2802,3	1768,6	2,6945	6,1463
34	240,88	0,0012310	0,05873	17,03	1041,3	2802,1	1760,3	2,7101	6,1344
35	242,54	0,0012345	0,05703	17,54	1049,3	2802,0	1752,2	2,7253	6,1228
36	244,16	0,0012381	0,05541	18,05	1057,5	2801,7	1744,2	2,7401	6,1115
37	245,75	0,0012416	0,05389	18,56	1065,2	2801,4	1736,2	2,7547	6,1004
38	247,31	0,0012451	0,05244	19,07	1072,7	2801,1	1728,4	2,7689	6,0896
39	248,84	0,0012486	0,05106	19,58	1080,1	2800,8	1720,6	2,7829	6,0789
40	250,33	0,0012521	0,04975	20,10	1087,4	2800,3	1712,9	2,7965	6,0685
41	251,80	0,0012556	0,04850	20,62	1094,5	2799,9	1705,3	2,8099	6,0583
42	253,24	0,0012592	0,04731	21,14	1101,5	2799,4	1697,8	2,8231	6,0482
43	254,66	0,0012628	0,04617	21,66	1108,5	2798,9	1690,3	2,8360	6,0383
44	256,05	0,0012667	0,04508	22,18	1115,4	2798,3	1682,9	2,8487	6,0286
45	257,41	0,0012691	0,04404	22,71	1122,1	2797,7	1675,6	2,8612	6,0191
46	258,75	0,0012725	0,04304	23,24	1128,8	2797,0	1668,3	2,8735	6,0097
47	260,07	0,0012758	0,04208	23,76	1135,3	2796,4	1661,1	2,8855	6,0004
48	261,37	0,0012792	0,04116	24,29	1141,8	2795,7	1653,9	2,8974	5,9913
49	262,65	0,0012825	0,04028	24,83	1148,2	2794,9	1646,8	2,9091	5,9824
50	263,91	0,0012858	0,03943	25,36	1154,5	2794,2	1639,7	2,9206	5,9735
51	265,15	0,0012891	0,03861	25,90	1160,7	2793,4	1632,7	2,9320	5,9648
52	266,37	0,0012924	0,03782	26,44	1166,8	2792,6	1625,7	2,9431	5,9561
53	267,58	0,0012957	0,03707	26,98	1172,9	2791,7	1618,8	2,9541	5,9476
54	268,76	0,0012990	0,03633	27,52	1178,9	2790,8	1611,9	2,9650	5,9392
55	269,93	0,0013023	0,03562	28,07	1184,9	2789,9	1605,0	2,9757	5,9309
56	271,09	0,0013056	0,03495	28,62	1190,8	2789,0	1598,2	2,9863	5,9227
57	272,22	0,0013089	0,03429	29,16	1196,6	2788,0	1591,4	2,9967	5,9146
58	273,35	0,0013121	0,03365	29,72	1202,3	2787,0	1584,7	3,0071	5,9066
59	274,46	0,0013154	0,03303	30,27	1208,0	2786,0	1578,0	3,0172	5,8986
60	275,55	0,0013187	0,03244	30,83	1213,7	2785,0	1571,3	3,0273	5,8905
61	276,63	0,0013219	0,03186	31,29	1219,3	2784,0	1564,7	3,0372	5,8830
62	277,70	0,0013252	0,03130	31,95	1224,8	2782,9	1558,0	3,0471	5,8753
63	278,75	0,0013285	0,03076	32,51	1230,3	2781,8	1551,5	3,0568	5,8677
64	279,79	0,0013317	0,03023	33,08	1235,7	2780,6	1544,9	3,0664	5,8601
65	280,82	0,0013350	0,02972	33,65	1241,1	2779,5	1538,4	3,0759	5,8527
66	281,84	0,0013383	0,02922	34,22	1246,5	2778,3	1531,9	3,0853	5,8452
67	282,84	0,0013415	0,02874	34,79	1251,8	2777,1	1525,4	3,0946	5,8379
68	283,84	0,0013448	0,02827	35,37	1257,0	2775,9	1518,9	3,1038	5,8306
69	284,82	0,0013481	0,02782	35,95	1262,2	2774,7	1512,5	3,1129	5,8233
70	285,79	0,0013513	0,02737	36,53	1267,4	2773,5	1506,0	3,1219	5,8162
71	286,75	0,0013546	0,02694	37,12	1272,5	2772,2	1499,6	3,1308	5,8090
72	287,70	0,0013579	0,02652	37,70	1277,6	2770,9	1493,3	3,1397	5,8020
73	288,64	0,0013611	0,02611	38,29	1282,7	2769,6	1486,9	3,1484	5,7949
74	289,57	0,0013644	0,02572	38,89	1287,7	2768,3	1480,5	3,1571	5,7880
75	290,50	0,0013677	0,02533	39,48	1292,7	2766,9	1474,2	3,1657	5,7811
76	291,41	0,0013710	0,02495	40,08	1297,6	2765,5	1467,9	3,1742	5,7742
77	292,31	0,0013743	0,02458	40,68	1302,6	2764,2	1461,6	3,1827	5,7673
78	293,21	0,0013776	0,02422	41,29	1307,4	2762,8	1455,3	3,1911	5,7606
79	294,09	0,0013809	0,02387	41,90	1312,3	2761,3	1449,1	3,1994	5,7538
80	294,97	0,0013842	0,02353	42,51	1317,1	2759,9	1442,8	3,2076	5,7471
81	295,84	0,0013876	0,02319	43,12	1321,9	2758,4	1436,6	3,2158	5,7404
82	296,70	0,0013909	0,02286	43,74	1326,6	2757,0	1430,3	3,2239	5,7338
83	297,55	0,0013942	0,02254	44,36	1331,4	2755,5	1424,1	3,2320	5,7272
84	298,39	0,0013976	0,02223	44,98	1336,1	2754,0	1417,9	3,2399	5,7207
85	299,23	0,0014009	0,02193	45,61	1340,7	2752,5	1411,7	3,2479	5,7141
86	300,06	0,0014043	0,02163	46,24	1345,4	2750,9	1405,5	3,2558	5,7076
87	300,88	0,0014077	0,02133	46,87	1350,0	2749,4	1399,3	3,2636	5,7012
88	301,70	0,0014111	0,02105	47,51	1354,6	2747,8	1393,2	3,2713	5,6948
89	302,51	0,0014146	0,02077	48,15	1359,2	2746,2	1387,0	3,2790	5,6884
90	303,31	0,0014179	0,02050	48,79	1363,7	2744,8	1380,9	3,2867	5,6820
91	304,10	0,0014213	0,02023	49,44	1368,3	2743,0	1374,7	3,2943	5,6757
92	304,89	0,0014247	0,01996	50,09	1372,8	2741,4	1368,6	3,3018	5,6694
93	305,67	0,0014281	0,01971	50,74	1377,2	2739,7	1362,5	3,3093	5,6631
94	306,44	0,0014316	0,01945	51,40	1381,7	2738,0	1356,3	3,3168	5,6568

454 MECCANICA DEI GAS E DEI VAPORI - TERMODINAMICA

VAPORE ACQUEO 455

# UGELLO CONVERGENTE-DIVERGENTE (DE LAVAL) FUORI PROGETTO



tratto	rapporto di espansione	pressione di uscita	pressione nella sezione r	criticità	trasformazione isentropica 1-u	adattamento	portata	temperatura nella sezione di uscita
1	$\frac{P_2}{P_1} > \left(\frac{P}{P_1}\right)_d$	$P_u = P_2$	$P_r > P_c$	NO	SI	NO	(1) con $\frac{P}{P_1} = \frac{P_2}{P_1}$	Si valuta considerando una evoluzione isentropica nel tratto 1-u
2	$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{P}{P_1}\right)_d$	$P_u = P_2$	$P_r = P_c$	SI	SI	NO	(1) con $\frac{P}{P_1} = \left(\frac{P}{P_1}\right)_d$	non vale la legge di evoluzione isentropica; vale il primo principio
3	$\left(\frac{P}{P_1}\right)_a < \frac{P_2}{P_1} < \left(\frac{P}{P_1}\right)_d$	$P_u = P_2$	$P_r = P_c$	SI	NO (SI solo nel tratto 1-r)	NO	oppure (1) con $\frac{P}{P_1} = \left(\frac{P}{P_1}\right)_a$	Si valuta considerando una evoluzione isentropica nel tratto 1-u
4	$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{P}{P_1}\right)_a$	$P_u = P_a = P_2$	$P_r = P_c$	SI	SI	SI		
5	$\frac{P_2}{P_1} < \left(\frac{P}{P_1}\right)_a$	$P_u = P_a > P_2$ (post-espansione)	$P_r = P_c$	SI	SI	NO	oppure (2)	

### CONDIZIONI DI FUNZIONAMENTO CRITICHE

$$A = \frac{\dot{m}}{\rho c} = A_{\min} \Rightarrow \rho c = (\rho c)_{\max} \Rightarrow \frac{d(\rho c)}{d(p/p_0)} = 0$$

rapporto critico delle pressioni.

VEL. SECONO

$$C_s = \sqrt{kRT}$$

$\left(\frac{p}{p_0}\right)_c = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$	valide per vapore e gas perfetto
$\left(\frac{p}{p_0}\right)_c = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}$	
$c_c = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \frac{p_0}{\rho_0} \sqrt{\frac{k p_0}{\rho_0}}}$	valida solo per gas perfetto
$\left(\frac{T}{T_0}\right)_c = \frac{2}{k+1}$	

$$\begin{aligned} i^0 &= i + \frac{C^2}{2} \\ T^0 &= T + \frac{C^2}{2C_p} \\ \rho^0 &= \rho \left(\frac{T^0}{T}\right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \rho^0 &= \rho \left(\frac{T^0}{T}\right)^{\frac{1}{k-1}} \rightarrow v^0 \end{aligned}$$

### DIMENSIONAMENTO DI UN UGELLO

$$\dot{m} = A_w \rho_w C_w$$

confronto	tipologia	Numero di Mach in $A_u$	$p_u$	$A_1$	$A_u$	$A_r$
$\frac{p_2}{p_1} > \left(\frac{p}{p_1}\right)_c$	semplicemente convergente	$Ma_u < 1$	$p_u = p_2$	$A_1 = \frac{\dot{m}}{\rho_1 c_1}$	$A_u = \frac{\dot{m}}{\rho_u c_u} = \frac{\dot{m}}{\rho_0 c_0} \frac{p_0}{\sqrt{p_0/\rho_0}} \left[ \frac{k}{2 \frac{k-1}{k-1}} \left( \frac{p_2}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - \left( \frac{p_2}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]$	non presente
$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{p}{p_1}\right)_c$	semplicemente convergente	$Ma_u = 1$	$p_u = p_2$	$A_1 = \frac{\dot{m}}{\rho_1 c_1}$	$A_u = \frac{\dot{m}}{\rho_u c_u} = \frac{\dot{m}}{\rho_0 c_0} \frac{p_0}{\sqrt{p_0/\rho_0}} \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k-1}{k-1}}}$	non presente
$\frac{p_2}{p_1} < \left(\frac{p}{p_1}\right)_c$	convergente-divergente	$Ma_u > 1$	$p_u = p_2$	$A_1 = \frac{\dot{m}}{\rho_1 c_1}$	$A_u = \frac{\dot{m}}{\rho_u c_u} = \frac{\dot{m}}{\rho_0 c_0} \frac{p_0}{\sqrt{p_0/\rho_0}} \left[ \frac{k}{2 \frac{k-1}{k-1}} \left( \frac{p_2}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - \left( \frac{p_2}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]$	$A_r = \frac{\dot{m}}{\rho_r c_r} = \frac{\dot{m}}{\rho_0 c_0} \frac{p_0}{\sqrt{p_0/\rho_0}} \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k-1}{k-1}}}$

# FORMULARIO MACCHINE

1

## P.P. LAGRANGIANO → SYS CHIUSI pag 1

### MOTRICI

$$\mathcal{Q} = \mathcal{L}_{FS} + \Delta U^* + \Delta E_c + \Delta E_g + \Delta E_w$$

oppure

$$\mathcal{Q} + \mathcal{L}_{um} = \Delta U^* + \int p dV$$

### OPERSTRICI

$$\mathcal{Q} + \mathcal{L}_{FS} = \Delta U^* + \Delta E_c + \Delta E_g + \Delta E_w$$

## EQ. ENERGIA MECCANICA LAGRANGIA → SYS CHIUSI

### OPERSTRICI (MOTRICI CAMBIA SEGNO)

$$\mathcal{L} = \int -p dV + \Delta E_c + \Delta E_g + \Delta E_w + L_w$$

Se XYZ FISSI:  $\Delta E_c = \frac{C^2 - C^2}{2}$   $\Delta E_w = 0$   
 Se XYZ ROTANTI:  $\Delta E_c = \frac{\omega^2 - \omega^2}{2}$   $\Delta E_w = \frac{u^2 - u^2}{2}$

## P.P. EULERIANO → SYS APERTI

### MOTRICI

$$\mathcal{Q} = \mathcal{L}_i + \Delta U^* + \Delta E_c + \Delta E_g + \Delta E_w$$

$\mathcal{Q} > 0$  se fornito al sistema  
 $\mathcal{Q} < 0$  se ceduto dal sistema

### OPERSTRICI

$$\mathcal{Q} + \mathcal{L}_i = \Delta U^* + \Delta E_c + \Delta E_g + \Delta E_w$$

## EQ. ENERGIA MECCANICA EULERIANA →

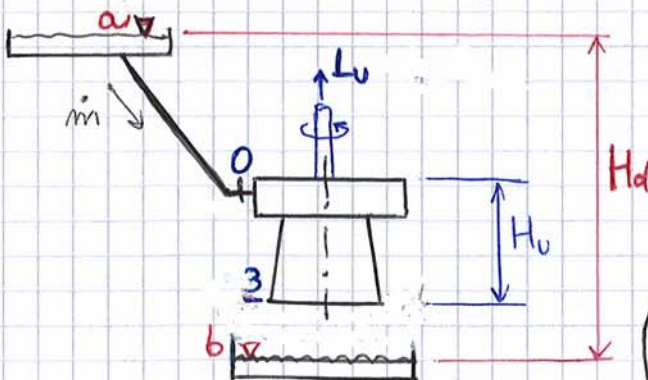
### MOTRICI

$$\mathcal{L}_i = \int -V dp - \Delta E_c - \Delta E_g - \Delta E_w$$

### OPERSTRICI

$$\mathcal{L}_i = \int V dp + \Delta E_c + \Delta E_g + \Delta E_w$$

## TURBINE IDRAULICHE pag 589 (motrici)



$$H_d = H_a^0 - H_b^0 = (z_a - z_b) + \left( \frac{p_a - p_b}{\rho g} \right) + \left( \frac{C_a^2 - C_b^2}{2g} \right)$$

Caduta disponibile

$$H_u = H_0^0 - H_3^0 = (z_0 - z_3) + \left( \frac{p_0 - p_3}{\rho g} \right) + \left( \frac{C_0^2 - C_3^2}{2g} \right)$$

Caduta utile

1° PRINCIPIO:

$$\mathcal{L}_i = g(z_0 - z_3) + \left( \frac{p_0 - p_3}{\rho} \right) + \left( \frac{C_0^2 - C_3^2}{2} \right) - L_{um}$$

$$\mathcal{L}_i = g(H_0^0 - H_3^0) - L_{um}$$

$$\mathcal{L}_i = g H_u - L_{um}$$

$$\mathcal{L}_i = g \left( H_u - \frac{L_{um}}{g} \right) = g(H_u - H_w)$$

genericamente:

$$H^0 = z_i + \frac{p_i}{\rho g} + \frac{C_i^2}{2g}$$

Caduta totale

$$H_u = H_d - Y_c - \frac{C_3^2}{2g} = H_d - Y$$

[m] perdita nei condotti

[m] perdita energia cinetica alle scanie

[m] perdita totale esterne alla macchina

$H_w$  "perdite resistenze passive" → calore

### RENDIMENTO IDRAULICO:

$$\left\{ \begin{aligned} \eta_v &= \frac{H_u - H_w}{H_u} \approx 99\% \\ \eta_Y &= \frac{\mathcal{L}_i}{\mathcal{L}_i + L_{um}} \end{aligned} \right.$$



2

$\dot{m}$  = portata che attraversa la turbina

$\Delta \dot{m}$  = fughe, portata che non compie lavoro perché sfugge attraverso i giochi

Quindi:

$$\eta_v = \frac{\dot{m} - \Delta \dot{m}}{\dot{m}} \quad \text{RENDIM. VOLUMETRICO} \quad \sim 0,92$$

Perdite per gli organi accessori:

$$\eta_o = \frac{P_o}{P_i} \quad \text{RENDIM. ORGANICO} \quad \sim 0,98$$

Turbina	$n_c \frac{\text{giri}}{\text{min}}$	$(n_c)_{\text{w}}$
Pelton	5 ÷ 60	0,26 ÷ 0,31
Francis lenta	60 ÷ 100	0,31 ÷ 0,52
Francis normale	100 ÷ 200	0,52 ÷ 1,03
Francis veloce	200 ÷ 450	1,03 ÷ 2,3
Elza & Kaplan	450 ÷ 1000	2,3 ÷ 5,2

**POTENZA INTERNA:**

$$P_i = \eta_v \dot{m} L_i = \eta_v \dot{m} \eta_y g H_u$$

**LAVORO UTILE:**

$$L_u = \frac{P_u}{\dot{m}} = \frac{\eta_o P_i}{\dot{m}} = \frac{\eta_o \eta_v \eta_y \dot{m} g H_u}{\dot{m}} = \eta_o \eta_v \eta_y g H_u$$

↑ *accessori*    ↑ *fughe*    ↑ *calore*

$$\text{RENDIM. TOTALE} \quad \eta_t = \eta_o \eta_v \eta_y \quad \sim 0,85 \div 0,90$$

**SIMILITUDINE FLUIDODINAMICA**

$$\frac{C_1'}{C_2} = \sqrt{\frac{H_u'}{H_u}}$$

$$\frac{m'}{m} = \frac{D}{D'} \sqrt{\frac{H_u'}{H_u}}$$

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{C_1' D'^2}{C_2 D^2} = \frac{D'^2}{D^2} \sqrt{\frac{H_u'}{H_u}}$$

"SPECIFICO":

"CARATTERISTICO:" [CV]

$$m_s = \frac{m' D'}{\sqrt{H_u}} \quad [giri/min] \quad m_c = \frac{m' \sqrt{P_u'}}{(H_u)^{5/4}} \quad [giri/min]$$

$$Q_s = \frac{Q' \rightarrow [l/s]}{D'^2 \sqrt{H_u}} \quad [l/s] \quad w_c = \frac{w \sqrt{P_u}}{\sqrt{P'} (g H_u)^{5/4}} \quad [-]$$

$$\frac{P_o'}{P_o} = \frac{D'^2}{D^2} \left( \frac{H_u'}{H_u} \right)^{3/2}$$

$$\frac{m'}{m} = \left( \frac{P_o}{P_o'} \right)^{1/2} \left( \frac{H_u'}{H_u} \right)^{5/4}$$

(4)

$$C = \frac{P_i}{\omega} = \frac{\eta_v \dot{m} D}{2} C_1 \left(1 - \frac{\omega}{C_1}\right) (1 + \eta \cos \beta) = \dot{m} (\eta_1 C_{w1} - \eta_2 C_{w2})$$

$$P_i = \eta_v \dot{m} L_i \quad P_u = \eta_t \dot{m} g H_u = \eta_t i \left(\frac{\rho \pi d^2}{4}\right) \phi \sqrt{2} (g H_u)^{\frac{3}{2}}$$

