

CIMENTO

01. CONCEITOS E CLASSIFICAÇÃO
02. A IMPLANTAÇÃO DE INDÚSTRIAS BRASILEIRAS DE CIMENTO
03. PRODUÇÃO E CONSUMO
04. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO
 - 4.1. DESCRIÇÃO SUCINTA DAS ETAPAS
 - 4.2. CIRCUITOS DE MOAGEM
 - 4.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE MOAGEM DA FARINHA
 - 4.4. CONSIDERAÇÕES SOBRE MOAGEM DE CIMENTO
05. SISTEMAS DE CLINQUERIZAÇÃO
 - 5.1. CONSTRUÇÃO E FUNCIONAMENTO DOS FORNOS
 - 5.2. FORNOS PARA PROCESSOS ÚMIDOS
 - 5.3. FORNOS PARA PROCESSOS SECOS
 - 5.4. RESFRIADOR DE CLINQUER
06. QUÍMICA DO CLINQUER E DO CIMENTO
 - 6.1. ESTEQUIOMETRIA CIMENTEIRA
 - 6.2. COMPOSIÇÕES DAS MATÉRIAS-PRIMAS, CLINQUER E ADITIVOS FINAIS
 - 6.3. CÁLCULOS PARA PRODUÇÃO DE FARINHA
 - 6.4. NOTAÇÃO DOS CIMENTEIROS
 - 6.5. FORMAÇÃO DO CLINQUER PORTLAND
 - 6.6. COMPOSIÇÃO POTENCIAL DO CIMENTO
 - 6.7. INFLUÊNCIA DAS MATÉRIAS-PRIMAS NO CLINQUER E CPC
 - 6.8. QUALIDADES CEMENTÍFERAS DOS SILICATOS E ALUMINATOS DO CLINQUER
 - 6.9. ADIÇÕES FINAIS AO CLINQUER
 - 6.10. HIDRATAÇÃO DO CIMENTO
07. OPERAÇÃO DE UM FORNO ROTATÓRIO DE CIMENTO
 - 7.1. CARACTERÍSTICAS DAS CHAMAS E TEMPERATURAS OBTIDAS EM BICOS DE GÁS
 - 7.2. A COMBUSTÃO DE LÍQUIDOS E SÓLIDOS
 - 7.3. A CHAMA DO FORNO DE CLINQUERIZAÇÃO
 - 7.4. AUTO-COMBUSTÃO E PRÉ-IGNIÇÃO
 - 7.5. A FORMAÇÃO DA COLAGEM E DO ANEL
 - 7.6. CICLOS DOS ÁLCALIS, SULFATOS E CLORETOS
 - 7.7. CIRCUITOS GASOSOS
 - 7.8. SISTEMAS DE CONTROLE DE QUALIDADE
 - 7.9. PARTIDA E PARADA DO FORNO
08. CONTROLE QUÍMICO DA QUALIDADE
09. BIBLIOGRAFIA

ESTE TEXTO É FRUTO DO APOIO CONCEDIDO PELA
CIMENTO IRAJÁ S.A. À ESCOLA DE QUÍMICA DA UFRJ
ATRAVÉS DA SUA ASSOCIAÇÃO DOS EX-ALUNOS.

PROF. ABRAHAM ZAKON

DPI

CIMENTO

AZ 16/05/84

1

1. CONCEITOS E CLASSIFICAÇÃO

O termo "cimento" é empregado para designar diversos tipos de "substâncias usadas como ligantes, aglomerantes ou adesivos". Com esta interpretação, admite-se que o cimento mais produzido e usado no mundo seja o "cimento portland". Os cimentos podem ser definidos como "substâncias adesivas capazes de unir fragmentos ou massas de matéria num todo compacto". Vários autores estrangeiros englobam a cal e o gesso dentro do conceito de "cimento".

As definições acima restringem-se aos cimentos inorgânicos hidráulicos, principalmente de origem calcária e que podem incluir alguns compostos de magnésio. As substâncias que devem ser excluídas do âmbito das definições acima são compostos orgânicos como epoxis, latex, monômeros polimerizáveis solúveis em água, cola animal, betume, caseína e preparações oleaginosas.

Cimento - é um material pulverizado que por adição de uma quantidade conveniente de água, forma uma pasta aglomerante capaz de endurecer, tanto embaixo d'água, como no ar. Ficam excluídas as cales hidráulicas, as cales aéreas e os gessos. (ABNT/P-TB-76).

A variedade de cimentos é grande; alguns foram usados no passado em alguns locais específicos em função de jazidas minerais já ~~exauridas~~. O Quadro I, na página seguinte apresenta resumidamente diversos tipos em função de: obtenção, composição e emprego.

Os cimentos hidráulicos são fabricados pelo processamento de quantidades / selecionadas, britadas e secas de matérias-primas, que são misturadas e queimadas (ou clinquerizadas), cujas partículas resultantes denominadas "clinker" são moídas até a finura necessária para fornecer taxas de hidratação adequadas através da reação com água.

Os cimentos naturais são resultantes de misturas calcário-argilosas obtidas diretamente de ocorrências minerais que são calcinadas em temperatura abaixo das necessárias a sua sinterização. Tais materiais representam um grupo intermediário entre as cales hidráulicas e o cimento portland. Sendo suas composições governadas pelas jazidas são, por conseguinte, mais variáveis que as misturas artificiais.

