

Tabela D₁₂ – Dados Experimentais do Hidrociclone HF₁₂

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	267	30,35	1237	12970	3,83	7,98	67,49	53,32	1,00	0,086
1,2	302	30,44	1295	14634	3,20	6,39	70,92	58,20	1,00	0,1093
1,5	335	30,43	1310	16267	3,08	6,67	71,28	58,72	1,00	0,144
1,8	360	30,33	1134	17483	2,76	6,27	72,94	61,15	1,00	0,175

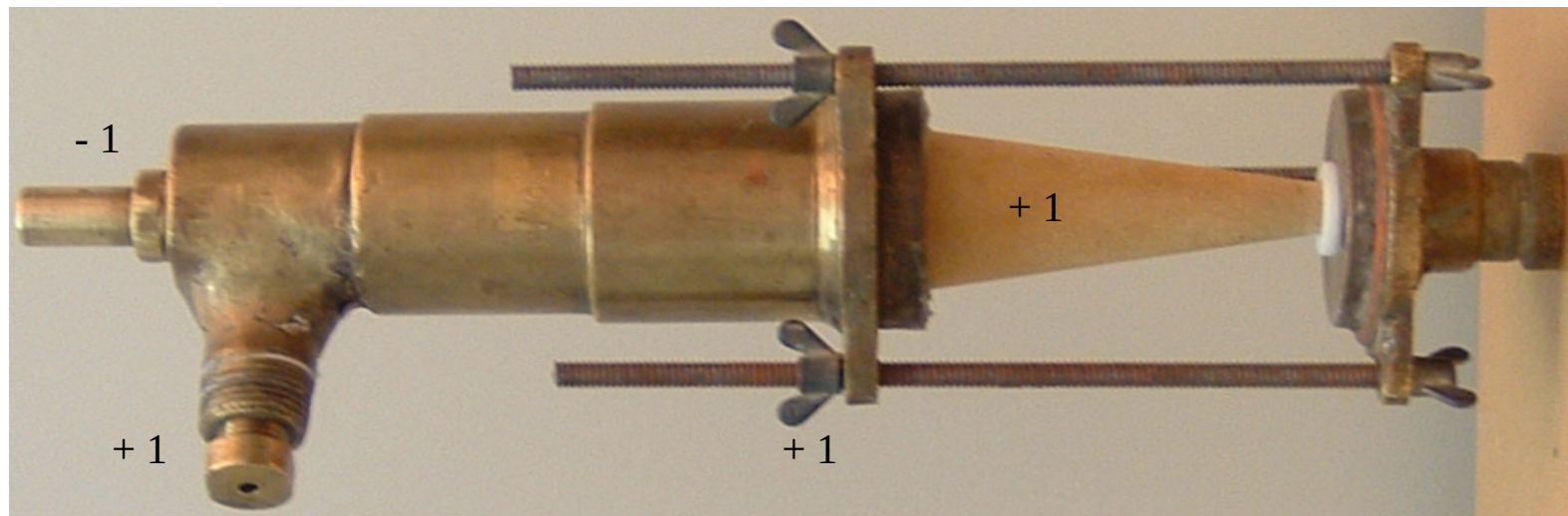


Tabela D₁₃ – Dados Experimentais do Hidrociclone HF₁₃

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	288	22,32	1065	13974	4,77	6,96	68,21	59,08	1,00	0,143
1,2	332	22,18	1068	16110	4,50	6,60	69,98	61,42	1,00	0,174
1,5	367	22,09	1195	17787	4,19	6,19	70,37	61,97	1,00	0,211
1,8	406	22,07	1072	19691	3,92	5,92	71,95	64,00	1,00	0,233

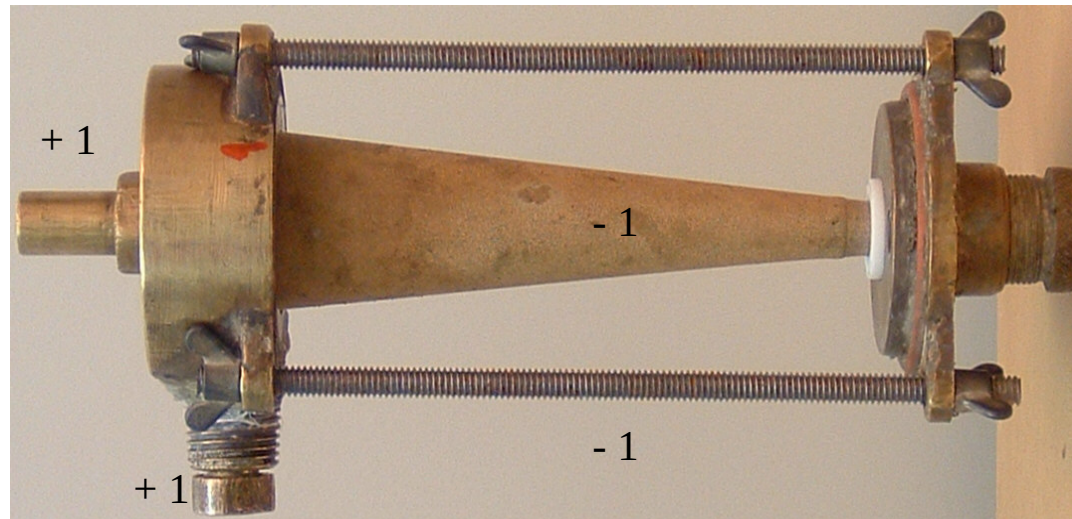


Tabela D₁₄ – Dados Experimentais do Hidrociclone HF₁₄

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	290	10,69	1045	14107	8,56	9,51	54,01	48,50	1,02	0,0824
1,2	329	10,61	1091	15944	7,87	8,84	55,96	50,74	1,02	0,112
1,5	366	10,50	1102	17738	7,87	8,79	56,17	51,02	1,02	0,128
1,8	389	10,32	1167	18879	7,75	8,62	57,48	52,55	1,02	0,161

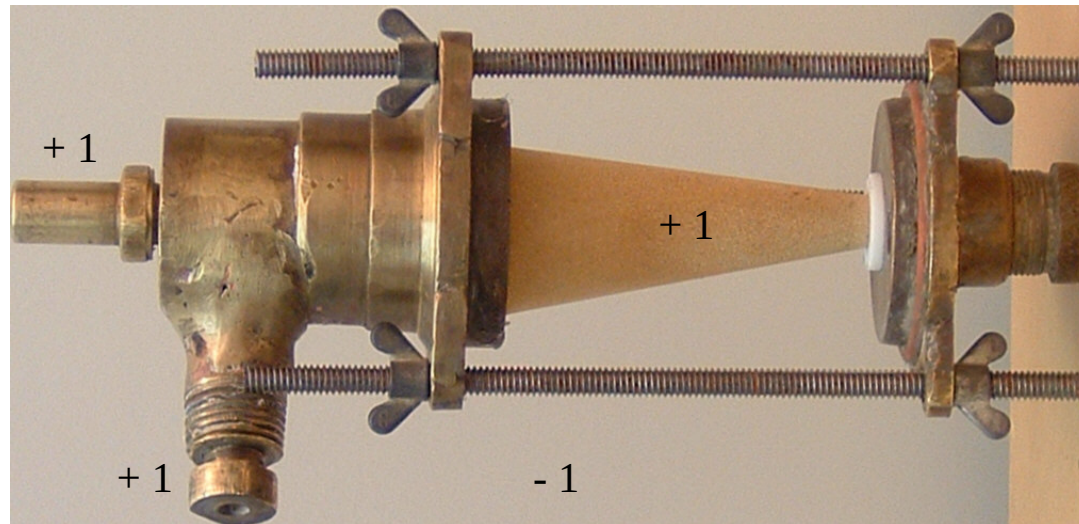


Tabela D₁₅ – Dados Experimentais do Hidrociclone HF₁₅

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	D₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	317	22,61	878	15393	5,23	7,50	66,25	56,38	1,00	0,143
1,2	361	22,48	903	17527	4,82	8,03	67,12	57,58	1,00	0,162
1,5	402	22,17	911	19507	4,61	6,63	68,80	59,91	1,00	0,228
1,8	438	22,33	924	21223	4,30	6,28	70,37	61,85	1,00	0,259

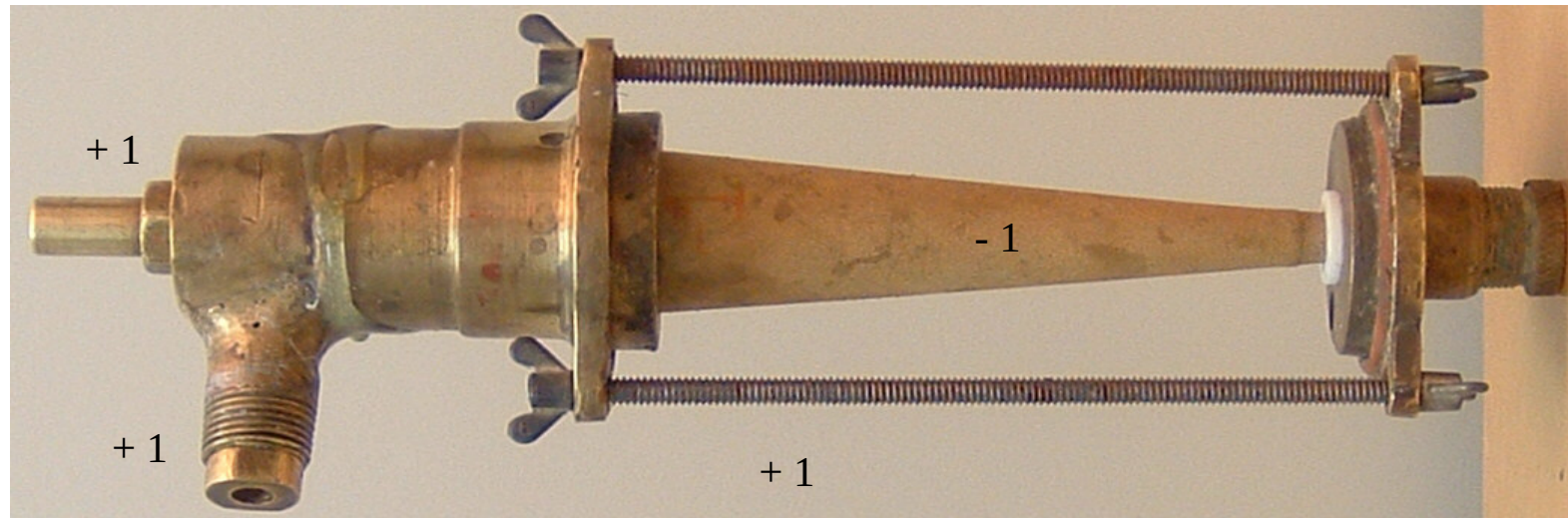


Tabela D₁₆ – Dados Experimentais do Hidrociclone HF₁₆

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	317	16,44	879	15381	7,49	9,47	55,77	47,07	1,00	0,075
1,2	361	16,14	902	17535	6,86	8,70	57,23	49,08	1,00	0,097
1,5	398	16,18	941	19195	6,26	7,95	61,33	53,86	1,00	0,125
1,8	435	16,05	938	21086	5,93	7,42	64,61	57,85	1,00	0,1460

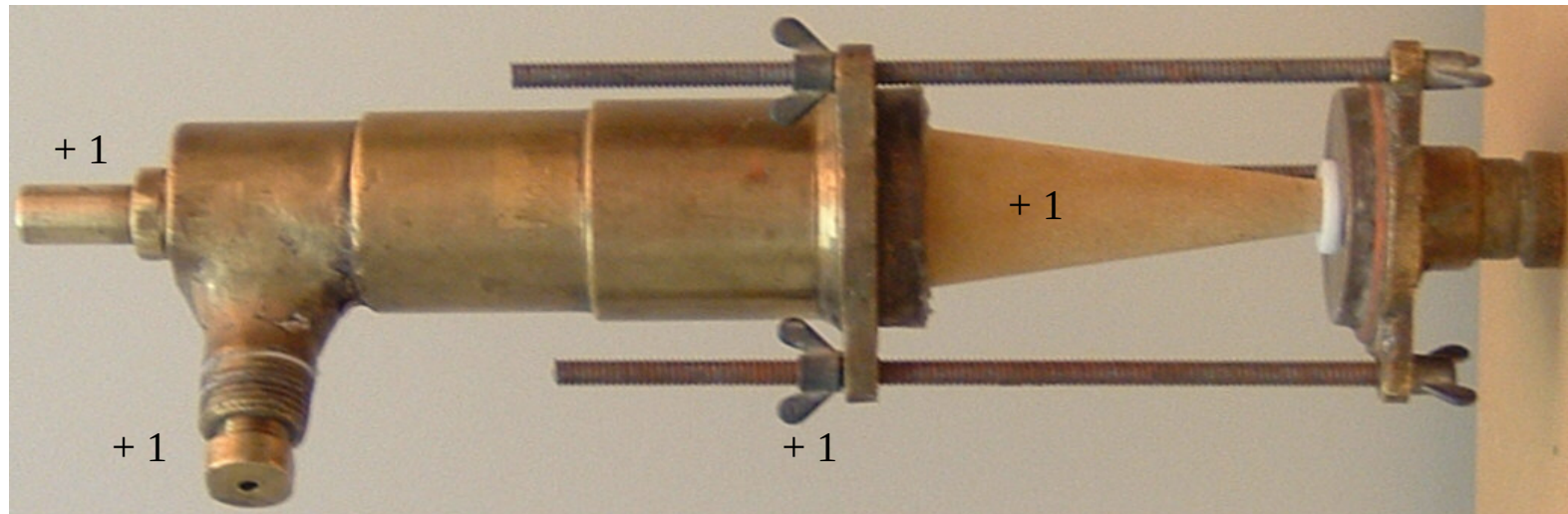


Tabela D₁₇ – Dados Experimentais do Hidrociclone HF₁₇

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	D₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	127	20,94	5511	6144	5,55	7,74	63,93	54,37	1,01	0,056
1,2	144	20,00	5680	6988	5,41	7,30	65,00	56,24	1,01	0,073
1,5	159	19,61	5854	7696	5,36	6,99	67,98	60,17	1,01	0,082
1,8	172	19,69	6007	8323	4,74	6,51	68,11	60,29	1,01	0,098