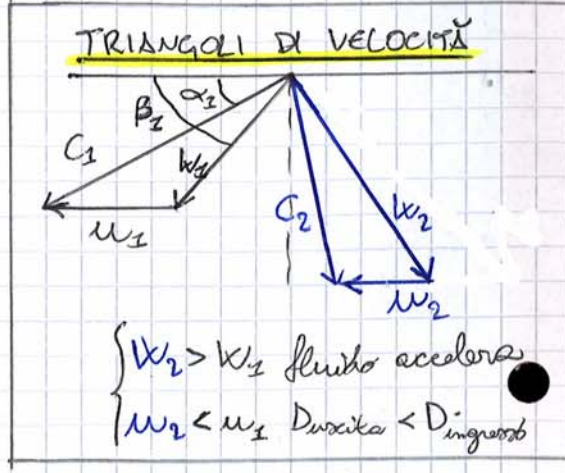
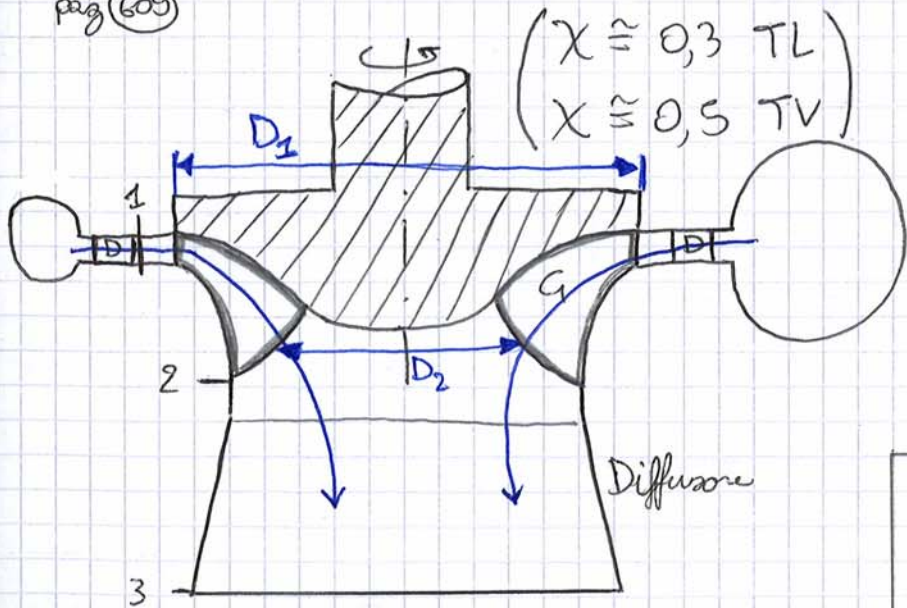
$$H_u^{MAX} = \frac{1}{2g \phi^2} \left(\frac{C_1}{\omega}\right)^2 \omega^2 \quad \leftarrow \text{MAX SALTO UTILIZZABILE}$$

$$\dot{m} = i \left(\frac{\rho \pi d^2}{4}\right) C_1 \quad \text{PORTATA uscente dal getto}$$

$$m_c \propto \frac{\omega}{C_1} \sqrt{\eta_t} \frac{d}{D} \sqrt{i} \propto \frac{d}{D} \sqrt{i} \quad \text{N° GIRI CARATTERISTICO}$$

**TURBINA FRANCIS** ( $X \neq 0$ ) ( $H_d = \text{qualche da m}$ )

pag (609)



$$(z_2 - z_3)_{MAX} = 10,33 \text{ m} \quad (p_a = 1 \text{ atm})$$

$$L_i = g H_u - (L_{w,d} + L_{w,g} + L_{w,df})$$

6

$$f_g = \frac{1}{T} = \frac{z_1 \omega}{2\pi}$$

FREQUENZA OSCILLAZIONI VEL. ASSOLUTA FLUIDO DALLA GIRANTE

$$f_D = \frac{1}{T} = \frac{z_2 \omega}{2\pi}$$

FREQUENZA OSCILLAZIONI VEL. ASSOLUTA FLUIDO DAL DISTRIBUTORE

$$f = \frac{1}{T} = \frac{m\omega}{2\pi}$$

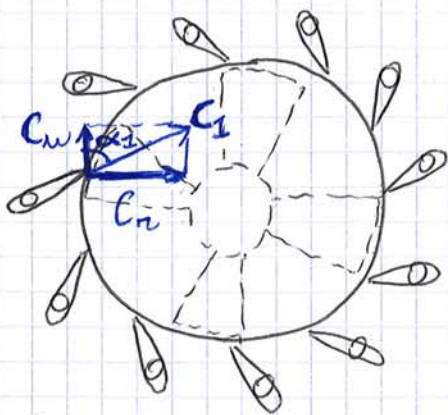
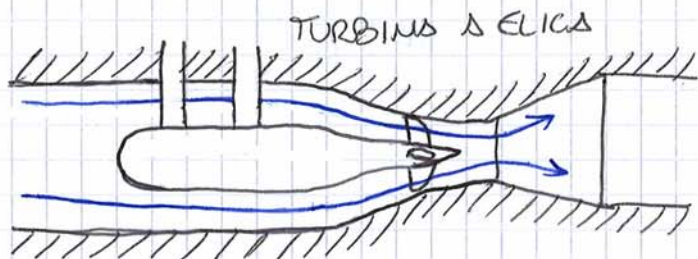
FREQUENZA OSCILLAZIONI VEL. ASSOLUTA FLUIDO RISULTANTE

(m = minimo comune multiplo tra z1 e z2.)

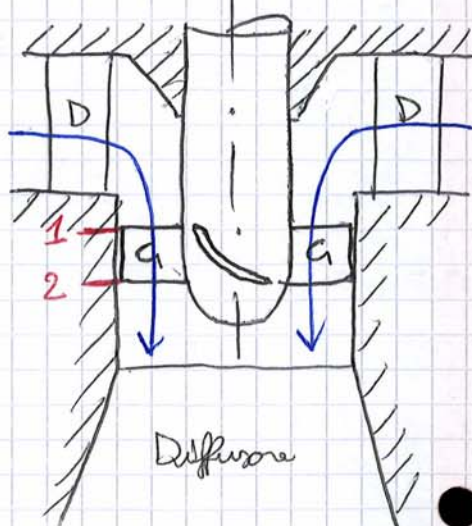
TURBINA KAPLAN E ELICA (X = ?) (Hd: piccola caduta 2-25m)

pag 620

GRUPPO A BULBO



TURBINA KAPLAN

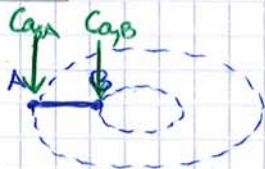


- ☒ ☒ ☒ ☒ ☒ ☒ ☒ ☒ ☒
- ☒ Per vedere tutti i tipi di ☒
- ☒ turbine Kaplan (a razione con ☒
- ☒ camera a spirale "aspirata"...) ☒
- ☒ vai a pag 627 ☒
- ☒ ☒ ☒ ☒ ☒ ☒ ☒ ☒ ☒

OCCHIO!:

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega$$

$$C_{\alpha, A} = C_{\alpha, B}$$



8

$$2\pi r_1 \cdot B \cdot c_1 \tan \alpha_1 = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2) \cdot c_{a1} \quad \text{EQUAZ. CONTINUITÀ DELLA PORTATA}$$

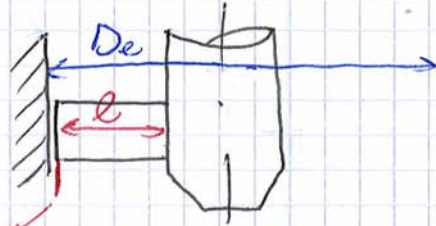
alla data distanza dall'asse di rotazione

$$\tan \alpha_1 = 4 \frac{B}{D_e} \frac{D}{D_e} \cdot \frac{\tan \alpha_1'}{1 - \left(\frac{D_i}{D_e}\right)^2} \quad \text{TROVO } \alpha_1(r)$$

$$\eta_y = \frac{u_2 C_{u2} - u_1 C_{u1}}{gH_u} \approx \frac{u_2 C_{u2}}{gH_u} \quad \text{RENDIM. IDRAULICO} = \frac{L_i}{gH_u}$$

$$K = \frac{u_1}{\sqrt{2gH_u}} \quad \text{COEFF. DI VELOCITÀ PERIFERICA}$$

$$m = \int \pi l (D_e - l) \rho c_1 \tan \alpha_2$$



$(c_1 \tan \alpha_1)$  in punta ala

$$m_c \propto \sqrt{k \frac{l}{D_e} \left(1 - \frac{l}{D_e}\right) \tan \alpha_1} \quad \text{N° GIRI CARATTERISTICO} \rightarrow \alpha_2 \text{ in punta ala}$$

**CAVITAZIONE**

$$\Delta p \leq p_2 - p_v \quad p_v = \text{pressione di vapore}$$

$$z_s = z_2 - z_3 \leq \frac{p_a - p_v}{\rho g} - \frac{c_2^2}{2g} + \frac{L_{w,df}}{g} - \frac{\Delta p}{\rho g}$$

$$z_s \leq \frac{p_a - p_v}{\rho g} - h_o + Y_{df}$$

con:

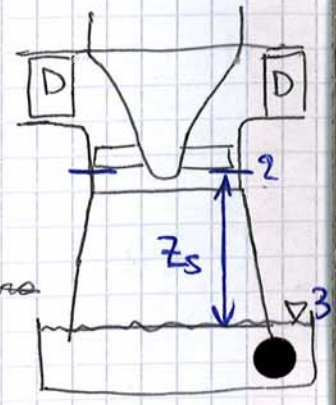
$$h_o = \frac{c_2^2}{2g} + \frac{\Delta p}{\rho g}$$

$$z_s \leq \frac{p_a - p_v}{\rho g} - \sigma H_u + Y_{df}$$

$$Y_{df} = \frac{L_{w,df}}{g}$$

$$\sigma = \frac{h_o}{H_u} \quad \text{oppure} \quad \log \sigma = 1,67 \log(m_c) - 10,76$$

$\frac{[m]}{[m]} = [-]$



MAX alterna

Per Circuito CHIUSO:

$$L_i = g Y_c + L_{ep} \quad H_u = Y_c$$

**RENDIMENTO IDRAULICO**

$$\eta_Y = \frac{L_i - L_{ep}}{L_i} = \frac{g H_u}{L_i}$$

**POTENZA INDICATA**

$$P_i = (\dot{m} + \Delta \dot{m}) \cdot L_i$$

$$P_i = \frac{1}{\eta_Y \eta_V} \rho Q g H_u$$

**POTENZA ASSORBITA**

$$P_a = \frac{P_i}{\eta_0} = \frac{1}{\eta_0 \eta_Y \eta_V} \rho Q g H_u$$

$$P_a = \frac{1}{\eta_p} \rho Q g H_u$$

**RENDIMENTO TOTALE**

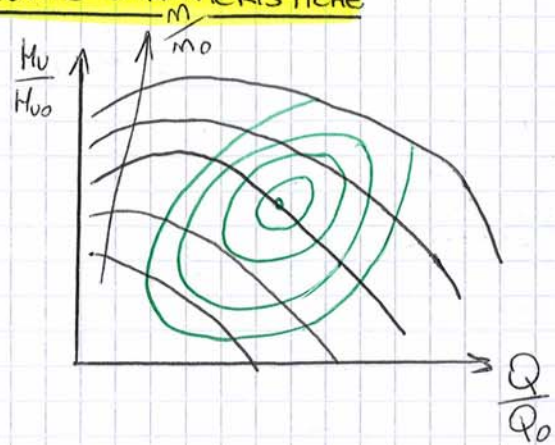
$$\eta_p = \eta_0 \eta_Y \eta_V \approx 0,9$$

**GRADO DI REAZIONE**

$$\chi = \frac{(w_1'^2 - w_1''^2) - (u_1'^2 - u_1''^2)}{2 g H_u}$$

1 epici ' = ingresso girante  
2 epici '' = uscita girante

**CURVE CARATTERISTICHE**



**N° GIRI CARATTERISTICO**

$$m_c = \frac{m \sqrt{P_a}}{H_u^{5/4}}$$

[giri/min]

$$m_c \approx 3,65 \frac{m \sqrt{Q}}{H_u^{3/4}}$$

[giri/min]

$$\omega_c = (m_c)_a = \frac{\omega \sqrt{P_a}}{\sqrt{g} (g H_u)^{3/4}}$$

[-]

$m \rightarrow$  giri/min  
 $P_a \rightarrow$  CV!  
 $H_u \rightarrow$  m  
 $Q \rightarrow$  l/s

Supposto a  $\eta_Y$  MAX

$$\psi = \frac{L_i}{u''/2} \quad \varphi = \frac{L_{wp}}{u''/2} \quad \phi = \frac{W_n''}{u''}$$

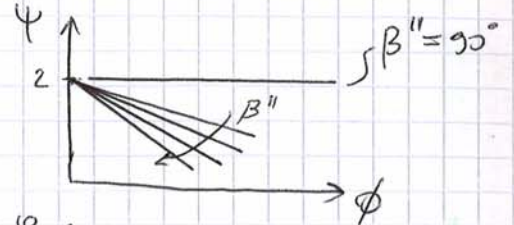
COEFF. DI PRESSIONE (o LAVORO)      COEFF. DI PERDITA      COEFF. DI PORTATA

← Sempre validi.

(12)

$$\psi = 2 [1 + \phi \cotg \beta'']$$

$$\cotg \beta'' = \frac{1}{\tg \beta''}$$

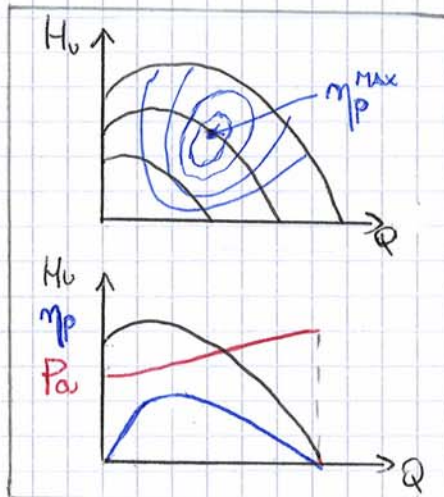


$$\eta_y = \frac{L_i - L_{wp}}{L_i} = \frac{\psi - \varphi}{\psi}$$



$$H_u = \frac{L_i - L_{wp}}{g} = \dots = \frac{u''^2}{2g} (\psi - \varphi) \propto (\psi - \varphi) m^2$$

$$Q \propto \phi m$$



PUNTO DI FUNZIONAMENTO

$$H_g = g(z_b - z_a)$$

$$Y_c \propto Q^2$$

$$L_i = g H_u - L_{wp}$$

$$L_i = g H_e - L_{wp}$$

$$L_i = g (H_g + Y_c) - L_{wp}$$



$$H_e = H_g + Y_c$$

$$H_u = H_e$$

$$K = \frac{u''}{\sqrt{2g H_u}}$$

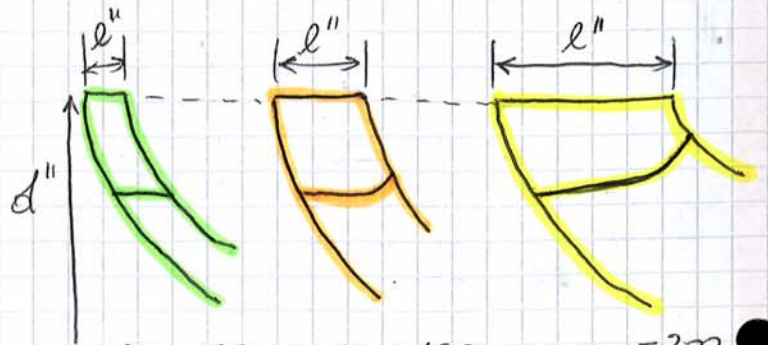
COEFF. DI VELOCITÀ PERIFERICA

$$\sim (0,83 \div 1,56)$$

$$m_c \propto \sqrt{K \frac{l''}{d''} \tg \alpha''}$$

$$(60 \leq m_c \leq 350)$$

$$\frac{l''}{d''} = (0,04 \div 0,25)$$



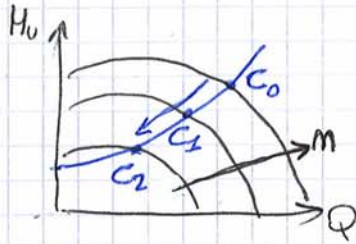
$m_c = 70$   
lenta

$m_c = 150$   
normale

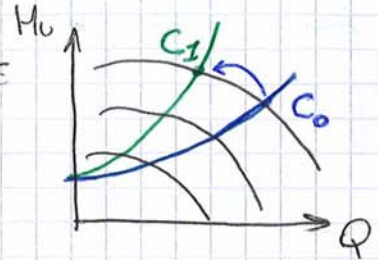
$m_c = 300$   
veloce

REGOLAZIONE

1) RIDUZIONE DI  $m$



2) LAMINAZIONE ALLA MANDATA



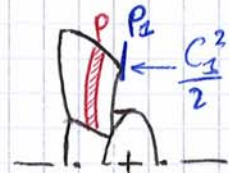
CAVITAZIONE

$$\Delta p = p_2 - p = \lambda \rho \frac{W^2}{2}$$

$p_v$  = pressione di vapore saturato ad una data temperatura

$$p_1 - \Delta p > p_v$$

coeff. dato dal costruttore



$$h_0 = \frac{\lambda W^2}{2g} + \frac{C_1^2}{2g}$$

$$h_0 = \frac{\Delta p}{\rho g} + \frac{C_1^2}{2g}$$

$h_0$  = altezza necessaria per accelerare il fluido sino alla vel.  $C_1$  e per farlo accelerare ulteriormente dal punto d'ingresso della girante al punto di pressione minima.