DPI

CIMENTO

AZ 28/03/83

2

QUADRO 1

CLASSIFICAÇÃO DOS CIMENTOS QUANTO A ORIGENS, COMPOSIÇÃO E EMPREGO

NATURAIS

- pozolanas (cinzas vulcânicas),
- rochas cementíferas (calcário-argilosas),
- terras diatomáceas

PORTLAND (fabricadas no Brasil)

- de alta resistência inicial (ARI), EB-2
- comuns (CPC), Especificação Brasileira EB-1/77
- de alto forno (AF), EB-208/74
- pozolânico (POZ), EB-758/74
- branco (CBP)
- de moderada resistência a sulfatos e moderado calor de hidratação (MRS), EB-903/77
- de alta resistência a sulfatos (ARS), EB-903/77

DE ESCÓRIAS

- metalúrgico ferro-portland;
- metalúrgico de alto forno;
- metalúrgico sulfatado ou super-sulfatado;

PARA ALVENARIA :

- CPC mais cal hidratada;
- CPC mais alguns % de estearato de cálcio ou alumínio;
- CPC mais óleo parafínico, com ou sem cloreto de cálcio;
- CPC mais calcário britado; também com adição de argila coloidal;
- CPC mais terra diatomácea
- escória de alto forno granulada mais cal hidratada
- CPC mais escória granulada

ALUMINOSOS

- calcário mais bauxita (alumina + óxido de ferro + sílica + magnésia , etc)

ESPECIAIS

- de enxofre;
- de silicato;
- de poço de petróleo;
- de pega rápida;
- expansivo;
- controlado;
- asfáltico;

DENTÁRIOS

- fosfato de zinco;
- fosfato de zinco mais sais de cobre ou prata;
- fosfato de cobre (vermelho ou negro);
- policarboxilato;
- hidróxido de cálcio;
- silicato;
- silicofosfato;
- óxido de zinco-eugenol.

AMIANTO

- EQ/CT -

DPI

CIMENTO

AZ 28/03/83

3

Os cimentos portland apresentam-se, geralmente, como pós acinzentados e são compostos principalmente de silicatos tricálcico e dicálcico. Existem já seis tipos padronizados pela ABNT/ABCP: comum (CPC) -Especificação Brasileira EB-1/77, de alta resistência inicial (ARI)-EB-2/74, de alto forno (AF)-EB-208/74, pozolânico (POZ)-EB-758/74, de moderada resistência a sulfatos e moderado calor de hidratação (MRS) e de alta resistência a sulfatos (ARS), ambos normalizados pela EB-903/77.

O cimento portland comum (CPC) depende, principalmente, para sua fabricação de calcário, argila e gesso (gipsita ou gesso). As adições de gesso destinam-se a regular o tempo de pega. Também são misturadas às matérias-primas (calcário e argila) quantidades de carvão, para facilitar a queima ou cozimento durante a clínquerização, e ferro, que atua como fundente (permite reduzir as temperaturas de operação do forno necessárias à ocorrência das reações químicas). Além do gesso, adiciona-se ao clínquer (produto da queima) escórias de alto-forno, para acrescentar ao cimento produzido propriedades hidráulicas. A Tabela 1 apresenta a composição típica de cimentos brasileiros e americanos, expressa em função dos seus principais óxidos componentes, responsáveis pelas propriedades do clínquer e do produto final.

TABELA 1 Composição de Cimentos Portland Comuns em Função dos
Óxidos Formadores

Componente	CPC Brasileiros (%)	CPC Americanos (%)
CaO	58,9 a 66,8	60,0 a 67,5
SiO ₂	19,0 a 24,2	19,0 a 25,5
Al ₂ O ₃	3,9 a 7,3	2,5 a 8,0
Fe ₂ O ₃	1,8 a 5,0	0 a 5,5
SO ₃	0,9 a 3,0	1,2 a 3,0
MgO	0,5 a 6,3	0 a 5,0

Os cimentos de escórias são obtidos pela moagem conjunta de clínquer e escórias granuladas de altos-fornos siderúrgicos (constituídas em sua maior parte de silicatos e alumino-silicatos de cálcio) com adição de gesso. A composição química da escória varia com os minerais e fundentes empregados na siderurgia e pode apresentar os teores expostos na Tabela 2, pela qual observa-se que vários de seus óxidos são os mesmos que compõem o cimento portland. Características principais:

DPI

CIMENTO

AZ 28/03/83

4

os cimentos de escória são resistentes à água do mar e hidratam-se e endurecem mais lentamente que o CPC.

TABELA 2 Composição de Cimentos de Escórias em Função dos
Óxidos Formadores

Componente	Teores Típicos (%)
Sílica (SiO ₂)	30 a 40
Alumina (Al ₂ O ₃)	8 a 20
Cal (CaO)	40 a 55
Magnésia (MgO)	0 a 8
Enxôfre (SO ₃)	0 a 2
Outros (FeO, MnO, etc.)	0 a 3

Os cimentos para arremesso são preparados para facilitar o seu manuseio em obras de alvenaria ou recomposição de revestimentos, inclusive os de reatores químicos em operação revestidos com refratários, através do uso de pistolas especiais.

Os cimentos aluminosos ou fundidos apresentam elevado teor de alumina (acima de 30%) e são obtidos pela cozedura até a fusão completa de uma mistura de cálcio e bauxita, que resulta em aluminatos de cálcio de cor negra. Sujeitos à hidratação endurecem rapidamente atingindo o valor final da resistência mecânica em cerca de 24 horas. Resistem às águas contendo ácidos minerais diluídos, suportando também temperaturas elevadas.

TABELA 3 Composição de Cimentos Aluminosos em Função dos
Óxidos Formadores

Componente	Teores Típicos (%)
Alumina (Al ₂ O ₃)	38 a 40
Cal (CaO)	37 a 40
Óxidos de Ferro	10 a 16
Sílica (SiO ₂)	5 a 10
Impurezas	0,5 a 1

Cronograma de instalação das fábricas de cimento no Brasil

De 1888 a 1925 é o período chamado pioneiro, onde algumas iniciativas de implantação da indústria do cimento foram tentadas. As primeiras idéias de fabricar cimento no Brasil devem-se a Nóbrega, na Paraíba, e Rodovalho, em São Paulo, em 1888.

