

FACULDADE DE ENGENHARIA

**Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão
Industrial**

PROGRAMA PRODEP

Medida 4.3

Acção de Formação nº- 4

RELATORIO FINAL

**"Estudo transferencia de massa entre a fase de bolhas e a
fase densa do leito fluidizado"**

por

Rui Pedro Carvalho

Porto e FEUP, 30 de Setembro de 1993

FACULDADE DE ENGENHARIA

Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

PROGRAMA PRODEP

1994-95

Acção de Formação nº 4

ANEXO I

Relatório de actividades realizadas durante o período de 1994-95

Universidade do Porto	
Faculdade de Engenharia	
Biblioteca 7	
Nº	CDU 621(047.3)/LEN1992/CARV
Data	01/10/2009

Porto, 1 de Outubro de 1995

PARECER

O aluno finalista do Curso de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial RUI PEDRO MEIXIEIRA DUARTE CARVALHO, realizou no INEGI, no âmbito do programa PRODEP, medida 4.3/7/7/92/93, um estágio cujo trabalho se encontra descrito no relatório apresentado com o título "**Estudo transferência de massa entre a fase de bolhas e a fase densa do leito fluidizado**".

Durante a execução do conjunto de tarefas que lhe foram atribuídas, o referido estagiário atingiu os objectivos que lhe foram propostos, mostrando ter conhecimentos adequados .

Face à qualidade do trabalho produzido cumpre-me informar que o estágio realizado se revestiu de grande interesse para esta instituição.

Porto, 27 de Dezembro de 1993

Oscar Neto

O Supervisor

INDICE

- 1. Determinação da fracção de carbono fixo**
- 2. Determinação da massa específica do carvão**
- 3. Calibração do analizador de CO_2**
- 4. Calibração do rotametro**
- 5. Obtenção dos parâmetros do controlador de temperatura que controla o termopar tipo k**
- 6. Construção do gráfico representativo da velocidade de fluidização para um distribuidor ($d_t=8\text{cm}$)**
- 7. Cálculo da velocidade de fluidização**
- 8. Dimensionamento do distribuidor**

DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO CARVÃO

3 AMOSTRAS

METODOLOGIA

1) DETERMINA-SE PRIMEIRO O VOLUME DO PICONÔMETRO:

i) PESA-SE O PICONÔMETRO VAZIO

$$m_{\text{PIC. VAZIO}} = 13,2576 \text{ g}$$

ii) ENCHE-SE O PICONÔMETRO COM ÁGUA DESTILADA E VOLTA A PESAR-SE O PICONÔMETRO E A MEDIR A TEMPERATURA DA ÁGUA DESTILADA

$$m_{(\text{PIC} + \text{H}_2\text{O})} = 37,4446 \text{ g}$$

$$\begin{cases} V = 1,05 \text{ mL} \\ T = 20,1^\circ \text{C} \end{cases} \longrightarrow \text{TERMOPAR TIPO J (IRON-CONSTANTAN)}$$

$$P_A = \rho_{\text{H}_2\text{O}} g h =$$

iii) O VOLUME DO PICONÔMETRO OBTÉM-SE DO SEQUINTE MODO:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = m_{(\text{PIC} + \text{H}_2\text{O})} - m_{\text{PIC. VAZIO}} = 24,187 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

COM A TEMPERATURA DETERMINADA PARA A ÁGUA E A PRESSÃO AMBIENTE, RECORRE-SE ÀS TABELAS DE VALOR DE ÁGUA, OBTENDO-SE O VALOR DE $\rho_{\text{H}_2\text{O}} [\text{kg/m}^3]$

$$\left. \begin{array}{l} \text{para } T = 20,1^\circ \text{C} \\ p = 766,9 \text{ mmHg} \end{array} \right\} \rho_{\text{H}_2\text{O}} = 974,0 \text{ kg/m}^3$$

FINALMENTE

$$V_{\text{PICONOMETRO}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} = 2,48326 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

2) DETERMINA-SE A MASSA ESPECÍFICA DO KEROSENE

i) ENCHE-SE O PICOENÓMETRO COM KEROSENE E PESA-SE

$$m_{PIC + KEROSENE} = 32,6093 \text{ g}$$

ii) A DENSIDADE DO KEROSENE CALCULA-SE DO SEQUINTE MODO:

$$\rho_{KER} = \frac{m_{(PIC + KER)} - m_{PIC \text{ VAZIO}}}{V_{PIC}}$$

$$\rho_{KER} = \frac{32,6093 - 13,2576}{2,48326 \times 10^{-2}} = 7,99; 286 \text{ kg/m}^3$$

3) DETERMINA-SE FINALMENTE A MASSA ESPECÍFICA DO CARVÃO:

i) ENCHE-SE O PICOENÓMETRO COM KEROSENE E INTRODUZ-SE A PARTÍCULA DE CARVÃO, PRÉVIAMENTE PESADA

$$m_1 (\text{PARTÍCULA COM ELEVADO TERC. EM CARBONO}) = 0,0232 \text{ g}$$

$$m_2 (\text{PARTÍCULA COM ELEVADO TERC. EM LINZA}) = 0,0675 \text{ g}$$

$$m_3 (\text{PARTÍCULA COM ELEVADO TERC. EM LINZA}) = 0,0720 \text{ g}$$

ii) PESA-SE O CONJUNTO $m_{(PIC + KEROSENE + PART.)}$

$$m_1 (PIC + KER + PART.) = 32,6125 \text{ g}$$

$$m_2 (PIC + KER + PART.) = 32,6416 \text{ g}$$

$$m_3 (PIC + KER + PART.) = 32,6628 \text{ g}$$

iii) DETERMINA-SE O VOLUME DA PARTÍCULA ATRAVÉS DA EXPRESSÃO SEQUINTE:

$$V_{PIC} = V_{KER.} + V_{PART.}$$

$$V_{PART} = V_{PIC} - \left(\frac{m_{PIC + KER + PART} - m_{PIC \text{ VAZIO}} - m_{PART.}}{\rho_{KEROSENE}} \right)$$

$$V_1 = 2,566134 \times 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$V_2 = 4,5166375 \times 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$V_3 = 2,37365019 \times 10^{-8} \text{ m}^3$$