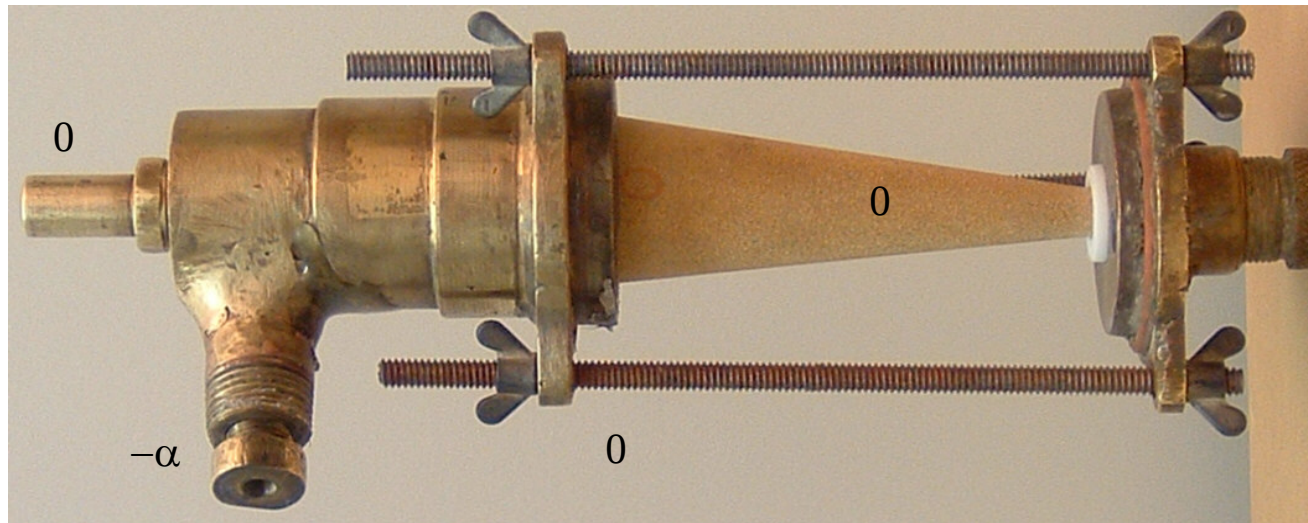


Tabela D₁₈ – Dados Experimentais do Hidrociclone HF₁₈

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	315	21,50	893	15261	6,13	8,83	59,17	47,99	1,01	0,109
1,2	358	21,24	920	17362	5,79	8,46	60,46	49,79	1,01	0,149
1,5	394	20,98	948	19127	5,45	7,82	61,98	51,88	1,01	0,188
1,8	427	21,45	967	20737	5,21	7,61	64,44	54,72	1,01	0,246

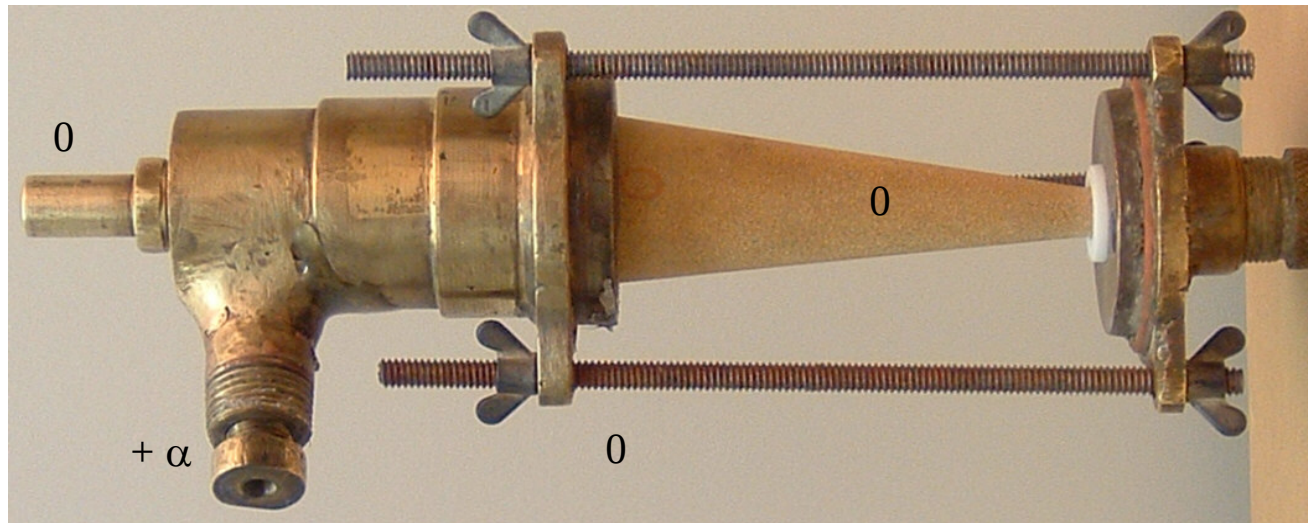


Tabela D₁₉ – Dados Experimentais do Hidrociclone HF₁₉

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA}	Q (cm³/s)
0,9	192	43,50	2396	9318	1,20	6,53	75,06	55,86	1,02	0,083
1,20	219	44,02	2461	10611	1,11	6,21	74,80	54,93	1,02	0,105
1,50	244	43,10	2472	11842	0,90	6,00	74,00	55,00	1,02	0,131
1,80	266	43,46	2505	12881	0,81	6,00	75,27	56,30	1,02	0,168

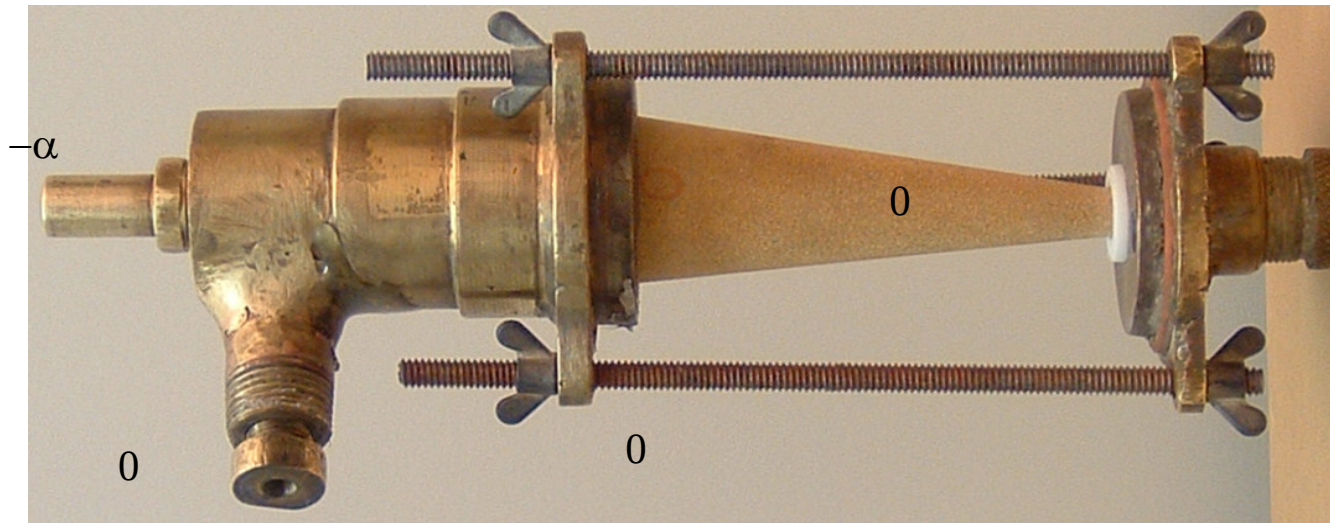


Tabela D₂₀ – Dados Experimentais do Hidrociclone HF₂₀

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA}	Q (cm³/s)
0,9	251	16,21	1405	12168	4,72	6,80	68,14	61,95	0,85	0,073
1,20	280	16,21	1507	13567	4,52	6,18	68,94	62,92	0,85	0,089
1,50	311	16,10	1521	15094	4,27	5,73	70,41	64,73	0,85	0,112
1,80	344	15,81	1489	16692	4,13	5,52	71,00	65,30	0,85	0,132

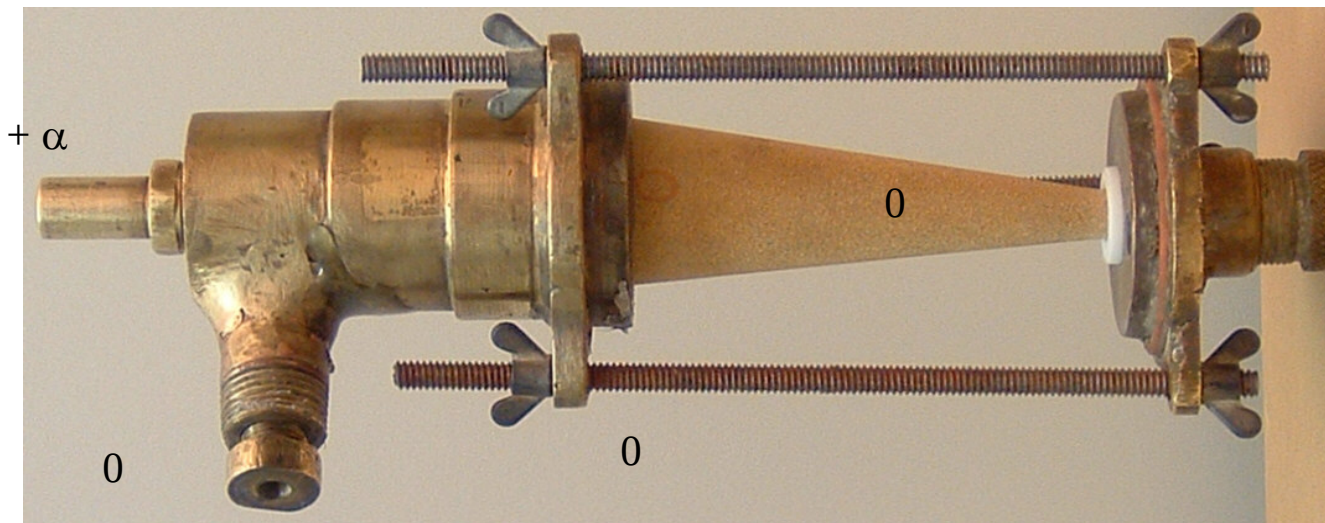


Tabela D₂₁ – Dados Experimentais do Hidrociclone HF₂₁

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	208	18,40	2039	10101	5,91	7,55	65,92	58,24	1,01	0,085
1,2	237	18,30	2102	11487	5,59	8,61	66,10	58,51	1,01	0,099
1,5	259	18,56	2199	12556	5,23	6,85	67,21	59,74	1,01	0,137
1,8	284	18,34	2192	13778	5,15	6,76	69,70	62,87	1,01	0,143

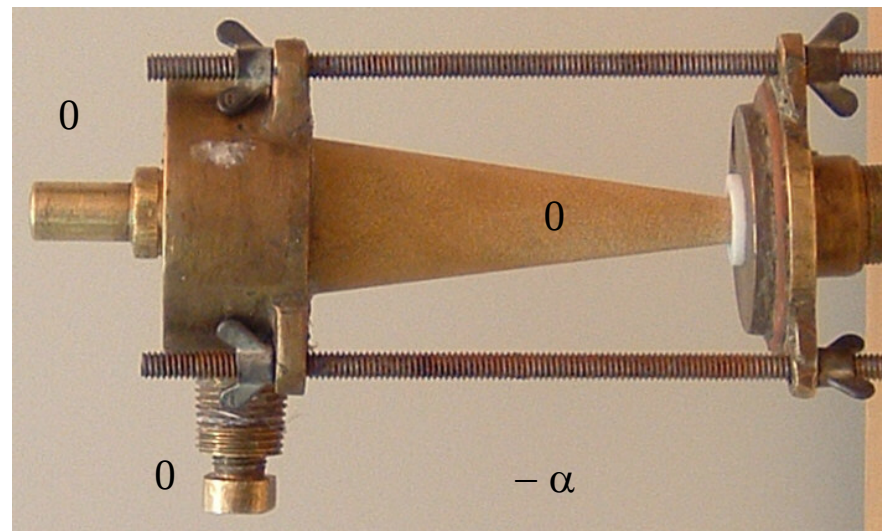


Tabela D₂₂ – Dados Experimentais do Hidrociclone HF₂₂

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	265	22,83	1262	12840	6,28	8,90	58,15	45,76	1,02	0,066
1,2	300	22,94	1309	14555	6,02	9,99	58,62	46,30	1,02	0,094
1,5	330	22,82	1350	16024	5,32	7,95	60,86	49,28	1,02	0,094
1,8	357	22,77	1384	17336	5,27	7,76	61,66	50,35	1,02	0,119

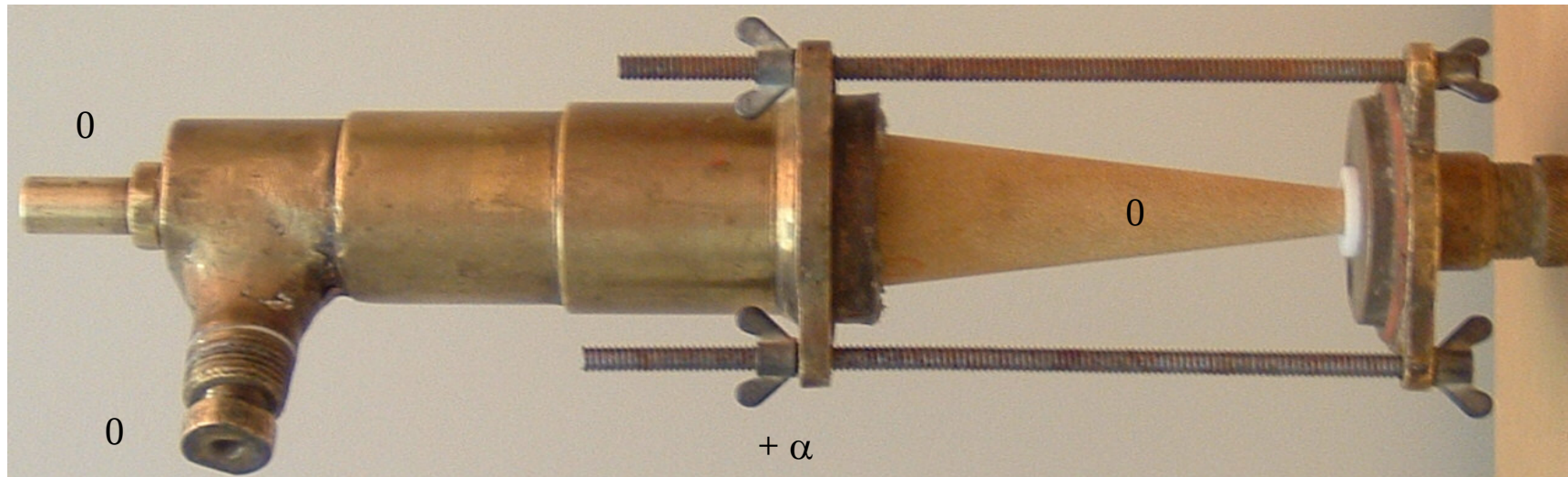


Tabela D₂₃ – Dados Experimentais do Hidrociclone HF₂₃

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	239	24,74	1547	11596	4,77	7,28	65,88	54,67	1,02	0,138
1,2	274	24,58	1570	13289	4,21	7,97	66,50	55,57	1,02	0,194
1,5	298	24,92	1656	14471	4,13	6,58	68,22	57,68	1,02	0,233
1,8	331	24,78	1610	16076	3,83	6,24	69,26	59,14	1,02	0,294