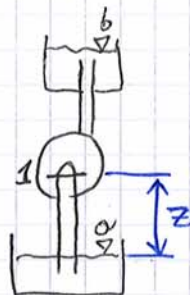
$$NPSH = \frac{p_1 - p_v}{\rho g} + \frac{C_1^2}{2g}$$

NET POSITIVE SUCTION HEAD. = la  $p^0 (p + \frac{C^2}{2})$  sopra al valore  $p_v$  che occorre garantire alla bocca di aspirazione per evitare la cavitazione nella macchina

$$NPSH > h_0$$

$$NPSH_{MIN} = h_0$$

$$Z = Z_1 - Z_a < \frac{p_a - p_v}{\rho g} - h_0 - Y_c$$



da cui

$$h_0 = \frac{p_a - p_v}{\rho g} - (Z_1^{MAX} - Z_a) - Y_c$$

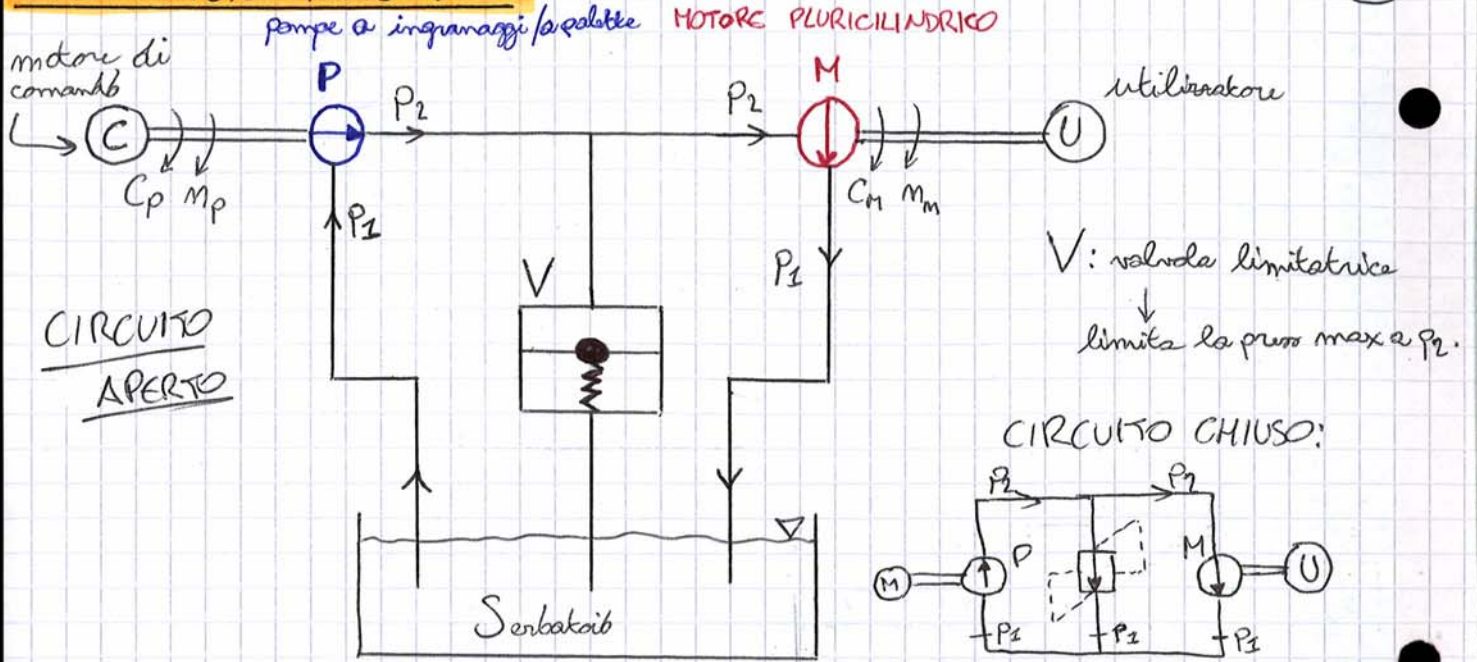
Se CIRCUITO CHIUSO

$$\frac{p_2}{\rho g} - \frac{\lambda W^2}{2g} > \frac{p_v}{\rho g}$$

$$\frac{p_1 - p_v}{\rho g} + \frac{C_1^2}{2g} > \frac{C_1^2}{2g} + \frac{\lambda W^2}{2g}$$

$$\frac{p_1^0 - p_v}{\rho g} > h_0$$

**TRASMISSIONI IDROSTATICHE** pag 669



- Si trascurano le perdite di carico nei condotti e la differenza di quota.
- FUNZIONANO CON LA SOLA PRESSIONE STATICA

$V_p$ : cilindrata della pompa  
 $m_p$ : giri/min della pompa  
 $\eta_{yp}$ : rendim. idraulico della pompa  
 $\eta_{mp}$ : rendim. meccanico della pompa  
 $\eta_{vp}$ : rendim. volumetrico della pompa

$V_m$ : cilindrata del motore  
 $m_m$ : giri/min del motore  
 $\eta_{ym}$ : rend. idraulico del motore  
 $\eta_{mm}$ : rend. meccanico del motore  
 $\eta_{vm}$ : rend. Volumetrico del motore

$P_2 \sim 100 \text{ ata}$  (1 ata = 0,98 bar)

$$P_p = \frac{V_p \cdot m_p \cdot (P_2 - P_1)}{\eta_{mp} \cdot \eta_{yp}}$$

$$C_p = \frac{V_p \cdot (P_2 - P_1)}{2\pi \cdot \eta_{mp} \cdot \eta_{yp}}$$

$$Q_p = \eta_{vp} \cdot V_p \cdot m_p \cdot \rho$$

**POTENZA ASSORBITA**  
 DALLA POMPA

**COPPIA ASSORBITA**  
 DALLA POMPA

**PORTATA MASSICA**  
 DALLA POMPA

$$Q_p = \eta_{vp} \cdot V_p \cdot m_p$$



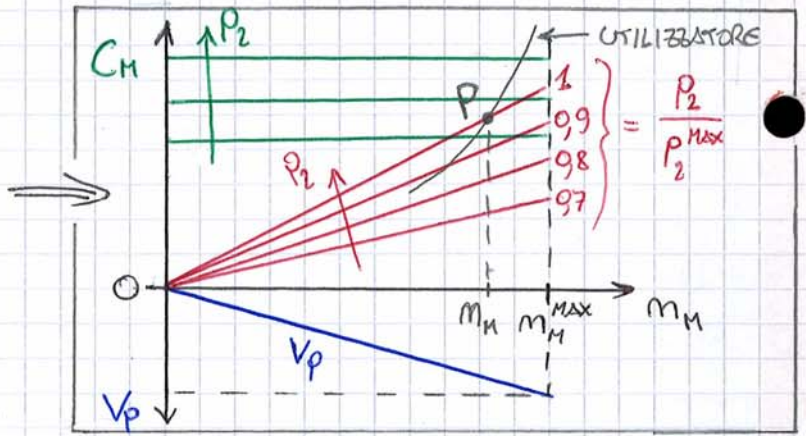
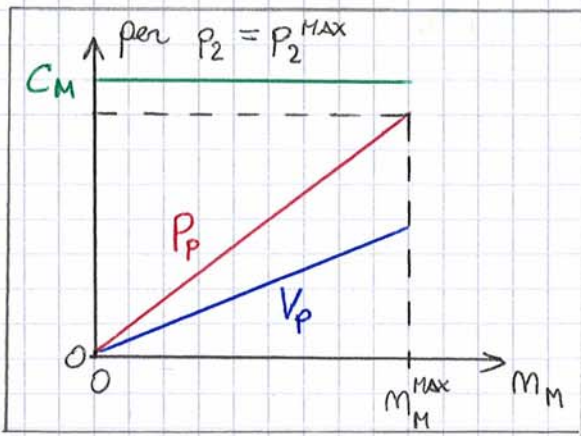
REGOLAZIONE con  $m_p = \text{COST}$  sempre

1)  $V_p$  VARIA,  $V_M = \text{COST}$

$m_M \sim V_p \rightarrow m_M$  cresce al crescere di  $V_p$

$C_M \sim (p_2 - p_1) \rightarrow C_M = \text{COST}$  varia solo se varia  $p_2$

$P_p \sim V_p (p_2 - p_1) \sim m_M (p_2 - p_1) \rightarrow P_p$  cresce al crescere di  $V_p$  e/o di  $p_2$

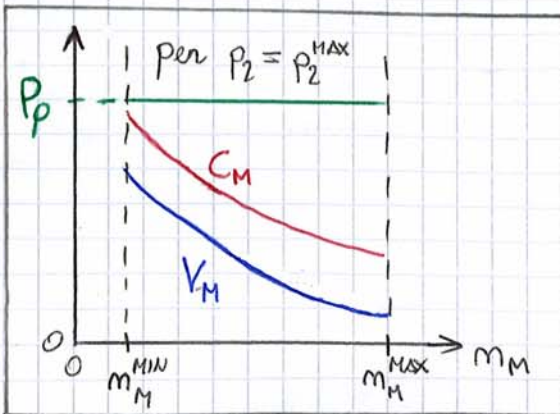


2)  $V_p = \text{COST}$ ,  $V_M$  VARIA

$m_M \sim \frac{1}{V_M} \rightarrow m_M$  cresce al diminuire di  $V_M$

$C_M \sim V_M (p_2 - p_1) \sim \frac{p_2 - p_1}{m_M} \rightarrow C_M$  cresce al crescere di  $V_M$  e/o di  $p_2$

$P_p \sim (p_2 - p_1) \rightarrow P_p = \text{COST}$  varia solo se varia  $p_2$



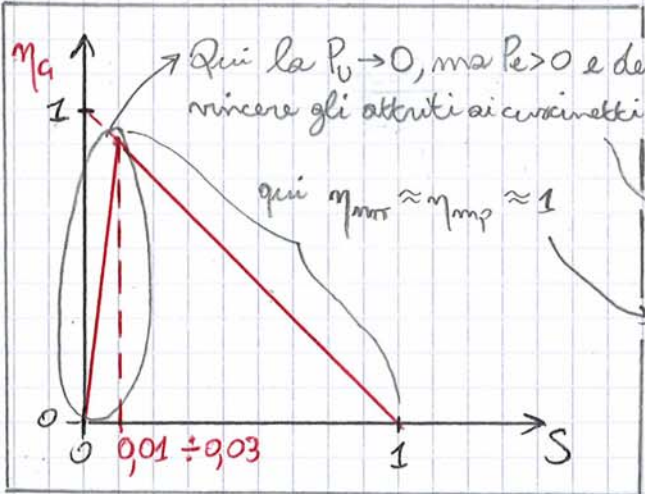
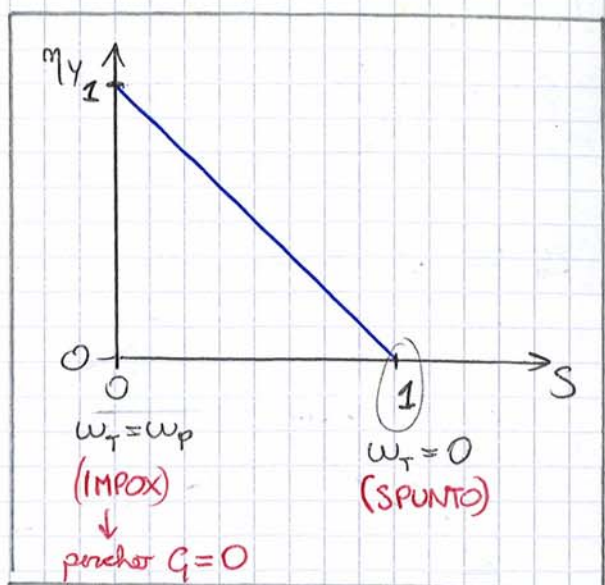
$\Rightarrow$  al variare di  $p_2$  si ha un fascio di curve

$$\eta_y = \frac{P_T}{P_p} = \frac{(C_T / \omega_T)^{1.5}}{(C_p / \omega_p)^{1.5}} = 1 - S$$

RENDIM. IDRULICO

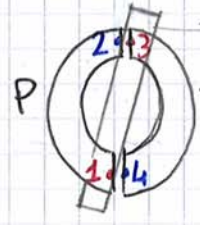
$$\eta_g = \frac{P_0}{P_e} = \eta_{mt} \eta_y \eta_{mp}$$

RENDIMENTO DEL GIUNTO



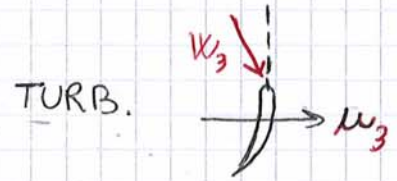
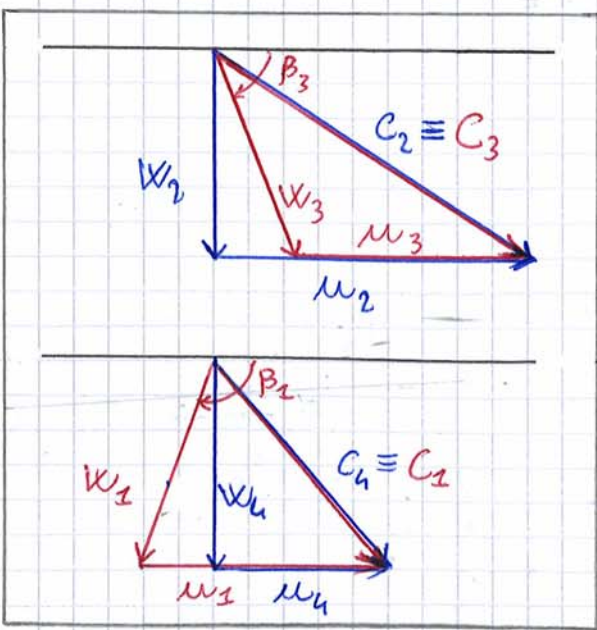
TRIANGOLI DI VELOCITÀ

- pale puramente radiali
- $\omega_T < \omega_P$  (cioè  $u_T < u_P$ )
- $C_2 \equiv C_3$

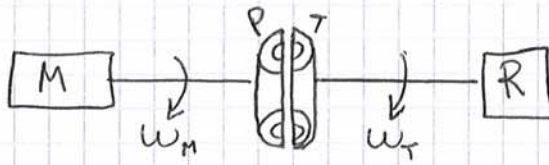


gli angoli  $\beta_1$  e  $\beta_3$  non corrispondono con gli angoli geometrici delle pale (cioè  $90^\circ$ )

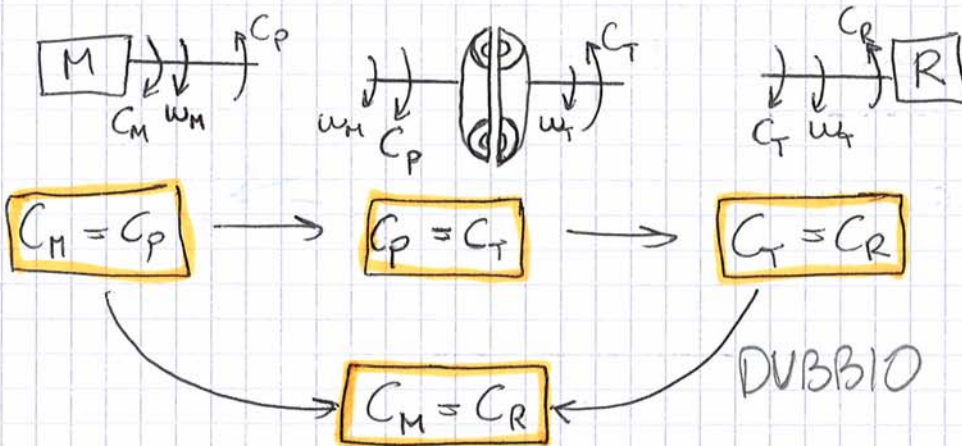
ciò implica PERDITE PER URTE



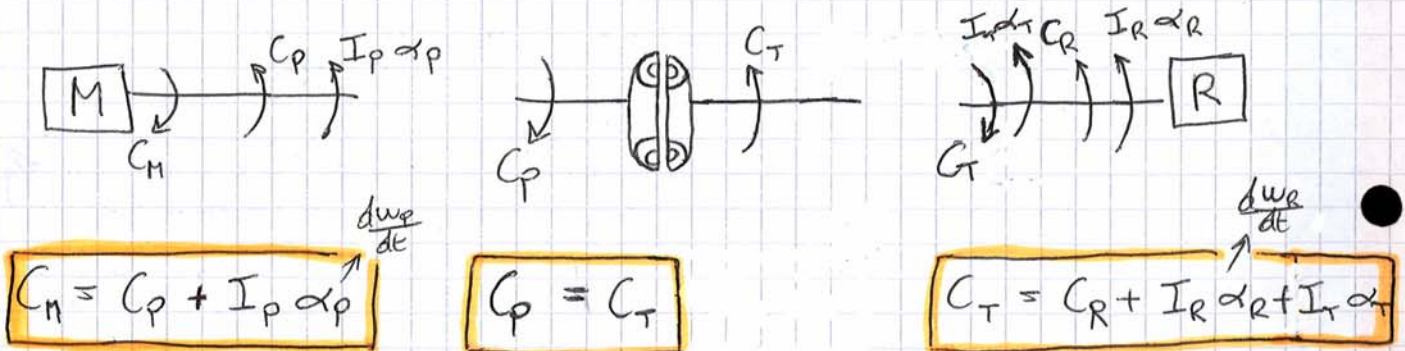
ACCOUPLAMENTO MOTORE A COMB. INTERNA - GIUNTO



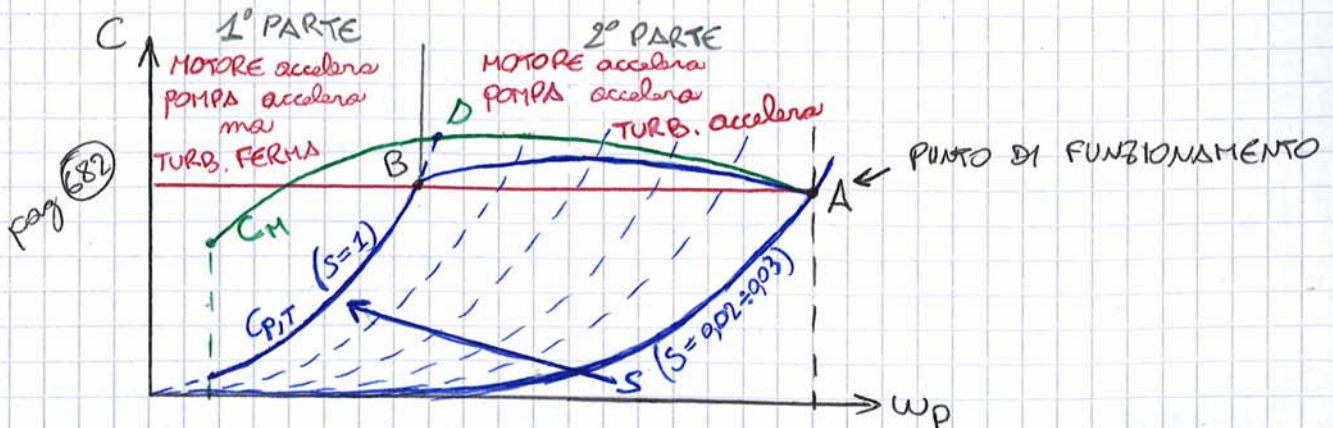
EQ. STAZIONARIO: (a regime)



EQ. DINAMICO: (transitorio in accelerazione)



$C_M = C_R + I_P \alpha_P + I_R \alpha_R + I_T \alpha_T$  ← GIUSTO?