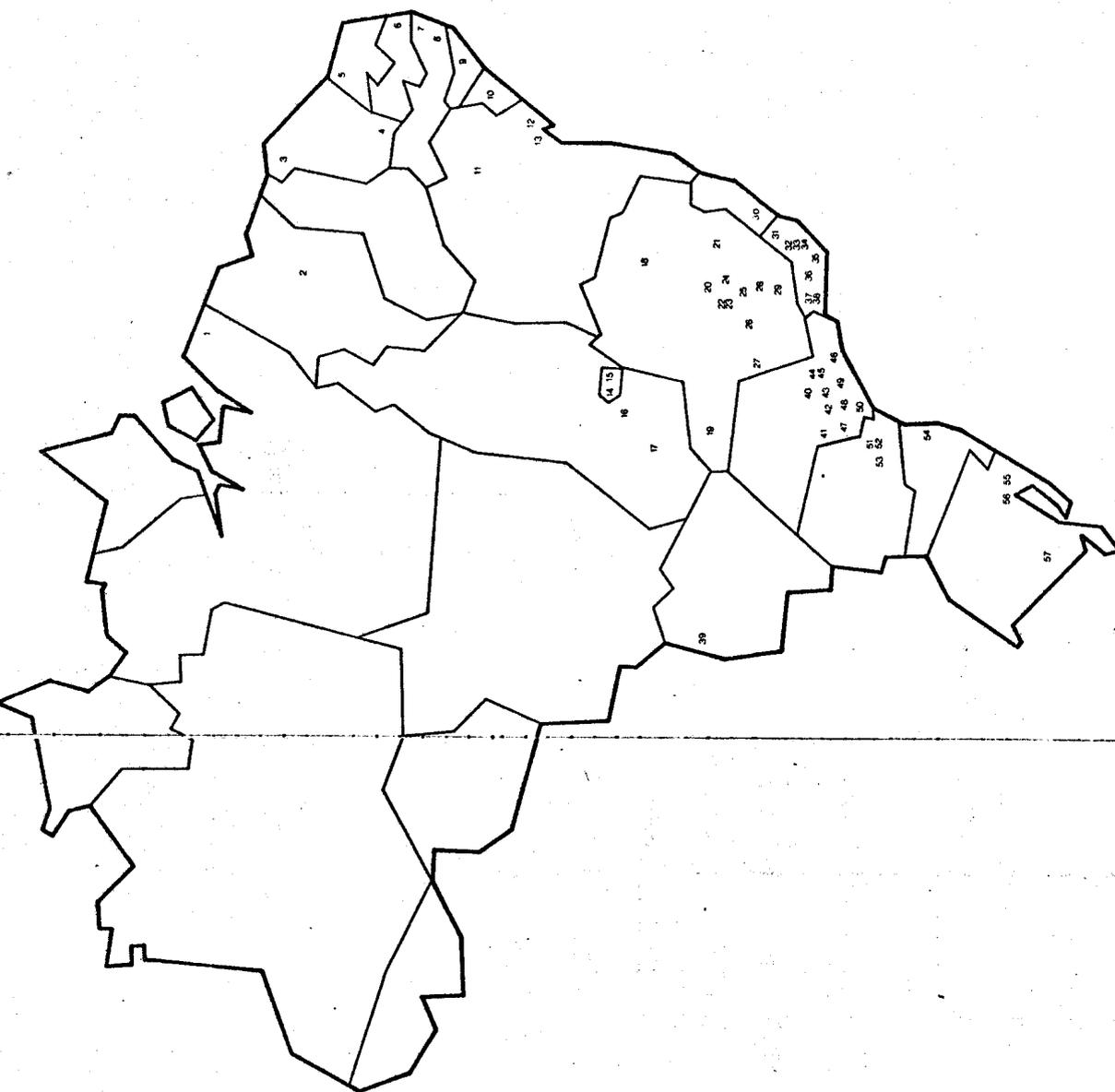
★ PERUS	1926	27	28	29	30
	1931	32	33 ^a ★ NACIONAL/S. Gonçalo	34	35 ★ CIMEPAR
★ VOTORANTIM	1936	37	38	39 ★ ITAU/Pratópolis	40
	1941	42 ★ POTY	43	44	45
★ ITAU/Contagem	1946	47 ★ GAÚCHO/Esteio	48	49 ★ PARAÍSO	50
★ TUPI/V. Redonda	1951	52 ★ MÁRINGA ★ IPANEMA ★ CIMBA ★ PONTE ALTA	53 ★ ARATU ★ RIO BRANCO/R. B. Sul	54 ★ IRAJA ★ ITAPESSOCA	55 ★ BARROSO ★ ITAU CORUMBA ★ CAUE/P. Leopoldo
	1956	57 ★ SANTA RITA/Itapevi	58 ★ CATARINENSE	59 ★ NACIONAL/Matozinhos ★ ITABIRA/C. Itapemirim	60 ★ GOÍAS
	1961	62 ★ NACIONAL/Arcos ★ CIBRASA ★ VOTORANTIM/Jaguareé	63	64	65
	1966	67 ★ SERGIPE	68 ★ CEARENSE ★ SANTA RITA/Cubatão	69 ★ MATSULFUR	70 ★ ALVORADA
	1971	72 ★ TOCANTINS ★ ITAPETINGA ★ GAÚCHO/P. Machado	73 ★ SERRANA ★ SALVADOR ★ ITAPICURU ★ ITAU PARANA ★ RIO BRANCO/C. Goiás ★ CAUE/Mesquita	74 ★ CAMARGO CORRÊA	75 ★ CIMINAS ★ VOTORANTIM/Rio Negro
★ ITAMBÉ ★ SOEICOM ★ TUPI/Carandai	1976	77 ★ IBACIP ★ CISAFA ★ CIPLAN ★ SANTA RITA/S. Pirapora ★ VOTORANTIM/V. Redonda ★ ITABIRA/Capão Bonito	78 ★ ATOL	79	80
	1981	82 ★ MAUA	83	84	85