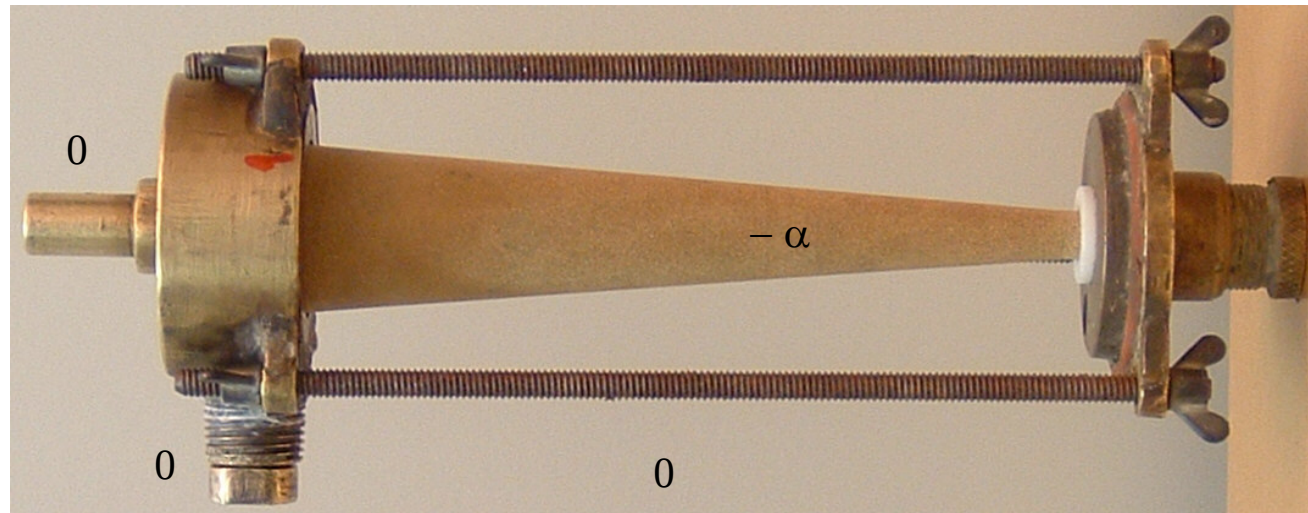


Tabela D₂₄ – Dados Experimentais do Hidrociclone HF₂₄

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	242	17,89	1511	11733	6,68	8,67	57,35	48,09	1,02	0,065
1,2	272	17,78	1591	13203	5,76	7,78	60,02	51,37	1,02	0,085
1,5	303	17,76	1600	14717	5,67	7,53	61,57	53,27	1,02	0,113
1,8	334	17,61	1584	16204	5,25	7,03	62,65	54,74	1,02	0,126

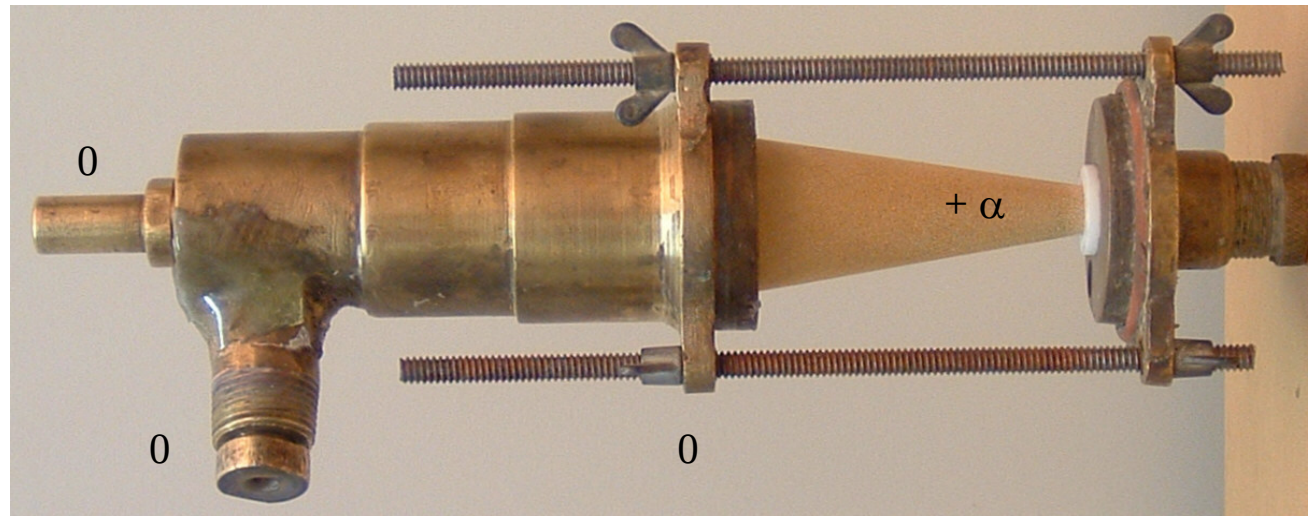


Tabela D₂₅ – Dados Experimentais do Hidrociclone HF₂₅ (1)

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	242	21,67	1507	11750	5,13	7,71	63,10	52,89	1,04	0,076
1,2	275	21,61	1554	13358	4,77	8,32	66,61	57,41	1,05	0,086
1,5	306	21,23	1576	14832	4,65	6,79	67,14	58,30	1,05	0,110
1,8	334	20,88	1589	15663	4,27	6,20	69,55	61,51	1,05	0,140

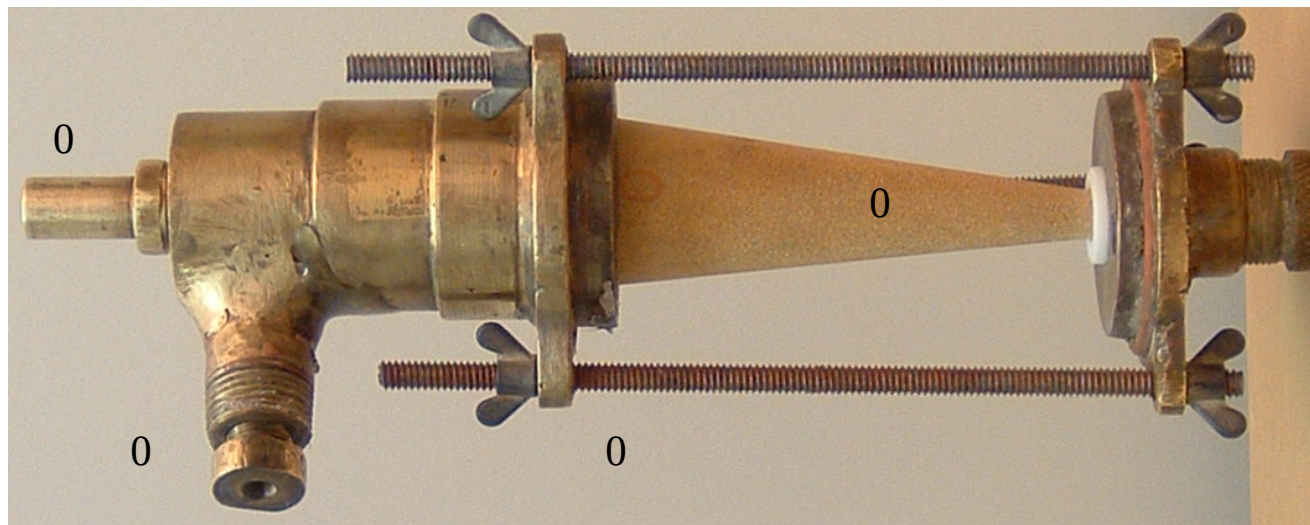


Tabela D₂₆ – Dados Experimentais do Hidrociclone HF₂₅ (2)

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	246	22,48	1455	11958	4,87	7,49	64,88	54,70	1,10	0,090
1,2	278	21,47	1529	13470	4,76	7,06	65,82	56,50	1,10	0,095
1,5	307	21,52	1558	14915	4,61	6,94	67,30	58,33	1,10	0,120
1,8	327	20,78	1651	15875	4,58	6,51	69,85	61,94	1,06	0,140

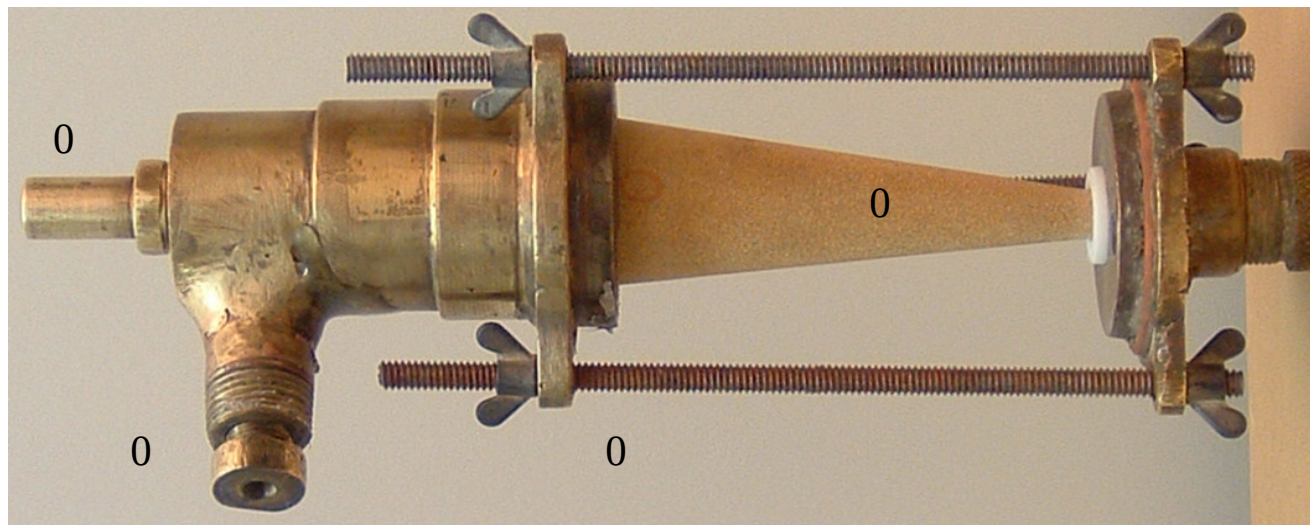


Tabela D₂₇ – Dados Experimentais do Hidrociclone HF₂₅ (3)

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	240	21,71	1536	11637	5,12	7,56	63,95	53,95	1,10	0,070
1,2	270	21,10	1612	13117	4,82	8,18	66,38	57,40	1,10	0,080
1,5	300	20,75	1636	14557	4,77	6,78	67,58	59,10	1,10	0,110
1,8	323	21,11	1696	15663	4,40	6,40	69,20	60,94	1,10	0,130

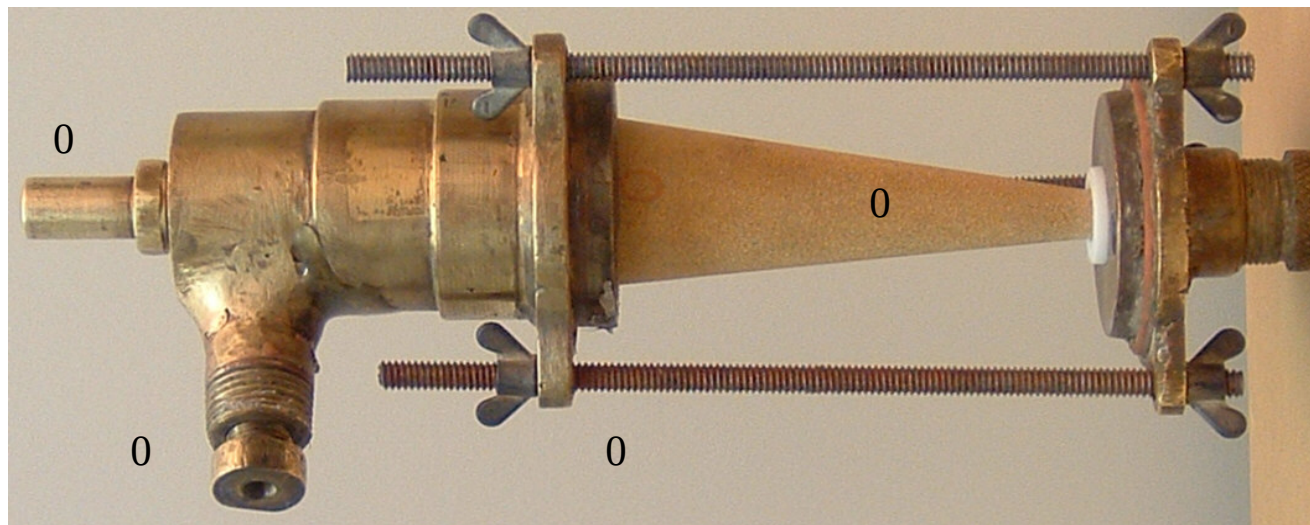


Tabela D₂₈ – Dados Experimentais do Hidrociclone HF₂₅ (4)

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	241	21,10	1525	11679	4,85	7,12	65,76	56,62	1,10	0,075
1,2	275	21,03	1558	13342	4,62	8,16	66,92	58,11	1,05	0,100
1,5	302	20,60	1617	14641	4,40	6,54	67,10	58,53	1,10	0,120
1,8	325	20,90	1673	15772	4,04	6,10	69,43	61,35	1,06	0,140