**COPPIA ESERCITATA DALLA POMPA SUL FLUIDO**

OPERATRICE (24)

$$C_p = G(\rho_2 C_{u2} - \rho_1 C_{u1}) = G(\rho_2 u_2 - \rho_1 C_G \cos(\alpha_G)) =$$

$$= G \rho_2 u_2 \left(1 - \varphi \frac{C_G}{u_2} \cdot \cotg(\alpha_G)\right)$$

**COPPIA ESERCITATA DAL FLUIDO SULLA TURBINA**

MOTRICE

$$C_T = G(\rho_3 C_{u3} - \rho_4 C_{u4}) = G[\rho_2 u_2 - \rho_1 (W_4 \cos(\beta_4) - u_4)] =$$

$$= G \rho_2 u_2 \left[1 - \varphi \left(\frac{C_G}{u_2} \cdot \cotg(\beta_4) + \varphi v\right)\right]$$

**COPPIA ESERCITATA DAL FLUIDO SULLO STATORE**

MOTRICE

$$C_S = G(\rho_5 C_{u5} - \rho_6 C_{u6}) = G \rho_1 (C_{u4} - C_{u2}) =$$

$$= G \rho_2 u_2 \varphi \left[ \left(\frac{C_G}{u_2} \cdot \cotg(\beta_4) + \varphi v\right) - \frac{C_G}{u_2} \cotg(\alpha_G) \right]$$

$$\varphi = \frac{C_G}{u_2} = \frac{W_2}{u_2}$$

COEFF. DI PORTATA riferito alla sez. 2.

$$C_p = \varphi \rho A_2 \rho_2^3 \omega_p^2 (1 - \varphi \cotg(\alpha_G))$$

$$C_T = \varphi \rho A_2 \rho_2^3 \omega_p^2 (1 - \varphi \cotg(\beta_4) - \varphi^2 v)$$

$$C_S = \varphi \rho A_2 \rho_2^3 \omega_p^2 \varphi \left[ \varphi (\cotg \beta_4 - \cotg \alpha_G) + v \right]$$

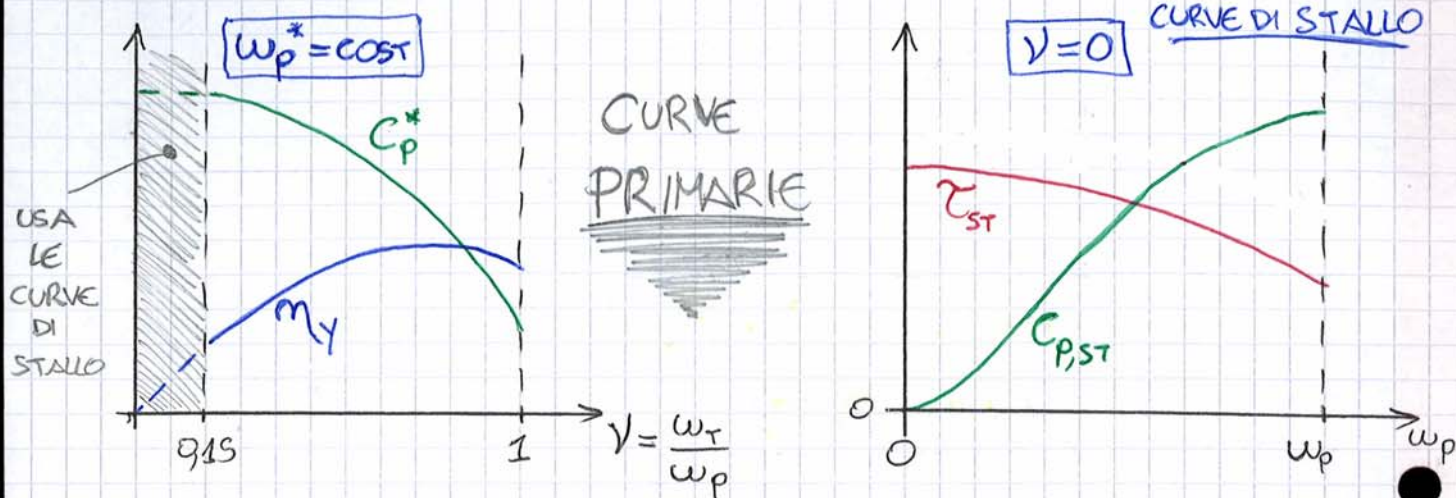
**COPPIE**

Coppie dipendono da:

- dimensioni geometriche
- $\omega_p^2$
- $v$

ACCOPPIAMENTO MOTORE A COMB. INTERNA - CONV. DI COPPIA

STALLO: pompe che girano, turbine ferme ( $\omega_T = 0$ )



VALGONO:

$$\frac{C_p}{\omega_p^2} = \frac{C_p^*}{\omega_p^{*2}} \longrightarrow C_p = C_p^* \left( \frac{\omega_p}{\omega_p^*} \right)^2$$

$$\frac{C_M}{\omega_M^2} = \frac{C_M^*}{\omega_M^{*2}} \longrightarrow C_M = C_M^* \left( \frac{\omega_M}{\omega_M^*} \right)^2$$

Esempio:

$$\begin{cases} C_p = C_M & \text{eq. STATICO} \\ C_p^* = C_M^* & \text{eq. STATICO} \end{cases}$$

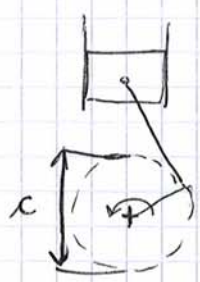
da cui

$$\underbrace{C_p^* \left( \frac{\omega_p}{\omega_p^*} \right)^2}_{C_p} = \underbrace{C_M^* \left( \frac{\omega_M}{\omega_M^*} \right)^2}_{C_M}$$

$$\underbrace{C_p \left( \frac{\omega_p^*}{\omega_p} \right)^2}_{C_p^*} = \underbrace{C_M \left( \frac{\omega_M^*}{\omega_M} \right)^2}_{C_M}$$

# POMPE VOLUMETRICHE pag (698)

$$\left\{ \begin{aligned} \eta_v &= 0,85 \div 0,97 \\ \eta_m &= 0,88 \div 0,95 \\ \eta_v &= 0,90 \div 0,98 \end{aligned} \right.$$



$V_0 = \text{Cilindrata } [m^3]$   
 $c = \text{corsa dello stantuffo } [m]$   
 $m_c = m^\circ \text{ ciclo / ro}$

$m_c \equiv m$  se SINGOLO EFFETTO

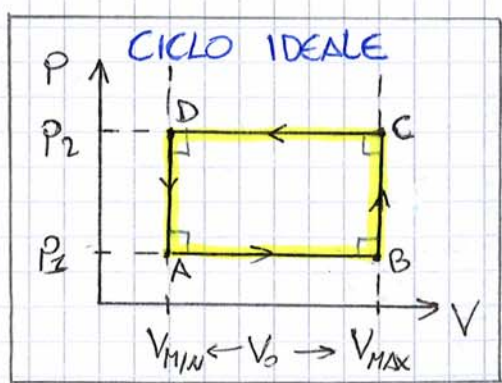
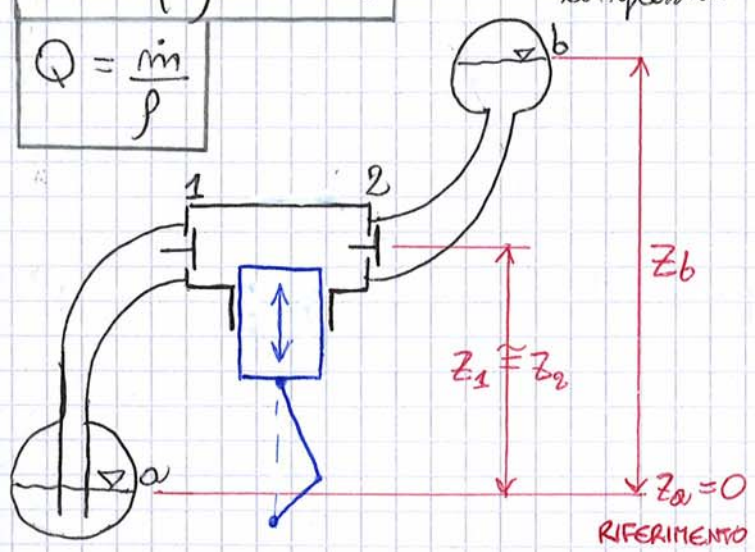
SINGOLO EFFETTO  
 1 giro  $\rightarrow$  1 aspirazione e 1 mandata  
 DOPPIO EFFETTO  
 1 giro  $\rightarrow$  2 aspirazioni e 2 mandate

$u_m = 2 c m_c$  VEL. MEDIA STANTUFFO

$\dot{m} = \eta_v \rho V_0 m_c$   
 $\dot{m} = \eta_v \rho i V_0 m_c$   
 $Q = \frac{\dot{m}}{\rho}$

PORTATA  
 se ti dà la cilindrata complessiva

POMPE	$u_m$ [m/ro]
lente	0,3 ÷ 0,8
medie	0,8 ÷ 1,2
veloci	1,2 ÷ 2,4



$p_3 = p_2 - \rho g z_1$   
 $p_2 = p_b + \rho g (z_b - z_2)$

$\Sigma_{sid} = V_0 (p_2 - p_3) = V_0 (p_b - p_a + \rho g z_b)$

$P_{ass, sid} = \frac{\Sigma_{sid} m_c}{\eta_m} = \frac{V_0 (p_b - p_a + \rho g z_b) \cdot m_c}{\eta_m}$

$V_0 = \text{cilindrata}$   
 $V_f = \text{Volume d'acqua fornito (conosciuto) dalla corsa d'aria}$

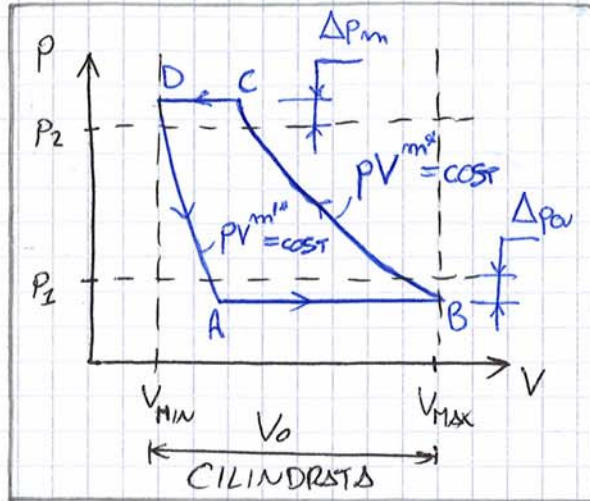
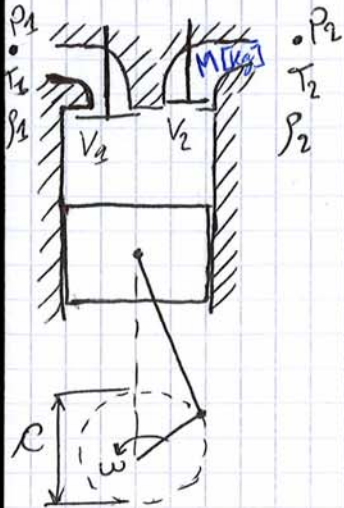
## GRADO DI IRREGOLARITÀ (J)

$J = \frac{V_f}{V_0}$

**COMPRESSORI ALTERNATIVI** pag. (722)

**A STAMPUFFO**

(30)



CICLO INDICATO

per  $\beta \geq 20$   
 $Q \leq 50 \text{ m}^3/\text{ro}$

$\eta_p$  = coeff. di perdita per fughe di gas verso l'esterno  
 $\eta_r$  = coeff. calore che il gas riceve dalle pareti (<1)

$V_0 = V_{MAX} - V_{MIN}$  CILINDRATA

$\mu = \frac{V_{MIN}}{V_0}$  GRADO DI SPAZIO MORTO

$\delta_1 = \frac{\Delta p_2}{P_1}$        $\delta_2 = \frac{\Delta p_m}{P_2}$

$\beta = \frac{P_2}{P_1}$        $\beta_i = \frac{P_c}{P_B} = \frac{P_D}{P_A} = \frac{P_2}{P_1} \frac{1+\delta_2}{1-\delta_1} = \beta \frac{1+\delta_2}{1-\delta_1}$  (INDICATO)

Se ADIABATICA  $m = k$   
 Se ADIAB. e NO FUGHE  
 $m^{i*} \neq m^* = m = k$

**LAVORO CICLO** (INDICATO)

TUTTO (le perdite) COMPRESO

$L_c = \int_B^C V dp - \int_A^D V dp$

$$L_c = \frac{m^*}{m^*-1} P_B V_B \left( \beta_i^{\frac{m^*-1}{m^*}} - 1 \right) - \frac{m^{i*}}{m^{i*}-1} P_A V_A \left( \beta_i^{\frac{m^{i*}-1}{m^{i*}}} - 1 \right)$$

$$= \frac{m^*}{m^*-1} P_2 (1-\delta_1) (1+\mu) V_0 \left( \beta_i^{\frac{m^*-1}{m^*}} - 1 \right) - \frac{m^{i*}}{m^{i*}-1} P_2 (1+\delta_2) \mu V_0 \left( 1 - \frac{1}{\beta_i^{\frac{m^{i*}-1}{m^{i*}}}} \right)$$

**POTENZA ASSORBITA**

$P_{ass} = \frac{L_c}{\eta_m} \cdot n$  →  $n$  [giri/ro]

**LAVORO AD UNITÀ DI MASSA MANDATA**

FOUNDALENTALE

$$L_i = \frac{L_c}{M}$$

$$L_i = \frac{\frac{m^*}{m^{*+1}-1} p_B V_B \left( \beta_i^{\frac{m^*-1}{m^*}} - 1 \right) - \frac{m^*}{m^{*+1}-1} p_A V_A \left( \beta_i^{\frac{m^*-1}{m^*}} - 1 \right)}{\lambda_v V_0 \rho_1}$$

$$L_i = \frac{\eta_m P_{\text{ass}}}{\dot{m}} = \frac{P_i}{\dot{m}}$$

$$L_i = \int_1^2 v dp = \frac{\bar{m}}{\bar{m}-1} R T_1 \left( \beta^{\frac{\bar{m}-1}{\bar{m}}} - 1 \right)$$

IPOTESI:

$$L_{uc} = 0$$

$$\bar{m} = \frac{m^* + m^{*+1}}{2} \text{ (valor mediu)}$$

$$\eta_\phi = 1 \text{ (fughe trascurabili)}$$

**Se  $\beta < 4$**   
 **$\bar{m} \cong k$**

**1° CASO LIMITE**

IPOTESI

$$\mu = 0 \rightarrow V_{MIN} = 0$$

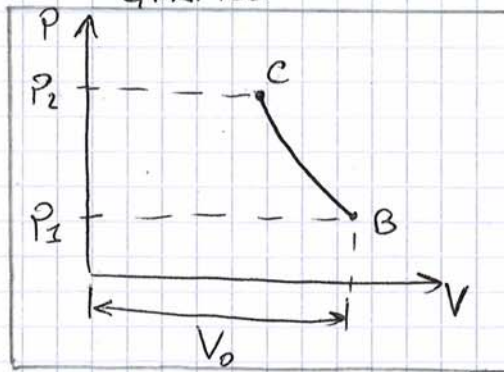
$\eta_\tau = 1$  no calore scambiato con le pareti

$\eta_\phi = 1$  no fughe  $\rightarrow m^* = m$

$d_1 = d_2 = 0$  no laminazioni dalle valvole

$$\lambda_v = 1$$

GRAFICO



$$L_c = \frac{m}{m-1} p_1 V_0 \left( \beta^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right)$$

$$M = \frac{p_1}{R T_1} V_0 \text{ mandata [kg]}$$

$$L_i = \frac{L_c}{M} = \frac{m}{m-1} R T_1 \left( \beta^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right)$$



**RENDIMENTO ISOENTROPICO**

$$\eta_{c, is} = \frac{L_{i, is}}{L_i} \rightarrow L_{i, is} = \frac{k}{k-1} RT_1 \left( \beta^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)$$

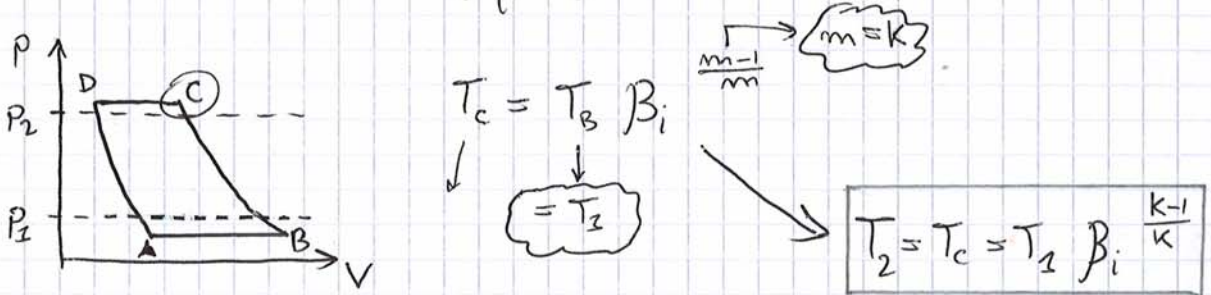
$$L_i = \frac{Q_c}{M} \text{ a seconda del caso limite}$$

**RENDIMENTO COMPRESSORE**

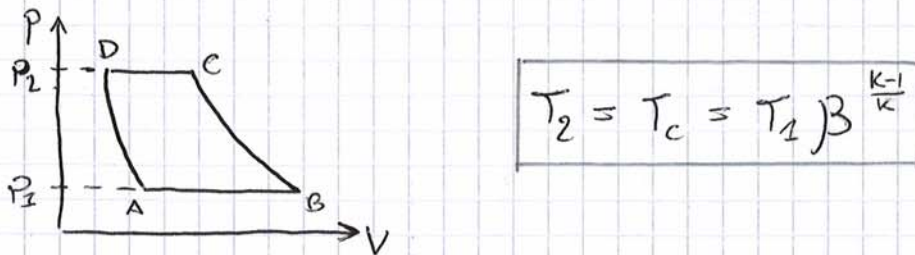
$$\eta_c = \eta_{c, is} \cdot \eta_m \text{ oppure } \eta_m \rightarrow \eta_0 \text{ se ci sono organi ausiliari}$$

**CALCOLO  $T_2$  DI MANDATA**

2) **MACCHINA ADIABATICA** ( $\eta_T = 1$ ) no scambio di calore con le pareti



Oppure se si trascurano le laminazioni ( $d_1 = d_2 = 0$ ):



b) **ASSENZA DI FUGHE**  $\eta_\phi = 1 \rightarrow m^* = m$

$$L_i = C_p (T_2 - T_1) + Q = 2 [5] \text{ in 1 ciclo}$$

$$Q_c = M L_i = M C_p (T_2 - T_1) + Q M$$

$$P_{comp} = \frac{P_i}{\eta_m} = \min L_i$$

$$= \min C_p (T_2 - T_1) + \min Q$$

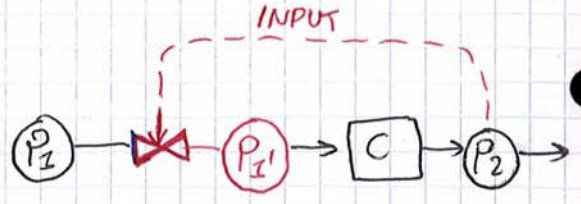
$$= \min C_p (T_2 - T_1) + \dot{Q}$$

$Q [J/kg] =$  calore complessivamente sottratto all'unità di massa (mandata!) nelle fasi di aspirazione, compressione e mandata in 1 ciclo

Ricavo  $T_2 = \dots$

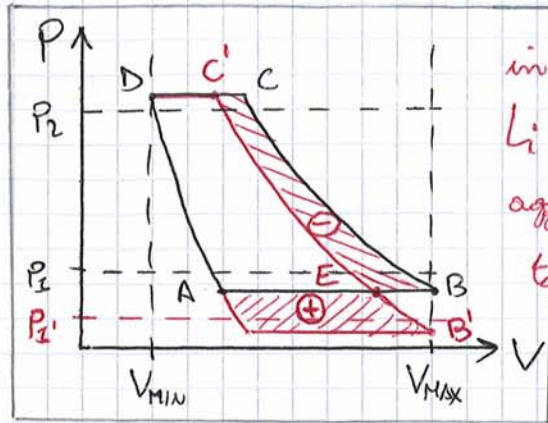
→ **LAMINAZIONE ALL'ASPIRAZIONE**

INSALTERATO:  $\eta_m$  (ipodisante)



$$\frac{\dot{m}'}{\dot{m}} = \frac{\lambda_v'}{\lambda_v} \frac{P_2'}{P_2}$$

$$\frac{P_{arr}'}{P_{arr}} = \frac{A'B'C'D}{ABCD}$$



in trapeggio  
 Li che devo  
 aggiungere (+) e  
 togliere (-)

→ Se  $\beta > \beta_d$ :  $\Rightarrow P_2 \downarrow$  anche  $P_{arr}' \downarrow$   
 Se  $\beta < \beta_d$ :  $\Rightarrow P_2 \downarrow$  la  $P_{arr}' \uparrow$

$\beta_d$ : discriminante  
 = 3 per 1° e 2° caso limite

$$\frac{L_i'}{L_i} = \frac{P_{arr}'}{P_{arr}} \cdot \frac{\dot{m}}{\dot{m}'} = \frac{P_{arr}'}{P_{arr}} \frac{\lambda_v}{\lambda_v'} \frac{P_2}{P_2'}$$

$$\frac{L_i'}{L_i} = \frac{\eta_{c,is}}{\eta_{c,is}'}$$

Nel 2° caso limite,  $L_i'$  aumenta e anche  $T_2'$  aumenta:

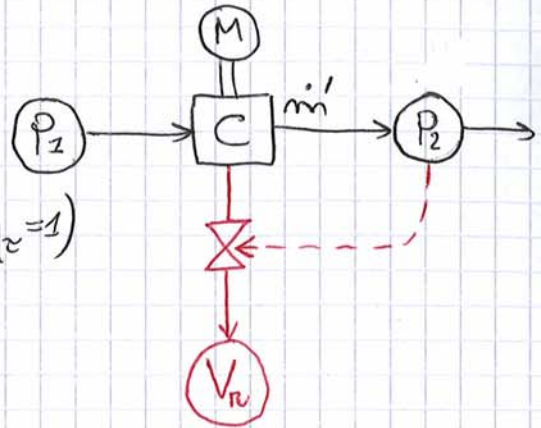
$$\frac{L_i'}{L_i} = \frac{\left(\frac{P_2}{P_2'}\right)^{\frac{m-1}{m}} - 1}{\left(\frac{P_2}{P_2}\right)^{\frac{m-1}{m}} - 1}$$

$$\frac{T_2'}{T_2} = \left(\frac{P_2}{P_2'}\right)^{\frac{m-1}{m}}$$

→ ADDIZIONI DI CAPACITÀ SUPPLEMENTARI ALLO SPAZIO MORTO

INVARIATI:  $L_i, \eta_c$

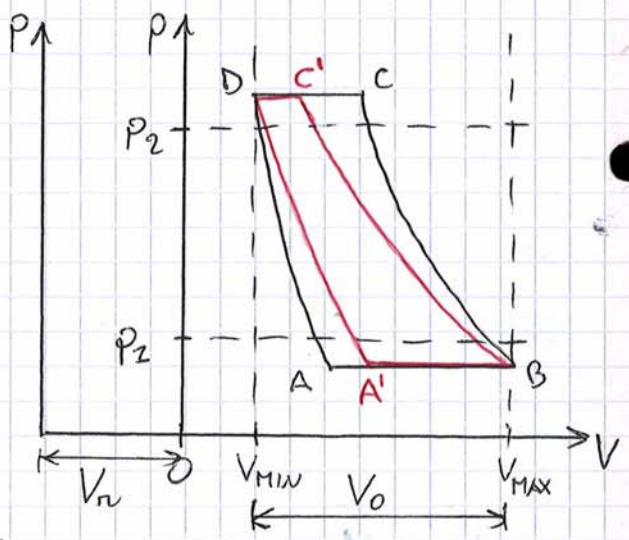
- trascurò le fughe ( $\eta_p = 1$ )
- " scambi termici durante l'espansione ( $\eta_r = 1$ )



$$\frac{\lambda'_v}{\lambda_v} = \frac{V_B - V_{A'}}{V_B - V_A} = \frac{1 + \mu_n - \mu_n (\beta_i)^{\frac{1}{m'^*}}}{1 + \mu - \mu (\beta_i)^{\frac{1}{m'^*}}}$$

in cui:

$$\mu_n = \frac{\mu V_0 + V_n}{V_0} = \mu + \frac{V_n}{V_0}$$



- Se trascurò anche le perdite dovute allo spazio morto allora  $m'^* = m$ :

$$\frac{\lambda'_v}{\lambda_v} = \frac{1 + \mu + \frac{V_n}{V_0} - \left(\mu + \frac{V_n}{V_0}\right) \beta_i^{\frac{1}{m}}}{1 + \mu - \mu \beta_i^{\frac{1}{m}}}$$

$$\frac{\dot{m}'}{\dot{m}} = \frac{\lambda'_v}{\lambda_v}$$

$$\frac{P'_{ass}}{P_{ass}} = \frac{\dot{m}'}{\dot{m}}$$

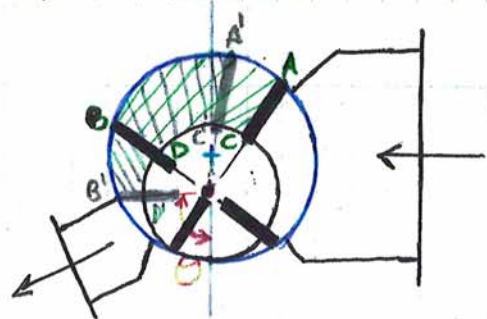
# COMPRESSORI ROTATIVI pag (735)

A PALETTE →  $\lambda_v \approx 1!$  → per  $\beta \leq 6$   $Q \leq 3 \text{ m}^3/\text{sb}$

## RAPPORTO COMPRESSIONE VOLUMETRICO

$$\rho = \frac{V_{MAX}}{V_M}$$

se  $\theta \downarrow \rightarrow \rho \uparrow$   
 se  $i \uparrow \rightarrow \rho \uparrow$   
 (n° palette)

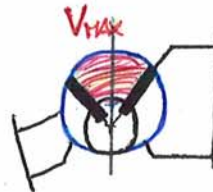


$V_M$ : volume della capacità attiva all'istante dell'apertura della mandata (in motito)



$\theta$ : angolo che definisce la posizione del punto iniziale della mandata

$V_{MAX}$ : volume max assunto dalla capacità attiva → quando le palette si trovano (angolarmente) simmetriche rispetto all'asse dei centri.



### CILINDRATA

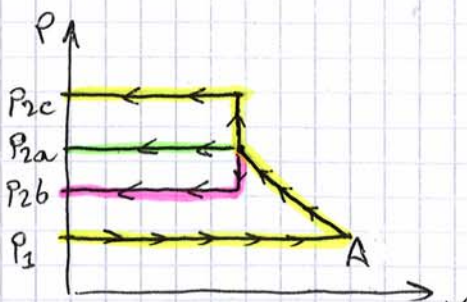
$$V_0 = V_{MAX} - V_{MIN}$$



potrebbe anche essere  $V_{MIN} = 0$

$n^{\circ}$  camere  
**CILINDRATA TOT. =  $i V_0$**

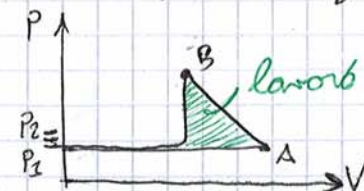
## CICLO DI LAVORO



- CASO a)  $P_2 = P_1 \rho^{m^*}$
- CASO b)  $P_2 < P_1 \rho^{m^*}$
- CASO c)  $P_2 > P_1 \rho^{m^*}$

MARCIA A VUOTO:  $P_2 = P_1!$

Conseguenza:



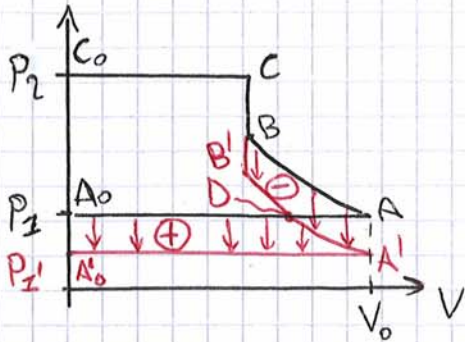
Caso a)  
 $\rho_{ROTATIVO} = \rho_{ALTERNATIVO}$   
 $\lambda_c = \lambda_c$

Caso b) e c)  
 $\rho_{ROTATIVO} > \rho_{ALTERNATIVO}$   
 $\lambda_c > \lambda_c$

**REGOLAZIONE**

- ↳ per LAMINAZIONE ALL'ASPIRAZIONE
- ↳ o per RIFLUSSO DI PARTE DELLA MANDATA

LAMINAZIONE ALL'ASPIRAZIONE



$\oplus L_i \ominus L_i$

Se  $p < m^* \left( \frac{1}{m^*-1} \right)$  : SPESO  $L_{i,TOT} \uparrow$

Se  $p > m^* \left( \frac{1}{m^*-1} \right)$  : SPESO  $L_{i,TOT} \downarrow$

Se  $m^* = 1,4$

$p < 2,3$

$p > 2,3$

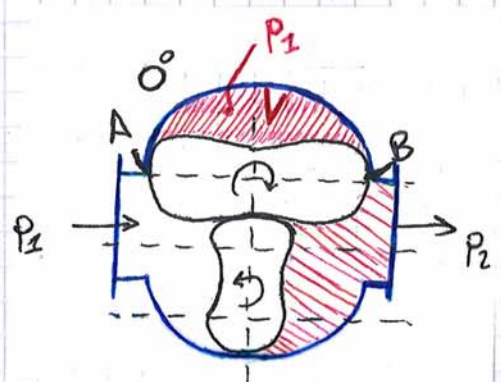
$$\begin{aligned} Q_c &= P_1 V_A \left[ \frac{m^*}{m^*-1} (p^{m^*-1} - 1) + \frac{1}{p} (\beta - p^{m^*}) \right] \\ &= P_2 V_A \frac{m^*}{m^*-1} \frac{P_1}{P_2} (p^{m^*-1} - 1) + P_2 V_A \left( \frac{1}{p} - \frac{P_1}{P_2} p^{m^*-1} \right) \end{aligned}$$

A INGRANAGGI → per  $\beta \leq 1,2 \div 1,8$   $Q \leq 3 \text{ m}^3/\text{rs}$

$V_{(A-B)}$  : CILINDRATA

$\mu = 0$   
(spazio morto)

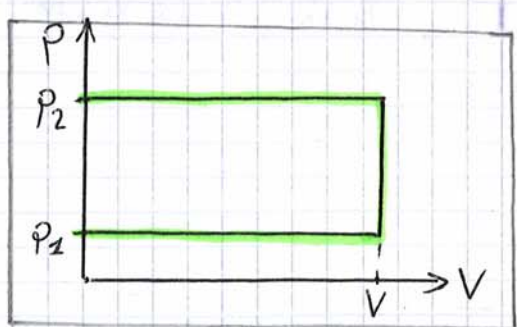
$i = n^\circ$  di lobi compressibili dei due rotori



$\beta = \frac{P_2}{P_1}$

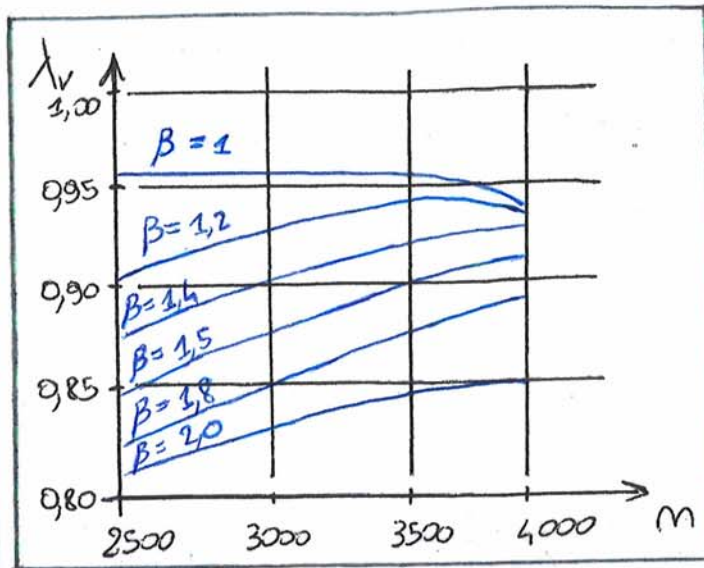
$Q_c = V(P_2 - P_1) = P_2 V(\beta - 1)$

$L_i = \frac{P_2 V}{\lambda_v P_1 V} (\beta - 1) = \frac{RT_2}{\lambda_v} (\beta - 1)$



(46)

ANDAMENTO DI  $\lambda_v$  in funz. di  $M$  e  $\beta$ :



RISCALDAMENTO DEL GAS ( $T_2$ )

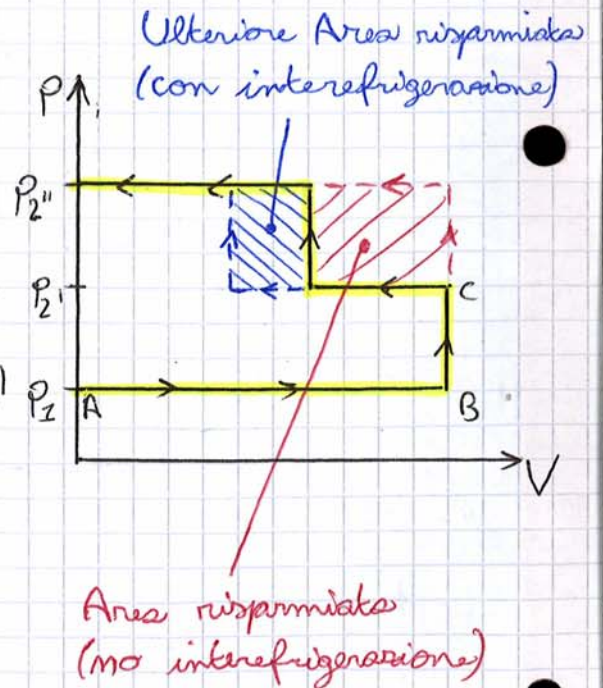
$$\frac{T_2}{T_1} = 1 + \frac{1}{\lambda_v} \frac{k-1}{k} (\beta-1)$$

COMPRESSORE A PIÙ STADI

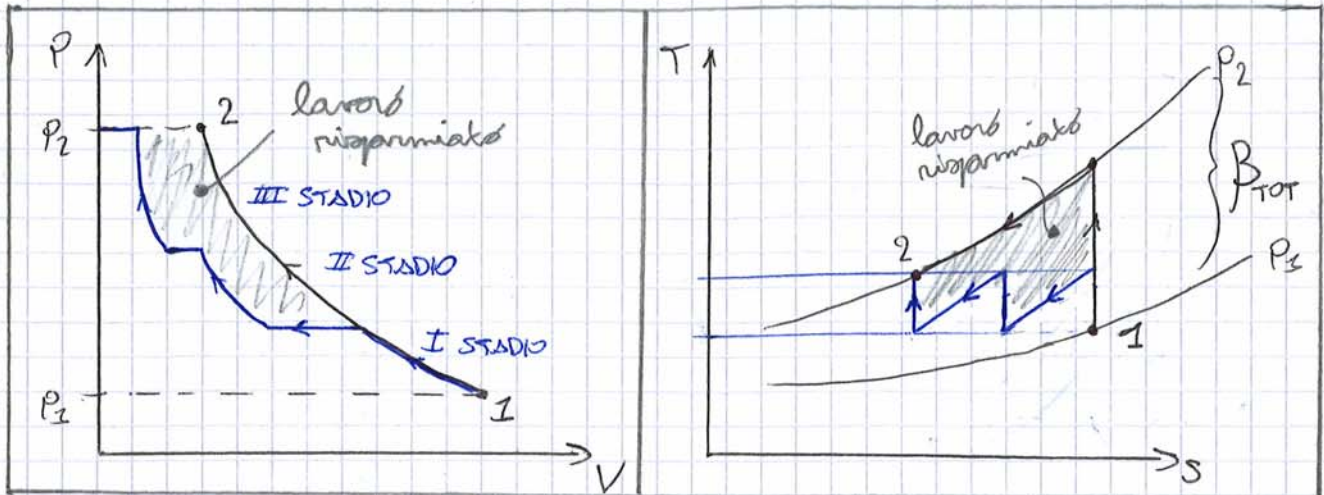
per  $\beta = 1,2 \div 1,8$  MONOSTADIO

per  $\beta > 2,5 \div 3$  PLURISTADIO

esempio compressore a DUE STADI



COMPRESSIONE INTERREFRIGERATA



Il minimo  $L_i$  si ottiene se OGNI STADIO ha:

$$B_{STADIO} = \sqrt{B_{TOT}}$$

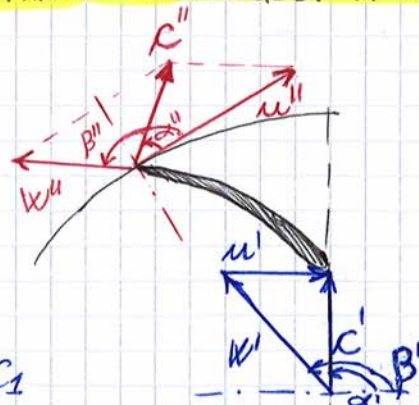
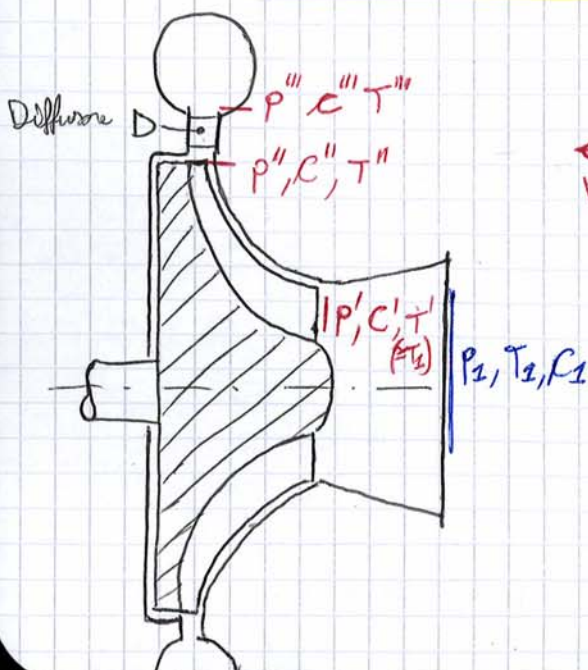
$$L_i^{INTER.} = (1+\alpha) \sum_{i=1}^N \int_{P_i}^{P_{i+1}} v dp$$

$$= (1+\alpha) \frac{m}{m-1} RT_1 \left[ \sum_{i=1}^N \left( \frac{P_{i+1}}{P_i} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]$$

$$\frac{L_w}{\int v dp} = \alpha$$

- ← OGNI STADIO CON:
- stesso  $\alpha$
  - stesso  $m$
  - $T_1$

COSTITUZIONE DELLA MACCHINA - TRIANGOLI DI VELOCITÀ



$$L_{C,RENE} = U''c''_u - U'c'_u$$

polinomial

$$Q + L_{C,RENE} = \Delta i + \Delta E_{cgu} + L_w$$

$$\dot{m} = \frac{A' c'_u}{U'} = \frac{A'' c''_u}{U''}$$

PARAMETRI ADIMENSIONATI

$$\phi = \frac{W_n''}{U''}$$

COEFF. DI PORTATA (re compass. assiale  $W_n'' \rightarrow W_a''$ )

$$\psi = \frac{L_c}{\frac{U''^2}{2}}$$

COEFF. DI PRESSIONE (O LAVORO)

$$\rho = \frac{L_w}{\frac{U''^2}{2}}$$

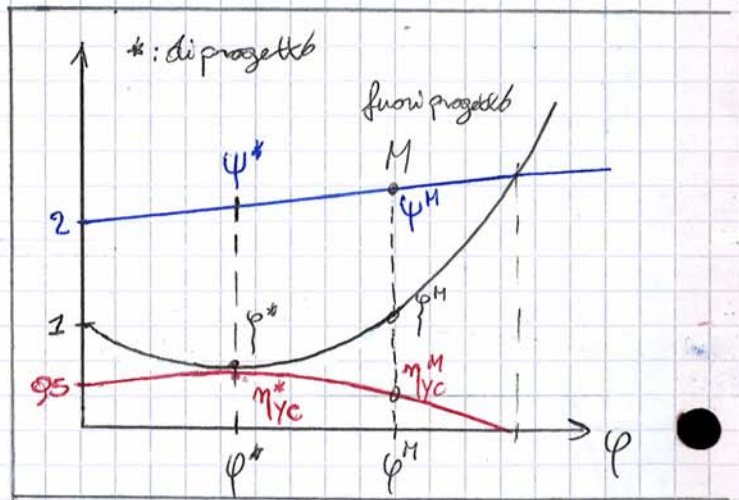
COEFF. DI PERDITA

$$\eta_{yc} = \frac{L_c - L_{wem}}{L_c} = \frac{\psi - \rho}{\psi}$$

RENDIMENTO IDRAULICO (POLITROPICO)

$$C_{ru} = \frac{U''}{\sqrt{2i^0}} = \frac{U''}{\sqrt{2 \frac{k}{k-1} p^0 v^0}}$$

NUMERO DI CROCCO



Essendo che:

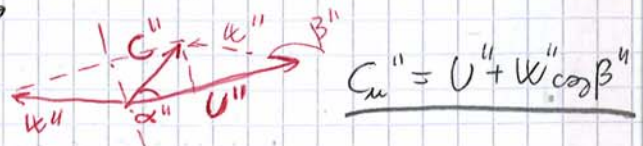
$$\begin{cases} L_c = i_2 - i_1 \text{ (trascurando } \Delta E_c!) \\ L_c = C_{u''} U'' - C_{u'} U' \end{cases}$$

$$\psi = \frac{L_c}{\frac{U''^2}{2}} \rightarrow \frac{\psi}{2} = \frac{L_c}{U''}$$

$$\frac{\psi}{2} = \frac{C_{u''} U'' - C_{u'} U'}{U''}$$

$$\frac{\psi}{2} = \frac{C_{u''}}{U''} - C_{u'} \frac{U'}{U''^2}$$

dal triangolo di velocità in uscita



$$\frac{\psi}{2} = \frac{U'' + W'' \cos \beta''}{U''} - \frac{U' C' \cos \alpha'}{U''}$$

$$\frac{\psi}{2} = 1 + \frac{W'' \cos \beta''}{U''} - \frac{U' C' \cos \alpha'}{U''}$$

$$\phi = \frac{W'' \sin \beta''}{U''} \rightarrow W'' = \frac{\phi U''}{\sin \beta''}$$

$$\frac{\psi}{2} = 1 + \frac{\phi U''}{\sin \beta''} \frac{\cos \beta''}{U''} - \frac{U' C' \cos \alpha'}{U''}$$



**RENDIMENTO POLITROPICO**

Durante la compressione REALE ~~isocora~~ si ha un aumento di entropia

dovuta a  $\int_1^2 T ds = Q + L_{um}$  formato dal gas (di autoionisce)  
 $\rightarrow$  perdite dissipative

$\eta_{yc} > \eta_{is}$   
 perché  
 $L_{c,pol} > L_{c,is}$

Ma studiamo il caso in cui trascuriamo  $L_{um}$ :

$\int_1^2 T ds = Q$

Wikipedia:  
 L'effetto termico del lavoro dissipato consiste, fisicamente, nell'espansione del gas dovuta al calore prodotto provocato dagli attriti. In altre parole, gli attriti meccanici e viscosi all'interno della macchina producono calore, che viene ceduto al gas, il quale si espande.