FONTE: ABCP

DPI

CIMENTO

AZ 28/03/83



Localização das fábricas de cimento no Brasil

IDENTIFICAÇÃO DAS FÁBRICAS		SINOPSE	
Ref	Localidade/usual	UF	Reg.
1	CIBRASA	PA	4
2	ITAPIQUIRU	MA	4
3	DEANENSE	CE	4
4	IBACIP	CE	5
5	ITAPETINGA	RN	5
6	CIBERPAZ	PE	6
7	PARASSOCA	PE	6
8	POTY	AL	6
9	ATOL	SE	7
10	SERGIPE	BA	7
11	CISAPRA	BA	7
12	ARATU	BA	7
13	ALVALOZ	BA	7
14	ESCALVADOR	DF	8
15	TOSCANINS	DF	8
16	RIO BRANCO/COMUNDA DE ODIAS	GO	9
17	GOIAS	GO	9
18	MATSLERUR	MG	9
19	PONTE ALTA	MG	10
20	ALTO ALEZINHOS	MG	10
21	CAJUE MESQUITA	MG	10
22	CIMINAS	MG	10
23	CAJUE PEDRO LEOPOLDO	MG	10
24	SOLECOM	MG	10
25	ITAJU CONTRAEM	MG	10
26	NACIONAL/ARCOZ	MG	11
27	MARIA APARECIDA	MG	11
28	ITUPICARANGA	MG	11
29	BARROSO	MG	11
30	ITABIRA/CACHEIRO DE ITAPERIRIM	ES	14
31	PARAÍSO	ES	14
32	ITAPERIRIM/RIO NEGRO	RJ	15
33	ALVODADA	RJ	15
34	MAJUA	RJ	17
35	NACIONAL/SÃO GONCALO	RJ	17
36	IRIJA	RJ	17
37	ITAJU-VOLTA REDONDA	RJ	14
38	VOTORANTIM/POETA REDONDA	RJ	18
39	ITAPERIPE/ITAPERIPE	RJ	18
40	ITAPERIPE	RJ	18
41	MARINGÁ	SP	16
42	SANTA RITA/SALTO DE PIRAPORA	SP	16
43	VOTORANTIM	SP	16
44	VOTORANTIM/JAGUARE	SP	16
45	PARANÁ	SP	18
46	SANTA RITA/OURATIAO	SP	18
47	CAMARGO CORREA	SP	18
48	ITABIRA/CAPAO BONITO	SP	15
49	SANTA RITA/ITAPERI	SP	15
50	SERRANA	SP	20
51	ITAJU PARANA	PR	21
52	RIO BRANCO/RIO MANCO DO SUL	PR	21
53	ITAPERIPE	PR	21
54	CATAPUENSE	RS	22
55	CAJOCHO/ESTREO	RS	22
56	CIMBA	RS	22
57	GAUCHO/PRIMEIRO MACHADO	RS	22

FIGURA 1

FONTES: ABCP

DPI

CIMENTO

AZ 28/03/83

7

TABELA 4

Produção de Cimento Portland Nacional, Segundo as Fábricas, Marcas, Tipos e Respectivas Unidades da Federação 1980/1981