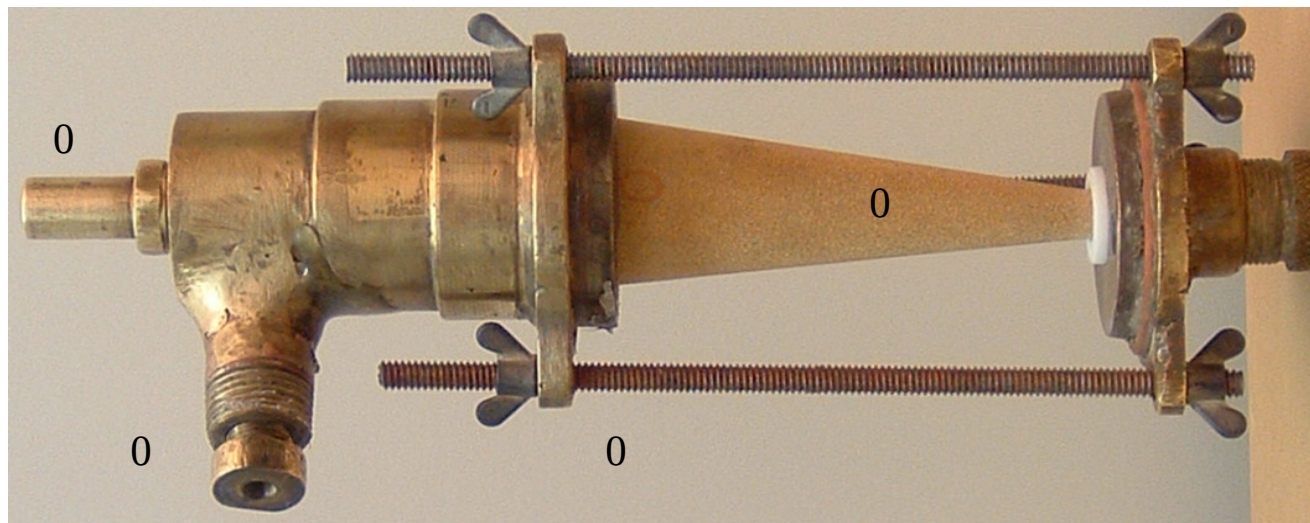
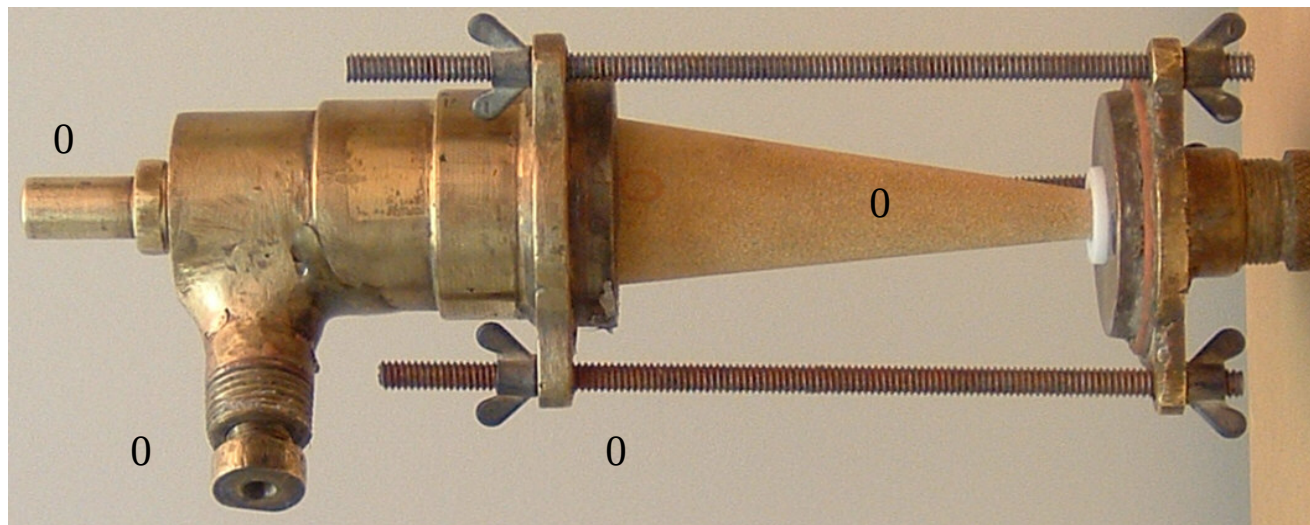


Tabela D₂₉ – Dados Experimentais do Hidrociclone HF₂₅ (5)

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	242	21,67	1507	11750	5,13	7,71	63,10	52,89	1,04	0,076
1,2	275	21,61	1554	13358	4,77	8,32	66,61	57,41	1,05	0,086
1,5	306	21,23	1576	14832	4,65	6,79	67,14	58,30	1,05	0,110
1,8	334	20,88	1589	15663	4,27	6,20	69,55	61,51	1,05	0,140



APÊNDICE E

Hidrociclones Convencionais

Dados Experimentais

Tabela E₁ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₁

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	149	29,52	4001	7210	4,85	10,26	60,36	43,76	0,73
1,2	167	29,13	4244	8084	4,60	9,48	61,17	45,20	0,73
1,5	182	28,90	4429	8847	4,30	8,92	62,54	47,32	0,73
1,8	198	28,28	4493	9623	3,93	7,83	65,18	51,45	0,73

PCC	Fatores	Dimensão	
-1	D _i	0,48	
-1	D _o	0,66	
-1	L	L1	1,50
		H	12,8
-1	θ	11,2°	

Tabela E₂ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₂

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	154	28,91	3750	7448	5,01	11,50	58,56	41,70	0,88
1,2	172	28,68	3982	8346	4,93	10,49	59,17	42,74	0,88
1,5	191	28,14	4032	9273	4,66	9,50	59,46	43,58	0,88
1,8	200	29,30	4407	9716	4,45	9,42	61,76	46,00	0,88

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
-1	D _i	0,48	
-1	D _o	0,66	
-1	L	L ₁	6,1
		H	8,0
+1	θ	17,8°	

Tabela E₃ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₃

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	158	33,01	3549	7656	3,32	7,04	69,91	55,10	0,85
1,2	178	32,58	3725	8629	2,56	6,88	70,55	56,32	0,85
1,5	197	32,00	3801	9550	2,32	6,21	70,40	56,47	0,85
1,8	210	31,80	3997	10203	2,15	5,72	72,47	59,63	0,85

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
- 1	D _i	0,48	
- 1	D _o	0,66	
+ 1	L	L ₁	8,00
		H	12,8
- 1	θ	11,2°	

Tabela E₄ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₄

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	162	32,56	3357	7872	4,88	12,33	57,54	37,04	0,83
1,2	184	31,56	3486	8919	4,22	11,61	58,81	39,80	0,83
1,5	202	30,89	3624	9782	4,01	10,50	60,12	42,29	0,83
1,8	220	31,20	3664	10657	3,45	9,50	62,23	45,10	0,83

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
-1	D _i	0,48	
-1	D _o	0,66	
+1	L	L ₁	13,0
		H	8,0
+1	θ	17,8°	

Tabela E₅ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₅

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	163	12,32	3308	7930	8,56	9,91	51,77	45,00	0,73
1,2	186	11,18	3409	9021	8,39	9,55	53,37	47,49	0,73
1,5	203	10,54	3588	9831	8,12	9,16	54,01	48,59	0,73
1,8	219	10,24	3697	10608	7,97	8,99	54,06	48,81	0,73

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
-1	D _i	0,48	
+1	D _o	0,96	
-1	L	L ₁	1,50
		H	12,8
-1	θ	11,2°	

Tabela E₆ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₆

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	174	11,41	2917	8445	10,78	12,39	43,93	36,71	0,88
1,2	195	11,10	3111	9443	10,10	11,51	46,05	39,32	0,88
1,5	215	10,94	3196	10416	9,89	11,25	46,67	40,10	0,88
1,8	235	10,50	3211	11382	9,58	10,93	47,30	41,14	0,88

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
-1	D _i	0,48	
+1	D _o	0,96	
-1	L	L ₁	6,1
		H	8,0
+1	θ	17,8°	

Tabela E₇ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₇

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	172	16,82	2971	8367	6,63	8,47	60,39	52,38	0,85
1,2	194	15,82	3139	9402	6,60	8,22	60,60	53,28	0,85
1,5	215	15,36	3175	10450	6,54	8,07	60,94	53,85	0,85
1,8	233	15,04	3257	11303	6,11	7,63	61,52	54,70	0,85

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
- 1	D _i	0,48	
+ 1	D _o	0,96	
+ 1	L	L ₁	8,00
		H	12,8
- 1	θ	11,2°	

Tabela E₈ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₈

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	181	18,71	2743	8708	8,33	11,13	50,92	39,63	0,80
1,2	203	18,54	2833	9897	8,20	11,10	51,11	40,00	0,80
1,5	226	17,93	2890	10952	7,47	10,48	53,00	42,72	0,80
1,8	242	17,16	3016	11744	7,09	9,34	54,30	44,84	0,80

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
-1	D _i	0,48	
+1	D _o	0,96	
+1	L	L ₁	13,0
		H	8,0
+1	θ	17,8°	

Tabela E₉ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₉

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	201	30,13	2181	9766	3,77	6,95	69,29	56,05	0,73
1,2	228	29,51	2277	11037	3,20	6,50	70,87	58,67	0,73
1,5	250	29,01	2365	12109	3,15	5,80	71,69	60,12	0,73
1,8	270	29,00	2416	13122	2,74	5,59	74,59	64,28	0,73

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
+1	D _i	0,78	
-1	D _o	0,66	
-1	L	L ₁	1,50
		H	12,8
-1	θ	11,2°	

Tabela E₁₀ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₁₀

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	237	32,74	1572	11504	3,94	8,54	66,45	50,11	0,88
1,2	263	32,48	1701	12768	3,50	8,09	67,15	51,34	0,88
1,5	289	32,76	1768	14002	3,29	7,44	68,12	52,60	0,88
1,8	314	33,10	1789	15250	2,78	7,12	69,00	53,64	0,88

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
+1	D _i	0,78	
-1	D _o	0,66	
-1	L	L ₁	6,1
		H	8,0
+1	θ	17,8°	

Tabela E₁₁ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₁₁

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	251	33,47	1407	12158	3,09	8,11	68,61	52,67	0,85
1,2	284	33,00	1464	13765	2,94	7,24	69,61	54,64	0,85
1,5	313	32,07	1502	15192	2,10	6,58	70,00	55,83	0,85
1,8	334	32,68	1587	16193	1,86	5,54	72,32	58,59	0,85

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
+ 1	D _i	0,78	
- 1	D _o	0,66	
+ 1	L	L ₁	8,00
		H	12,8
- 1	θ	11,2°	

Tabela E₁₂ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₁₂

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	261	32,17	1295	12675	4,42	10,13	61,06	42,58	0,83
1,2	292	32,07	1378	14188	3,69	9,71	61,71	43,63	0,83
1,5	320	31,98	1439	15520	3,50	8,42	63,64	46,54	0,83
1,8	347	31,72	1467	16838	3,39	8,10	63,40	46,39	0,83

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
+1	D _i	0,78	
-1	D _o	0,66	
+1	L	L ₁	13,0
		H	8,0
+1	θ	17,8°	

Tabela E₁₃ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₁₃

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	244	12,00	1482	11848	6,99	8,11	61,25	55,92	0,73
1,2	276	11,90	1545	13398	6,80	7,76	63,60	59,09	0,73
1,5	298	11,37	1656	14469	6,25	7,14	67,67	63,52	0,73
1,8	324	11,00	1679	15743	6,03	6,83	68,82	64,97	0,73

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
+1	D _i	0,78	
+1	D _o	0,96	
-1	L	L ₁	1,50
		H	12,8
-1	θ	11,2°	

Tabela E₁₄ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₁₄

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	291	15,44	1047	14094	7,78	9,44	55,76	47,69	0,88
1,2	325	15,12	1117	15760	7,48	9,10	56,60	48,87	0,88
1,5	355	14,28	1170	17217	7,37	8,74	58,64	51,75	0,88
1,8	388	14,10	1177	18799	7,17	8,49	59,83	53,23	0,88

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
+1	D _i	0,78	
+1	D _o	0,96	
-1	L	L ₁	6,1
		H	8,0
+1	θ	17,8°	

Tabela E₁₅ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₁₅

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	303	17,83	964	14686	6,53	8,81	59,64	50,88	0,85
1,2	337	17,74	1040	16330	6,48	8,63	59,75	51,10	0,85
1,5	376	16,87	1040	18254	6,40	8,38	60,35	52,30	0,85
1,8	406	16,54	1071	19710	6,31	8,05	62,42	54,00	0,85

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
+ 1	D _i	0,78	
+ 1	D _o	0,96	
+ 1	L	L ₁	8,00
		H	12,8
- 1	θ	11,2°	

Tabela E₁₆ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₁₆

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	313	17,19	902	15186	8,44	11,05	51,54	41,47	0,83
1,2	352	16,86	948	17100	7,51	9,82	54,14	44,83	0,83
1,5	386	16,17	986	19236	7,04	9,20	55,31	46,68	0,83
1,8	420	16,19	1001	20385	6,98	8,94	56,44	48,03	0,83

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
+1	D _i	0,78	
+1	D _o	0,96	
+1	L	L ₁	13,0
		H	8,0
+1	θ	17,8°	

Tabela E₁₇ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₁₇

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	122	17,67	5894	5941	6,49	8,58	58,96	50,15	0,82
1,2	138	16,62	6183	6698	6,70	8,49	59,00	50,56	0,82
1,5	154	15,91	6207	7474	6,21	7,91	60,41	52,92	0,82
1,8	166	15,61	6435	8040	5,63	7,18	62,84	55,97	0,82

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
- α	D _i	0,39	
0	D _o	0,81	
0	L	L ₁	7,60
		H	9,80
0	θ	14,5°	

Tabela E₁₈ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₁₈

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	296	19,71	1006	14382	7,21	9,86	57,39	46,91	0,82
1,2	333	19,47	1063	16151	6,44	9,33	57,77	47,56	0,82
1,5	367	19,22	1096	17784	6,21	8,89	59,27	49,59	0,82
1,8	400	18,90	1109	19367	5,52	8,11	60,35	51,11	0,82

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
+ α	D _i	0,87	
0	D _o	0,81	
0	L	L ₁	7,60
		H	9,80
0	θ	14,5°	

Tabela E₁₉ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₁₉

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	185	43,78	2574	8989	1,23	7,00	74,04	53,81	0,79
1,20	210	43,66	2678	10196	0,75	6,44	75,60	56,70	0,82
1,50	230	42,85	2803	11122	0,72	5,93	76,00	57,21	0,82
1,80	248	42,54	2866	12047	0,73	5,71	76,73	59,50	0,82

PCC	Fatores	Dimensões (cm)	
0	D _i	0,63	
- α	D _o	0,57	
0	L	L ₁	7,60
		H	9,80
0	θ	14,5°	

Tabela E₂₀ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₂₀

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	242	13,58	1513	11724	5,66	7,07	63,10	57,26	0,82
1,20	268	13,29	1636	13020	5,34	6,65	65,39	60,10	0,82
1,50	297	12,91	1666	14425	5,32	6,51	66,56	61,83	0,82
1,80	325	12,43	1671	15781	5,19	6,36	66,00	61,00	0,82

PCC	Fatores	Dimensões (cm)	
0	D _i	0,63	
+ α	D _o	1,05	
0	L	L ₁	7,60
		H	9,80
0	θ	14,5°	

Tabela E₂₁ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₂₁

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	191	16,65	2430	9252	7,60	9,69	53,30	43,97	1,05
1,2	213	16,58	2588	10352	7,38	9,14	53,87	44,71	1,05
1,5	239	16,00	2589	11572	7,08	9,09	54,56	45,91	1,05
1,8	254	15,65	2744	12314	6,68	8,47	55,61	47,36	1,05

