

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho avaliou-se as emissões de poluentes gasosos e o efeito de escala do reator no processo de absorção de SO_2 por calcário sob combustão de carvão mineral brasileiro. Determinou-se a eficiência de absorção de SO_2 no leito, a conversão e o coeficiente global de taxa de reação de um calcário. Foram avaliadas as emissões dos gases CO_2 , CO , THC , NO_x e O_2 , e determinados para carbono fixo, a eficiência de combustão, a conversão e o coeficiente global de taxa de reação para a condição de operação sem alimentação de calcário. Adicionalmente verificou-se a influência, isolada e conjunta, dos fatores Ca/S , altura do leito e reator nos resultados através de análise estatística simples de três planejamentos fatoriais 2^3 .

As condições experimentais nas duas plantas foram especificadas de maneira a ter-se padrões hidrodinâmicos e térmicos os mais semelhantes possíveis. Os valores são apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2. Nota-se que, embora fosse tentado, não se conseguiu operar os reatores com as mesmas condições. Não obstante, os valores são relativamente próximos, principalmente os adimensionais. Na planta de bancada os valores de altura do leito e altura na mínima fluidização foram estimados em 0,25 e 0,224 m, respectivamente, pois durante os testes o dreno do leito ficou obstruído e a altura do leito aumentou continuamente até o final dos testes. Nos outros testes, com altura do leito de 0,120 m não ocorreu obstrução do dreno.

O fator de fluxo bolha-emulsão, χ , é claramente influenciado pela altura do leito, pois quanto maior a altura mais vezes as bolhas renovam seu volume de gás.

Tabela 5.1 – Condição operacional média das plantas de bancada e piloto.

Reator	U (m/s)	U_{mf} (m/s)	M_{Leito} (kg)	H_{mf} (m)	H_{Leito} (m)	T (°C)
Bancada	0,590	0,064	4,2	0,224	0.250	830
Bancada	0,730	0,060	2,0	0,107	0.120	900
Piloto	0,590	0,063	71,3	0,300	0.340	860
Piloto	0,590	0,061	30,9	0,140	0.160	890

Tabela 5.2 – Números adimensionais com valores médios calculados.

Reator	Ar	Re_{Umf}	χ	U/U_{mf}	Pr	Fr	Sc	Sh	H_{mf}/D_h	H/H_{mf}
Bancada	313	0.2	2.1	9.2	0.73	0.13	0.87	1.98	1.4	1.1
Bancada	265	0.2	1.2	12.0	0.73	0.43	0.88	1.43	0.7	1.1
Piloto	291	0.2	2.3	9.4	0.73	0.09	0.88	1.44	0.6	1.1
Piloto	271	0.2	1.7	9.6	0.73	0.20	0.88	1.43	0.3	1.1

Os resultados das emissões médias são apresentados nas Tabelas 5.3 a 5.7 para as plantas de bancada e piloto, e seus gráficos são mostrados nas Figuras 5.1 a 5.11. A nomenclatura dos testes indica: a relação Ca/S (CaS2; CaS=2), a taxa de alimentação de carvão (C059; 0,59g/s) e a taxa de alimentação de calcário (L022; 0,22 g/s). Para avaliação das reações de enxofre, os valores de concentração foram normalizados para uma concentração de O_2 de 7% como referência para todos os testes. Para se ter os valores de concentração normalizada dos outros gases, basta multiplicar a concentração medida pela respectiva relação concentração de SO_2 normalizada pela concentração de SO_2 medida.

Tabela 5.3 – Resultados dos testes na planta de bancada operando com nível baixo do leito. O parâmetro “s” significa desvio padrão amostral.

Teste na planta de bancada: nível baixo do leito					
	CaS0C059L000	CaS2C059L022	CaS3C059L033	CaS4C059L043	CaS5C059L054
Ca/S	0	2	3	4	5
U (m/s)	0,72	0,73	0,72	0,69	0,69
s (m/s)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
T (°C)	903	915	905	870	871
s (°C)	16	6	4	4	3
SO ₂ (ppm)	1899	671	261	274	205
SO ₂ * (ppm)	2201	830	390	302	230
s (ppm)	26	15	23	13	15
THC (ppm)	1023	919	1205	1352	1204
s (ppm)	35	55	309	159	157
NO _x (ppm)	1960	1317	496	526	386
s (ppm)	3	30	44	28	30
CO (ppm)	2398	2260	1962	2996	2793
s (ppm)	72	91	250	181	325
CO ₂ (%)	14,28	15,95	12,63	16,13	16,25
s (%)	0,05	0,09	0,58	0,25	1,78
O ₂ (%)	8,92	9,68	11,62	8,30	8,50
s (%)	0,12	0,23	0,44	0,49	1,39
X	0,000	0,094	0,084	0,063	0,053
K_A (m/s)	0,0000	0,0098	0,0252	0,0191	0,0239
Abs_SO ₂ * (%)	0,0	62,3	82,3	86,3	89,6
Efic_comb (%)	81,34				
X_C	0,82				
K_C (m/s)	0,10				

* Valor normalizado para concentração de O₂ de 7% como referência.

Os valores da eficiência de combustão, conversão de carbono fixo e coeficiente global de carbono fixo foram calculados apenas para a condição operacional sem alimentação de calcário, uma vez que com alimentação de calcário ocorre emissão adicional de CO₂ devido à calcinação do calcário, e isto afetaria os resultados.

Na planta de bancada só foi possível operar-se com relação Ca/S a partir de 2 devido à limitação de torque em rotação baixa do motor da válvula rotativa. Relações Ca/S menores que 2 propiciavam o travamento da válvula que deixa de girar. Na planta piloto não se teve esse tipo de problema, pois esta utiliza motores e controles diferentes.

Tabela 5.4 – Resultados dos testes na planta de bancada operando com nível alto.