Fábricas	Marca	UF	Tipo	Produção		
				1980 (t)	1981 (t)	1981:1980 (Δ %)
Cibrasa	Nassau	PA	Comum	315.486	388.000	+ 23,0
Itapicuru	Nassau	MA	Comum	200.982	170.550	- 15,1
Cearense	Poly	CE	Comum	294.054	386.543	+ 31,5
Ibaciç	Nassau	CE	Comum	60.055	67.019	+ 11,6
Itapetinga	Nassau	RN	Comum	252.789	123.191	- 51,3
			Pozolânico	—	69.243	—
Cimpar	Zebú	PB	Comum	456.786	387.204	- 15,2
			Pozolânico	—	75.835	—
Itapessoca	Nassau	PE	Comum	397.654	234.071	- 41,1
			Pozolânico	—	122.443	—
Poly	Poly	PE	Comum	640.971	624.321	- 2,6
Atol	Atol	AL	Comum	315.229	272.072	- 13,7
Sergipe	Poly	SE	Comum	156.648	160.014	+ 2,1
Aratu	Afatu	BA	Comum	426.051	380.527	- 10,7
Cisafrá	Bonfim	BA	Comum	176.047	162.625	- 7,6
Salvador	Salvador	BA	Comum	211.042	256.657	+ 21,6
Corumbá	Itaú Corumbá	MS	Comum	373.369	326.498	- 12,6
Goias	Goias	GO	Comum	495.649	548.057	+ 10,6
Rio Branco	Votoran	GO	Comum	338.277	253.829	- 25,0
Ciplan	Planalto	DF	Comum	221.909	236.619	+ 6,6
			Alta Resistência	—	717	—
Tocantins	Tocantins	DF	Comum	397.943	308.755	- 22,4
Barroso	Barroso	MG	Comum	1.224.947	1.127.842	- 7,9
CNCP-Matosinhos	Campeão	MG	Comum	490.196	499.611	+ 1,9
			Alto Forno	352.334	228.613	- 35,1
CNCP-Arcos	Campeão	MG	Comum	143.945	107.650	- 25,2
Cauê	Cauê	MG	Comum	105.709	141.642	+ 34,0
			Alto Forno	879.375	691.350	- 21,4
Ciminas	Ciminas	MG	Comum	1.207.334	1.107.231	- 8,3
Itaú de Minas	Itaú	MG	Comum	709.967	639.413	- 9,9
Itaú C. Industrial	Itaú	MG	Comum	491.217	376.053	- 23,4
Matsulfur	Montes Claros	MG	Comum	704.000	820.000	+ 16,5
Ponte Alta	Ponte Alta	MG	Comum	141.242	150.790	+ 6,8
Soelcom	Soelcom	MG	Comum	843.506	1.188.277	+ 40,9
			Alto Forno	121.994	—	—
Tupi-Carandá	Tupi	MG	Comum	610.400	543.396	- 11,0
Itabira-C. Itapemirim	Nassau	ES	Comum	663.458	797.311	+ 20,2
Ahorada	Ahorada	RJ	Comum	445.352	398.390	- 10,5
CNCP-São Gonçalo	Mauá	RJ	Comum	408.017	391.555	- 4,0
CNCP-Cantagalo	Mauá	RJ	Comum	—	6.863	—
Paraíso	Paraíso	RJ	Comum	237.533	195.999	- 17,5
Tupi-Volta Redonda	Tupi	RJ	Alto Forno	625.970	544.541	- 13,0
Irajá	Irajá	RJ	Comum	220.643	225.687	+ 2,3
			Alto Forno	26.898	—	—
Rio Negro	Votoran	RJ	Comum	74.365	68.398	- 8,0
			Comum	244.738	256.739	+ 4,9
Camargo Corrêa	Eldorado	SP	Alto Forno	621.616	438.818	- 29,4
			Comum	644.263	487.698	- 24,3
			Pozolânico	2.187	63.908	+ 2822,2
Ipanema	Ipanema	SP	Comum	121.102	108.230	- 10,6
Maringá	Maringá	SP	Comum	272.303	253.753	- 6,8
Perus	Perus	SP	Comum	66.971	67.149	+ 0,3
Itabira-Capão Bonito	Nassau	SP	Comum	838.649	895.953	+ 6,8
Santa Rita-Itapevi	Santa Rita	SP	Comum	643.193	654.967	+ 1,8
Santa Rita-Cubatão	Santa Rita	SP	Alto Forno	456.752	411.848	- 9,8
Santa Rita-Saito	Santa Rita	SP	Comum	604.181	637.549	+ 5,5
Serrana	Serrana	SP	Comum	280.559	211.252	- 24,7
			Pozolânico	306.305	313.381	+ 2,3
Votorantim	Votoran	SP	Comum	2.627.285	2.396.190	- 8,8
Catarinense	Votoran	SC	Pozolânico	353.850	336.490	- 4,9
Gaúcho	Votoran	RS	Pozolânico	544.245	584.975	+ 7,5
Matarazzo	Minuano	RS	Pozolânico	199.362	214.531	+ 7,6
Itambé	Itambé	PR	Comum	283.672	159.389	- 43,8
			Pozolânico	197.205	282.629	+ 43,3
Itaú do Paraná	Itaú do Paraná	PR	Comum	392.380	454.862	+ 15,9
			Pozolânico	202.091	229.528	+ 13,6
Rio Branco do Paraná	Votoran	PR	Comum	608.509	655.783	+ 7,8
			Pozolânico	222.042	130.046	- 41,4
Total				27.192.803	26.051.070	- 4,2

5

FONTE: SNIC

DPI

CIMENTO

AZ 28/03/83

8

TABELA 5

Consumo Aparente de Cimento Portland Total e Per Capita no Brasil no Período 1950/83.

ANO	PRODUÇÃO (ton) (a)	DESPACHO (ton) (b)	EXPORTAÇÃO (ton) (c)	IMPORTAÇÃO (ton) (d)	CONSUMO APARENTE (ton) (e) = b - c + d	POPULAÇÃO (1 000 hab) (f)	CONSUMO PER CAPITA (Kg/hab.ano) (g) = e/f
1950	1 385 797	1 385 797	0	404 525	1 790 322	51 944	34.47
1951	1 455 775	1 455 775	0	656 847	2 112 622	53 523	39.47
1952	1 618 992	1 618 992	0	820 228	2 439 220	55 149	44.23
1953	2 030 418	2 030 418	0	996 772	3 027 190	56 825	53.27
1954	2 441 187	2 439 968	0	338 172	2 778 140	58 551	47.45
1955	2 733 505	2 705 179	0	242 372	2 947 551	60 330	48.86
1956	3 278 223	3 253 620	3 236	32 009	3 282 393	62 164	52.80
1957	3 376 096	3 372 673	5 249	11 438	3 378 862	64 052	52.75
1958	3 769 158	3 792 326	3 526	719	3 789 519	65 999	57.42
1959	3 822 069	3 816 776	4 748	40 493	3 852 521	68 004	56.65
1960	4 446 903	4 450 277	2 959	1 370	4 448 688	70 070	63.49
1961	4 708 911	4 704 245	2 606	462	4 702 101	72 093	65.22
1962	5 071 740	5 035 743	2 923	1 736	5 034 556	74 174	67.87
1963	5 188 198	5 204 426	2 622	8 252	5 210 056	76 316	68.27
1964	5 583 008	5 557 773	413	28 732	5 586 092	78 518	71.14
1965	5 623 773	5 632 583	2 656	43 528	5 673 455	80 785	70.23
1966	6 045 589	6 035 079	3 349	93 502	6 125 232	83 118	73.69
1967	6 405 001	6 381 190	14 218	124 877	6 491 849	85 517	75.91
1968	7 280 654	7 256 287	6 835	584 561	7 834 013	87 986	89.04
1969	7 823 487	7 823 314	1 180	609 360	8 431 494	90 526	93.14
1970	9 002 431	8 994 017	338	334 510	9 328 189	93 139	100.15
1971	9 802 639	9 768 281	210	279 195	10 047 266	95 455	105.26
1972	11 381 431	11 345 260	0	244 335	11 589 595	97 829	118.47
1973	13 397 576	13 360 857	123 127	235 677	13 473 407	100 261	134.38
1974	14 919 644	14 972 923	113 048	243 439	15 103 314	102 755	146.98
1975	16 737 458	16 693 550	45 746	234 896	16 882 700	105 310	160.31
1976	19 146 794	19 099 778	50 718	337 596	19 386 656	107 928	179.63
1977	21 122 927	20 937 910	27 711	260 646	21 170 845	110 612	191.40
1978	23 202 867	23 152 898	127 039	179 827	23 205 686	113 363	204.70
1979	24 873 654	24 956 630	181 673	100 699	24 875 656	116 182	214.11
1980	27 192 803	27 088 521	203 613	26 342	26 911 250	119 071	226.01
1981	26 051 070	26 115 586	164 179	6 899	25 958 306	121 452	213.73
1982	25 644 119	25 456 392	7 287	21 274	25 470 379	123 881	205.60
1983	20 869 935	20 877 400	19 061	2 399	20 860 738	126 358	165.09