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
0	D _i	0,63	
0	D _o	0,81	
- α	L	L ₁	1,19
		H	9,80
0	θ	14,5°	

Tabela E₂₂ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₂₂

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	256	21,09	1349	12418	9,62	14,62	47,65	33,66	0,98
1,2	280	20,78	1497	13609	9,33	14,00	48,16	34,56	0,98
1,5	313	20,63	1508	15163	9,19	14,07	48,21	34,75	0,98
1,8	340	20,11	1525	16515	8,89	13,07	49,17	36,37	0,98

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
0	D _i	0,63	
0	D _o	0,81	
+ α	L	L ₁	13,0
		H	9,80
0	θ	14,5°	

Tabela E₂₃ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₂₃

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	216	21,40	1901	10461	6,39	9,84	56,18	44,25	0,83
1,2	241	20,84	2029	11691	5,82	8,59	59,35	48,65	0,83
1,5	263	20,79	2137	12737	4,85	7,38	61,73	51,68	0,83
1,8	287	20,22	2245	13925	4,74	7,28	63,44	54,17	0,83

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
0	D _i	0,63	
0	D _o	0,81	
0	L	L ₁	1,50
		H	15,9
-α	θ	9,0°	

Tabela E₂₄ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₂₄

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	234	18,08	1617	11344	7,03	9,52	55,95	46,22	0,80
1,2	260	17,63	1748	12596	6,65	8,70	59,30	50,58	0,80
1,5	288	17,29	1773	13982	6,14	8,17	60,70	52,48	0,80
1,8	313	16,96	1801	15199	5,97	7,93	61,14	53,21	0,80

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
0	D _i	0,63	
0	D _o	0,81	
0	L	L ₁	10,3
		H	7,09
+ α	θ	20°	

Tabela E₂₅ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₂₅ (1)

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	228	18,44	1701	11058	6,26	8,56	58,79	49,47	0,83
1,2	255	17,92	1806	12392	5,63	7,77	61,83	53,49	0,83
1,5	282	17,57	1847	13700	5,47	7,42	62,90	54,90	0,83
1,8	306	17,31	1894	14821	5,42	7,27	62,31	54,42	0,83

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
0	D _i	0,63	
0	D _o	0,81	
0	L	L ₁	7,60
		H	9,80
0	θ	14,5°	

Tabela E₂₆ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₂₅ (2)

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	228	18,60	1707	11039	7,10	9,59	56,24	46,29	0,83
1,2	254	18,06	1822	12337	5,65	7,77	61,86	53,45	0,83
1,5	282	17,67	1858	13659	5,59	7,56	61,98	53,82	0,83
1,8	305	17,50	1904	14781	5,00	6,87	62,74	54,84	0,83

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
0	D _i	0,63	
0	D _o	0,81	
0	L	L ₁	7,60
		H	9,80
0	θ	14,5°	

Tabela E₂₇ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₂₅ (3)

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	233	18,57	1630	11296	6,10	8,26	60,58	51,59	0,83
1,2	254	18,67	1820	12345	5,55	7,53	63,50	55,11	0,83
1,5	286	17,94	1801	13875	5,78	7,32	66,08	58,66	0,83
1,8	306	17,74	1889	14842	5,70	7,14	68,24	61,38	0,83

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
0	D _i	0,63	
0	D _o	0,81	
0	L	L ₁	7,60
		H	9,80
0	θ	14,5°	

Tabela E₂₈ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₂₅ (4)

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	229	18,69	1686	11106	5,71	7,38	65,07	57,07	0,83
1,2	259	18,11	1754	12577	5,99	7,62	64,60	56,77	0,83
1,5	286	17,87	1804	13863	4,55	6,29	68,56	61,71	0,83
1,8	312	17,50	1818	15126	4,61	6,24	69,49	63,30	0,83

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
0	D _i	0,63	
0	D _o	0,81	
0	L	L ₁	7,60
		H	9,80
0	θ	14,5°	

Tabela E₂₉ – Dados Experimentais do Hidrociclone HC₂₅ (5)

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
0,9	228	18,26	1701	11059	7,08	9,30	56,77	47,11	1,00
1,2	257	18,02	1791	12445	6,64	8,75	58,50	49,38	1,00
1,5	278	18,09	1902	13502	6,74	8,89	57,85	48,54	1,00
1,8	300	17,90	1971	14530	6,37	8,51	58,29	49,19	1,00

PCC	Fatores	Dimensão (cm)	
0	D _i	0,63	
0	D _o	0,81	
0	L	L ₁	7,60
		H	9,80
0	θ	14,5°	

APÊNDICE F

Hidrociclones Filtrantes

Bradley, Rietema, Krebs e Demco

Dados Experimentais

Tabela F₁ – Dados Experimentais para o Hidrociclone BF₁

D_u (mm)	-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
5	0,9	123	32,50	5857	5890	1,92	4,93	77,64	66,87	0,85	0,144
5	1,2	140	32,14	6042	6704	1,64	4,88	77,67	67,06	0,85	0,175
5	1,5	155	32,11	6159	7422	1,60	4,70	77,72	67,19	0,85	0,215
5	1,8	170	31,25	6142	8140	1,54	4,60	78,30	68,44	0,85	0,265
4	0,9	123	16,30	5795	5890	4,24	5,57	71,77	66,28	0,85	0,132
4	1,2	141	15,81	5884	6751	3,85	5,28	71,21	65,80	0,85	0,170
4	1,5	160	16,00	5759	7661	3,33	5,19	71,75	66,66	0,85	0,205
4	1,8	173	16,10	5904	8284	2,72	4,59	72,60	66,47	0,85	0,251
3	0,9	124	7,65	5705	-	6,41	7,04	63,25	60,20	0,85	0,129
3	1,2	142	7,22	5884	-	6,49	7,03	64,70	61,95	0,85	0,176
3	1,5	154	7,52	6189	-	6,09	6,66	65,73	62,94	0,85	0,209
3	1,8	168	7,37	6237	-	5,93	6,47	68,14	65,60	0,85	0,259

Tabela F₂ – Dados Experimentais para o Hidrociclone BC

D_u (mm)	-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
5	0,9	122	39,58	5892	5942	0,61	4,19	79,92	66,76	0,82
5	1,2	138	39,14	6227	6674	0,48	3,77	80,07	67,26	0,82
5	1,5	151	39,34	6448	7333	0,39	3,59	80,32	67,56	0,82
5	1,8	163	38,60	6630	7922	0,33	3,37	80,37	68,03	0,82
4	0,9	119	23,97	6228	5779	2,81	5,22	72,92	64,38	0,82
4	1,2	134	23,81	6610	6478	2,50	4,80	73,67	65,44	0,82
4	1,5	148	23,10	6713	7187	2,48	4,67	73,56	65,62	0,82
4	1,8	160	22,89	6444	7741	2,36	4,29	75,90	68,76	0,82
3	0,9	121	14,50	6030	5873	6,56	6,83	64,74	63,35	0,82
3	1,2	136	14,41	6354	6607	6,17	6,47	66,40	64,90	0,82
3	1,5	149	14,32	6682	7203	5,89	6,18	67,47	66,10	0,82
3	1,8	162	14,12	6753	7849	5,85	6,12	68,20	66,25	0,82

Tabela F₃ – Dados Experimentais para o Hidrociclone RF₁

D_u (mm)	-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
5	0,9	308	15,98	930	14958	7,09	9,04	59,24	51,48	0,826	0,0233
5	1,2	344	15,68	993	16710	7,01	8,54	61,06	53,82	0,824	0,0296
5	1,5	382	15,60	1007	18551	6,77	8,17	62,93	56,08	0,826	0,0327
5	1,8	421	15,42	999	20410	6,53	8,06	63,62	56,99	0,826	0,0441
4	0,9	299	8,69	986	14528	9,05	9,83	53,47	49,05	0,826	0,0355
4	1,2	337	8,45	1038	16347	8,96	9,66	54,72	50,54	0,824	0,0208
4	1,5	375	8,16	1048	18185	8,46	9,22	55,47	51,51	0,826	0,0374
4	1,8	403	8,24	1090	19534	7,95	8,67	58,87	55,18	0,826	0,0475
3	0,9	289	2,70	1059	14014	11,40	11,59	46,52	45,03	0,826	0,0311
3	1,2	334	2,49	1053	16226	10,91	11,07	48,57	47,32	0,826	0,0306
3	1,5	364	2,13	1114	17642	10,66	10,80	49,16	48,05	0,826	0,0332
3	1,8	403	1,77	1091	19529	10,18	10,30	51,15	50,27	0,826	0,0437

Tabela F₄ – Dados Experimentais para o Hidrociclone RF₂

D_u (mm)	-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
5	0,9	301	11,46	977	14588	8,63	9,91	53,66	47,66	0,88	0,148
5	1,2	341	11,35	1014	16541	8,05	9,27	55,46	49,75	0,88	0,188
5	1,5	373	11,42	1058	18102	7,53	8,72	57,21	51,69	0,88	0,223
5	1,8	415	11,45	1028	20122	7,15	8,36	57,36	51,85	0,88	0,302
4	0,9	291	3,42	1046	14103	10,62	10,87	47,49	45,63	0,88	0,135
4	1,2	326	3,16	1111	15796	10,22	10,44	49,68	48,04	0,88	0,166
4	1,5	367	6,03	1096	17787	9,42	9,92	52,82	49,79	0,88	0,214
4	1,8	400	6,24	1105	19403	8,99	9,50	53,74	50,66	0,88	0,246
3	0,9	286	0,64	1078	13891	12,19	12,23	44,58	44,22	0,88	0,132
3	1,2	338	0,75	1029	16418	12,99	12,04	38,86	38,39	0,88	0,174
3	1,5	361	0,65	1134	17488	11,27	11,30	48,48	48,15	0,88	0,166
3	1,8	397	0,65	1124	19240	11,05	11,09	48,95	48,62	0,88	0,232

Tabela F₅ – Dados Experimentais para o Hidrociclone RF₃

D_u (mm)	-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
5	0,9	302	12,89	971	14635	8,38	9,74	55,22	48,59	0,88	0,103
5	1,2	345	12,30	988	16757	8,28	9,68	55,44	49,19	0,88	0,126
5	1,5	377	12,19	1037	18289	7,57	9,00	56,80	50,80	0,88	0,153
5	1,8	409	12,13	1058	19826	7,54	8,86	58,18	52,41	0,88	0,179
4	0,9	288	7,13	1067	13960	9,61	10,26	50,88	47,11	0,88	0,116
4	1,2	329	7,28	1092	15939	8,71	9,38	54,54	50,96	0,88	0,140
4	1,5	367	7,32	1092	17819	8,50	9,15	55,17	51,63	0,88	0,157
4	1,8	409	7,21	1057	19839	8,18	8,85	56,06	52,65	0,88	0,181
3	0,9	295	4,16	1018	14294	10,48	10,80	48,44	46,19	0,88	0,135
3	1,2	335	4,05	1053	16231	10,31	10,60	50,10	47,99	0,88	0,144
3	1,5	383	3,77	1005	18575	10,07	10,37	50,16	48,20	0,88	0,159
3	1,8	399	3,89	1108	19374	9,70	9,98	53,47	51,59	0,88	0,181

Tabela F₆ – Dados Experimentais para o Hidrociclone RC

D_u (mm)	-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)
5	0,9	300	12,92	981	14562	8,45	9,78	53,31	46,38	0,91
5	1,2	345	12,28	992	16724	8,35	9,53	53,81	47,35	0,91
5	1,5	375	12,27	1048	18188	8,02	9,46	53,95	47,51	0,91
5	1,8	412	11,79	1043	19968	7,86	9,07	55,88	50,00	0,91
4	0,9	292	5,35	1040	14142	10,62	11,06	46,60	43,58	0,93
4	1,2	328	5,13	1094	15920	10,31	10,72	47,29	44,44	0,93
4	1,5	361	4,91	1130	17518	9,59	9,98	50,32	47,96	0,93
4	1,8	378	4,74	1237	18340	9,07	9,44	52,73	50,38	0,93
3	0,9	289	0,67	1060	14005	13,30	13,35	41,30	40,90	0,90
3	1,2	322	0,69	1137	15618	12,86	12,90	42,86	42,46	0,90
3	1,5	358	0,67	1147	17384	12,43	12,47	44,63	44,26	0,90
3	1,8	392	0,64	1151	19009	11,81	11,85	46,76	46,38	0,90

Tabela F₇ – Dados Experimentais para o Hidrociclone KF₁

D_u (mm)	-ΔP (kgf/cm²)	C_{VA} (%)	Q (cm³/s)	Re	Eu	R_L (%)	η (%)	η' (%)	d'₅₀ (μm)	F (cm³/s)
5	0,9	1,71	230	11544	1677	60,40	86,37	65,58	4,33	0,23
5	1,2	1,64	256	12995	1804	58,23	85,36	65,47	3,33	0,25
5	1,5	1,46	283	13182	1842	57,55	81,64	56,74	2,66	0,27
5	1,8	1,17	294	15957	2049	57,69	82,43	58,21	2,56	0,30
4	0,9	1,70	227	12494	1723	56,16	81,50	57,76	5,19	0,22
4	1,2	1,44	240	12779	2068	56,98	82,77	59,96	3,79	0,26
4	1,5	1,48	261	13539	2164	54,14	87,67	73,12	3,56	0,29
4	1,8	1,44	276	13155	2320	52,68	87,80	74,25	2,90	0,33
3	0,9	1,18	192	10788	2300	38,03	72,02	57,26	5,53	0,18
3	1,2	1,66	217	10777	2512	36,04	78,13	65,80	4,31	0,22
3	1,5	1,48	220	10584	3052	34,74	78,16	66,53	4,11	0,25
3	1,8	1,48	239	11265	3095	33,80	76,04	63,81	3,52	0,28

Tabela F₈ – Dados Experimentais para o Hidrociclone KF₂

D_u (mm)	-ΔP (kgf/cm²)	C_{VA} (%)	Q (cm³/s)	Re	Eu	R_L (%)	η (%)	η' (%)	d'₅₀ (μm)	F (cm³/s)
5	0,9	1,51	205	12343	2112	58,75	79,34	54,93	4,25	0,23
5	1,2	1,49	241	13534	2038	58,84	78,21	52,90	3,54	0,26
5	1,5	1,25	255	14436	2264	51,33	81,22	57,69	3,11	0,27
5	1,8	1,41	276	13748	2319	58,64	83,13	63,61	2,90	0,29
4	0,9	1,31	203	10755	2160	53,47	81,59	64,25	4,51	0,22
4	1,2	1,44	232	13185	2192	54,51	90,02	78,07	3,66	0,23
4	1,5	1,41	243	13139	2496	51,72	81,89	62,49	3,32	0,24
4	1,8	1,19	258	13621	2666	51,98	78,86	56,45	3,25	0,27
3	0,9	1,64	185	10625	2582	34,37	78,22	66,82	5,29	0,18
3	1,2	1,67	213	11497	2608	32,62	76,06	64,47	4,77	0,21
3	1,5	1,60	221	11212	3027	30,94	73,57	61,73	4,46	0,22
3	1,8	1,51	231	10998	3318	30,44	73,48	61,87	4,15	0,23