Teste na planta de bancada: nível alto do leito					
	CaS0C059L000	CaS2C059L022	CaS3C059L033	CaS4C059L043	CaS5C059L054
Ca/S	0	2	3	4	5
U (m/s)	0,60	0,60	0,59	0,59	0,59
s (m/s)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
T (°C)	852	854	851	835	827
s (°C)	2	8	2	1	6
SO ₂ (ppm)	1817	697	305	150	212
SO ₂ * (ppm)	1927	770	336	121	173
s (ppm)	35	49	17	6	14
THC (ppm)	217	227	744	1866	3643
s (ppm)	18	50	234	144	246
NO _x (ppm)	1658	1507	585	276	400
s (ppm)	31	75	35	14	29
CO (ppm)	816	796	2071	2068	2450
s (ppm)	48	90	120	78	94
CO ₂ (%)	16,35	15,95	17,81	18,61	19,10
s (%)	0,03	0,23	0,06	0,07	0,06
O ₂ (%)	7,80	8,33	8,29	3,69	3,81
s (%)	0,05	0,22	0,15	0,04	0,05
X	0,000	0,075	0,066	0,056	0,042
K_A (m/s)	0,0000	0,0071	0,0162	0,0305	0,0178
Abs_SO ₂ * (%)	0,0	60,0	82,6	93,7	91,0
Efic_comb (%)	80,86				
X_C	0,81				
K_C	0,11				

* Valor normalizado para concentração de O₂ de 7% como referência.

As velocidades de fluidização foram aproximadamente as mesmas nas duas plantas, exceto nos testes da planta piloto em que não houve entupimento do dreno do leito. Neste caso a velocidade foi de 0,70 m/s aproximadamente. Essa velocidade foi necessária para manter a temperatura do leito em torno de 900 °C. Velocidades abaixo de 0,70 m/s faziam a temperatura do leito ir além dos 900 °C. Note-se que como os reatores não possuem isolamento térmico a perda de calor por radiação é significativa, principalmente na planta de bancada que possui relação área/volume = 25 bem maior que a planta piloto, de 8. É por isso que no caso da planta piloto, para operar-se com mesma velocidade foi necessário diminuir a taxa de alimentação de carvão para ter-se temperaturas aproximadamente iguais no leito

Tabela 5.5 – Resultados dos testes na planta piloto operando com nível baixo.

Teste na planta piloto: nível baixo do leito					
	CaS0C51L00	CaS1C51L09	CaS2C51L18	CaS3C51L28	CaS4C51L37
Ca/S	0	1	2	3	4
U (m/s)	0,60	0,59	0,59	0,58	0,57
s (m/s)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
T (°C)	887	876	885	886	869
s (°C)	14	6	9	8	9
SO ₂ (ppm)	1241	660	458	234	195
SO ₂ * (ppm)	1289	687	455	240	197
s (ppm)	8	10	7	4	4
THC (ppm)	580	622	662	536	666
s (ppm)	58	48	57	44	70
NO _x (ppm)	443	470	532	626	661
s (ppm)	6	4	4	5	6
CO (ppm)	3629	3837	3873	3662	4169
s (ppm)	167	152	131	121	188
CO ₂ (%)	11,27	11,62	12,60	12,53	13,00
s (%)	0,09	0,06	0,06	0,05	0,06
O ₂ (%)	7,52	7,55	6,91	7,34	7,11
s (%)	0,05	0,05	0,07	0,05	0,08
X	0,000	0,110	0,074	0,062	0,049
K_A (m/s)	0,0000	0,0035	0,0040	0,0074	0,0077
Abs_SO ₂ * (%)	0,0	46,7	64,7	81,4	84,7
Efic_comb (%)	78,46				
X_C	0,80				
K_C	0,07				

* Valor normalizado para concentração de O₂ de 7% como referência.

De maneira geral a temperatura do leito variou pouco com a taxa de alimentação de calcário. Em alguns testes a temperatura diminuiu discretamente com o aumento da taxa de alimentação de calcário, o que era esperado porque o calcário frio que adentra o leito tende a abaixar sua temperatura. Entretanto, em outros testes houve até aumento da temperatura com o aumento da taxa de alimentação de calcário.

Tabela 5.6 – Resultados dos testes na planta piloto operando com nível baixo-r.

Teste na planta piloto: nível baixo do leito (réplica)					
	CaS0C51L00	CaS1C51L09	CaS2C51L18	CaS3C51L28	CaS4C51L37
Ca/S	0	1	2	3	4
U (m/s)	0,57	0,59	0,58	0,59	0,57
s (m/s)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
T (°C)	960	889	880	898	864
s (°C)	9	7	14	17	8
SO ₂ (ppm)	1594	420	253	228	188
SO ₂ * (ppm)	1591	439	252	234	193
s (ppm)	50	20	16	7	6
THC (ppm)	743	655	626	478	512
s (ppm)	62	56	58	58	52
NO _x (ppm)	667	480	535	599	641
s (ppm)	5	3	6	5	7
CO (ppm)	4324	3821	3836	3398	3462
s (ppm)	134	179	197	180	193
CO ₂ (%)	13,02	12,05	11,72	12,84	13,04
s (%)	0,14	0,05	0,11	0,09	0,06
O ₂ (%)	6,97	7,62	6,97	7,33	7,36
s (%)	0,04	0,05	0,06	0,06	0,23
X	0,000	0,220	0,125	0,085	0,066
K_A (m/s)	0,0000	0,0112	0,0121	0,0105	0,0107
Abs_SO ₂ * (%)	0,0	72,4	84,2	85,3	87,9
Efic_comb (%)	81,04				
X_C	0,83				
K_C	0,08				

* Valor normalizado para concentração de O₂ de 7% como referência.

Em relação ao carbono fixo, a eficiência de combustão e a conversão foram em média de 80% em ambos os reatores. Este valor relativamente baixo foi devido a elutriação de finos de carvão. O coeficiente global de taxa de reação para o carbono fixo ficou em torno de 0,075 m/s em média.

Os parâmetros velocidade de fluidização, taxa de alimentação de carvão e taxa de alimentação de calcário foram ajustados em função de um cálculo estequiométrico inicial e escolha de excesso de ar em torno de 1%. O cálculo estequimétrico é apresentado na Tabela 5.8 e os valores de alimentação de carvão e de calcário são apresentados nas Tabela 5.9 e 5.10, para as plantas de bancada e piloto, respectivamente.

Tabela 5.7 – Resultados dos testes na planta piloto operando com nível alto.