P.P. EULERIANO (MASSICO): con  $L_{c,pol}$

$Q + L_{c,pol} = \Delta i + \Delta \phi_c \approx 0$

$L_{c,pol} = i_2 - i_1 - Q$

$L_{c,pol} = i_2 - i_1 - \int_1^2 T ds \rightarrow T ds = di - v dp$

$L_{c,pol} = i_2 - i_1 - \int_1^2 (di - v dp) ds$

$L_{c,pol} = i_2 - i_1 - \Delta i + \int_1^2 v dp$

$L_{c,pol} = \int_1^2 v dp$

EM. MECC. EULERIANA (MASSICA): con  $L_c$

$L_c = \int_1^2 v dp + \Delta \phi_c + L_{um}$

$L_c = \int_1^2 v dp + L_{um}$

da cui

$L_{c,pol} = L_c - L_{um}$

$\eta_{yc} = \frac{L_{c,pol}}{L_c}$

$\eta_{yc} = \frac{\int_1^2 v dp}{\int_1^2 v dp + L_{um}}$

$\eta_{yc} = \frac{L_c - L_{um}}{L_c} = \frac{\psi - \theta}{\psi}$

$\eta_{yc} = \frac{\frac{m}{m-1} R T_2 (\beta^{\frac{m-1}{m}} - 1)}{\frac{k}{k-1} R T_1 (\beta^{\frac{m-1}{m}} - 1)} = \frac{m}{m-1} \cdot \frac{k-1}{k}$

**CALCOLO DEL COMPRESSORE**

Stato date:  $m, P_1, T_1, P_2, k, \underbrace{m_{yc} = (0,7:0,8)}_{\text{IPOTESI}}, \underbrace{\psi = (1:2,5)}_{\text{IPOTESI}}$

$$U'' = \sqrt{\frac{2}{\psi} \frac{k}{k-1} R T_1 \left( \beta^{\frac{k-1}{k} \frac{1}{m_{yc}}} - 1 \right)}$$

$$d'' = \frac{U''}{\pi M}$$

Si rischia di avere poi un rapporto  $\frac{l''}{d''}$  sfavorevole.

se  $m$  è fissato

Se invece  $m$  è libero:

$$m = \sqrt{\frac{\phi}{\pi} \frac{1}{\sin \alpha''} \frac{l''}{d''} \frac{v_1}{U''} U''^3} = \sqrt{\frac{\phi}{\pi} \frac{U''^3}{\sin \alpha''} \frac{v_1}{U''} \frac{1}{\cot \alpha'' - \cot \beta''} \frac{l''}{d''}}$$

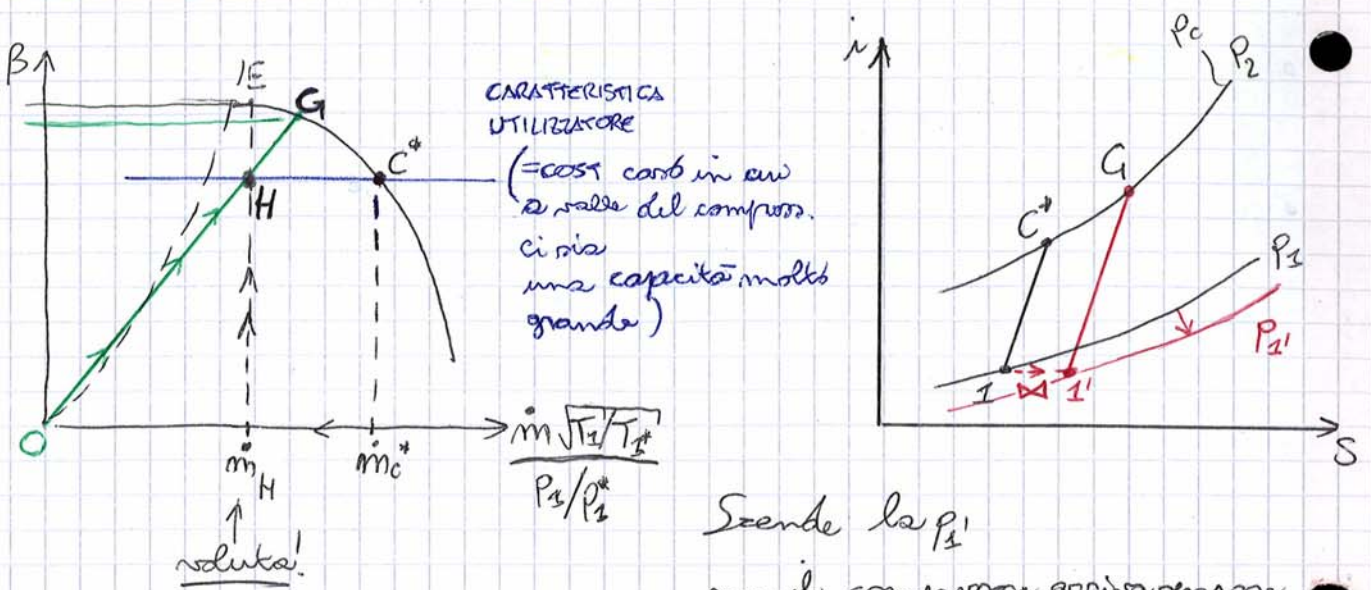
impossibile tu.

Anzi, per un buon rendimento:

$$\frac{l''}{d''} = 0,1$$

$$\alpha'' \cong 25^\circ$$

3) **LAMINAZIONE ALL'ASPIRAZIONE** (più vantaggiosa della laminazione alla mandata) (54)



Scende la  $P_1$   
 ma il compressore arriva sempre a  $P_2^c$ . Mi costa più lavoro ( $B \uparrow$ )  
 ma sempre meno che laminare alla mandata (E)

$$La P_{ass} = \eta_c \dot{m} C_p T_1 \left[ \left( \frac{P_c}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] *$$

$$La P'_{ass} = \eta'_c \dot{m}' C_p T_1 \left[ \left( \frac{P_c}{P_2'} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \uparrow$$

(ASPIRATA)

$$La P'_{ass} = \eta'_c \dot{m}' C_p T_2 \left[ \left( \frac{P_E}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \uparrow$$

(MANDATA)

perché  $\frac{P_E}{P_2} > \frac{P_c}{P_2'}$

4) **RIFLUSSO DI PARTE DELLA MANDATA**

Il compressore continua a lavorare nel punto  $C^*$  solo che poi alla mandata c'è una valvola che butta fuori una parte della mandata.

$$\left[ \frac{\dot{m}_{MANDATA}}{\dot{m}_{ASPIRATA}} = \frac{\eta'_c}{\eta_c^*} \right] \text{RIDUZIONE.}$$

**COMBUSTIONE**

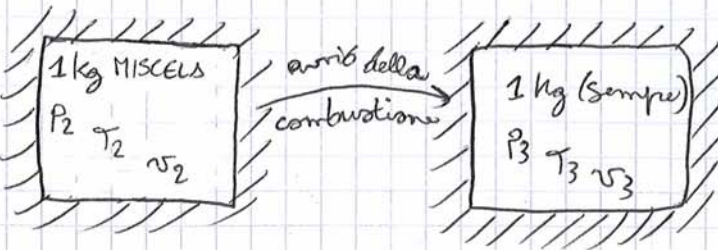
pag (16)

A VOLUME = COST

**PASSAGGIO DA  $H_{iVT_2} \rightarrow H_{iPT_2}$**

$$\frac{H_{iPT_2}}{1+\alpha} = \frac{H_{iVT_2}}{1+\alpha} - (R'-R)T_2$$

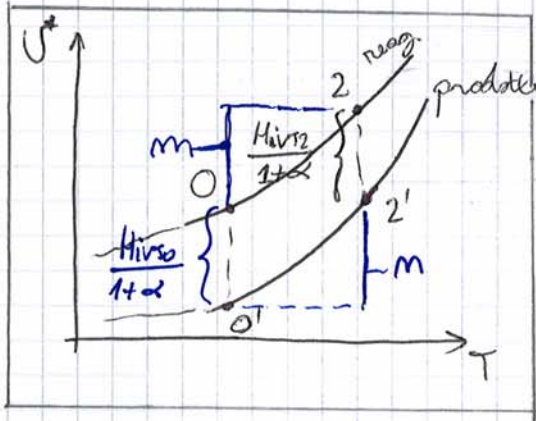
$$\left[ \frac{KJ}{Kg_{miscela}} \right]$$



$$\alpha = \frac{m_a}{m_b}$$

$$T^* = 1850K$$

$$\alpha_{ST} \approx 14,6$$



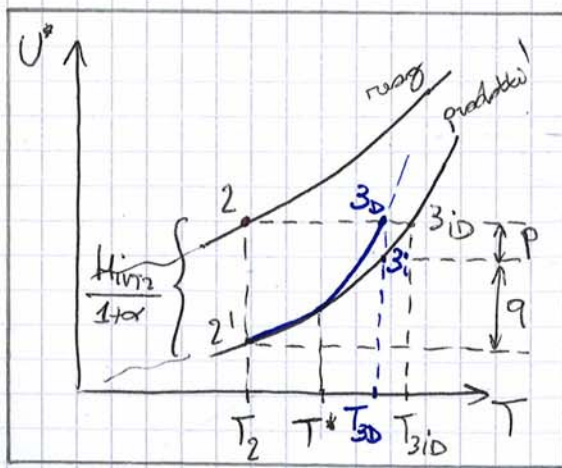
**EQUAZIONE: PASSAGGIO DA  $H_{iVT_0} \rightarrow H_{iVT_2}$**

$$\left[ \frac{H_{iVT_0}}{1+\alpha} + m = \frac{H_{iVT_2}}{1+\alpha} + m \right]$$

$$\begin{cases} m = U_2^* - U_0^* = C_{v,m} (T_2 - T_0) \\ m = U_{2'}^* - U_{0'}^* = C'_{v,m} (T_2 - T_0) \end{cases}$$

$$\frac{H_{iVT_2}}{1+\alpha} = \frac{H_{iVT_0}}{1+\alpha} + (T_2 - T_0)(C_{v,m} - C'_{v,m})$$

**DISSOCIAZIONE**



**EQUAZIONE:**

$$\left[ \frac{H_{iVT_2}}{1+\alpha} = p + q \right]$$

$$\begin{cases} q = U_{3D}^* - U_{2'}^* = C'_{v,m} (T_{3D} - T_{2'}) \\ p = K(T_{3D} - T^*)^2 \end{cases}$$

$$\frac{H_{iVT_2}}{1+\alpha} = K(T_{3D} - T^*)^2 + C'_{v,m} (T_{3D} - T_{2'})$$

una cost

START:

$$p_0 v_0 = R T_0$$

$$p_0 = \frac{p_0}{R T_0} = xx.xx \frac{kg}{Nm^3} \Rightarrow H_{iVT_0} \left[ \frac{KJ}{Nm^3} \right] \cdot \frac{1}{p_0} \left[ \frac{Nm^3}{kg} \right] = H_{iVT_0} \left[ \frac{KJ}{kg} \right]$$

$$M.M. O_2 = 32 \text{ g/mol} \rightarrow R = \frac{R^*}{M.M.} = \frac{8314}{xx}$$

$$M.M. CH_4 = 16 \text{ g/mol}$$

$$\frac{H_{iVT_2}}{1+\alpha} = \left[ \frac{KJ}{Kg_{CARB}} \right]$$

$$\frac{H_{iVT_2}}{1+\alpha} = \left[ \frac{KJ}{Kg_{MISC}} \right]$$

**FORMULE FINALI**

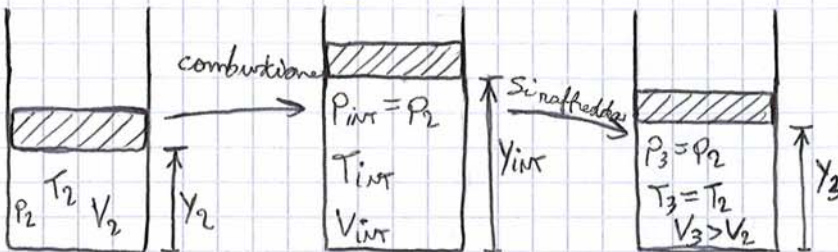
$$\eta_b \frac{H_{iVT2}}{1+\alpha} = C'_{V,m} (T_3 - T_2) + K (T_3 - T^*)^2 + |Q| + L_{FS}$$

$\alpha \geq \alpha_{ST} !!$

$$\eta_b \frac{\alpha}{\alpha_{ST}} \frac{H_{iVT2}}{1+\alpha} = C'_{V,m} (T_3 - T_2) + K (T_3 - T^*)^2 + |Q| + L_{FS}$$

$\alpha \leq \alpha_{ST} !!$

**A PRESSIONE = COST**



**FORMULE FINALI**

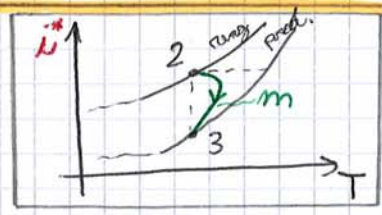
$$\eta_b \frac{H_{iPT2}}{1+\alpha} = C'_{P,m} (T_3 - T_2) + K (T_3 - T^*)^2 + |Q|$$

manca il LFS semplicemente perché è già implicito nell' $H_{iPT2}$

$\alpha \geq \alpha_{ST} !!$

$$\eta_b \frac{\alpha}{\alpha_{ST}} \frac{H_{iPT2}}{1+\alpha} = C'_{P,m} (T_3 - T_2) + K (T_3 - T^*)^2 + |Q|$$

$\alpha \leq \alpha_{ST} !!$



**N.B.**

Qui abbiamo / possiamo avere un lavoro residuo in 2' (=3) il quale fa/può farci sì che lo stantuffo NON scenda alla posizione iniziale che aveva in 2. Perché? Ciò avviene tutte le volte che, e fino a combustione, si hanno  $P_{iU}$  MAI rispetto alle mdci iniziali.

Le mdci aumentano SE la massa molecolare dei gas combusti diminuisce  
 ↓  
 e viceversa

# MOTORI ALTERNATIVI

60

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \cdot C \quad \text{CILINDRATA}$$

$$\lambda = \frac{l}{r} \quad \text{ORDINAMENTO}$$

$$\epsilon = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V + V_M}{V_M} \quad \text{RAPPORTO DI COMPRESSIONE}$$

(giri/ro)

$$m_c = \frac{m}{2} \quad \text{per } i \text{ 4T}$$

$$m_c = m \quad \text{per } i \text{ 2T}$$

N° CICLI

$$\dot{m}_a = \lambda_v p_a i V m_c$$

$$P_i = L_{i,ciclo} \cdot m_c i$$

$$P_i = P_u + P_v$$

$$\Delta\varphi = \frac{720^\circ}{i}$$

$$\Delta\varphi = \frac{360^\circ}{i}$$

(i = n° di cilindri)  
SFASAMENTO 4T

SFASAMENTO 2T

$\eta_u$  è il duale dell' $\eta_g$  delle turbine **POTENZA UTILE**

$$P_u = \eta_u P_{max} = \eta_u \dot{m}_b H_{iprto} = \eta_i \eta_o \dot{m}_b H_{iprto}$$

$$P_u = \eta_u \frac{\dot{m}_a}{2} H_i = \eta_u \frac{\dot{m}_a \cdot m_c \cdot i}{2} \cdot H_i$$

$$= \eta_u \frac{\lambda_v V p_a i \cdot m_c}{2} H_i$$

$$P_u = L_{u,ciclo} \cdot i \cdot m_c$$

$$P_{max} = \dot{m}_b H_{iprto}$$

**POTENZA MAX**

ottenibile dal carburante (teoricamente)

$$\dot{m}_a = \dot{m}_a \cdot m_c \cdot i$$

$$\dot{m}_b = \dot{m}_b \cdot m_c \cdot i$$

PORTATA DI COMBUSTIBILE

RENDIM. ORGANICO

$$\eta_o = \frac{L_{u,ciclo}}{L_{i,ciclo}} = \frac{L_{i,ciclo} - L_{v,ciclo}}{L_{i,ciclo}} = 1 - \frac{L_v}{L_i}$$

$$\eta_u = \frac{\eta_i}{\eta_{min} \eta_p \eta_o}$$

RENDIM. UTILE

Se trovi  $H_i = H_{iprto}$ !