Tabela F₉ – Dados Experimentais para o Hidrociclone KF₃

D_u (mm)	-ΔP (kgf/cm²)	C_{VA} (%)	Q (cm³/s)	Re	Eu	R_L (%)	η (%)	η' (%)	d'₅₀ (μm)	F (cm³/s)
5	0,9	1,23	233	12075	1633	59,90	83,24	58,20	3,32	0,13
5	1,2	1,26	148	13033	1754	60,56	87,74	68,91	2,90	0,15
5	1,5	1,32	273	13292	1977	60,88	87,83	68,90	2,44	0,18
5	1,8	1,26	297	14011	2000	60,04	84,72	61,76	2,33	0,21
4	0,9	1,25	220	12245	1832	55,22	83,86	63,95	3,44	0,13
4	1,2	1,20	243	13694	1992	52,38	88,13	75,07	3,24	0,16
4	1,5	1,19	260	14064	2178	51,84	80,22	58,93	3,04	0,18
4	1,8	1,17	274	14488	2364	51,76	81,38	61,40	2,88	0,22
3	0,9	1,19	196	11252	2303	35,19	72,10	56,94	4,50	0,12
3	1,2	1,14	214	12175	2571	34,51	76,19	63,64	3,44	0,14
3	1,5	1,17	227	12789	2856	33,45	75,20	62,74	3,38	0,17
3	1,8	1,24	245	13369	2952	33,20	77,05	65,64	3,17	0,20

Tabela F₁₀ – Dados Experimentais para o Hidrociclone KC

D_u (mm)	-ΔP (kgf/cm²)	C_{VA} (%)	Q (cm³/s)	Re	Eu	R_L (%)	η (%)	η' (%)	d'₅₀ (μm)
5	0,9	1,41	223	12402	1786	60,94	85,95	64,03	4,09
5	1,2	1,26	242	12413	2017	58,41	86,78	68,20	3,67
5	1,5	1,21	267	13697	2071	58,82	83,23	59,26	2,50
5	1,8	1,26	289	14371	2119	57,27	82,13	58,18	2,14
4	0,9	1,28	208	11705	2053	49,21	82,79	64,37	4,98
4	1,2	1,36	230	11428	2234	51,43	83,91	66,87	4,04
4	1,5	1,27	247	11752	2422	50,64	86,05	71,74	3,74
4	1,8	1,28	267	12433	2485	49,77	81,57	63,31	3,61
3	0,9	1,17	188	9112	2504	34,45	67,56	51,16	5,28
3	1,2	1,27	212	11254	2634	33,66	75,47	63,03	4,27
3	1,5	1,25	228	12050	2848	31,59	69,18	54,96	4,00
3	1,8	1,28	242	12020	3029	31,92	72,25	59,24	3,83

Tabela F₁₁ – Dados Experimentais para o Hidrociclone DF₁

D_u (mm)	-ΔP (kgf/cm²)	C_{VA} (%)	Q (cm³/s)	Re	Eu	R_L (%)	η (%)	η' (%)	d'₅₀ (μm)	F (cm³/s)
5	0,9	1,41	268	14777	1233	16,17	62,65	55,44	7,69	0,031
5	1,2	1,40	296	15337	1349	16,66	74,60	69,52	7,20	0,038
5	1,5	1,46	326	16195	1390	16,20	67,42	61,12	6,70	0,041
5	1,8	1,50	353	16652	1416	15,46	73,03	68,10	6,45	0,046
4	0,9	1,40	266	15693	1255	7,56	72,10	69,82	8,20	0,031
4	1,2	1,40	293	17293	1378	7,72	62,60	59,47	7,89	0,041
4	1,5	1,43	321	18394	1436	7,63	65,21	62,34	7,66	0,047
4	1,8	1,41	348	18815	1460	7,93	66,93	64,07	6,92	0,054
3	0,9	1,42	265	14156	1264	3,00	56,73	55,40	9,96	0,029
3	1,2	1,40	297	14787	1334	3,19	55,28	53,81	9,74	0,304
3	1,5	1,41	319	15530	1448	4,04	55,66	53,80	9,35	0,040
3	1,8	1,42	339	15812	1537	4,52	57,76	55,76	9,09	0,041

Tabela F₁₂ – Dados Experimentais para o Hidrociclone DF₂

D_u (mm)	-ΔP (kgf/cm²)	C_{VA} (%)	Q (cm³/s)	Re	Eu	R_L (%)	η (%)	η' (%)	d'₅₀ (μm)	F (cm³/s)
5	0,9	1,39	275	16257	1170	15,35	70,45	65,09	7,51	0,08
5	1,2	1,37	308	17674	1244	15,21	69,44	63,96	7,14	0,09
5	1,5	1,39	328	17715	1373	16,24	68,32	62,18	7,03	0,11
5	1,8	1,39	355	18237	1402	16,24	71,18	65,59	6,86	0,12
4	0,9	1,37	273	16123	1189	9,74	68,50	58,45	8,43	0,08
4	1,2	1,38	302	17514	1292	10,32	62,62	58,32	8,20	0,10
4	1,5	1,38	324	18600	1404	9,37	63,01	59,18	8,10	0,11
4	1,8	1,40	346	18704	1478	9,70	62,18	58,11	7,48	0,12
3	0,9	1,41	265	13178	1260	4,49	53,08	50,87	10,50	0,08
3	1,2	1,41	296	14577	1344	4,41	48,21	45,93	10,17	0,10
3	1,5	1,41	320	15233	1442	4,22	55,51	53,55	9,64	0,11
3	1,8	1,43	336	15498	1564	5,23	56,36	53,95	9,11	0,12

Tabela F₁₃ – Dados Experimentais para o Hidrociclone DF₃

D_u (mm)	-ΔP (kgf/cm²)	C_{VA} (%)	Q (cm³/s)	Re	Eu	R_L (%)	η (%)	η' (%)	d'₅₀ (μm)	F (cm³/s)
5	0,9	1,49	272	13237	1196	15,61	74,32	69,57	6,97	0,036
5	1,2	1,48	305	14361	1269	15,43	71,77	66,61	6,68	0,043
5	1,5	1,40	330	15432	1351	15,05	70,09	64,79	6,33	0,051
5	1,8	1,40	359	16365	1372	15,05	65,82	59,77	5,90	0,054
4	0,9	1,41	269	13538	1220	10,76	71,08	67,60	7,84	0,038
4	1,2	1,41	299	15051	1316	10,81	68,96	65,20	7,74	0,048
4	1,5	1,39	326	15555	1388	11,01	65,43	61,16	7,58	0,054
4	1,8	1,38	354	16142	1410	11,34	66,69	62,43	7,27	0,062
3	0,9	1,41	264	13960	1273	3,65	48,09	46,12	11,02	0,039
3	1,2	1,39	292	14855	1379	3,61	49,83	47,95	10,97	0,046
3	1,5	1,40	319	16220	1446	3,50	57,15	55,60	9,46	0,054
3	1,8	1,40	351	16379	1432	3,88	58,15	56,47	8,96	0,057

Tabela F₁₄ – Dados Experimentais para o Hidrociclone DC

D_u (mm)	-ΔP (kgf/cm²)	C_{VA} (%)	Q (cm³/s)	Re	Eu	R_L (%)	η (%)	η' (%)	d'₅₀ (μm)
5	0,9	1,36	267	13399	1245	12,63	65,52	60,54	7,62
5	1,2	1,37	294	14356	1360	12,35	69,51	65,21	7,02
5	1,5	1,36	328	15458	1370	11,69	69,72	65,71	6,86
5	1,8	1,36	339	1563	1538	12,67	69,11	64,63	6,61
4	0,9	1,39	265	13169	1262	7,25	53,60	49,97	10,0
4	1,2	1,38	293	13795	1376	7,50	64,36	61,47	9,22
4	1,5	1,36	319	14711	1447	7,59	63,64	60,66	8,46
4	1,8	1,40	334	14922	1580	7,57	61,08	57,89	8,34
3	0,9	1,33	261	14260	1297	2,19	58,97	58,06	10,1
3	1,2	1,28	291	15700	1398	2,55	55,83	54,68	9,49
3	1,5	1,28	310	16427	1532	2,71	57,77	56,59	9,04
3	1,8	1,28	332	17039	1606	3,46	57,80	56,30	8,94

APÊNDICE G

Razões de Líquido

e

Quedas de Pressão

Valores Simulados

Tabela G₁ – Valores simulados de razão de líquido e queda de pressão obtidos via CFD para os hidrociclones filtrantes

HF_i	N	Re	Q (cm³/s)	-ΔP^{exp} (kgf.cm⁻²)	-ΔP^{CFD} (kgf.cm⁻²)	R_L^{exp} (%)	R_L^{CFD} (%)
HF ₁	46935	50445	197	1,50	1,45	38,82	39,67
HF ₂	64215	50445	166	1,50	1,65	21,95	22,86
HF ₃	97720	53837	204	1,50	1,52	37,52	37,68
HF ₄	83620	54372	206	1,50	1,43	29,90	31,22
HF ₅	83881	55956	212	1,50	1,49	24,02	23,74
HF ₆	67998	58332	221	1,50	1,57	10,75	10,98
HF ₇	103110	58332	221	1,50	1,30	21,80	21,04
HF ₈	88433	58859	223	1,50	1,59	16,67	15,80
HF ₉	79765	49378	304	1,50	1,50	36,71	37,76
HF ₁₀	64510	48175	296	1,50	1,46	22,44	22,44
HF ₁₁	97835	53871	331	1,50	1,50	36,56	37,84
HF ₁₂	83685	54522	335	1,50	1,50	31,38	35,00
HF ₁₃	83948	53383	367	1,50	1,51	21,05	22,16
HF ₁₄	68065	59567	366	1,50	1,54	10,95	10,53
HF ₁₅	103177	68426	402	1,50	1,48	22,39	20,43
HF ₁₆	119555	64775	398	1,50	1,47	16,20	17,10
HF ₁₇	82412	52081	159	1,50	1,49	20,06	20,06
HF ₁₈	84920	57491	394	1,50	1,57	21,29	21,30
HF ₁₉	81822	49167	244	1,50	1,50	44,00	44,00
HF ₂₀	73818	62667	311	1,50	1,51	16,08	16,10
HF ₂₁	65912	52189	259	1,50	1,51	18,40	18,36
HF ₂₂	117426	66496	330	1,50	1,50	22,84	22,84
HF ₂₃	101728	60048	298	1,50	1,50	24,76	25,60
HF ₂₄	73496	61055	303	1,50	1,59	17,74	17,34
HF ₂₅	82412	65652	301	1,50	1,50	19,76	19,77

Tabela G₂ – Valores simulados de razão de líquido e queda de pressão obtidos via CFD para os hidrociclones convencionais

HC_i	N	Re	Q (cm³/s)	-ΔP^{exp} (kgf.cm⁻²)	-ΔP^{CFD} (kgf.cm⁻²)	R_L^{exp} (%)	R_L^{CFD} (%)
HC ₁	46935	50445	197	1,66	1,84	28,95	33,70
HC ₂	43815	50445	166	1,50	1,60	28,75	28,47
HC ₃	65070	53837	204	1,66	1,79	32,37	31,50
HC ₄	63120	54372	206	1,57	1,45	32,00	31,38
HC ₅	50131	55956	212	1,68	1,72	11,07	11,87
HC ₆	46848	58332	221	1,60	1,58	10,98	11,39
HC ₇	69360	58332	221	1,60	1,59	16,00	16,95
HC ₈	67283	58859	223	1,50	1,51	18,08	18,56
HC ₉	47065	49378	304	2,02	2,36	29,41	34,41
HC ₁₀	44010	48175	296	1,60	1,80	32,77	31,44
HC ₁₁	65135	53871	331	1,78	1,77	32,80	33,90
HC ₁₂	63185	54522	335	1,67	1,68	32,00	34,50
HC ₁₃	50198	53383	367	1,82	1,68	11,56	11,78
HC ₁₄	46915	59567	366	1,60	1,50	14,50	14,58
HC ₁₅	69427	68426	402	1,76	1,72	17,25	17,00
HC ₁₆	85105	64775	398	1,60	1,57	16,60	17,00
HC ₁₇	56606	52081	159	1,65	1,66	16,45	16,50
HC ₁₈	59070	57491	394	1,74	1,61	19,32	19,82
HC ₁₉	56122	49167	244	1,72	1,77	43,03	48,25
HC ₂₀	52118	62667	311	1,65	1,57	13,05	13,10
HC ₂₁	40062	52189	259	1,83	1,82	16,22	15,48
HC ₂₂	83226	66496	330	1,65	1,61	20,61	20,65
HC ₂₃	59928	60048	298	1,87	1,95	20,81	19,60
HC ₂₄	54846	61055	303	1,68	1,90	17,50	16,70
HC ₂₅	56562	65652	301	1,78	2,05	17,81	18,05

APÊNDICE H

Regressões Múltiplas

e

Análise Canônica

Hidrociclones Filtrantes

H₁ – Regressões Múltiplas para determinação das Superfícies de Resposta dos Hidrociclones Filtrantes

Tabela H₁ – Regressões Múltiplas para as principais respostas do Hidrociclone Filtrante ($-\Delta P = 0,9 \text{ kgf.cm}^{-2}$)

	β	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1X_2	X_1X_3	X_1X_4	X_2X_3	X_2X_4	X_3X_4	X_1X_1	X_2X_2	X_3X_3	X_4X_4	R
Q	241,41	55,61	16,77	10,76		8,94	5,31					-8,07	-7,89	-2,47		0,9970
R _L	21,52		-7,13	1,48	-4,38						1,90		3,31			0,9814
Re	11709	2693	815	529		431	251					-390	-387	-113		0,9810
Eu	1536	-1104	-263	-155								575	105			0,9868
d ₅₀	5,19		1,49		1,17					0,40	-0,48	0,29	-0,74	0,39		0,9567
d' ₅₀	7,89		0,66		1,06											0,7422
η	62,58		-4,69		-5,47								2,88			0,8967
η'	54,01		-2,60		-4,69											0,7010
F	0,0771	0,0219			-0,0217	0,0051		-0,0051			-0,0062				0,0078	0,9631

P.S.: Somente foram considerados os coeficientes com grau de significância menor que 10%

Tabela H₂ – Regressões Múltiplas para as principais respostas do Hidrociclone Filtrante ($-\Delta P = 1,2 \text{ kgf.cm}^{-2}$)