Teste na planta piloto: nível alto do leito					
	CaS0C64L00	CaS1C64L11	CaS2C64L23	CaS3C64L35	CaS4C64L46
Ca/S	0	1	2	3	4
U (m/s)	0,59	0,59	0,58	0,58	0,58
s (m/s)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
T (°C)	868	860	841	829	828
s (°C)	5	5	5	5	6
SO ₂ (ppm)	1946	698	402	206	126
SO ₂ * (ppm)	1555	555	322	164	99
s (ppm)	9	12	10	8	8
THC (ppm)	1908	2005	2149	2204	2024
s (ppm)	122	148	252	209	173
NO _x (ppm)	432	487	563	709	831
s (ppm)	4	5	10	15	11
CO (ppm)	4996	4995	4996	4996	4934
s (ppm)	0	3	0	0	103
CO ₂ (%)	15,07	15,60	15,87	16,37	16,99
s (%)	0,06	0,06	0,06	0,05	0,04
O ₂ (%)	3,48	3,39	3,54	3,45	3,24
s (%)	0,07	0,06	0,07	0,07	0,05
X	0,000	0,194	0,120	0,091	0,072
K_A (m/s)	0,0000	0,0031	0,0038	0,0063	0,0091
Abs_SO ₂ * (%)	0,0	64,3	79,3	89,5	93,6
Efic_comb (%)	84,32				
X_C	0,86				
K_C	0,08				

* Valor normalizado para concentração de O₂ de 7% como referência.

Tabela 5.8 - Equações de combustão: estequiométrico - N° de moles de O₂ /100 kg de carvão, e emissões de gases considerando combustão completa.

N° de moles O ₂ /100 kg	N° de moles de SO ₂ /100 kg	C_SO ₂ (ppm)
4,85	0,073	3004,2
N° de moles ar esteq/100 kg	N° de moles de CO ₂ /100 kg	C_CO ₂ (%)
23,12	4,11	16,91
M_ar esteq (kg) /100 kg	N° de moles de H ₂ O /100 kg	C_H ₂ O (%)
669,5	1,85	7,59
Rel. esteq A/C (kg_ar/kg_comb)	N° de moles de N ₂ /100 kg	C_N ₂ (%)
6,69	18,30	75,20

Tabela 5.9 – Taxas de alimentação de carvão e calcário e relação molar Ca/S na planta de bancada.

Leito com níveis baixo e alto			
Descarga de Carvão	Descarga de Calcario	Rel. mass Ca/S	Rel. mol Ca/S
(g/s)	(g/s)	$\frac{g_Ca}{g_S}$	Mol(Ca)/Mol(S)
0.59	0.22	2.6	2.05
0.59	0.33	3.8	3.06
0.59	0.43	5.1	4.07
0.59	0.54	6.3	5.08

Tabela 5.10 – Taxas de alimentação de carvão e calcário e relação molar Ca/S na planta piloto.

Leito com nível baixo			
Descarga de Carvão	Descarga de Calcario	Rel. mass Ca/S	Rel. mol Ca/S
(g/s)	(g/s)	$\frac{g_Ca}{g_S}$	Mol(Ca)/Mol(S)
5.12	0.93	1.3	1.01
5.12	1.85	2.5	2.00
5.12	2.78	3.8	3.01
5.12	3.70	5.0	4.00
Leito com nível alto			
Descarga de Carvão	Descarga de Calcario	Rel, mass Ca/S	Rel, mol Ca/S
(g/s)	(g/s)	$\frac{g_Ca}{g_S}$	Mol(Ca)/Mol(S)
6,37	1,15	1,7	1,00
6,37	2,31	3,4	2,01
6,37	3,46	5,1	3,01
6,37	4,61	6,8	4,02

Os gráficos de velocidade de fluidização, temperatura do leito, concentração de gases SO₂, THC, NO_x, CO, CO₂, O₂, conversão e coeficiente global de taxa de reação de calcário e absorção de SO₂ são mostrados para as plantas piloto e de bancada nas Figuras 5.1 a 5.11, para diversas relações Ca/S.

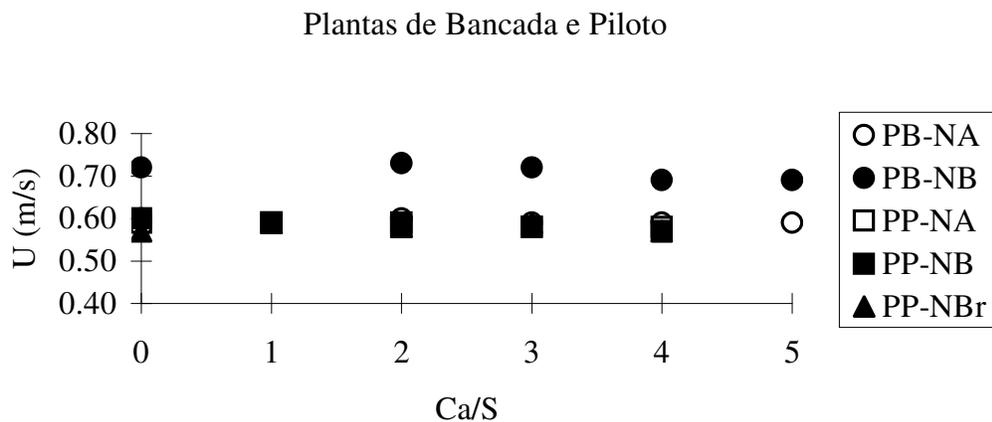


Figura 5.1 – Velocidades de fluidização em função da relação Ca/S nas plantas de bancada (PB) e piloto (PP) operando com níveis de altura do leito baixo (NB) e alto (NA). Os testes replicados apresentam “r” no final do símbolo.

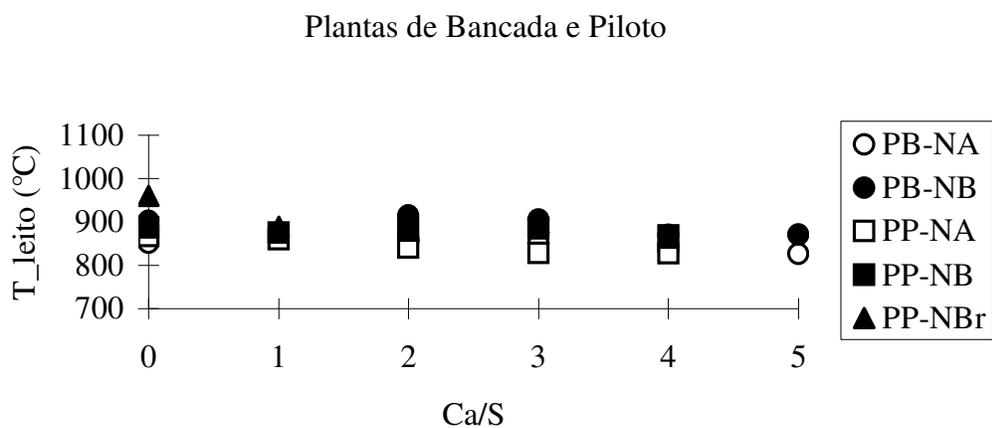


Figura 5.2 – Temperaturas do leito em função da relação Ca/S nas plantas de bancada (PB) e piloto (PP) operando com níveis de altura do leito baixo (NB) e alto (NA). Os testes replicados apresentam “r” no final do símbolo.