**LAVORO UTILE**

$$L_{u,ciclo} = \eta_u \dot{m}_b H_i$$

$$L_{i,ciclo} = L_{u,ciclo} + L_{v,ciclo}$$

**LAVORO INDICATO (A CICLO)**

$$L_{v,ciclo} = k_1 P_{MAX} \cdot V + k_2 \cdot \dot{m}_a U^2 + k_3 V + k_4 p_a U^2 V$$

**LAVORO MARCIA A VUOTO**

(attenti e accessori)

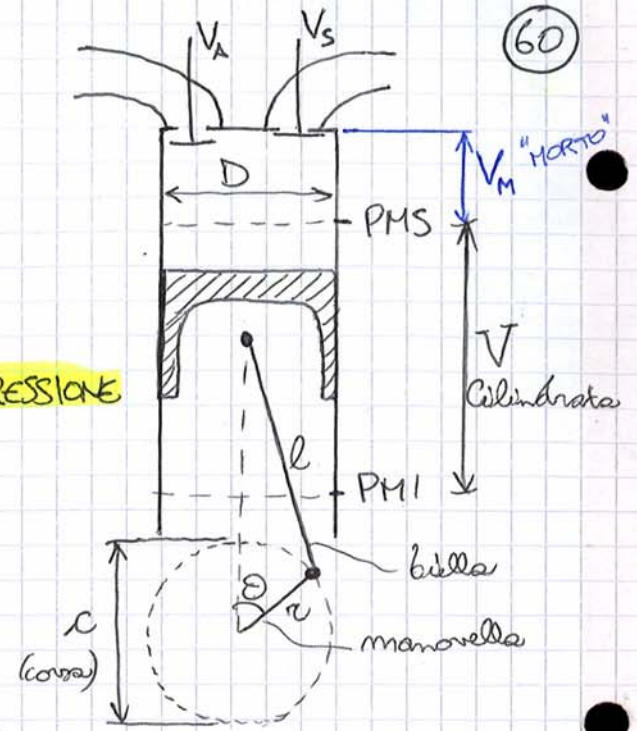
$$P_v = L_{v,ciclo} \cdot i \cdot m_c$$

**POTENZA MARCIA A VUOTO**

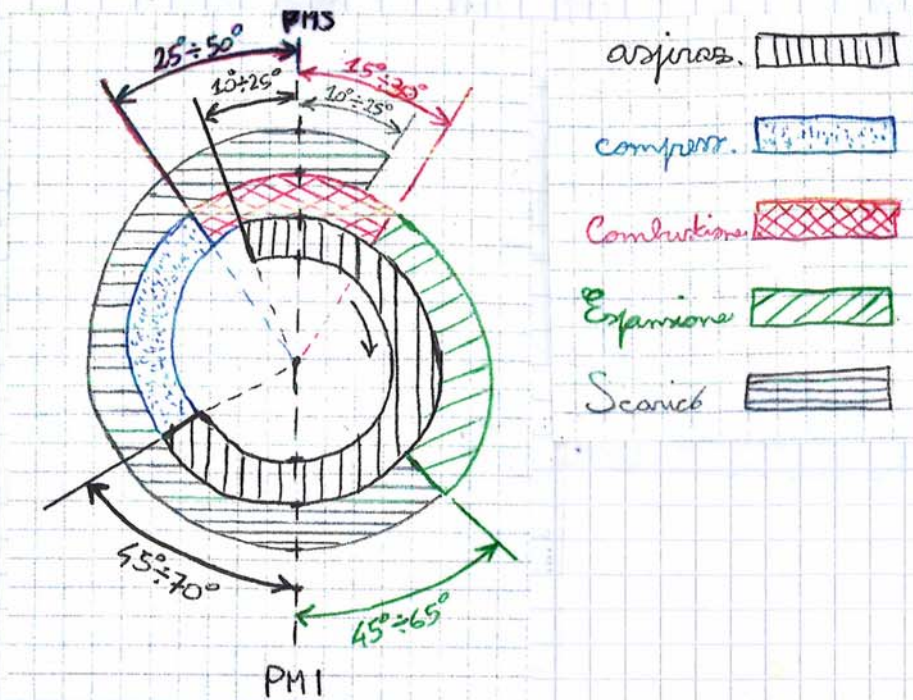
pag 63 altre formule

$$U = 2 \cdot r \cdot \omega \rightarrow \text{giri/ro}$$

**VELOCITÀ MEDIA STANTUFFO**



**DIAGRAMMA DELLA DISTRIBUZIONE OTTO 4T**



**COEFF. DI RIEMPIMENTO ( $\lambda_v$ )**

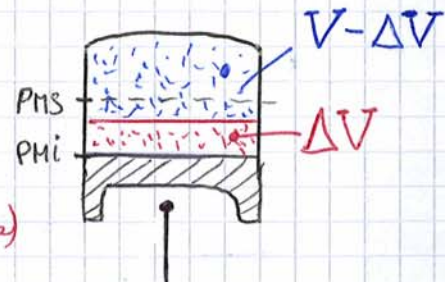
$$\Delta V = \Delta V' + \Delta V'' + \Delta V'''$$

volume occupato da gas combustibili (anziché da miscela fresca)

gas combustibili che rientrano dall'aspirazione (RIFIUTO ALL'ASPIRAZ.)

gas combustibili che rimangono in camera di combustione ( $V_M$ )

gas combustibili che rientrano dallo scariò



$$m_{a, \text{rif}} = V \cdot \rho_a$$
 massa d'aria di riferimento

$$m_a = (V - \Delta V) \cdot \rho_1$$
 massa d'aria entrante realmente

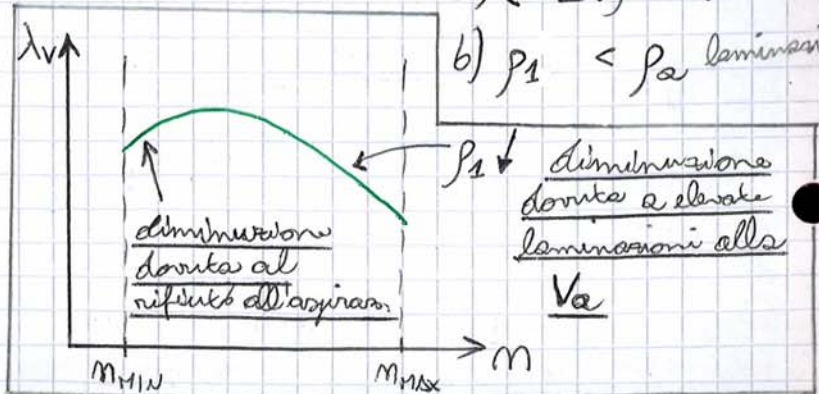
$m_a < m_{a, \text{rif}}$

perché:

a)  $(V - \Delta V) < V$

b)  $\rho_1 < \rho_a$  laminazioni

$$\lambda_v = \frac{m_a}{m_{a, \text{rif}}} = \frac{(V - \Delta V) \rho_1}{V \rho_a}$$



# DIMENSIONAMENTO DI MASSIMA DI UN MOTORE

Conseguenza delle IPOTESI che "dannò" qualcosa:

1)  $\frac{P_{ime}}{m} \cong COST$   $m = \begin{cases} 1 \text{ per } 2T \\ 2 \text{ per } 4T \end{cases}$

2)  $U \cong COST$  (15-20 m/r)  $\Rightarrow C \sim \frac{1}{m}$

3)  $\frac{C}{d} \cong COST \Rightarrow d \sim C \sim \frac{1}{m}$   
 $\Rightarrow V \sim \frac{1}{m^3}$  cilindrate unitaria

a) Per data  $iV$ , come si fa a far salire  $P_u$ ?

$\rightarrow$  aumento  $i$  (diminuisce  $V$ )  
 $\rightarrow V \sim \frac{1}{m^3}$  (aumenta  $m$ !)

$P_u \sim m$   $\leftrightarrow P_u = \frac{P_{ime}}{m} \cdot \overset{FISSO}{iV} m$   $(P_u \sim m)$

b) Per fissata  $P_u$ , come si può far diminuire la cilindrata totale  $iV$ ?

$\rightarrow$  aumento  $m$   
 $\rightarrow$  diminuisce la  $iV$

$iV \sim \frac{1}{m}$   $\leftrightarrow P_u = \frac{P_{ime}}{\frac{m}{COST}} \cdot iV m$   $(iV \sim \frac{1}{m})$

c) Senza vincoli, come faccio ad aumentare  $P_u$ ?

$\rightarrow$  aumento  $i$   
 $\rightarrow$  oppure diminuisce  $m$

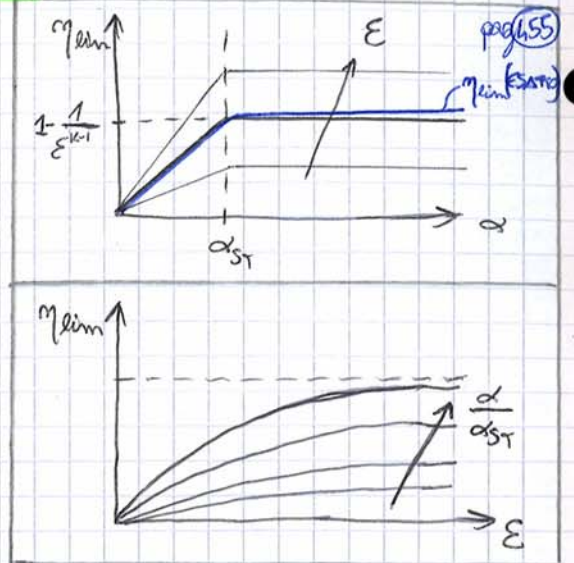
$P_u \sim \frac{i}{m^2}$   $\leftrightarrow P_u = \frac{P_{ime}}{m} \cdot iV m$   $(V \sim \frac{1}{m^3}, P_u \sim \frac{i}{m^2})$



CALCOLO  $\eta_{lim}$  (SEMPLIFICATO) per motori OTTO

(66)

$$\left\{ \begin{aligned} \eta_{lim} &\cong 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} && \text{re } \alpha \geq \alpha_{ST} \\ \eta_{lim} &\cong \left(\frac{\alpha}{\alpha_{ST}}\right) \left(1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}}\right) && \text{re } \alpha \leq \alpha_{ST} \end{aligned} \right.$$



CALCOLO  $\eta_{lim}$  (SEMPLIFICATO) per motori DIESEL

$$\left\{ \begin{aligned} \eta_{lim} &\cong 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} f(\tau) && \text{re } \alpha \geq \alpha_{ST} \\ \text{coeff. } \tau &= \frac{T_3}{T_2} && \begin{cases} f(\tau) \uparrow \text{ re } \tau \uparrow \\ f(\tau) = 1 \text{ re } \tau = 1 \end{cases} \\ \eta_{lim} &\cong \left(\frac{\alpha}{\alpha_{ST}}\right) \left(1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} f(\tau)\right) && \text{re } \alpha \leq \alpha_{ST} \end{aligned} \right.$$

ANDAMENTI DI  $P_{mi}$ ,  $P_{me}$ ,  $\eta_i$ ,  $\eta_u$  al variare di  $\alpha$

(68)

$\eta_u = \eta_i \eta_o$

$\eta_i = \eta_{lim} \eta_{\theta_i}$

$P_{me} = \eta_u \left( \frac{L_v H_i}{2 l v} \right)^{cost} \rightarrow P_{me} \propto \frac{\eta_u}{\alpha} = K \alpha$

$P_{mi} = \eta_i \left( \frac{L_v H_i}{2 l v} \right)^{cost} \rightarrow P_{mi} \propto \frac{\eta_i}{\alpha} \propto \frac{\eta_{\theta_i} \eta_{lim}}{\alpha} = \frac{\eta_{\theta_i} K \alpha}{\alpha} \cong \eta_{\theta_i}$

$P_{mi} \propto \eta_{\theta_i} \rightarrow P_{mi}$  ha la forma di  $\eta_{\theta_i}$

$P_{me} = P_{mi} - P_v$   
 $P_v \cong COST$   
 in funz. di  $\alpha$   
 non variata

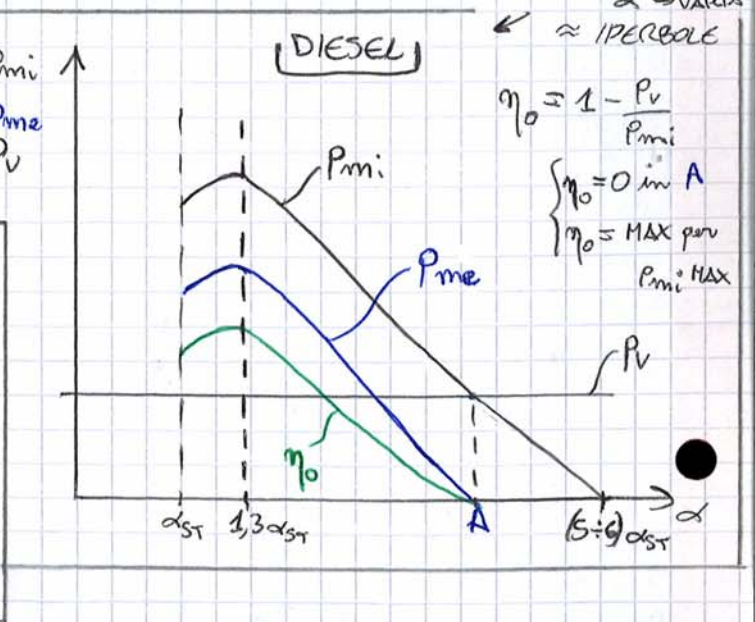
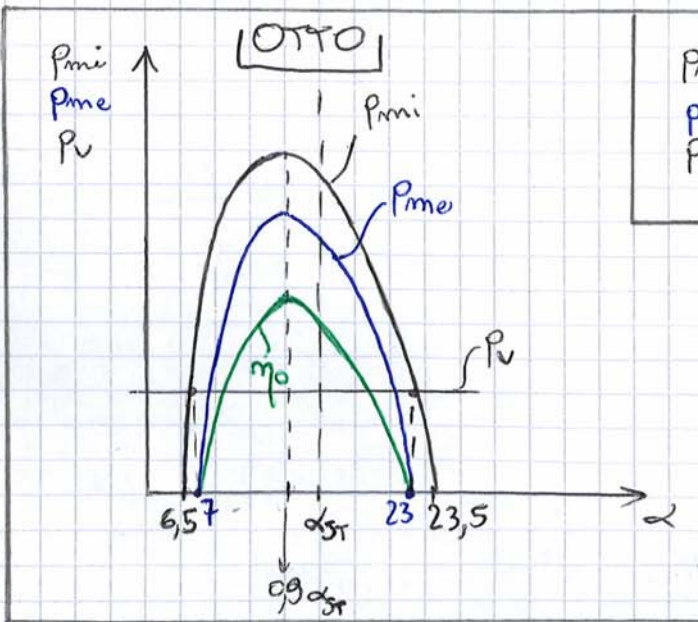
$P_{me} \propto \eta_{\theta_i} - P_v \rightarrow P_{me}$  ha la forma di  $P_{mi}$  abbassata di  $P_v$ .

$\eta_o = \frac{L_{v,cielo}}{L_{cielo}} = \frac{P_{me}}{P_{mi}} = \frac{P_{mi} - P_v}{P_{mi}} = 1 - \frac{P_v}{P_{mi}} \rightarrow COST (abituati e sec) (con \alpha)$

$\eta_o = 0$  per  $P_v = P_{mi}$  esatta in 7 e 23  
 $\eta_o = MAX$  per  $P_{mi} MAX$  esatta per  $\alpha = 0,9 \alpha_{ST}$

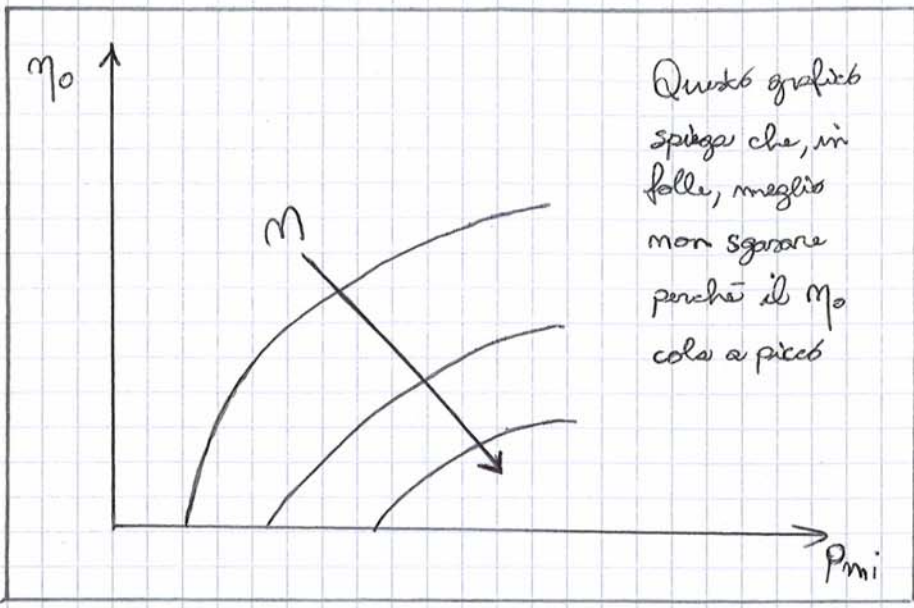
$P_{mi} \propto \frac{\eta_{\theta_i}}{\alpha} \sim COST$   
 $\alpha \rightarrow VARIA$   
 $\approx IPERBOLE$

$\eta_o = 1 - \frac{P_v}{P_{mi}}$   
 $\eta_o = 0$  in A  
 $\eta_o = MAX$  per  $P_{mi} MAX$

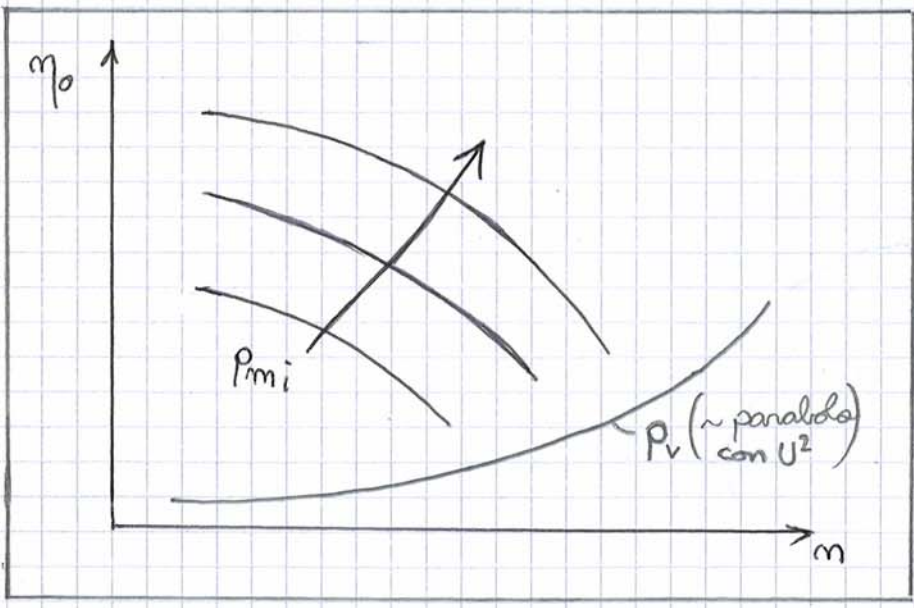


ANDAMENTO DI  $\eta_0$  AL VARIARE DI  $P_{mi}$  e  $M$

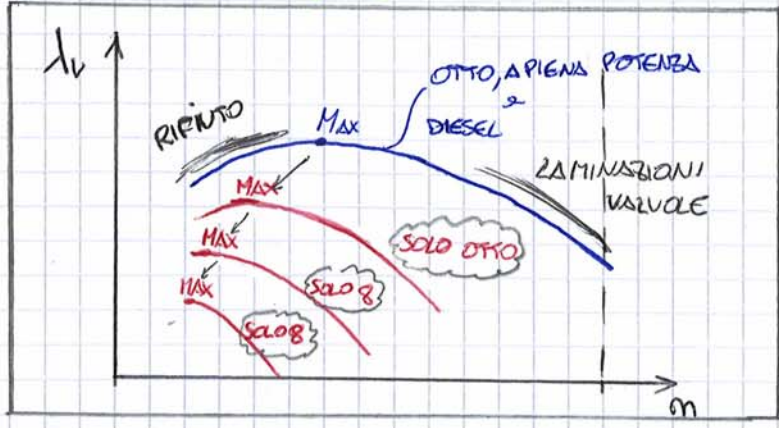
pag 503



Questo grafico spiega che, in folle, meglio non sgranare perché il  $\eta_0$  cola a picco