	β	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1X_2	X_1X_3	X_1X_4	X_2X_3	X_2X_4	X_3X_4	X_1X_1	X_2X_2	X_3X_3	X_4X_4	R
Q	273,56	63,56	19,52	12,71		10,43	5,06					-8,86	-9,40	-2,54		0,9971
R_L	21,26		-7,26	1,44	-4,25						1,93		3,45			0,9835
Re	13287	3080	943	624		490	266					-439	-476	-134		0,9973
Eu	1596	-1162	-295	-184								597	122			0,9869
d_{50}	4,78		1,48		1,14					0,34	-0,46	0,31	-0,69	0,39		0,9506
d'_{50}	7,32		0,77		1,04											0,7500
η	64,21		-4,28		-5,36								2,42			0,8620
η'	55,68				-4,54											0,6200
F	0,0966	0,0266			-0,0256						-0,0077				0,0112	0,9305

P.S.: Somente foram considerados os coeficientes com grau de significância menor que 10%

Tabela H₃ – Regressões Múltiplas para as principais respostas do Hidrociclone Filtrante ($-\Delta P = 1,5 \text{ kgf.cm}^{-2}$)

	β	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1X_2	X_1X_3	X_1X_4	X_2X_3	X_2X_4	X_3X_4	X_1X_1	X_2X_2	X_3X_3	X_4X_4	R
Q	306,65	70,52	21,42	13,38		11,12	5,62					-11,36	-10,99	-4,86		0,9936
R _L	21,14		-7,21	1,47	-4,26						1,96		3,36			0,9842
Re	14806	3443	1031	667		534	270					-527	-514	-210		0,9957
Eu	1637	-1190	-293	-177								615	108			0,9862
d ₅₀	4,81		1,44		1,09						-0,50	0,33	-0,69			0,9360
d' ₅₀	6,89		0,49		1,02											0,7140
η	65,87		-4,10		-5,19			3,424					2,09			0,8582
η'	56,94		-2,24		-4,37											0,7043
F	0,1201	0,0331			-0,0322	0,0098									0,0151	0,9434

P.S.: Somente foram considerados os coeficientes com grau de significância menor que 10%

Tabela H₄ – Regressões Múltiplas para as principais respostas do Hidrociclone Filtrante ($-\Delta P = 1,8 \text{ kgf.cm}^{-2}$)

	β	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₁ X ₄	X ₂ X ₃	X ₂ X ₄	X ₃ X ₄	X ₁ X ₁	X ₂ X ₂	X ₃ X ₃	X ₄ X ₄	R
Q	328,58	76,94	24,08	14,60		12,31	5,31					-11,34	-9,35	-3,76		0,9962
R _L	21,12		-7,26	1,44	-4,37						1,95		3,37			0,9832
Re	15766	3342	1135	742		632						-1261				0,9729
Eu	1732	-1230	-299	-201								635				0,9834
d ₅₀	4,55		1,42	-0,25	1,06					0,32	-0,52		-0,65	0,33		0,9504
d' ₅₀	6,65		0,51		0,87											0,7162
η	67,41		-4,00		-5,27								1,96			0,8505
η'	59,52				-4,61											0,6370
F	0,1407	0,0287			-0,0373							-0,0127			0,0257	0,898

P.S.: Somente foram considerados os coeficientes com grau de significância menor que 10%

H₂ – Planejamento Composto Central - Considerações

Inicialmente deve ser informado ao leitor que o material disposto nesta seção foi elaborado com base no curso de *Estatística Aplicada e Planejamento de Experimentos*, ministrado pelo Prof. Marcos Antonio de Souza Barrozo, docente do Programa de pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

Sabe-se que planejamentos compostos centrais são planejamento de 1ª ordem aumentados por pontos adicionais para permitir a estimação dos parâmetros de uma superfície de 2ª ordem. Desta forma, os planejamentos composto são planejamentos fatoriais do tipo 2^k (matriz A , onde k representa o número de fatores ou variáveis) ou fatorial fracionado com níveis codificados em “-1” e “+1” aumentados por pontos adicionais (matriz A^{ad}), como se vislumbra nas matrizes a seguir.

$$A = \begin{matrix} & X_1 & X_2 & X_3 & & X_k \\ \begin{matrix} A = \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & \dots & -1 \\ -1 & -1 & -1 & \dots & +1 \\ -1 & +1 & +1 & \dots & -1 \\ -1 & +1 & +1 & \dots & +1 \\ -1 & -1 & -1 & \dots & -1 \\ -1 & -1 & -1 & \dots & +1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ +1 & +1 & +1 & \dots & +1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$A^{ad} = \begin{matrix} & X_1 & X_2 & X_3 & & X_k \\ \begin{matrix} A^{ad} = \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -\alpha & 0 & 0 & \dots & 0 \\ +\alpha & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\alpha & 0 & \dots & 0 \\ 0 & +\alpha & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha & \dots & 0 \\ 0 & 0 & +\alpha & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -\alpha \\ 0 & 0 & 0 & \dots & +\alpha \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Na matriz A^{ad} , o valor de α deve ser selecionado pelo pesquisador de acordo com os limites físicos de cada variável e réplicas no ponto central (n_r) devem ser feitas para atingir algumas propriedades do planejamento (ortogonalidade e domínio experimental). Portanto, num planejamento composto central, o número de experimentos (N) a serem feitos pelo pesquisador está simbolizado na Equação H₁.

$$N = 2^k + 2k + n_r \quad (H_1)$$

Para darmos continuidade aos propósito desta seção, exemplifiquemos e consideremos um PCC onde se deseja estudar três fatores ($k = 3$). Assim, o número de pontos fatoriais é 8

($G = 2^k$) e o número de pontos adicionais 7 ($T = 2k + n_r$), considerando apenas uma réplica ($n_r = 1$) do ponto central, na concepção do modelo proposto na Equação H₂ ($\alpha \neq 1$).

$$y_u = \beta_o + \sum_{j=1}^3 \beta_j x_{ju} + \sum_{j=1}^3 \beta_j x_{jj} \left(x_{ju}^2 - \bar{x}_j^2 \right) + \sum_{1}^p \sum_{1}^j \beta_{jp} x_{ju} x_{pu} + \varepsilon_u \quad (j < p) \quad (u=1 \dots N) \quad (H_2)$$

Dispondo o modelo acima na forma matricial tem-se:

$$X = \begin{bmatrix} \beta_o & \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \beta_{11} & \beta_{22} & \beta_{33} & \beta_{12} & \beta_{13} & \beta_{23} \\ +1 & -1 & -1 & -1 & 1-c & 1-c & 1-c & +1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 & 1-c & 1-c & 1-c & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 & 1-c & 1-c & 1-c & -1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & +1 & 1-c & 1-c & 1-c & -1 & -1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 & 1-c & 1-c & 1-c & -1 & -1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 & +1 & 1-c & 1-c & 1-c & -1 & +1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 & -1 & 1-c & 1-c & 1-c & +1 & -1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 & 1-c & 1-c & 1-c & +1 & +1 & +1 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & -c & -c & -c & 0 & 0 & 0 \\ +1 & -\alpha & 0 & 0 & \alpha^2-c & -c & -c & 0 & 0 & 0 \\ +1 & +\alpha & 0 & 0 & \alpha^2-c & -c & -c & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & -\alpha & 0 & -c & \alpha^2-c & -c & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & +\alpha & 0 & -c & \alpha^2-c & -c & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & -\alpha & -c & -c & \alpha^2-c & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & +\alpha & -c & -c & \alpha^2-c & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Na matriz X, c foi inserido como artifício matemático no sentido de tornar ortogonal a $X^{-1}X$. O valor de c pode ser calculado pela Equação H₃, conforme se apreende na literatura.

$$c = \frac{G + 2\alpha^2}{G + T} \quad (H_3)$$

Continuando, a seguir é apresentada a matriz que simboliza o produto entre as matrizes X^{-1} e X.

$$X^{-1}X = \begin{bmatrix} \beta_0 & \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \beta_{11} & \beta_{22} & \beta_{33} & \beta_{12} & \beta_{13} & \beta_{23} \\ 15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8+2\alpha^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8+2\alpha^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8+2\alpha^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q & p & q & q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q & q & p & q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \end{bmatrix}$$

Da matriz $X^{-1}X$, segundo a literatura sobre o assunto, pode-se genericamente concluir que:

I – Não se valendo do PCC, seriam necessários a realização de 27 experimentos (3^k), ao passo que com ele, tal quantia se reduziu para apenas 15 ensaios experimentais;

II – O elemento $X^{-1}X (1,1)$ equivale ao número de experimentos ($N = G + T=15$);

III – Elementos diagonais correspondentes aos coeficientes de 1ª ordem: $G + 2\alpha^2$;

IV – Elementos diagonais correspondentes aos coeficientes de interação: G ;

V – A matriz ($k \times k$) simétrica correspondente aos coeficientes quadráticos, representados pelas Equações H₄ e H₅:

$$p = \frac{GT - 4G\alpha^2 - 4\alpha^4 + 2(G + T)\alpha^4}{G + T} \quad (H_4)$$

$$q = \frac{GT - 4G\alpha^2 - 4\alpha^4}{G + T} \quad (H_5)$$

Isto posto, passemos à discussão do planejamento composto central ortogonal. O planejamento composto central ortogonal é um PCC com a particularidade de possuir coeficientes nulos nas posições alheias à diagonal principal. Tal fato facilita a estimativa dos coeficientes do modelo e não os deixa correlacionados entre si (MYERS, 1976). Em outros termos:

$$q = 0 \rightarrow GT - 4G\alpha^2 - 4\alpha^4 = 0 \quad (H_6)$$

Resolvendo a Equação H₆ para α tem-se:

$$\alpha = \left(\frac{QG}{4} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (H_7)$$

onde

$$Q = \left[(G + T)^{\frac{1}{2}} - G^{\frac{1}{2}} \right]^2 \quad (H_8)$$

Eis então, uma forma para reduzir o número de experimentos e calcular o valor de α a fim de se chegar a uma matriz ortogonal.

H_{2.1} – Técnica das Superfícies de Resposta - Considerações

Nesta subseção serão feitas algumas considerações importantes a respeito das superfícies de resposta e do processo de otimização através da análise canônica.

Consideremos uma determinada resposta de interesse (η) em função de k variáveis independentes ($\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_k$) como na Equação H₉.

$$\eta = f(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_k) \quad (H_9)$$

Deve ser dito que a função f geralmente é desconhecida ou possui uma forma complicada sob o prisma analítico e matemático. Portanto, as técnicas de superfícies de resposta têm como objetivo aproximar a função do tipo f a um polinômio de ordem baixa numa região das variáveis independentes, quer de 1ª ou 2ª ordem (Equações H₁₀ e H₁₁, respectivamente). Também é usual a função f ser apresentada com as variáveis ξ_i na sua respectiva forma codificada x_i .

$$\eta = \beta_o + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (H_{10})$$

$$\eta = \beta_o + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j \quad (H_{11})$$

Sistematizando, as técnicas de superfície de resposta objetivam encontrar valores de previsão de respostas futuras, bem como encontrar os valores das variáveis independentes nos quais a resposta esteja otimizada, ou seja, maximizada ou minimizada conforme a natureza do problema.

No processo de otimização mencionado logo mais, algumas dificuldades podem ser inerentes à localização dos pontos ótimos da função estimada. Entre elas, podem ser citados: o fato da região experimental usada ser uma vizinhança do ponto ótimo ou o ponto otimizado estar distante da região experimental usada (ou ainda, ausência de pontos ótimos em qualquer domínio experimental).

Enfim, independentemente da natureza dos pontos que otimizam a função f , como suposições básicas, as variáveis independentes devem ser quantitativas, contínuas, controladas no processo e medidas com os menores erros possíveis (eliminação dos erros sistemáticos).

H_{2.1.1} – Otimização das Superfícies de Resposta

Um modelo de segunda ordem pode ser escrito na forma geral e matricial conforme denota a Equação H₁₂.

$$\hat{y} = b_o + \underline{x}' \underline{b} + \underline{x}' B \underline{x} \quad (H_{12})$$

onde:

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ . \\ . \\ . \\ x_k \end{bmatrix} \quad \underline{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ . \\ . \\ . \\ b_k \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} & & & & \\ b_{11} & b_{12}/2 & \dots & b_{13}/2 & b_{1k}/2 \\ b_{21}/2 & b_{22} & \dots & b_{23}/2 & b_{2k}/2 \\ b_{31}/2 & b_{32}/2 & . & b_{33} & b_{3k}/2 \\ . & . & \dots & . & . \\ b_{k1}/2 & b_{k2}/2 & & b_{k3}/2 & b_{kk} \end{bmatrix}$$

Observações:

$\underline{x}' \underline{b}$: termos de 1ª ordem na função de respostas equivalendo a $\sum_{j=1}^k b_j x_j$

$\underline{x}' B \underline{x}$: termo de 2ª ordem equivalente a $\sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2 + \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^k b_{jm} x_j x_m$

Se a superfície representada pela Equação H_{12} tiver um ponto de máximo ou de mínimo, existirá portanto, um conjunto de condições $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$, tal que:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} = 0 \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} = 0 \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} = 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} = 0 \end{array} \right. \quad (H_{13})$$

A solução do sistema de equações apresentados anteriormente, representada por $\underline{x}'_o = (x_1^o, x_2^o, x_3^o, \dots, x_k^o)$, será o ponto de máximo ou de mínimo (ponto estacionário). Em outros termos, ter-se-ia:

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial \underline{x}} = \frac{\partial}{\partial \underline{x}} (\underline{b}_o + \underline{x}' \underline{b} + \underline{x}' B \underline{x}) = \underline{b} + 2 B \underline{x} = \underline{0} \quad (H_{14})$$

No ponto estacionário $\underline{x} \rightarrow \underline{x}^o$. Da Equação H_{14} fazendo a devida separação:

$$\underline{x}^o = -\frac{1}{2} B^{-1} \underline{b} \quad (H_{15})$$

O ponto estacionário $\underline{x}^o$ pode ser:

- I – um ponto onde a superfície atinge um máximo;
- II – um ponto onde a superfície atinge um mínimo;
- III – um ponto nem de máximo, nem de mínimo, conhecido como ponto sela ou *saddle point*.

Ainda, é possível verificar no procedimento de otimização da superfície f que:

- I – pode existir uma região de máximo e não um ponto de máximo;
- II – pode existir uma região de mínimo e não um ponto de mínimo;

III – pode ser que o ponto estacionário esteja fora da região experimental;

H_{2.1.2} – Análise Canônica

A análise canônica consiste numa técnica para determinar a natureza do ponto estacionário. Em termos matemáticos, consiste numa translação da superfície de respostas da origem $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) = (0,0,0,\dots,0)$ para o ponto estacionário $\underline{x}^0$. Neste termos, a função de resposta é formulada em termos de novas variáveis $(w_1, w_2, w_3, \dots, w_k)$, cujos eixos correspondem àqueles principais do sistema de contornos (Figura H₁).