TABLE I

TYPE J

New Reference Tables
Supersedes N.B.S.
Circular #561

Iron Vs.
Copper-
Nickel
(Iron-Constantan)

Temperature in Degrees C
Reference Junction at 0°C



DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DEG C
THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS												
-210	-8.096											-210
-200	-7.890	-7.912	-7.934	-7.955	-7.976	-7.996	-8.017	-8.037	-8.057	-8.076	-8.096	-200
-190	-7.659	-7.683	-7.707	-7.731	-7.755	-7.778	-7.801	-7.824	-7.846	-7.868	-7.890	-190
-180	-7.402	-7.429	-7.455	-7.482	-7.508	-7.533	-7.559	-7.584	-7.607	-7.634	-7.659	-180
-170	-7.121	-7.151	-7.180	-7.209	-7.237	-7.265	-7.293	-7.321	-7.348	-7.375	-7.402	-170
-160	-6.821	-6.852	-6.883	-6.914	-6.944	-6.974	-7.004	-7.034	-7.064	-7.093	-7.122	-160
-150	-6.499	-6.532	-6.565	-6.598	-6.630	-6.663	-6.695	-6.727	-6.758	-6.790	-6.821	-150
-140	-6.159	-6.194	-6.228	-6.263	-6.297	-6.331	-6.365	-6.399	-6.433	-6.466	-6.499	-140
-130	-5.801	-5.837	-5.874	-5.910	-5.946	-5.982	-6.018	-6.053	-6.089	-6.124	-6.159	-130
-120	-5.428	-5.464	-5.502	-5.538	-5.574	-5.610	-5.645	-5.680	-5.715	-5.749	-5.784	-120
-110	-5.036	-5.074	-5.113	-5.151	-5.189	-5.227	-5.264	-5.301	-5.337	-5.374	-5.410	-110
-100	-4.632	-4.673	-4.714	-4.754	-4.794	-4.834	-4.874	-4.914	-4.954	-4.994	-5.034	-100
-90	-4.215	-4.257	-4.299	-4.341	-4.383	-4.425	-4.467	-4.508	-4.550	-4.591	-4.632	-90
-80	-3.785	-3.829	-3.872	-3.915	-3.958	-4.001	-4.044	-4.087	-4.130	-4.172	-4.215	-80
-70	-3.344	-3.389	-3.433	-3.478	-3.522	-3.566	-3.610	-3.653	-3.697	-3.740	-3.785	-70
-60	-2.892	-2.938	-2.983	-3.027	-3.074	-3.119	-3.165	-3.210	-3.255	-3.299	-3.344	-60
-50	-2.431	-2.478	-2.524	-2.570	-2.617	-2.663	-2.709	-2.755	-2.801	-2.847	-2.892	-50
-40	-1.960	-2.008	-2.055	-2.102	-2.150	-2.197	-2.244	-2.291	-2.338	-2.384	-2.431	-40
-30	-1.481	-1.530	-1.578	-1.626	-1.674	-1.722	-1.769	-1.816	-1.864	-1.911	-1.958	-30
-20	-0.995	-1.044	-1.093	-1.141	-1.189	-1.237	-1.285	-1.334	-1.381	-1.429	-1.477	-20
-10	-0.501	-0.550	-0.600	-0.650	-0.699	-0.748	-0.798	-0.847	-0.896	-0.945	-0.995	-10
0	0.000	-0.050	-0.101	-0.151	-0.201	-0.251	-0.301	-0.351	-0.401	-0.451	-0.501	0
DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DEG C
0	0.000	0.050	0.101	0.151	0.202	0.253	0.303	0.354	0.405	0.456	0.507	10
10	0.507	0.558	0.609	0.660	0.711	0.762	0.813	0.864	0.916	0.967	1.019	20
20	1.019	1.070	1.122	1.174	1.225	1.277	1.329	1.381	1.432	1.484	1.536	30
30	1.536	1.588	1.640	1.693	1.745	1.797	1.849	1.901	1.953	2.005	2.058	40
40	2.058	2.111	2.163	2.216	2.268	2.321	2.374	2.426	2.479	2.532	2.585	50
50	2.585	2.638	2.691	2.743	2.796	2.849	2.902	2.956	3.009	3.062	3.115	60
60	3.115	3.168	3.221	3.275	3.328	3.381	3.435	3.488	3.542	3.595	3.649	70
70	3.649	3.702	3.756	3.809	3.863	3.917	3.971	4.024	4.078	4.132	4.186	80
80	4.186	4.239	4.293	4.347	4.401	4.455	4.509	4.563	4.617	4.671	4.725	90
90	4.725	4.780	4.834	4.888	4.942	4.996	5.050	5.105	5.159	5.213	5.268	100
100	5.268	5.322	5.376	5.431	5.485	5.540	5.594	5.649	5.703	5.758	5.812	110
110	5.812	5.867	5.921	5.976	6.031	6.085	6.140	6.195	6.249	6.304	6.358	120
120	6.359	6.414	6.468	6.523	6.578	6.633	6.688	6.742	6.797	6.852	6.907	130
130	6.907	6.962	7.017	7.072	7.127	7.182	7.237	7.292	7.347	7.402	7.457	140
140	7.457	7.512	7.567	7.622	7.677	7.732	7.787	7.843	7.898	7.953	8.008	150
150	8.008	8.063	8.118	8.174	8.229	8.284	8.339	8.394	8.450	8.505	8.560	160
160	8.560	8.616	8.671	8.726	8.781	8.837	8.892	8.947	9.003	9.058	9.113	170
170	9.113	9.169	9.224	9.279	9.335	9.390	9.445	9.501	9.556	9.612	9.667	180
180	9.667	9.723	9.778	9.834	9.889	9.944	10.000	10.055	10.111	10.166	10.222	190
190	10.222	10.277	10.333	10.388	10.444	10.499	10.555	10.610	10.666	10.721	10.777	200
200	10.777	10.832	10.888	10.943	10.999	11.055	11.110	11.165	11.221	11.276	11.332	210
210	11.332	11.387	11.443	11.498	11.554	11.609	11.665	11.720	11.776	11.831	11.887	220
220	11.887	11.943	11.999	12.054	12.110	12.165	12.220	12.276	12.331	12.387	12.442	230
230	12.442	12.498	12.553	12.609	12.664	12.720	12.776	12.831	12.887	12.942	12.998	240
240	12.998	13.053	13.109	13.164	13.220	13.275	13.331	13.386	13.442	13.497	13.553	250
250	13.553	13.608	13.664	13.719	13.775	13.830	13.886	13.941	13.997	14.052	14.108	260