Importação: Fonte (CIEF-Coordenação do Sistema de Informações Econômico-Fiscais do Ministério da Fazenda).

População: Fonte (IBGE-Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

FONTE: SNIC

DPI

CIMENTO

AZ 28/03/83

9

TABELA 6

Importação Brasileira de Cimento 1981

Em toneladas

Meses	Cimento Hidráulico Aluminoso	Cimento Portland Comum	Cimento Portland Especial de Escória de Alto Forno	Qualquer Outro Cimento Portland Especial	Outros Cimentos Hidráulicos	Total
Jan	169,600	450,000	—	—	0,022	619,622
Fev	299,400	300,000	—	—	—	599,400
Mar	451,400	15,000	—	—	0,050	466,450
Abr	347,100	—	—	—	0,053	347,153
Mai	242,900	—	—	—	0,030	242,930
Jun	610,400	—	—	0,068	—	610,468
Jul	419,300	—	0,007	—	0,600	419,907
Ago	446,600	—	—	—	0,245	446,845
Set	517,900	2.000,000	—	11,400	—	2.529,300
Out	60,000	—	—	—	—	60,000
Nov	248,700	—	—	0,100	24,100	272,900
Dez	283,700	—	—	—	—	283,700
Total	4.097,000	2.765,000	0,007	11,568	25,100	6.898,675
Quantidades Arredondadas	4.097	2.765	0	12	25	6.899

Fonte: CIEF — Ministério da Fazenda

TABELA 7

Exportação Brasileira de Cimento Portland 1981

Em toneladas

Meses	Cimento Comum	Cimento Branco	Cimento Pozolânico	Total
Jan	15.697	197	1.400	17.294
Fev	16.855	—	387	17.242
Mar	20.761	172	—	20.933
Abr	17.338	172	—	17.510
Mai	14.928	227	—	15.155
Jun	12.242	342	—	12.584
Jul	17.178	60	—	17.238
Ago	12.801	222	—	13.023
Set	11.853	167	—	12.020
Out	8.440	30	—	8.470
Nov	8.904	167	—	9.071
Dez	3.073	566	—	3.639
Total	160.070	2.322	1.787	164.179

24

FONTE: SNIC

DPI

CIMENTO

AZ 28/03/83

10

4. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO - Vide Quadro 3.

4.1 Preparo da Mistura Crua - o calcário oriundo da pedreira tem seu tamanho reduzido em britadores primários (de mandíbula) até $D_p = 10$ cm e nos secundários (de martelos) até 1 a 2,5 cm. A argila, extraída da mina, pode ser desintegrada e conduzida a um forno rotatório de secagem, sendo possível, também, a prévia separação de areia e outros materiais. A mistura crua ou crú é composta de calcário, argila, ferro e carvão, sendo que é alimentada ao moinho de bolas para atingir uma finura capaz de retenção de 15 a 30% da massa em peneira 200 mesh. A moagem, conforme tratase de via úmida ou seca, é feita com ou sem presença de água.

Durante a fabricação, as matérias-primas e a mistura são analisadas quimicamente a intervalos de 1 hora e às vezes de meia em meia hora e, em face dos resultados dos ensaios, o laboratório indica ao setor de produção as porcentagens de cada matéria-prima que deverá compor o crú.

4.2 Homogeneização - na via úmida as matérias-primas são moídas com água, formando uma pasta ou lama com 30 a 40% de umidade, que é bombeada para grandes tanques cilíndricos, dotados de sofisticado sistema de agitação. A homogeneização dura várias horas e o teor de CaO é controlado constantemente. Na via seca o crú sai do moinho misturado, pulverizado e seco. Existem casos em que os moinhos operam aquecidos pelos gases de combustão do forno de clinquerização, podendo atingir até 300 a 400 °C. O crú é transportado mecânica ou pneumaticamente para o silo homogeneizador, onde é possível corrigir, eventualmente, a sua composição.

4.3 Clinquerização - na via úmida todas as etapas físico-químicas necessárias à formação do clinquer ocorrem dentro do forno rotativo. Na via seca as etapas até a faixa de 900 a 1000°C podem ser conduzidas em pré-aquecedores acoplados ao forno, o qual de comprimento reduzido, recebe a mistura naquelas temperaturas e realiza as etapas restantes. Na Figura 2 na página seguinte vemos diversos tipos de alternativas para as vias úmida e seca em função dos equipamentos disponíveis

4.4 Esfriamento - é desejável esfriar o clinquer rapidamente à medida que se afasta da zona de queima. Para tanto, emprega-se chama curta, intensa e tão próxima da descarga quanto possível. A recuperação de calor e pré-aquecimento do ar secundário