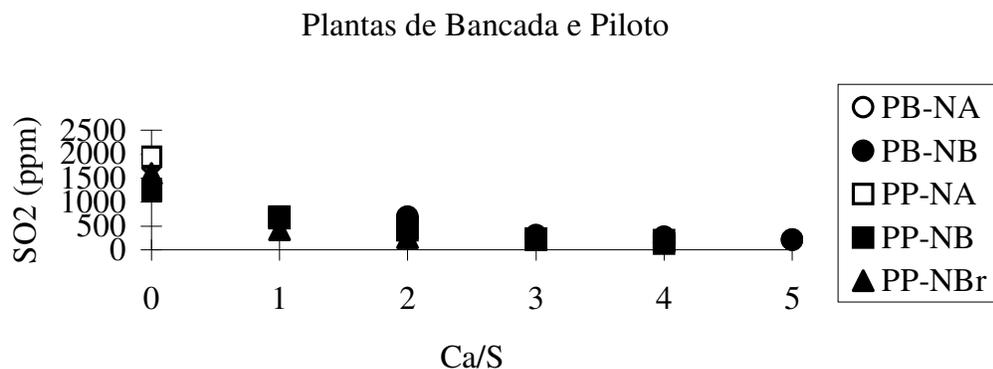


Figura 5.3 – Concentrações de SO₂ na descarga em função da relação Ca/S nas plantas de bancada (PB) e piloto (PP) operando com níveis de altura do leito baixo (NB) e alto (NA). Os testes replicados apresentam “r” no final do símbolo.

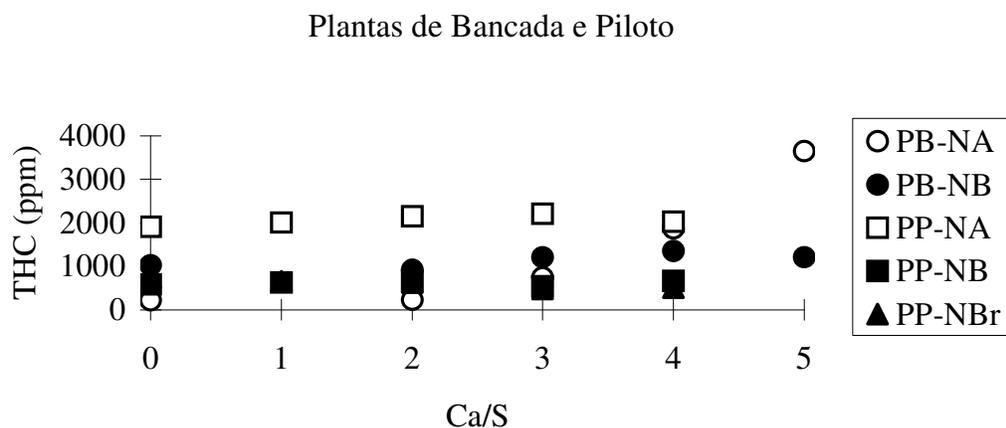


Figura 5.4 – Concentrações de THC na descarga em função da relação Ca/S nas plantas de bancada (PB) e piloto (PP) operando com níveis de altura do leito baixo (NB) e alto (NA). Os testes replicados apresentam “r” no final do símbolo.

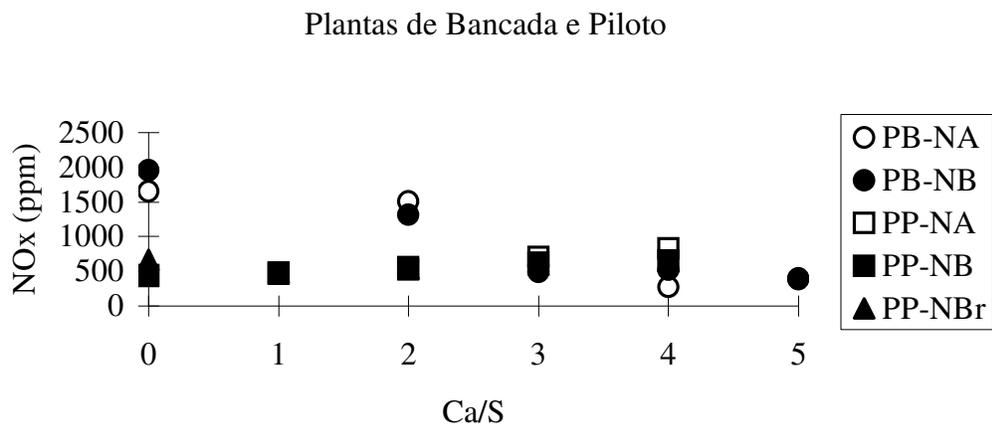


Figura 5.5 – Concentrações de NO_x na descarga em função da relação Ca/S nas plantas de bancada (PB) e piloto (PP) operando com níveis de altura do leito baixo (NB) e alto (NA). Os testes replicados apresentam “r” no final do símbolo.