260	14.108	14.163	14.219	14.274	14.330	14.385	14.441	14.496	14.552	14.607	14.663	270
270	14.663	14.718	14.774	14.829	14.885	14.940	14.995	15.051	15.106	15.162	15.217	280
280	15.217	15.273	15.328	15.383	15.439	15.494	15.550	15.605	15.661	15.716	15.771	290
290	15.771	15.827	15.882	15.938	15.994	16.049	16.105	16.159	16.214	16.270	16.325	300
300	16.325	16.380	16.436	16.491	16.547	16.602	16.657	16.713	16.768	16.823	16.879	310
310	16.879	16.934	16.989	17.044	17.100	17.155	17.210	17.264	17.321	17.376	17.432	320
320	17.432	17.487	17.542	17.597	17.653	17.708	17.763	17.818	17.874	17.929	17.984	330
330	17.984	18.039	18.095	18.150	18.205	18.260	18.315	18.371	18.426	18.481	18.537	340
340	18.537	18.592	18.647	18.702	18.757	18.813	18.868	18.923	18.978	19.033	19.089	350
350	19.089	19.144	19.199	19.254	19.309	19.364	19.420	19.475	19.530	19.585	19.640	360
360	19.640	19.695	19.751	19.806	19.861	19.917	19.971	20.026	20.081	20.137	20.192	370
370	20.192	20.247	20.302	20.357	20.412	20.467	20.522	20.577	20.632	20.687	20.742	380
380	20.742	20.798	20.853	20.908	20.963	21.018	21.073	21.128	21.183	21.238	21.293	390
390	21.293	21.349	21.404	21.460	21.515	21.570	21.625	21.680	21.735	21.791	21.846	400
400	21.846	21.901	21.956	22.011	22.066	22.122	22.177	22.232	22.287	22.342	22.397	410
410	22.397	22.453	22.508	22.563	22.618	22.673	22.728	22.783	22.838	22.893	22.948	420
420	22.948	23.003	23.058	23.113	23.168	23.223	23.278	23.333	23.388	23.443	23.498	430
430	23.498	23.553	23.608	23.663	23.718	23.773	23.828	23.883	23.938	23.993	24.048	440
440	24.048	24.103	24.158	24.213	24.268	24.323	24.378	24.433	24.488	24.543	24.598	450
450	24.598	24.653	24.708	24.763	24.818	24.873	24.928	24.983	25.038	25.093	25.148	460
460	25.148	25.203	25.258	25.313	25.368	25.423	25.478	25.533	25.588	25.643	25.698	470
470	25.698	25.753	25.808	25.863	25.918	25.973	26.028	26.083	26.138	26.193	26.248	480
480	26.248	26.303	26.358	26.413	26.468	26.523	26.578	26.633	26.688	26.743	26.798	490
490	26.798	26.853	26.908	26.963	27.018	27.073	27.128	27.183	27.238	27.293	27.348	500
500	27.348	27.403	27.458	27.513	27.568	27.623	27.678	27.733	27.788	27.843	27.898	510
510	27.898	27.953	28.008	28.063	28.118	28.173	28.228	28.283	28.338	28.393	28.448	520
520	28.448	28.503	28.558	28.613	28.668	28.723	28.778	28.833	28.888	28.943	29.000	530
530	29.000	29.055	29.110	29.165	29.220	29.275	29.330	29.385	29.440	29.495	29.550	540
540	29.550	29.605	29.660	29.715	29.770	29.825	29.880	29.935	29.990	30.045	30.100	550
550	30.100	30.155	30.210	30.265	30.320	30.375	30.430	30.485	30.540	30.600	30.655	560
560	30.655	30.710	30.765	30.820	30.875	30.930	30.985	31.040	31.095	31.150	31.205	570
570	31.205	31.260	31.315	31.370	31.425	31.480	31.535	31.590	31.645	31.700	31.755	580
580	31.755	31.810	31.865	31.920	31.975	32.030	32.085	32.140	32.195	32.250	32.305	590
590	32.305	32.360	32.415	32.470	32.525	32.580	32.635	32.690	32.745	32.800	32.855	600
600	32.855	32.910	32.965	33.020	33.075	33.130	33.185	33.240	33.295	33.350	33.405	610
610	33.405	33.460	33.515	33.570	33.625	33.680	33.735	33.790	33.845	33.900	33.955	620
620	33.955	34.010	34.065	34.120	34.175	34.230	34.285	34.340	34.395	34.450	34.505	630
630	34.505	34.560	34.615	34.670	34.725	34.780	34.835	34.890	34.945	35.000	35.055	640
640	35.055	35.110	35.165	35.220	35.275	35.330	35.385	35.440	35.495	35.550	35.605	650
650	35.605	35.660	35.715	35.770	35.825	35.880	35.935	35.990	36.045	36.100	36.155	660
660	36.155	36.210	36.265	36.320	36.375	36.430	36.485	36.540	36.595	36.650	36.705	670
670	36.705	36.760	36.815	36.870	36.925	36.980	37.035	37.090	37.145	37.200	37.255	680
680	37.255	37.310	37.									

iv) DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO CARVÃO :

$$\rho_{\text{PART}} = \frac{m_{\text{PARTÍCULA}}}{V_{\text{PARTÍCULA}}}$$

$$\rho_1 = 904,084 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_2 = 1494,475 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_3 = 3033,303 \text{ kg/m}^3$$

Obs. : UTILIZOU-SE O KEROSENE POR FOM A GARANTIR A IGUALDADE

$$V_{\text{PILONOMETRO}} = V_{\text{KEROSENE}} + V_{\text{PARTÍCULA}}$$

ISTO PORQUE O KEROSENE OCUPOU TODOS OS ESPAÇOS (VAZIOS, DOÇOS)
CONTIDOS NA PARTÍCULA DO CARVÃO.