DPI

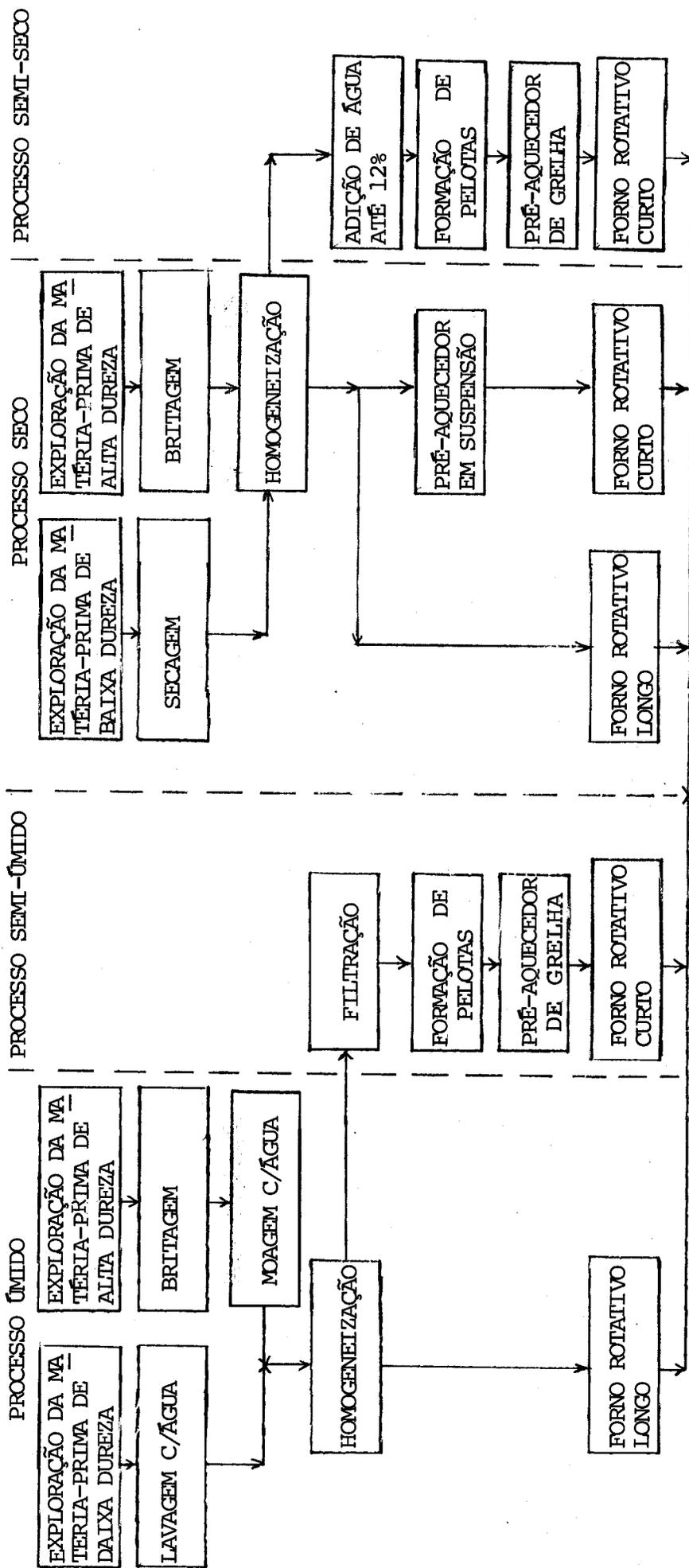
CIMENTO

AZ 28/03/83

11

QUADRO 3

ETAPAS DOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE CIMENTO



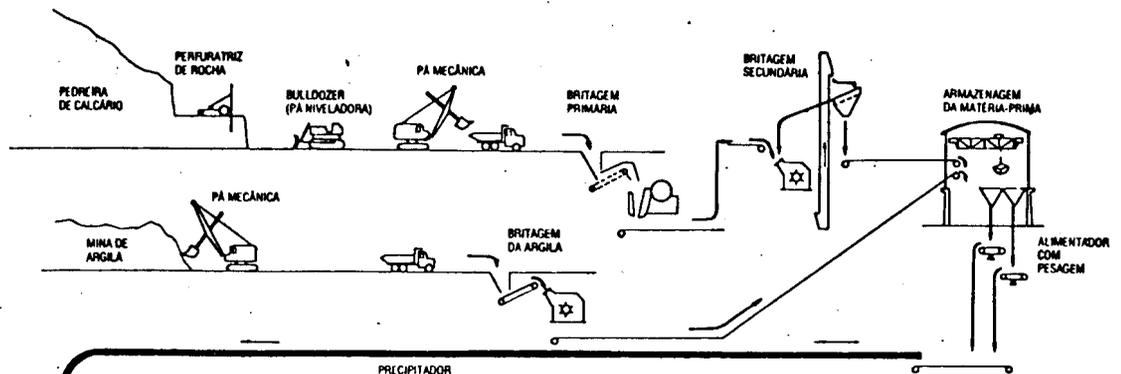
NOTA: BRITAGEM PARA MATERIAIS SECOS (CALCÁRIOS)
 SECAGEM PARA MATERIAIS ÚMIDOS (ARGILLOSOS)

FIGURA 2

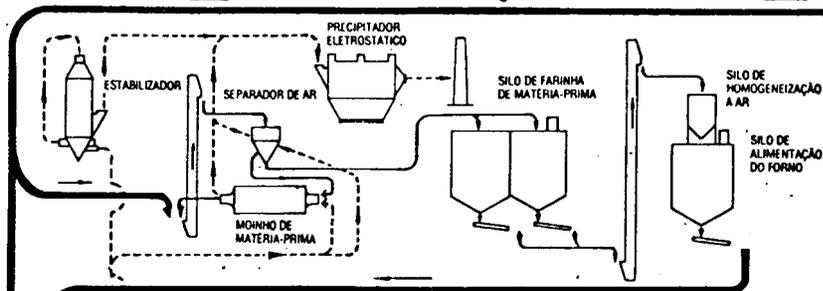
→ FLUXO DE MATERIAL
- - - FLUXO DE GAS, AR