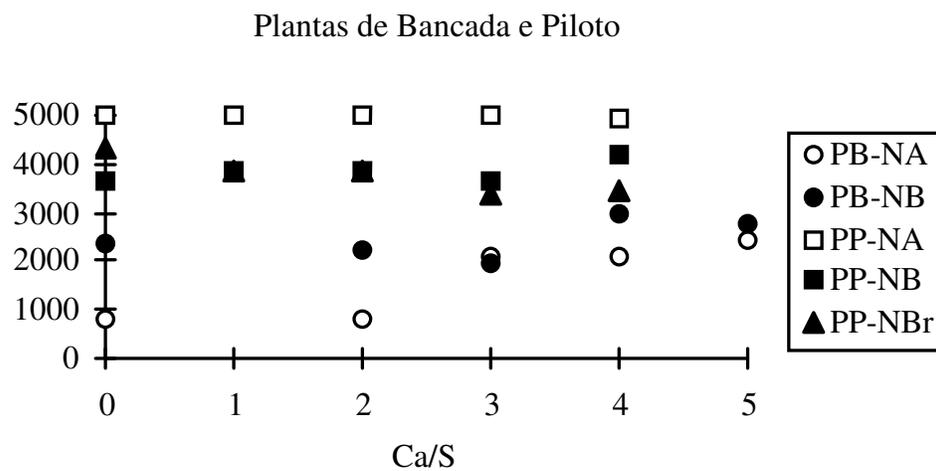


Figura 5.6 – Concentrações de CO na descarga em função da relação Ca/S nas plantas de bancada (PB) e piloto (PP) operando com níveis de altura do leito baixo (NB) e alto (NA). Os testes replicados apresentam “r” no final do símbolo.

Plantas de Bancada e Piloto

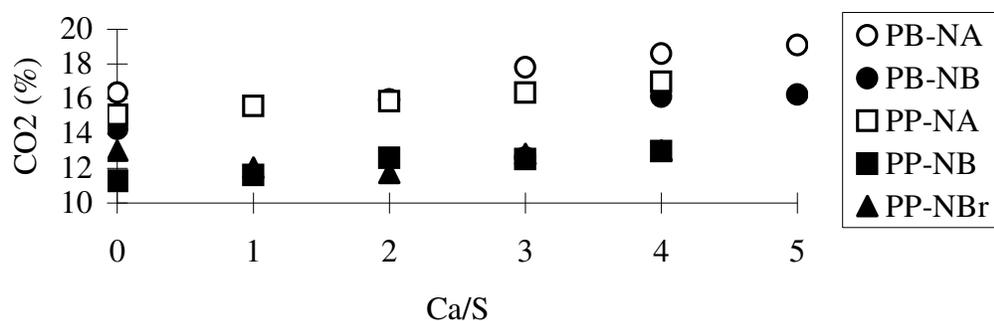


Figura 5.7 – Concentrações de CO₂ na descarga em função da relação Ca/S nas plantas de bancada (PB) e piloto (PP) operando com níveis de altura do leito baixo (NB) e alto (NA). Os testes replicados apresentam “r” no final do símbolo.

Plantas de Bancada e Piloto

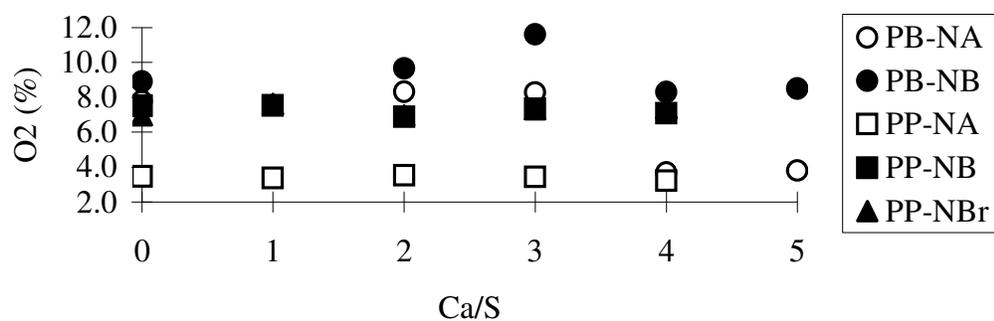


Figura 5.8 – Concentrações de O₂ na descarga em função da relação Ca/S nas plantas de bancada (PB) e piloto (PP) operando com níveis de altura do leito baixo (NB) e alto (NA). Os testes replicados apresentam “r” no final do símbolo.

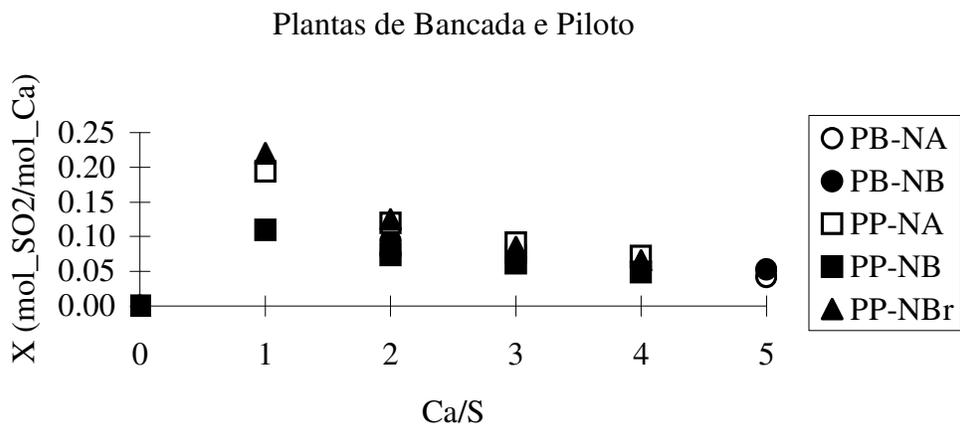


Figura 5.9 – Conversões de calcário no leito em função da relação Ca/S nas plantas de bancada (PB) e piloto (PP) operando com níveis de altura do leito baixo (NB) e alto (NA). Os testes replicados apresentam “r” no final do símbolo.

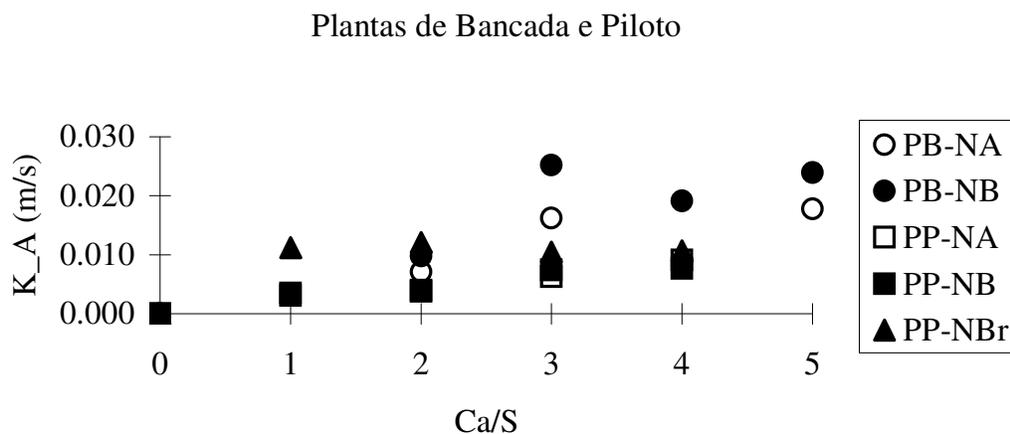


Figura 5.10 – Coeficientes globais de taxa de reação de calcário no leito em função da relação Ca/S nas plantas de bancada (PB) e piloto (PP) operando com níveis de altura do leito baixo (NB) e alto (NA). Os testes replicados apresentam “r” no final do símbolo.