DETERMINAÇÃO DA FRACÇÃO DE CARBONO FIXO

6 AMOSTRAS : 3 COM TEOR ELEVADO EM CINZA ($\phi = 4 \text{ mm}$)

3 COM TEOR ELEVADO EM CARBONO ($\phi = 3 \text{ mm}$)

METODOLOGIA :

- 1) PESAM-SE AS AMOSTRAS, DEPOIS DE RETILADO O VAPOR DE ÁGUA NUMA MUFLA A 105°C DURANTE 10 A 15 min. :

ELEVADO TEOR CINZA

①

$$\begin{aligned} m_{\text{CAD}} + m_{\text{PART}} &= 21,0145 \text{ g} \\ m_{\text{CAD}} &= 20,9445 \text{ g} \\ m_{\text{PARTÍCULA}} &= 0,0700 \text{ g} \end{aligned}$$

③

$$\begin{aligned} m_{\text{CAD}} + m_{\text{PART}} &= 25,8090 \text{ g} \\ m_{\text{CAD}} &= 25,7368 \text{ g} \\ m_{\text{PARTÍCULA}} &= 0,0722 \text{ g} \end{aligned}$$

⑤

$$\begin{aligned} m_{\text{CAD}} + m_{\text{PART}} &= 14,9900 \text{ g} \\ m_{\text{CAD}} &= 14,9252 \text{ g} \\ m_{\text{PARTÍCULA}} &= 0,0648 \text{ g} \end{aligned}$$

ELEVADO TEOR CARBONO

②

$$\begin{aligned} m_{\text{CAD}} + m_{\text{PART}} &= 25,6664 \text{ g} \\ m_{\text{CAD}} &= 25,6447 \text{ g} \\ m_{\text{PARTÍCULA}} &= 0,0217 \text{ g} \end{aligned}$$

④

$$\begin{aligned} m_{\text{CAD}} + m_{\text{PART}} &= 24,6979 \text{ g} \\ m_{\text{CAD}} &= 24,6774 \text{ g} \\ m_{\text{PARTÍCULA}} &= 0,0205 \text{ g} \end{aligned}$$

⑥

$$\begin{aligned} m_{\text{CAD}} + m_{\text{PART}} &= 15,0117 \text{ g} \\ m_{\text{CAD}} &= 14,9911 \text{ g} \\ m_{\text{PARTÍCULA}} &= 0,0206 \text{ g} \end{aligned}$$

- 2) INTRODUZEM-SE AS AMOSTRAS NUMA MUFLA A 950°C DURANTE 3 HORAS ;

3) REPETE-SE O PONTO 1)

①	②
$m_{CAD} + m_{CINZA} = 20,9575 \text{ g}$	$m_{CAD} + m_{CINZA} = 25,6481 \text{ g}$
$m_{CAD} = 20,9445 \text{ g}$	$m_{CAD} = 25,6447 \text{ g}$
$m_{CINZA} = 0,0130 \text{ g}$	$m_{CINZA} = 0,0034 \text{ g}$
③	④
$m_{CAD} + m_{CINZA} = 25,9776 \text{ g}$	$m_{CAD} + m_{CINZA} = 24,6801 \text{ g}$
$m_{CAD} = 25,7368 \text{ g}$	$m_{CAD} = 24,6774 \text{ g}$
$m_{CINZA} = 0,0408 \text{ g}$	$m_{CINZA} = 0,0027 \text{ g}$
⑤	⑥
$m_{CAD} + m_{CINZA} = 14,9635 \text{ g}$	$m_{CAD} + m_{CINZA} = 14,9944 \text{ g}$
$m_{CAD} = 14,9252 \text{ g}$	$m_{CAD} = 14,9911 \text{ g}$
$m_{CINZA} = 0,0383 \text{ g}$	$m_{CINZA} = 0,0033 \text{ g}$

RESULTADOS

m_1) = MASSA DE CARBONO FIXO + CINZA

m_3) = MASSA DE CINZA

Obs.: O CARBONO FIXO QUEIMA TODO NA MUFLA A 950°C DURANTE 3 HORAS

$$FCF (\text{FRACÇÃO DE CARBONO FIXO}) = \frac{m_1 - m_3}{m_1} \%$$

①	②
$FCF = 81,4 \% (\text{CINZA MOLE})$	$FCF = 84,33 \%$
③	④
$FCF = 43,5 \% (\text{CINZA DURA})$	$FCF = 86,83 \%$
⑤	⑥
$FCF = 41 \% (\text{CINZA DURA})$	$FCF = 84 \%$

CALIBRAÇÃO DO ANALISADOR DE CO_2

1) INTRODUZ-SE UM CAUDAL QUALQUER DE N_2 (AZOTO) NO ANALISADOR E ACERTA-SE O ZERO NO MANÍPULO DA ESQUERDA;

2) MEDE-SE UM CAUDAL CONHECIDO DE CO_2 , $\dot{V}_{\text{CO}_2}$, NO MEDIDOR DE BOLHAS (ÁGUA COM SABÃO):

$$V = 10 \text{ cm}^3$$

$$\left. \begin{array}{l} t_1 = 7,95 \text{ s} \\ t_2 = 7,85 \text{ s} \\ t_3 = 7,80 \text{ s} \end{array} \right\} \bar{t} = 7,867 \text{ s}$$

$$\dot{V}_{\text{CO}_2} = \frac{10 \text{ cm}^3}{\bar{t}} = 1,271 \text{ cm}^3/\text{s}$$