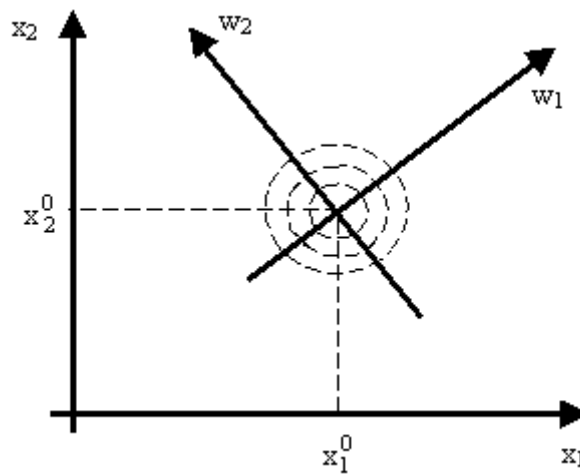


Figura H₁ – Translação de eixos para análise canônica

No estudo da forma de uma superfície de resposta e localização das regiões de condições ótimas, é útil reduzir uma forma quadrática para a forma canônica. Neste intuito, pode-se enunciar o seguinte teorema:

Se $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_k$ são as raízes característica (todas reais) da matriz simétrica real A , então existe uma transformação ortogonal $\underline{x} = P \underline{w}$ tal que a forma quadrática real $Q = \underline{x}' A \underline{x}$ é transformada para a forma canônica $\lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + \dots + \lambda_k w_k^2$.

Assim, a resposta $\hat{y}$ pode ser rescrita na forma canônica como:

$$\hat{y} = \hat{y}_o + \lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + \dots + \lambda_k w_k^2 \quad (H_{16})$$

onde:

$\hat{y}_o$ representa a resposta estimada no ponto estacionário $\underline{x}^o = -\frac{1}{2}B^{-1}\underline{b}$

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_k$ são constantes (autovalores da matriz B) e de acordo com a sua grandeza e o sinal, ajudam o pesquisador a determinar a natureza do ponto estacionário e explorar regiões de interesse.

Assim, continuemos a presente seção no intuito de realizar a superfície de resposta para uma nova origem $\underline{x}_o$. Então deve ser definido:

$$\underline{z} = \underline{x} - \underline{x}_o \quad (H_{17})$$

Portanto:

$$\hat{y} = b_o + (\underline{z}' + \underline{x}_o')\underline{b} + (\underline{z}' + \underline{x}_o')B(\underline{z} + \underline{x}_o) \quad (H_{18})$$

ou

$$\hat{y} = b_o + \underline{x}_o'\underline{b} + \underline{x}_o'B\underline{x}_o + \underline{z}'\underline{b} + \underline{z}'B\underline{x}_o + \underline{x}_o'B\underline{z} + \underline{z}'B\underline{z} \quad (H_{19})$$

Reagrupando os termos e dando a devida nomenclatura, pode-se chegar a (lembrando que $\underline{z}'B\underline{x}_o$ e $\underline{x}_o'B\underline{z}$ são equivalentes):

$$\hat{y} = \hat{y}_o + \underline{z}'(\underline{b} + 2B\underline{x}_o) + \underline{z}'B\underline{z} \quad (H_{20})$$

Se $\underline{x}^o = -\frac{1}{2}B^{-1}\underline{b}$ então, a Equação H_{20} pode ser escrita como:

$$\hat{y} = \hat{y}_o + \underline{z}'[\underline{b} - 2B(\frac{1}{2}B^{-1}\underline{b})] + \underline{z}'B\underline{z} \quad (H_{21})$$

Como $[\underline{b} - 2B(\frac{1}{2}B^{-1}\underline{b})] = 0$, então:

$$\hat{y} = \hat{y}_o + \underline{z}'B\underline{z} \quad (H_{22})$$

A Equação H_{22} representa a superfície de 2ª ordem na nova origem $\underline{x}_o$. Falta então, transformar a forma quadrática $\underline{z}'B\underline{z}$ para uma forma canônica $\lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + \dots + \lambda_k w_k^2$,

onde $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_k$ são as raízes características da matriz B . Logo, existe uma transformação $\underline{z} = M \underline{w}$ tal que:

$$\underline{z}' B \underline{z} = \underline{w}' M' B M \underline{w} = \lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + \dots + \lambda_k w_k^2 \quad (H_{23})$$

Vale ressaltar que M é uma matriz ($k \times k$) ortogonal, *in exemplis*, $M' M = I_k$. A determinação da matriz M é importante porque a transformação $\underline{w} = M' \underline{z}$ permite ao pesquisador a obtenção da expressão que relaciona as variáveis z_i com as variáveis w_i .

Então, tendo a superfície de resposta (Equação H_{12}) devidamente transladada para a forma canônica (Equação H_{16}), podem ser feitas as seguintes interpretações:

I – se $\lambda_i < 0$, $i = 1, 2, 3, \dots, k$, quando ocorrer uma movimentação em qualquer direção a partir do ponto estacionário, tem-se um decréscimo de $\hat{y}$, i.e., o ponto estacionário $\underline{x}_o$ é um ponto de resposta máxima da superfície ajustada;

II – se $\lambda_i > 0$, $i = 1, 2, 3, \dots, k$, quando ocorrer uma movimentação em qualquer direção a partir do ponto estacionário, tem-se um acréscimo de $\hat{y}$, i.e., o ponto estacionário $\underline{x}_o$ é um ponto de resposta mínima da superfície ajustada;

III - se $\lambda_i \cong 0$, $i = 1, 2, 3, \dots, k$, determina-se uma região quase que estacionária na direção do eixo correspondente;

IV - se λ_i , $i = 1, 2, 3, \dots, k$, têm sinais diferentes, o ponto estacionário $\underline{x}_o$ não é de máximo e nem de mínimo.

H_{2.2} – Aplicação das técnicas de otimização e de análise canônica para os hidrociclones filtrantes

H_{2.2.1} – Número de Euler

Consideremos a superfície de resposta do número de Euler dos hidrociclones filtrantes na Equação H_{18} . O termo em negrito da Equação H_{18} (mesmo sabendo que é insignificante) foi acrescentado na superfície de resposta para que a matriz B não se tornasse singular (coluna ou linha de zeros, impossibilitando a respectiva inversão quando necessária).

$$Eu = 1607 - 1176X_1 - 283X_2 - 186X_3 + 604X_1^2 + 112X_2^2 + \mathbf{24X_3^2} \quad (H_{18})$$

Da equação H₁₈ pode-se abstrair os seguintes vetores e matrizes:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{pmatrix} -1176 \\ -283 \\ -186 \end{pmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 604 & 0/2 & 0/2 \\ 0/2 & 112 & 0/2 \\ 0/2 & 0/2 & 24 \end{pmatrix}$$

Calculando os autovalores (*eigenvals*) da matriz $\mathbf{B}$, tem-se o vetor $\underline{\lambda}$:

$$\text{Eigenvals}[\mathbf{B}] = \underline{\lambda} = \begin{bmatrix} 604 & 112 & 24 \end{bmatrix} \quad (\text{H}_{19})$$

Interpretando o vetor $\underline{\lambda}$, pode-se concluir que a superfície definida na Equação H₁₈ para o número de Euler possui um ponto de mínimo, haja vista que os autovalores da matriz $\mathbf{B}$ são todos positivos. Assim, o ponto estacionário pode ser calculado como:

$$\underline{\mathbf{X}}^0 = -\frac{1}{2}\mathbf{B}^{-1}\mathbf{b} = [X_1 \ X_2 \ X_3]^T$$

$$\underline{\mathbf{X}}^0 = -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \frac{1}{604} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{112} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{24} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1176 \\ -283 \\ -186 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,97 \\ 1,26 \\ 3,91 \end{pmatrix} \quad (\text{H}_{20})$$

De acordo com as coordenadas do ponto $\underline{\mathbf{X}}^0$, não restam dúvidas que o mesmo representa um ponto de mínimo, mas com um inconveniente: está fora do domínio experimental estudado para a variável X_3 (L/D_c).

Logo, uma alternativa interessante é atribuir o valor “zero” para X_3 (entre todas as variáveis estudadas esta teve a menor contribuição no número de Euler). Recalculando (procedimento análogo ao já feito até então), a superfície de resposta para o número de Euler (considerando $X_3 = 0$) apresenta o ponto de mínimo dentro do domínio estudado, nas seguintes coordenadas:

$$\underline{\mathbf{X}}^0 = [X_1 \ X_2] = [0,97 \ 1,25] \quad (\text{H}_{21})$$

H_{2.2.2} – Eficiência Total de Coleta

Consideremos a superfície de resposta para a eficiência total dos hidrociclones filtrantes (queda de pressão a $1,5 \text{ kgf.cm}^{-2}$) na Equação H₂₂. Os termos em **negrito** da Equação H₂₂ (mesmo sabendo que são insignificantes) foram acrescentados na superfície de resposta a fim de que a matriz B não se tornasse singular (coluna ou linha de zeros, impossibilitando a respectiva inversão quando necessária).

$$\eta = 65,18 - 4,94X_2 - 5,23X_4 + 1,28X_2^2 - 0,30X_4^2 \quad (\text{H}_{22})$$

Da equação H₂₂ pode-se abstrair os seguintes vetores e matrizes:

$$X = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} -4,94 \\ -5,23 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 1,28 & 0 \\ 0 & -0,30 \end{pmatrix}$$

Calculando os autovalores (*eigenvals*) da matriz B, tem-se o vetor $\underline{\lambda}$:

$$\text{Eigenvals}[B] = \underline{\lambda} = \begin{bmatrix} 1,28 & -0,30 \end{bmatrix} \quad (\text{H}_{23})$$

Interpretando o vetor $\underline{\lambda}$, pode-se concluir que a superfície definida pela Equação H₂₂ para a eficiência total não possui ponto de máximo nem de mínimo, haja vista que os autovalores da matriz B têm sinais distintos, o que faz $\underline{X}^0$ ser um *saddle point*.

H_{2.2.3} – Razão de Líquido

Consideremos a superfície de resposta para a razão de líquido dos hidrociclones filtrantes na Equação H₂₄. Os termos em **negrito** da Equação H₂₄ (mesmo sabendo que são insignificantes) foram acrescentados na superfície de resposta a fim de que a matriz B não se torne singular (coluna ou linha de zeros, impossibilitando a respectiva inversão quando necessária).

$$R_L = 21,14 - 7,21X_2 + 1,47X_3 - 4,26X_4 + 1,96X_3X_4 + 3,36X_2^2 + \mathbf{0,20X_3^2} + \mathbf{0,43X_4^2} \quad (\text{H}_{24})$$

Da equação H₂₄ pode-se abstrair os seguintes vetores e matrizes:

$$X = \begin{pmatrix} X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} -7,21 \\ 1,47 \\ -4,26 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 3,36 & 0/2 & 0/2 \\ 0/2 & 0,20 & 1,96/2 \\ 0/2 & 1,96/2 & 0,43 \end{pmatrix}$$

Calculando os autovalores (*eigenvals*) da matriz B , tem-se o vetor $\underline{\lambda}$:

$$Eigenvals[B] = \underline{\lambda} = \begin{bmatrix} -0,67 & 1,30 & 3,36 \end{bmatrix} \quad (H_{25})$$

Interpretando o vetor $\underline{\lambda}$, pode-se concluir que a superfície definida pela Equação H_{24} para a razão de líquido não possui ponto de máximo nem de mínimo, haja vista que os autovalores da matriz B têm sinais distintos, o que faz $\underline{X}^o$ ser um *saddle point*.

APÊNDICE I

Programa em Maple

**Cálculo de Número de Euler, Eficiência
Total e Diâmetro de Corte**

Programa de cálculo de diâmetro de Corte Reduzido para Hidrociclone

Implementação: Eng. Luiz Gustavo Martins Vieira

Última Atualização: 10 de fevereiro de 2006

Laboratório de Sistemas Particulados - Bloco 1Z - Campus Santa Mônica

Universidade Federal de Uberlândia - Minas Gerais

> restart;

Propriedades físicas do Sistema, Vazões Mássicas e Concentrações Mássicas e Pressão

Dc(cm) - P (kgf/cm²) - rho,ro (g/cm³) - Ma,MU (g/s)

> Dc:=3:

> P:=1.2:

> mu:=0.8722e-2:

> rho:=0.9968:

ro:=2.98:

Ma:=141.55:

MU:=47.08:

Cwa:=2.45e-2:

Cwu:=5.72e-2:

Cálculo das Concentrações e Vazões Volumétricas

> Cva:=1/(ro/rho*(1/Cwa-1)+1): Cvu:=1/(ro/rho*(1/Cwu-1)+1):

rhoa:=rho/(1-Cwa*(1-rho/ro)): rhou:=rho/(1-Cwu*(1-rho/ro)):

Vazão Volumétrica , Eficiências Totais e Reduzidas

> Q:=Ma/rhoa:

> Qu:=MU/rhou:

> Rl:=(Qu*(1-Cvu))/(Q*(1-Cva)):

> Et:=Cwu*MU/(Cwa*Ma):

> Etred:=(Et-Rl)/(1-Rl):

> vc:=evalf(Q/(3.141592*(Dc^2)/4)):

> Eu:=evalf(P*980000/((rho*vc^2)/2)):

> Rey:=(rho*vc*Dc)/mu:

Parâmetros das Análises Granulométricas

Da e Du em micras

> Da:=11.9619:na:=0.8387:

> Du:=17.0085:nu:=1.0324:

RRB para a Alimentação

> y:=1-exp(-(D/Da)^na):dy:=diff(y,D):

RRB para o Underflow

> yu:=1-exp(-(D/Du)^nu):dyu:=diff(yu,D):

d50:=fsolve(Et*dyu/dy-0.5,D); Resolução para o diâmetro de corte Reduzido para G'
(Eficiência Granulométrica Reduzida) de 50% - diâmetro em micra

> diametro_de_corte:=fsolve(Et*(dyu/dy)-0.5,D):

> diametro_de_corte_reduzido:=fsolve((Et*(dyu/dy)-Rl)/(1-Rl)-0.5,D):

Resumo das Principais Variáveis

> Q:=Ma/rhoa;

> Qu:=MU/rhou;

> Rl:=(Qu*(1-Cvu))/(Q*(1-Cva));

> Et:=Cwu*MU/(Cwa*Ma);

> Etred:=(Et-Rl)/(1-Rl);

> vc:=evalf(Q/(3.141592*(Dc^2)/4));

> Eu:=evalf(P*980000/((rho*vc^2)/2));

> Rey:=(rho*vc*Dc)/mu;

> diametro_de_corte:=fsolve(Et*(dyu/dy)-0.5,D);

> diametro_de_corte_reduzido:=fsolve((Et*(dyu/dy)-Rl)/(1-Rl)-0.5,D);