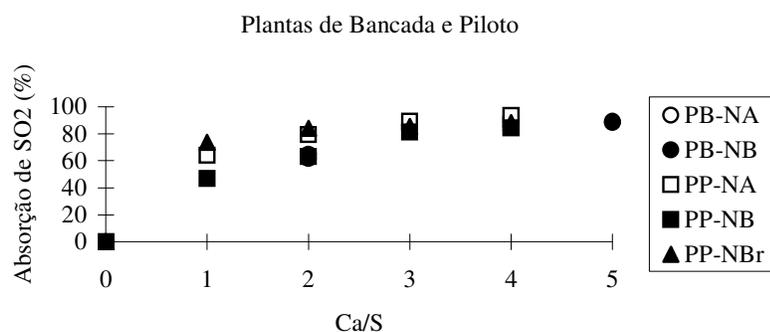


Figura 5.11 – Eficiência de absorções de SO₂ por calcário no leito em função da relação Ca/S nas plantas de bancada (PB) e piloto (PP) operando com níveis de altura do leito baixo (NB) e alto (NA). Os testes replicados apresentam “r” no final do símbolo.

Para analisar os gráficos das Figuras 5.1 a 5.11 utilizou-se três planejamentos fatoriais 2³, considerando os fatores sendo relação Ca/S, altura do leito e tipo de reator. As respostas são as concentrações dos gases SO₂, THC, NO_x, CO, CO₂, O₂, a conversão, o coeficiente global de taxa de reação de calcário e a absorção de SO₂. Na Tabela 5.11, apresenta-se um exemplo de planejamento fatorial 2³ usando algoritmo de Yates. O fator ou variável Ca/S varia entre 0 e 2. Para cada fator é dado o valor -1 para seu nível inferior e +1 para seu nível superior. O algoritmo de Yates permite o arranjo rápido de todas as combinações entre os níveis dos fatores.

Tabela 5.11 – Exemplo de planejamento fatorial 2³ usando algoritmo de Yates. O fator ou variável Ca/S varia entre 0 e 2 neste caso.

Planejamento fatorial 2 ³							
Variável				Nível da variável			Resposta
Altura (B)	Altura (P)	Rel. Ca/S	Reator	Altura	Rel. Ca/S	Reator	X, K_A, etc
0.12	0.16	0	B	-1	-1	-1	
0.24	0.34	0	B	1	-1	-1	
0.12	0.16	2	B	-1	1	-1	
0.24	0.34	2	B	1	1	-1	
0.12	0.16	0	P	-1	-1	1	
0.24	0.34	0	P	1	-1	1	
0.12	0.16	2	P	-1	1	1	
0.24	0.34	2	P	1	1	1	

Nas Tabelas 5.12 a 5.14 apresenta-se os resultados das análises para os casos de relação Ca/S variando entre 0 e 2, entre 0 e 3 e entre 0 e 4, respectivamente.

Tabela 5.12 – Efeitos dos fatores isolados e com interação, com o fator Ca/S entre 0 e 2.

Efeito principal da altura do leito (de H1 para H2)								
SO2 (ppm)	THC (ppm)	NOx (ppm)	CO (ppm)	CO2 (%)	O2 (%)	X	K_A (m/s)	Abs_SO2 (%)
162	329	-23	-139	2,29	-2,49	0,007	-0,0007	3
Efeito principal da relação Ca/S (de 0 para 2)								
SO2 (ppm)	THC (ppm)	NOx (ppm)	CO (ppm)	CO2 (%)	O2 (%)	X	K_A (m/s)	Abs_SO2 (%)
-1182	57	-144	22	0,85	0,20	0,091	0,0062	67
Efeito principal do reator (da bancada para piloto)								
SO2 (ppm)	THC (ppm)	NOx (ppm)	CO (ppm)	CO2 (%)	O2 (%)	X	K_A (m/s)	Abs_SO2 (%)
-246	728	-1118	2806	-1,93	-3,31	0,006	-0,0023	4
Efeito de interação altura-relação Ca/S								
SO2 (ppm)	THC (ppm)	NOx (ppm)	CO (ppm)	CO2 (%)	O2 (%)	X	K_A (m/s)	Abs_SO2 (%)
-150	68	134	-32	-0,65	0,10	0,007	-0,0007	3
Efeito de interação altura-reator								
SO2 (ppm)	THC (ppm)	NOx (ppm)	CO (ppm)	CO2 (%)	O2 (%)	X	K_A (m/s)	Abs_SO2 (%)
163	1078	33	1384	1,25	-1,25	0,016	0,0006	5
Efeito de interação relação Ca/S-reator								
SO2 (ppm)	THC (ppm)	NOx (ppm)	CO (ppm)	CO2 (%)	O2 (%)	X	K_A (m/s)	Abs_SO2 (%)
19	104	254	101	0,22	-0,45	0,006	-0,0023	4
Efeito de interação altura-relação Ca/S-reator								
SO2 (ppm)	THC (ppm)	NOx (ppm)	CO (ppm)	CO2 (%)	O2 (%)	X	K_A (m/s)	Abs_SO2 (%)
-231	11	-113	-91	0,39	0,21	0,016	0,0006	5

Efeito principal do reator: efeito de escala.