3) MEDE-SE UM CAUDAL CONHECIDO DE N_2 NUM ROTÂMETRO 2C-150-S

$$\left. \begin{array}{l} \text{POS 70} \\ p_{\text{CAIB. (relativa)}} = 1 \text{ bar} \\ T = 15^\circ\text{C} = 288 \text{ K} \end{array} \right\} \dot{V}_{\text{N}_2} = 34,887 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$\left. \begin{array}{l} p_{\text{DIA}} = 767,8 \text{ mmHg} \\ T_{\text{DIA}} = 294 \text{ K} \end{array} \right\}$$

$$\dot{V}_{\text{N}_2} = 34,887 \times \frac{760}{p_{\text{DIA}}} \times \frac{T_{\text{DIA}}}{288} = 35,252 \text{ cm}^3/\text{s}$$

CAIBRAÇÃO DO ROTÂMETRO

ROTÂMETRO → GA-130-S

i) PRESSÃO DE CAIBRAÇÃO = 1 bar RELATIVO → 2 bar ABSOLUTO

ii) MEDIR $\parallel$ PRESSÃO AMBIENTE = 758,3 mmHg
 AMBIENTE = 20°C

$$\dot{V}_{AR, ENTRADA} = \frac{\dot{V}_{CO_2, E}}{\frac{(1 - X_{CO_2, E})}{(1 - X_{CO_2, S})} \times X_{CO_2, S} - X_{CO_2, E}}$$

$$X_{CO_2, E} = 0,05\% = 0,0005 \quad (\text{AR ATMOSFÉRICO})$$

$$\dot{V}_{CO_2, E} = \frac{10 \text{ cm}^3}{\bar{t}} = \frac{10}{4} = 2,5 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$\left. \begin{array}{l} t_1 \rightarrow 4,0 \\ t_2 \rightarrow 4,1 \\ t_3 \rightarrow 4,1 \\ t_4 \rightarrow 4,0 \end{array} \right\} \bar{t} = 4 \text{ s}$$

Substituindo:

$$\dot{V}_{AR} = 2,5 \times \frac{1}{\frac{0,9995}{(1 - X_{CO_2, S})} \times X_{CO_2, S} - 0,0005}$$

POS ROTÂMETRO	10	20	30	40	50
$X_{CO_2, SAÍDA} [\%]$	1,23	0,88	0,645	0,54	0,43
$\dot{V}_{AR, ENTRADA} [\text{cm}^3/\text{s}]$	200,650	298,554	417,458	507,449	655,666

POS ROTÂMETRO	60	70	80	90
X_{CO_2} , SAÍDA [%]	0,38	0,33	0,3	0,28
$\dot{V}_{AR}$, ENTRADA [cm^3/s]	754,697	889,911	997,000	1083,913

ESTES VALORES TABELADOS ENCONTRAM-SE REPRESENTADOS NA CURVA $U = f(p_{CO_2})$ QUE EM SEGUIDA SE ANEXA.

9

DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO CONTROLADOR DE TEMPERATURA QUE CONTROLA O TERMOPAR TIPO K

i) O SISTEMA CUJA TEMPERATURA SE PRETENDE CONTROLAR CARACTERIZA-SE DA SEGUINTE FORMA :

- LEITO DE AREIA COM ALTURA $H = 20 \text{ cm}$
- CONTIDO EM TUBO REFRACTÁRIO DE DIÂMETRO $D_t = 8 \text{ cm}$.
- DIÂMETRO MÉDIO DAS PARTÍCULAS DE AREIA $d = 0,650 \text{ mm}$

ii) PROCEDIMENTO :

INJETA-SE UM CAUDAL CONHECIDO DE AR QUE PASSA ASSIM ATRAVÉS DO LEITO. UM TERMOPAR ACOPLADO A UM CONTROLADOR DE TEMPERATURA MEDE A TEMPERATURA DO LEITO, QUE VAI SENDO CONTINUAMENTE REGISTADA NUM REGISTADOR.

iii) PARÂMETROS DO CONTROLADOR RECORRENDO AO RESPECTIVO MANUAL :

- CONDIÇÕES INICIAIS :

$$P_b = 3$$

$$t_i = 60 \text{ s}$$

$$t_d = 60 \text{ s}$$

$$A_p = 2$$

$$H_c = 10 \text{ s}$$

$$H_L = 24 \%$$

- CONSIDERAR QUE O SETPOINT PRETENDIDO É DE 200°C
- TER O CUIDADO DE NUNCA COLOCAR O PARÂMETRO H_L ACIMA DE 50%.

PARÂMETROS DO CONTROLADOR
VALORES OBTIDOS COM CORREÇÕES / STANDARD 810

i) ROTÂMETRO : 6A-150-S (ESFERA DE AÇO)
Posição 30
PRESSÃO ≈ 1 bar (RELATIVA) = 2 bar absoluta
DE CALIBRAÇÃO

ii) RESULTADOS :
 $\phi = 10 \text{ mm} / \text{h}$

$$P_b = 2\% = \frac{25}{1250} \times 100$$

$$t_i = 5 \times 360 = 1800 \text{ s}$$

$$t_d = \frac{I}{S} = 360 \text{ s} \longrightarrow 300 \text{ s}$$

$$A_p = 2$$

$$H_c = 10 \text{ s}$$

$$H_L = 24\%$$

$$47 \times 360 = 4,7 \text{ horas}$$

CONSTRUÇÃO DO GRÁFICO REPRESENTATIVO DA VELOCIDADE DE FLUIDIZAÇÃO PARA DISTRIBUIDOR COM $d_f = 8 \text{ cm}$

UTILITANDO OS ROTÂMETROS 6A-150-G e 6A-150-S E COM BASE NOS SEUS GRÁFICOS (POSICÃO ROTÂM. / $\dot{U}$ (cm^3/s)) CONSTRUI-SE UMA TABELA DE VELOCIDADES POR VARIAÇÃO DA POSICÃO DOS ROTÂMETROS, PARA VALORES COMPREENDIDOS ENTRE 15 e 70.