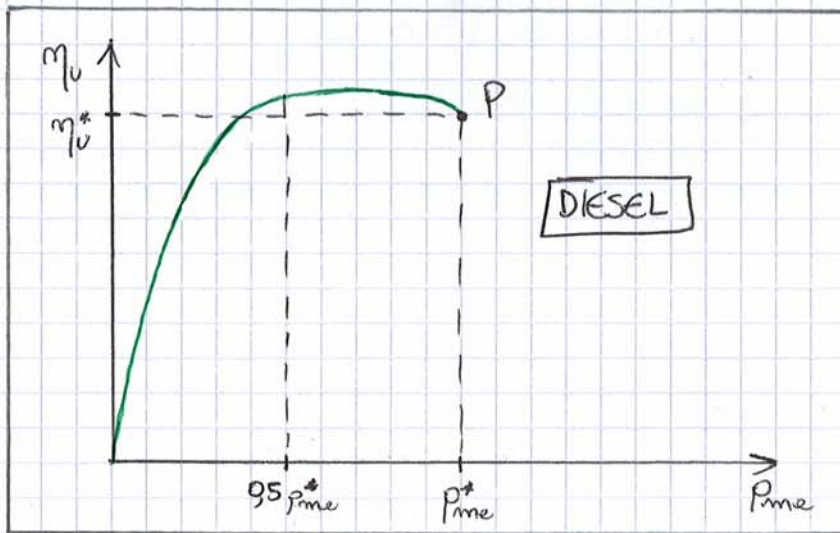
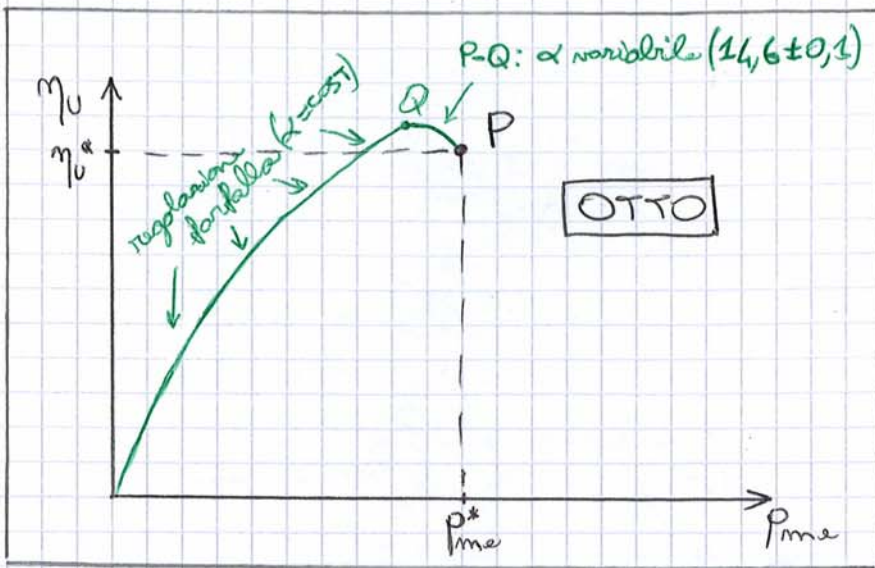


ANDAMENTO DI  $\lambda_v$  AL VARIARE DI  $M$



Curve solo per l'OTTO quando si laminano con la farfalla (cioè quando si chiude il gas)

**REGOLAZIONE - RIDUZIONE DELLA POTENZA A  $m=COST$**



**CORREZIONE DELLA POTENZA** → ci si riferisce alle condizioni standard ( $p_0; T_0$ )

**OTTO**

IPOTESI 1:  $\alpha = COST = 990_{ST}$

IPOTESI 2:  $\eta_u = COST$

$$P_{me} = \left( \eta_u \frac{\lambda_v}{\alpha} p_a \lambda_i \right)^{COST} \rightarrow P_{me} \sim \lambda_v p_a$$

$$\lambda_v^{1'} = \frac{m_{a,1'}}{m_{a,rif}} = \frac{(V - \Delta V)}{V} \frac{p_1'}{p_a} \frac{T_a}{T_1'} \rightarrow \lambda_v^{1'} \sim \sqrt{T_a}$$

$$0,93 \leq \frac{P_{y,0}}{P_0} \leq 1,07$$
 *se oltre prova invalida*

$$\frac{P_{me,0}}{P_{me}} = \frac{P_{a,0}}{P_a} \sqrt{\frac{T_a}{T_{a,0}}}$$

è vale anche: 
$$\frac{P_{y,0}}{P_0} = \frac{P_{a,0}}{P_a} \sqrt{\frac{T_a}{T_{a,0}}}$$

e 
$$\frac{P_{m,i,0}}{P_{m,i}} = \frac{P_{a,0}}{P_a} \sqrt{\frac{T_a}{T_{a,0}}}$$

## 2- TURBOCOMP. + SERBATOIO

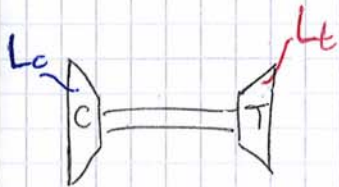
ossendo:

gas combusti: per trovare  $k'$  usa  $C_v, C_p, R'$

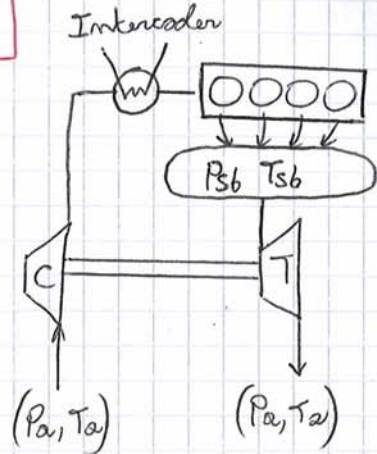
$$L_t = \eta_{t, is} L_{t, is} = \eta_{t, is} \frac{k'}{k'-1} RT \left[ 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_{sb}}{P_a}\right)^{\frac{k'-1}{k'}}} \right]$$

$$L_c = \frac{k}{k-1} RT_2 \left[ \beta_c^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \cdot \frac{1}{\eta_{c, is}}$$

BILANCIO POTENZE:



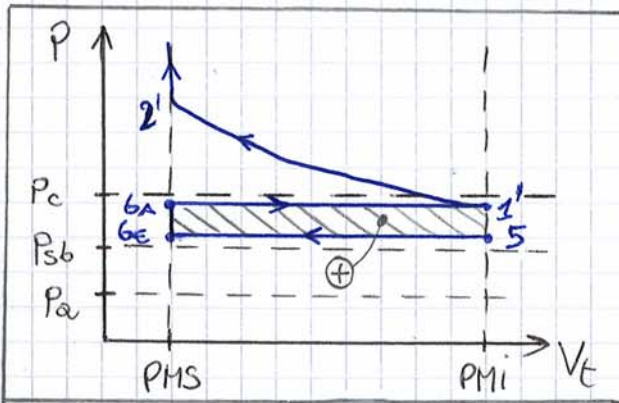
$$\left(\frac{1+\alpha}{\alpha}\right) L_t \eta_{m, t} = 1 \cdot \frac{L_c}{\eta_{m, c}}$$



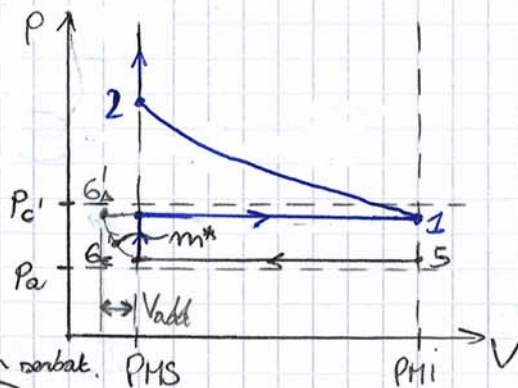
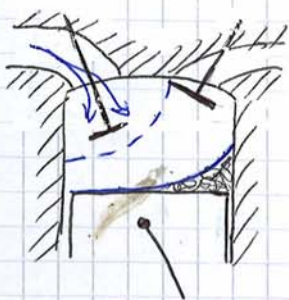
x 1 kg di aria  
ma ce ho più kg:

$$m_a \left(\frac{\alpha+1}{\alpha}\right) L_t \eta_{m, t} = m_a \frac{L_c}{\eta_{m, c}}$$

$$\eta_{m, c} \cdot \eta_{m, t} = \eta_m^{c+t}$$



## VOLUME ADDIZIONALE



$$m_a = \rho_1 (V - \Delta V + V_{add})$$

$$\lambda_v^{S*} = \frac{m_a}{m_{a, ref}} = \frac{(V - \Delta V + V_{add}) \rho_1}{V \rho_a}$$

dove  $\rho = \frac{1}{\epsilon - 1} \left[ 1 - \left(\frac{P_a}{P_c}\right)^{\frac{1}{\epsilon}} \right]$

$$\lambda_v^{S*} = (1 + \rho) \lambda_v^*$$

aumento VIRTUALE cilindrata

$$\frac{\eta_u^s}{\eta_u} \approx \frac{\eta_o^s}{\eta_o}$$

$$\eta_o^s = 1 - \frac{p_v^s}{p_{mi}^s}$$

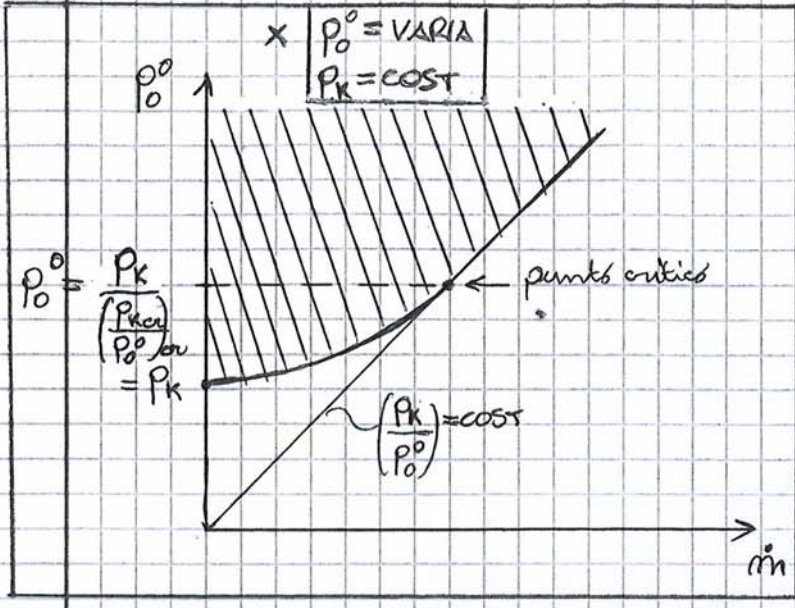
$$\eta_o = 1 - \frac{p_v}{p_{mi}}$$



$$\frac{q_b^s}{q_b} = \frac{\eta_u}{\eta_u^s} = \frac{\eta_o}{\eta_o^s}$$

per trovare il  $q_b^s$

78



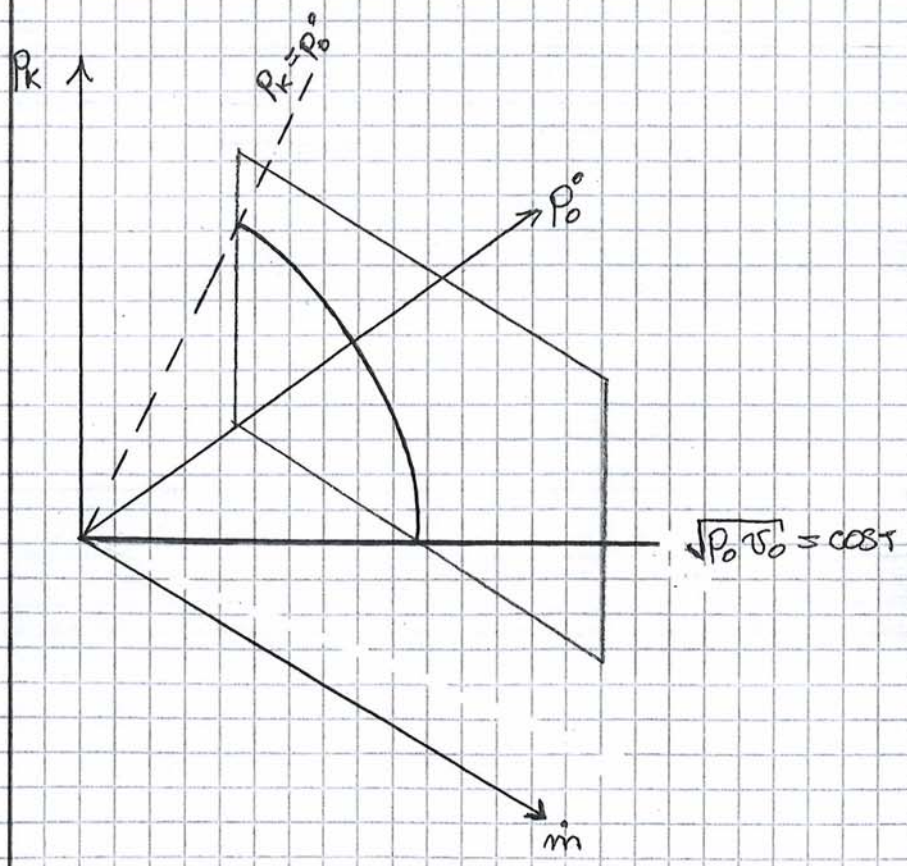
$$\frac{\dot{m}}{P_0^0} = \text{COST} \quad \& \quad P_0^0 > \frac{P_k}{\left(\frac{P_{kcr}}{P_0^0}\right)_{cr}}$$

CRITICITÀ: come risulta

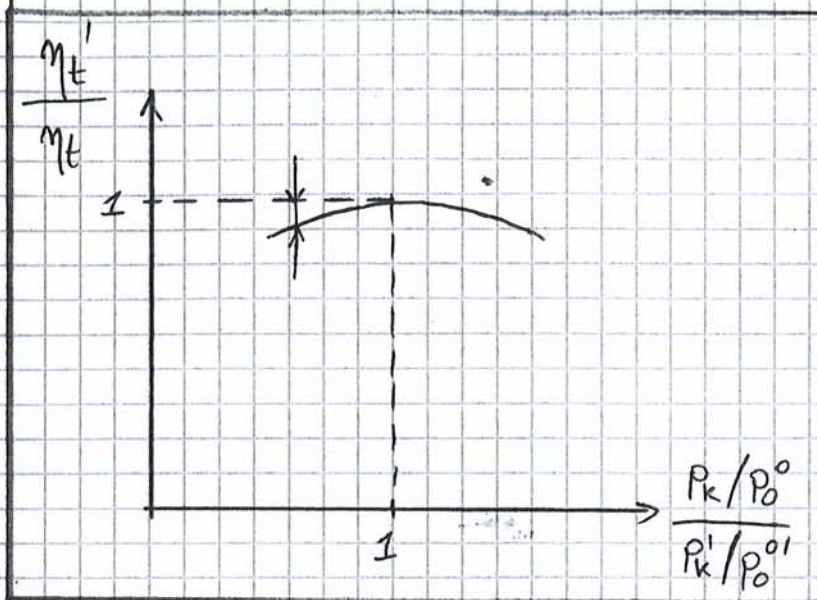
$$\frac{\dot{m} \sqrt{P_0^0 \gamma_0^0}}{A P_0^0 (1-E)} = \frac{\dot{m}' \sqrt{P_0'^0 \gamma_0'^0}}{A P_0'^0 (1-E')}$$

la portata corretta

X N° DI STADI INFINITO



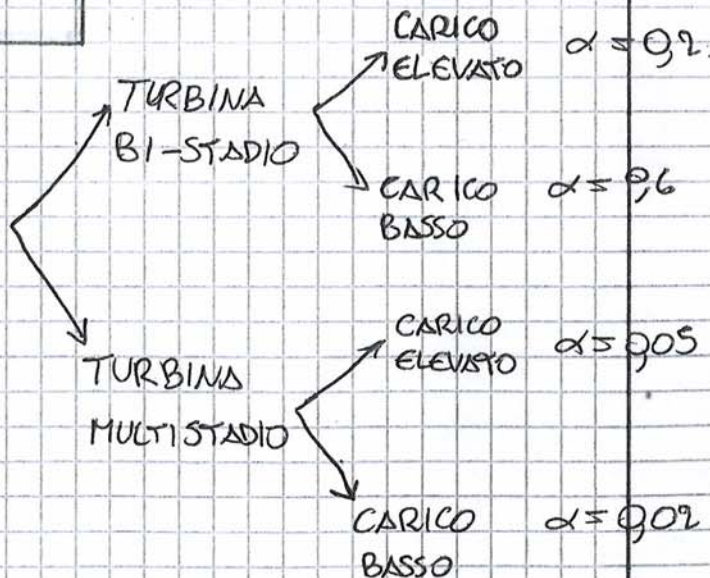
# RENDIMENTO DI UNA TURBINA IN CONDIZIONI FUORI PROGETTO



$$1 - \frac{\eta'_t}{\eta_t} = \alpha \left( \frac{P_k/P_o^o}{P'_k/P_o^o} - 1 \right)^2$$

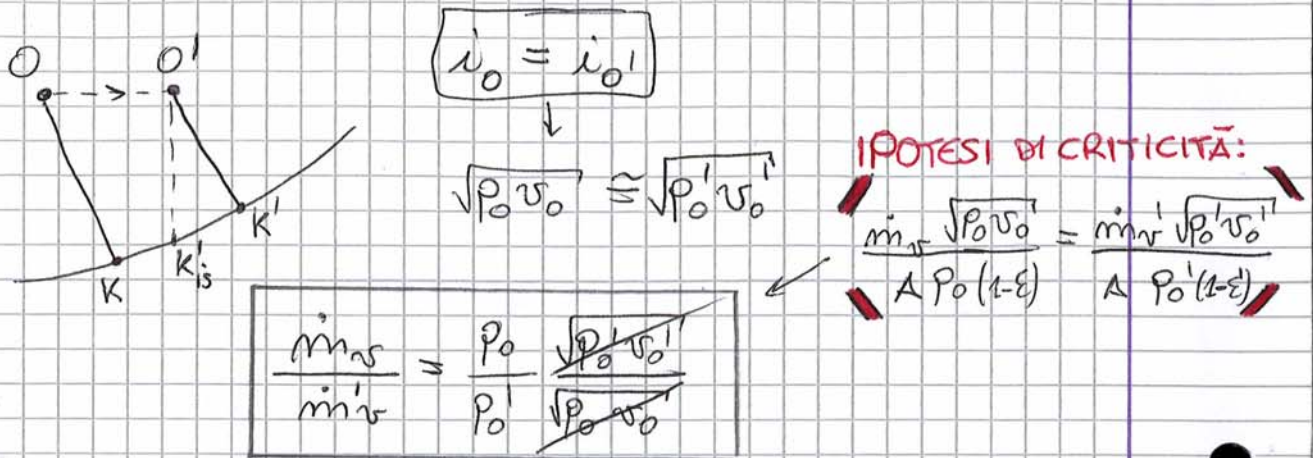
Formula valida per turbine a pochi stadi

$\alpha$  DIPENDE DAL N° DI STADI E DAL CARICO





**LAMINAZIONE**



Richiede immediata verifica della criticità!

**RAPPORTO DI ESPANSIONE CRITICO:**

Vapore surriscaldato  $k=1,3 \rightarrow \left(\frac{p}{p_0}\right)_{cr} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 0,546$

Vapore saturo  $k=1,135 \rightarrow \left(\frac{p}{p_0}\right)_{cr} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 0,577$

\* Se la turbina è "semplice ad azione" può usarsi questa formula altrimenti se è più stadi dovrebbe darla lui la  $p_{k,cr}$ .

Se durante l'esercizio viene un numero tipo 0,553?

↓  
 Dev' calcolare  $k$  tramite il Mollier:

$\Rightarrow p_H v_H^k = p_0 v_0^k \Rightarrow$  trova  $k$

# TURBINE A GAS

$$\eta_u \frac{H_i}{1+\alpha} = C'_{p,m} (T_3 - T_2) \quad \text{COMBUSTIONE}$$

$$\dot{Q} = (m_a + m_b) C_p (T_3 - T_2) \quad \text{POTENZA TERMICA FORNITA}$$

$$P_u = \eta_g m_b H_i$$

$$P_u = m_a L_u \quad \text{POTENZA UTILE}$$

$$L_u = \eta_o \left[ L_r \left( \frac{1+\alpha}{\alpha} \right) - L_c \right]$$

$$= \eta_{mt} L_r \left( \frac{1+\alpha}{\alpha} \right) - \frac{L_c}{\eta_{mc}} \quad \text{LAVORO UTILE} \times 1 \text{ kg ARIA}$$

$$\eta_g = \frac{P_u}{m_b H_i} = \frac{L_u \eta_b}{C'_{p,m} (T_3 - T_2)} \frac{\alpha}{1+\alpha} \quad \text{RENDIMENTO GLOBALE}$$

$$\eta_g = \frac{L_u}{\frac{1}{\alpha} H_i} = \frac{L_u}{\dot{Q}/\eta_b}$$

$$R_s = \frac{C_p (T_5 - T_2)}{C_p (T_{5L} - T_2)} \quad \text{EFFICIENZA RIGENERAZIONE}$$