Os resultados de emissões de SO₂, absorção, conversão e coeficiente global de taxa de reação mostram que a mudança da planta de bancada para a planta piloto implicou uma redução média de 190ppm na concentração de SO₂ emitido, um aumento de 1% na absorção, um aumento médio de 0,3 pontos percentuais na conversão e uma redução média de 0,0058 m/s no coeficiente global. Destes valores o mais significativo em relação aos outros resultados é o coeficiente global de taxa de reação. A redução

deste parâmetro quando se trabalha com um reator maior pode ser explicada pelo maior volume de bolhas que aumenta a resistência de difusão do SO₂ no leito. Isto tende a reduzir a taxa de reação em leitos de escala maiores. Contudo, como o tempo de residência do calcário e do gás é maior isto compensa a diminuição da taxa de reação e o resultado global é uma absorção e uma conversão ligeiramente melhores.

Tabela 5.13 – Efeitos dos fatores isolados e com interação, com o fator Ca/S entre 0 e 3.

Efeito principal da altura do leito (de H1 para H2)								
SO ₂ (ppm)	THC (ppm)	NO _x (ppm)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	X	K _A (m/s)	Abs_SO ₂ (%)
160	682	-29	307	3,72	-3,10	0,003	-0,0025	1
Efeito principal da relação Ca/S (de 0 para 3)								
SO ₂ (ppm)	THC (ppm)	NO _x (ppm)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	X	K _A (m/s)	Abs_SO ₂ (%)
-1474	490	-526	213	0,59	0,75	0,076	0,0138	85
Efeito principal do reator (da bancada para piloto)								
SO ₂ (ppm)	THC (ppm)	NO _x (ppm)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	X	K _A (m/s)	Abs_SO ₂ (%)
-164	260	-616	2509	-1,46	-3,71	0,001	-0,0069	0
Efeito de interação altura-relação Ca/S								
SO ₂ (ppm)	THC (ppm)	NO _x (ppm)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	X	K _A (m/s)	Abs_SO ₂ (%)
-152	421	128	415	0,79	-0,52	0,003	-0,0025	1
Efeito de interação altura-reator								
SO ₂ (ppm)	THC (ppm)	NO _x (ppm)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	X	K _A (m/s)	Abs_SO ₂ (%)
179	816	64	1043	0,10	-0,87	0,012	0,0020	3
Efeito de interação relação Ca/S-reator								
SO ₂ (ppm)	THC (ppm)	NO _x (ppm)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	X	K _A (m/s)	Abs_SO ₂ (%)
101	-364	756	-197	0,69	-0,85	0,001	-0,0069	0
Efeito de interação altura-relação Ca/S-reator								
SO ₂ (ppm)	THC (ppm)	NO _x (ppm)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	X	K _A (m/s)	Abs_SO ₂ (%)
-215	-251	-81	-431	-0,77	0,59	0,012	0,0020	3

Com relação aos gases THC, NO_x e CO, o efeito de escala pareceu, a priori, ser mais intenso. Os resultados indicam em média aumentos de 390 ppm de THC e de 2560 ppm de CO, e uma redução de 750 ppm de NO_x. As emissões elevadas de THC e CO na planta piloto podem ser explicadas considerando-se o fato do “freeboard” ser mais frio e maior e também pelo acúmulo de partículas finas de carvão no tubo de descarga

onde estava localizada a sonda de amostragem de gases. Naquele local com temperatura em torno de 450 °C, as partículas de carvão elutriado ainda continuavam a volatilizar e oxidar parcialmente dando níveis elevados de THC e CO. Na planta de bancada isto não acontecia com essa intensidade pois sua sonda de amostragem estava localizada no tubo vertical de descarga do reator na saída do ciclone. Em relação ao NOx, seu decréscimo foi causado basicamente pela quantidade de calcário relativamente menor do leito piloto. Portanto os resultados das emissões destes gases devem-se principalmente à diferença na condição de amostragem das sondas e não à escala dos reatores. Tal influência, entretanto, não altera os resultados concernentes à absorção de SO₂, pois este processo ocorre primordialmente no leito e na temperatura deste.

Tabela 5.14 – Efeitos dos fatores isolados e com interação, com o fator Ca/S entre 0 e 4.

Efeito principal da altura do leito (de H1 para H2)								
SO2 (ppm)	THC (ppm)	NOx (ppm)	CO (ppm)	CO2 (%)	O2 (%)	X	K_A (m/s)	Abs_SO2 (%)
108	599	-98	-95	3,09	-3,41	0,004	0,0032	4
Efeito principal da relação Ca/S (de 0 para 4)								
SO2 (ppm)	THC (ppm)	NOx (ppm)	CO (ppm)	CO2 (%)	O2 (%)	X	K_A (m/s)	Abs_SO2 (%)
-1540	545	-550	582	1,94	-1,35	0,060	0,0166	89
Efeito principal do reator (da bancada para piloto)								
SO2 (ppm)	THC (ppm)	NOx (ppm)	CO (ppm)	CO2 (%)	O2 (%)	X	K_A (m/s)	Abs_SO2 (%)
-158	180	-513	2362	-2,26	-1,84	0,001	-0,0082	0
Efeito de interação altura-relação Ca/S								
SO2 (ppm)	THC (ppm)	NOx (ppm)	CO (ppm)	CO2 (%)	O2 (%)	X	K_A (m/s)	Abs_SO2 (%)
-204	338	58	13	0,15	-0,83	0,004	0,0032	4
Efeito de interação altura-reator								
SO2 (ppm)	THC (ppm)	NOx (ppm)	CO (ppm)	CO2 (%)	O2 (%)	X	K_A (m/s)	Abs_SO2 (%)
211	745	178	1160	0,81	-0,54	0,008	-0,0025	1
Efeito de interação relação Ca/S-reator								
SO2 (ppm)	THC (ppm)	NOx (ppm)	CO (ppm)	CO2 (%)	O2 (%)	X	K_A (m/s)	Abs_SO2 (%)
107	-444	858	-343	-0,11	1,02	0,001	-0,0082	0
Efeito de interação altura-relação Ca/S-reator								
SO2 (ppm)	THC (ppm)	NOx (ppm)	CO (ppm)	CO2 (%)	O2 (%)	X	K_A (m/s)	Abs_SO2 (%)
-183	-323	32	-314	-0,05	0,91	0,008	-0,0025	1

Efeito principal da altura do leito.

Os resultados indicam que, de maneira geral, o aumento na altura do leito, nos níveis testados neste trabalho, não parece ter influência significativa no processo de absorção de SO₂ por calcário. Porém parece ter influência nas emissões dos outros gases produtos de combustão, principalmente o NO_x, que diminuiu com o aumento da altura do leito.