$$P_{\text{CALIBRAÇÃO}} = 760 \text{ mmHg}$$

$$T_{\text{CALIBRAÇÃO}} = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$$

$$P_{\text{TRABALHO}} = 760 \text{ mmHg}$$

$$T_{\text{TRABALHO}} = 950^\circ\text{C} = 1223 \text{ K}$$

$$U (\text{cm/s}) = \frac{\dot{U} (T=20^\circ\text{C})}{A} \times \frac{P_{\text{CALIBRAÇÃO}}}{P_{\text{TRABALHO}}} \times \frac{T_{\text{TRABALHO}}}{T_{\text{CALIBRAÇÃO}}}$$

$$A = 53,68 \text{ cm}^2$$

ROTÂMETRO 6A-150-S :

POSICÃO	$\dot{U}$ (cm^3/s)	U (cm/s)	ΔP ($\text{mm H}_2\text{O}$)
70	865	67,26	290
60	755		280
50	645	50,15	270
35	465	36,94	265
30	420	32,66	265
25	365	28,38	265
20	310	24,11	255
15	255	19,83	238

ROTÂMETRO 6A-150-G

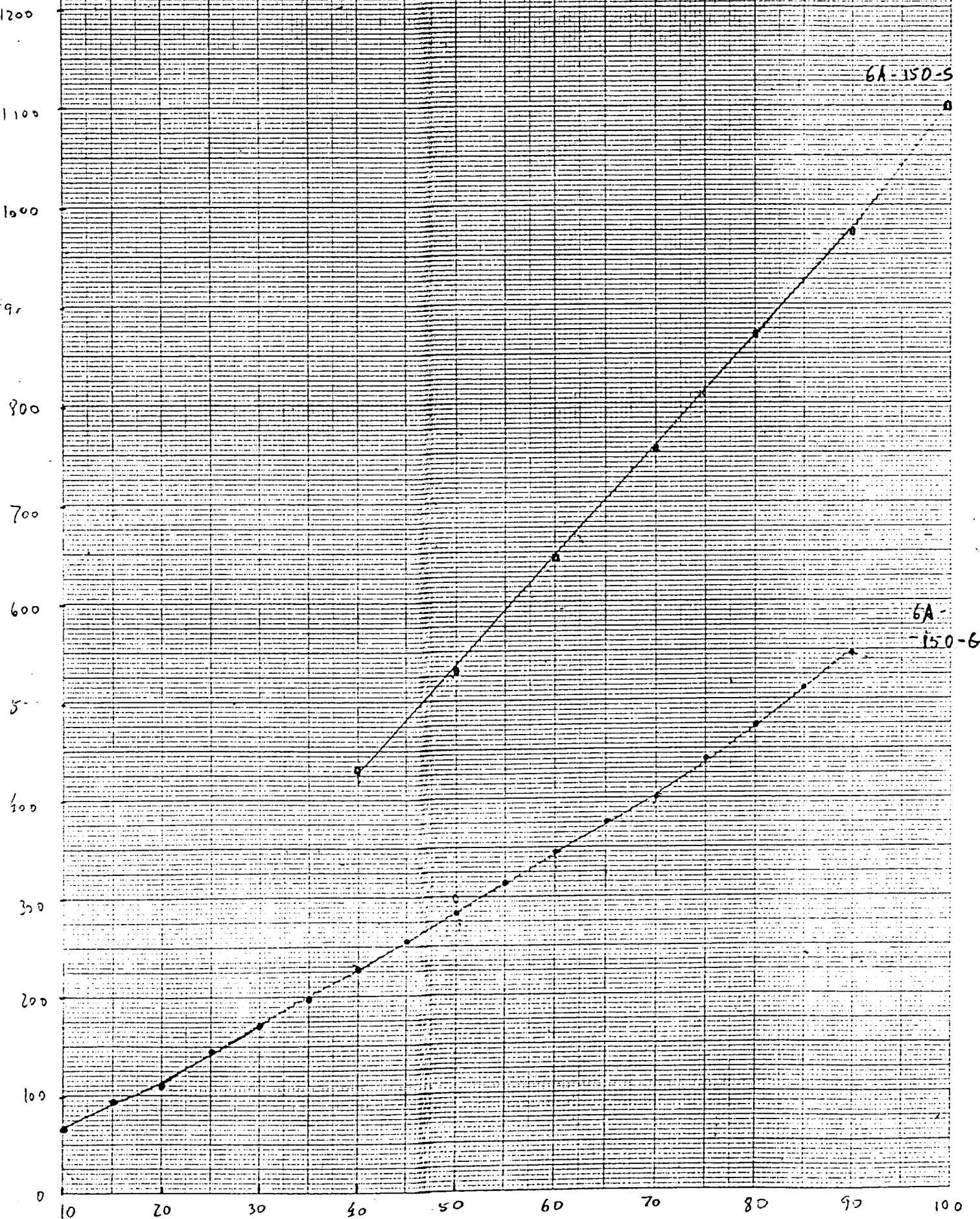
Posição	$\dot{U}$ (cm ³ /s)	U (cm/s)	ΔP (mmH ₂ O)
50	255	19,83	259
45	283	22,00	259
40	225	17,5	255
35	195	15,16	235
30	170	13,22	210
25	145	11,27	183
20	110	8,55	157
15	95	7,39	126

OS GRÁFICOS SEGUINTE APRESENTAM AS CURVAS $U = f(\Delta p)$ RESULTANTES DESTAS OBSERVAÇÕES EXPERIMENTAIS.

Obs: - FORAM DESPREZADOS OS VALORES RELATIVOS ÀS POSIÇÕES 70, 60 e 50 DO ROTÂMETRO 6A-150-S, DADO QUE HOUVE UMA GRANDE VARIAÇÃO DA TEMPERATURA.

- VERIFICOU-SE QUE UM AUMENTO DA VELOCIDADE ORIGINOU UMA MAIOR AGITAÇÃO DO LEITO.

$P_{rel} = 1,0 \text{ bar}$
 $P_{abs} = 2,0 \text{ bar}$



CÁLCULO DA VELOCIDADE DE FLUIDIZAÇÃO

$$\frac{1,75}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} \times \left(\frac{d_p \times U_{mf} \times \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150 \times (1 - \epsilon_{mf})}{\phi_s^2 \times \epsilon_{mf}^3} \times \left(\frac{d_p \times U_{mf} \times \rho_g}{\mu} \right) =$$

$$= \frac{d_p^3 \times \rho_g \times (\rho_s - \rho_g) \times g}{\mu^2}$$

$$\epsilon_{mf} = \frac{\sqrt{\rho_{poros}}}{\sqrt{\rho_{ADM}}} = 0,4$$

$$d_p = 0,650 \text{ mm}$$

$$\phi_s = 1,0$$

$$\rho_s = 2600 \text{ kg/m}^3$$

$$dt = 8 \text{ cm} \longrightarrow A = 0,005368 \text{ m}^2 = 53,68 \text{ cm}^2$$

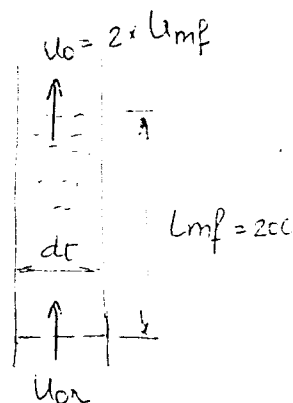
$$P = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$T_i = \begin{cases} 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K} \\ 900^\circ\text{C} = 1173 \text{ K} \\ 950^\circ\text{C} = 1223 \text{ K} \\ 1000^\circ\text{C} = 1273 \text{ K} \end{cases}$$

$i=1,4$

$$\rho_g = \frac{P}{R_{AR} \times T} \quad (\Rightarrow) \quad \rho_g = \frac{348,43}{T}$$

$$R_{AR} = 287 \text{ J/kg K}$$



CÁLCULO DA VELOCIDADE DE FLUIDIZAÇÃO
- RESULTADOS OBTIDOS -

$$T_1 = 293 \text{ K} \quad \rho_{1g} = 1,2 \text{ kg/m}^3 \quad \mu_1 = 10,240 \times 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$$

$$T_2 = 1173 \text{ K} \quad \rho_{2g} = 0,13 \text{ kg/m}^3 \quad \mu_2 = 46,876 \times 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$$

$$T_3 = 1223 \text{ K} \quad \rho_{3g} = 0,235 \text{ kg/m}^3 \quad \mu_3 = 47,661 \times 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$$

$$T_4 = 1273 \text{ K} \quad \rho_{4g} = 0,274 \text{ kg/m}^3 \quad \mu_4 = 48,445 \times 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$$

$$\frac{U_{mf}}{1 \times 0,43} \times \left(\frac{0,650 \times 0,235}{47,661 \times 10^{-6}} \right)^2 U_{mf}^2 + \frac{450 \times (1 - 0,14)}{12 \times 0,43} \times \left(\frac{0,650 \times 0,235}{47,661 \times 10^{-6}} \right) U_{mf} = \frac{0,650 \times 0,235 \times (2600 - 0,285) \times 9,8}{(47,661 \times 10^{-6})^2}$$

$$41309,33539 \times U_{mf}^2 + 246584865 \times U_{mf} - 877,83 = 0$$

$$U_{mf} = 0,158699 \text{ m/s}$$

$$U_{mf} \approx 16 \text{ cm/s}$$

CÁLCULO DA VELOCIDADE DE FLUIDIZAÇÃO
- RESTANTES RESULTADOS -

$$U_{mf1} = 44,9 \text{ cm/s}$$

$$U_{mf2} = 16,12 \text{ cm/s}$$

$$U_{mf4} = 15,62 \text{ cm/s}$$

$$U_{mf3} = 15,37 \text{ cm/s} \quad (\text{JÁ CÁLCULADO ATRÁS})$$

DIMENSIONAMENTO DO DISTRIBUIDOR

$$T = 950^{\circ}\text{C} = 1223 \text{ K}$$

PROCEDIMENTO:

- i) DETERMINAR A QUEDA DE PRESSÃO NECESSÁRIA ATRAVÉS DO DISTRIBUIDOR

$$\Delta p_{d, \min} = m \times (d_1 \times \Delta p ; 35 \text{ cm H}_2\text{O} ; 100 \times \Delta p')$$

- ii) CÁLCULO DO NÚMERO DE REYNOLDS E VERIFICAÇÃO DE C_d PELO GRÁFICO fig.12, pág.88.

$$Re_t = \frac{d_t \rho_g \times u_0}{\mu}$$

- iii) CÁLCULO DE $u_{cr} = C_d' \times \left(\frac{2 \times g_e \times \Delta p_d}{\rho_g} \right)^{1/2}$

$$\text{e } \frac{u_0}{u_{cr}} < 10\% \quad \leftarrow \quad \left(\frac{\frac{u_0}{A_0}}{\frac{u_{cr}}{A_{cr}}} = \frac{A_{cr}}{A_0} < 10\% \right)$$

$$u_0 = \frac{\pi}{4} \times d_{or}^2 \times u_{cr} \times NOR$$

$$iv) \quad NOR = \frac{n^2 \text{ (ORIFÍCIOS)} \times \frac{\mu_c}{\mu_l}}{\frac{\pi}{4} \times d_o^2}$$

$$\frac{\pi}{4} \times d_o^2 = \text{ÁREA DO DISTRIBUIDOR}$$

DIMENSIONAMENTO DO DISTRIBUIDOR RESULTADOS

$$i) \Delta p = L_{mf} (1 - E_{mf}) \times (P_s - P_g) \times \frac{g}{g_c}$$

$$L_{mf} = 20 \text{ cm}$$

$$E_{mf} = 0,4$$

$$\Delta p_d = 0,1 \times \Delta p$$

$$\Delta p = 20 \times 10^{-2} \times (1 - 0,4) \times (2600 - 0,285) \times \frac{9,81}{1} = 3060,4 \text{ N/m}^2$$

$$P_g = 0,285 \text{ kg/m}^3$$

$$P_s = 2600 \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta p_d = 0,1 \times \Delta p = 306,4 \text{ N/m}^2$$

$$ii) Re_f = \frac{dt P_g \times u_o}{\mu} = \frac{80 \times 10^{-3} \times 0,285 \times 2 \times 0,1587}{47,661 \times 10^{-6}} = 151,8$$