Efeito principal da relação Ca/S.

Este fator, como já era esperado, apresentou efeito significativo no processo de absorção de SO₂ por calcário, principalmente em relação aos níveis 0 e 2, e 0 e 3, cuja redução na concentração chega a 67 e 85 %, respectivamente. Entre os níveis 0 e 4, embora apresente redução de 89 % de SO₂, o acréscimo na redução é de apenas quatro pontos percentuais entre os níveis 3 e 4. A conversão diminuiu devido à maior quantidade de massa de calcário no leito. O coeficiente global de taxa de reação aumentou com o aumento da relação Ca/S pois a taxa de reação é diretamente proporcional à massa de calcário no leito e à relação entre as concentrações inicial e final de SO₂. Em relação às emissões dos outros gases, o efeito da relação Ca/S foi inócuo, exceto pelo NO_x que sofreu influência da altura do leito.

Efeito de interação entre fatores.

Sobre os efeitos de interação entre fatores observa-se que não houve incremento nos resultados comparando-os com os respectivos efeitos isolados, ou seja pelo menos um dos fatores analisados isoladamente apresentou valor com nível de significância maior que o encontrado na análise de interação. Por exemplo, o efeito de interação altura-relação Ca/S na emissão de SO₂ foi de -204 ppm, enquanto seus efeitos isolados foram de +108 ppm e -1540 ppm.

Comparação dos resultados com a literatura.

A comparação dos resultados deste trabalho com dados da literatura estudada, é feita somente em relação às emissões de SO₂. Os resultados de absorção de SO₂ obtidos neste trabalho estão próximos daqueles obtidos por Tureso (2004), Lee *et al.* (1980), Lyngfelt and Leckner (1989), Garcíá-Labiano *et al.* (1992), Makarytchev *et al.* (1995),

Adánez *et al.* (1993) e Zhang *et al.* (1991). Outros trabalhos citados na literatura apresentam valores de absorção e SO₂ mais baixos para relações Ca/S próximas daquelas utilizadas neste trabalho, como Fee *et al.* (1984) e Lee and Georgakis (1981). Diferenças nos resultados podem advir não só da diferença de reatores mas sobretudo da composição dos calcários utilizados, estrutura física e da temperatura de operação conforme Costa (2000), Camargo (2001), Da Silva (2001) e Crncovick (2003). Outras variáveis de menor importância são o excesso de ar, a velocidade de fluidização e a taxa de recirculação de material particulado elutriado. Todos estes são fatores que além daqueles aqui analisados, podem ter influência significativa nas respostas.

Avaliação das emissões de gases medidas neste trabalho.

A resolução CONAMA N° 08, de 6 de dezembro de 1990 "estabelece, em nível nacional, limites máximos de emissão de poluentes do ar (padrões de emissão) para processos de combustão externa em fontes novas fixas de poluição com potências nominais totais até 70 MW (setenta megawatts) e superiores."

Para fontes novas fixas de poluição com potências nominais totais inferiores a 70 MW a emissão de Dióxido de Enxofre (SO₂) não deverá ultrapassar 5000 (cinco mil) gramas por milhão de quilocalorias, para óleo combustível e carvão mineral. Para fontes novas fixas de poluição com potências nominais totais superiores a 70 MW a emissão de Dióxido de Enxofre (SO₂) não deverá ultrapassar 2000 (dois mil) gramas por milhão de quilocalorias, para óleo combustível e carvão mineral.

As potências das plantas de bancada e piloto são aproximadamente 0,018 MW e 0,280 MW, respectivamente, considerando-se taxa máxima de alimentação de carvão mineral nas duas plantas. Portanto o limite máximo de emissão de SO₂ para as duas plantas seria de 5000 g/10⁶ kcal. Para as taxas de alimentação de carvão utilizadas neste trabalho, máximo de 0,59 g/s e 6,37 g/s nas plantas de bancada e piloto, respectivamente, os níveis de emissões são apresentados na Tabela 5.15. Nota-se que em ambas as plantas os níveis de emissão ultrapassam o limite estabelecido pela norma para a relação Ca/S = 0. Entretanto, para relações Ca/S de 1 e 2 nas plantas piloto e de

bancada, respectivamente, as emissões de SO₂ já ficam abaixo do limite fixado pela resolução CONAMA N° 08.

Segundo Oka (2004), as regulamentações contemporâneas dos países mais desenvolvidos fixam os seguintes limites para emissões: particulado < 50 mg/m³, SO₂ < 400 mg/Nm³, NO_x < 200 mg/Nm³ e CO < 40 mg/Nm³. Em relação a estes valores, observa-se que para relação Ca/S=3 as emissões de SO₂ estão abaixo do limite. Em relação aos gases NO_x e CO, praticamente todos os valores estão acima do limite aceitável. Entretanto, deve-se notar que ambos os reatores operaram em condições diferentes daquela de operação normal onde as paredes do reator são isoladas termicamente e ainda pode existir sistema de retorno de particulado elutriado do leito.

Tabela 5.15 – Emissões de SO₂, NO_x e CO para as plantas de bancada e piloto.

Planta	P* (MW)	Ca/S	SO ₂ (ppm)	SO ₂ (g/10 ⁶ kcal)	SO ₂ (mg/m ³)	NO _x (mg/m ³)	CO (mg/m ³)	Abs_SO ₂ (%)
Bancada	0.011	0	1899	6094	1156	858	639	0
Bancada	0.011	2	671	2132	404	570	596	65,0
Bancada	0.011	3	261	836	159	217	522	83,6
Bancada	0.011	4	274	905	172	237	821	85,1
Bancada	0.011	5	205	676	128	174	765	88,9
Piloto	0.121	0	1946	6354	1221	195	1371	0
Piloto	0.121	1	698	2295	441	221	1381	63,9
Piloto	0.121	2	402	1344	258	260	1405	78,8
Piloto	0.121	3	206	696	134	331	1420	89,0
Piloto	0.121	4	126	426	82	388	1404	93,3

* Nas condições testadas neste trabalho.

Exceto para relação Ca/S=0, comparando-se os mesmos valores de relação Ca/S, nota-se que na mudança da escala de bancada para a escala piloto a eficiência de absorção de SO₂ aumenta significativamente, conforme já evidenciado de forma discreta na Tabela 5.12. Entretanto isto pode ser creditado às diferenças nas condições operacionais dos reatores.