$$u_o = u_{mf} \times 2 = 2 \times 0,1587 \text{ m/s}$$

$$dt = d_c = 80 \text{ mm}$$

$$iii) u_{or} = C_d \times \left(\frac{2 \times g_c \times \Delta p_d}{P_g} \right)^{1/2} = 0,7 \times \left(\frac{2 \times 1 \times 306,4}{0,285} \right)^{1/2} = 32,5 \text{ m/s}$$

$$Re_f = 3,0 \times 10^2 \rightarrow C_d = 0,7$$

$$\frac{u_o}{u_{or}} = \frac{2 \times 0,1587}{32,458988} = 0,95 \% < 10\%$$

DIMENSIONAMENTO DO DISTRIBUIDOR

RESULTADOS

$$iv) \quad N_{O_2} = \frac{w_{O_2} \times 4 \times 1}{w_{O_2} \times \pi \times d_{O_2}^2} = \frac{1,24 \times 10^{-2}}{d_{O_2}^2}$$

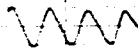
d_{O_2} (m)	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4
N_{O_2} (gros/cm ²)	4,96	1,24	0,31	0,138	0,078

Selecionando orifícios demasiadamente pequenos existe o risco de entupimento. Por outro lado aqueles que são muito largos podem originar uma distribuição irregular do gás.

Deles as considerações aqui feitas a seleção mais conveniente será:

$$d = 0,2 \text{ cm}$$

$$N_{O_2} = 0,31 \text{ /cm}^2$$



FABRIS (M) 09/20/19

$$\Delta D = 1 \text{ mV} = 25^\circ\text{C}$$

250 mm

10C - 0,040 mV

TERMO PAR TIPO U

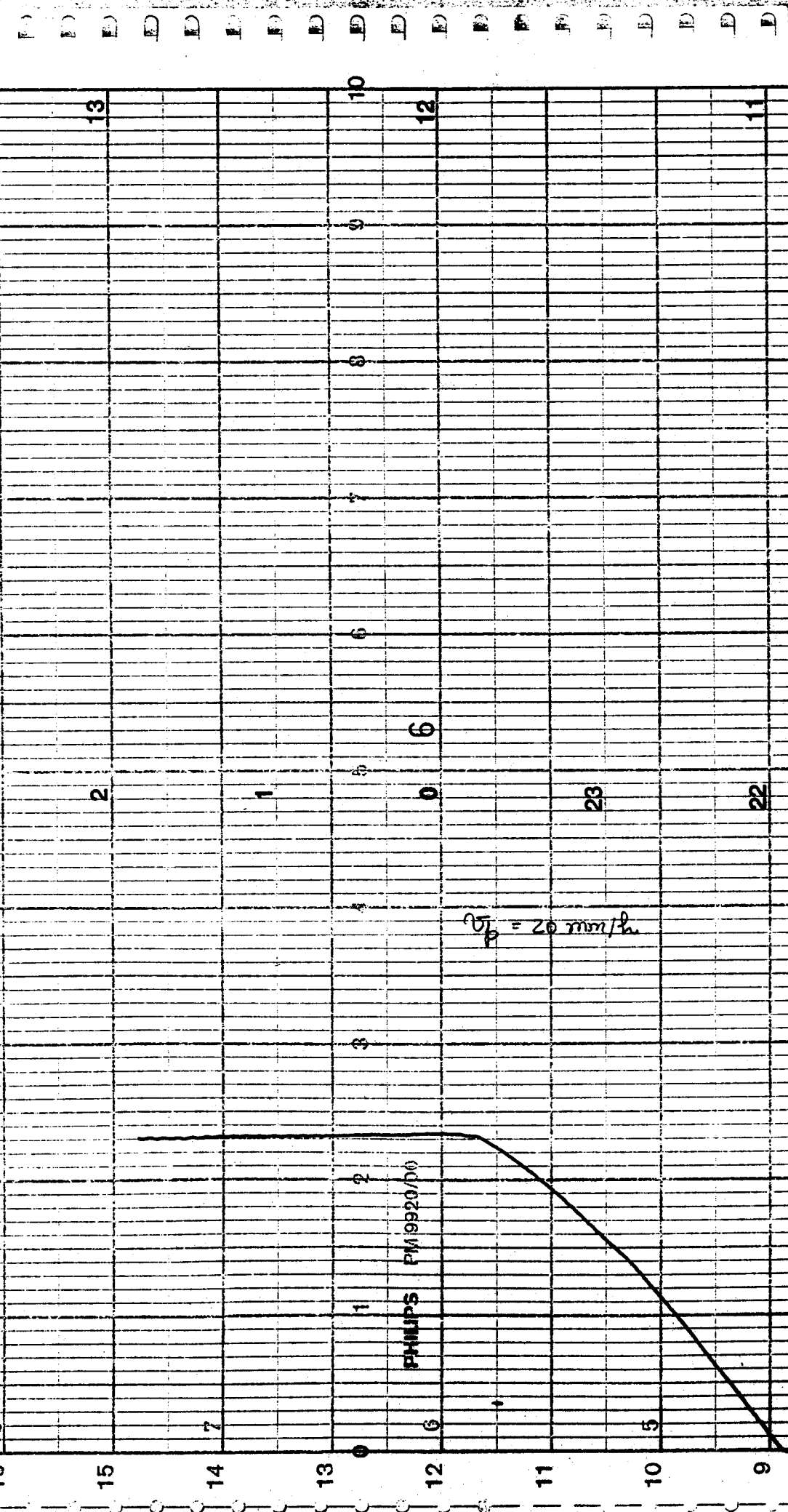
$\frac{1}{2} \text{ DIA}$

$$\text{ESCALA TOTAL} = 1250^\circ\text{C} = 50 \text{ mV}$$

$$U = 10 \text{ mm} + \frac{3600^\circ}{360^\circ}$$

$$100 \text{ quadrados} = 50 \text{ mV}$$

$$\boxed{1 \text{ quadrado} = 0,5 \text{ mV}}$$





FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000101516