FLUXOGRAMA DA FÁBRICA DE CIMENTO

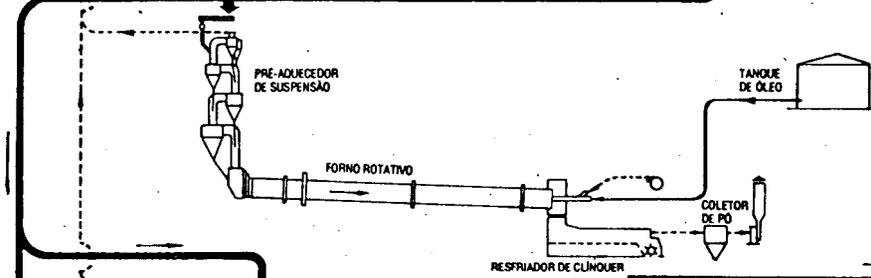
BRITAGEM NA PEDREIRA E ARMAZENAGEM



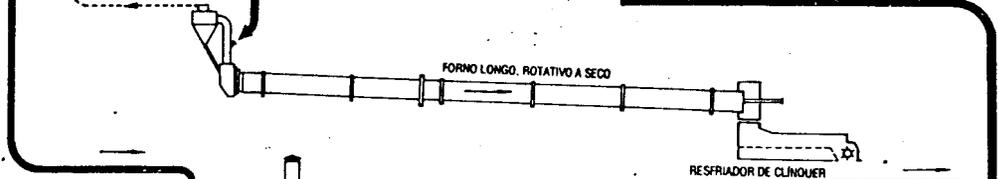
MOAGEM DE MATÉRIA-PRIMA E HOMOGENEIZAÇÃO



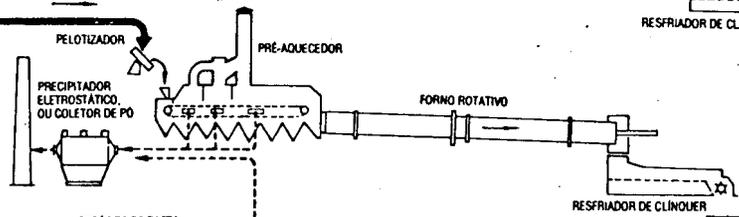
QUEIMA PROCESSO SECO COM PRÉ-AQUECEDOR TIPO SUSPENSÃO



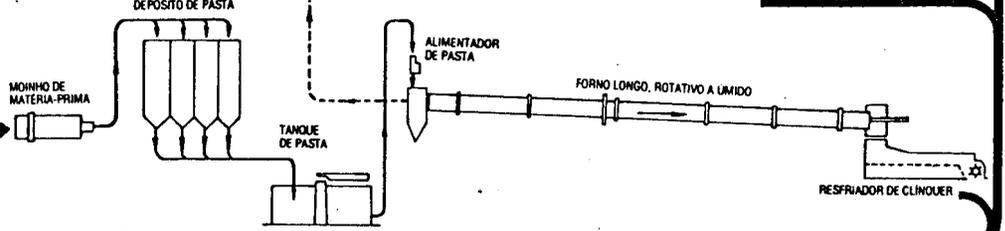
PROCESSO SECO FORNO LONGO



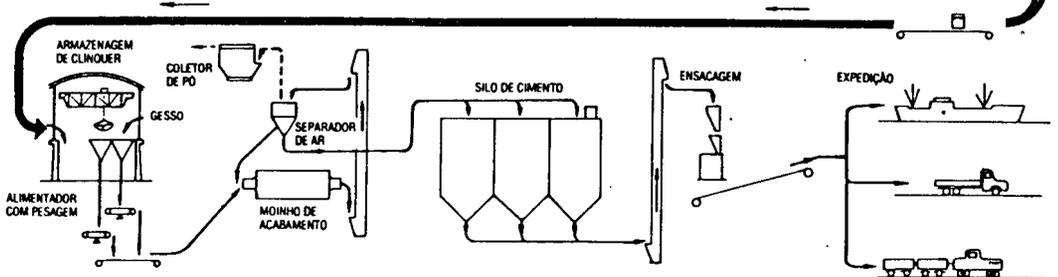
PROCESSO SECO, COM PRÉ-AQUECEDOR TIPO GRELHA



PROCESSO ÚMIDO (FORNO LONGO)



MOAGEM DE CIMENTO E ENSACAGEM



FONTE: DEDINI

- EQ/CT -

DPI

CIMENTO

AZ 28/03/83

13

rio da combustão podem ser efetuados em resfriadores vibratórios de clínquer, planetários (conforme nos fornos de cal), rotatórios ou de esteira. Os efeitos são: a temperatura do clínquer reduz-se de 1200 a 1300°C até 50 a 70°C e o ar secundário é aquecido até 370 a 800°C no terminal quente do resfriador.

4.5 Adições e Moagem Finais - o clínquer esfriado é transportado para um silo ou misturado com gesso e é conduzido diretamente para o moinho, que pode ser de barras / ou de bolas, atingindo-se aí D_p menor que 44 μ m para 85 a 96% das partículas moídas. As especificações brasileiras permitem para o CPC uma adição máxima de 10% de escórias.

4.6 Circuitos de Moagem - para moer matérias-primas e clínquer, emprega-se, na maioria dos casos, o circuito fechado, visto na Figura 3, na moagem de matérias úmidas é possível usar-se o circuito aberto; em alguns casos este sistema é usado para a moagem de matéria prima seca e clínquer.

4.7 Considerações sobre moagem da farinha:

1^a - uma farinha muito fina acarreta maior consumo de energia elétrica, corpos moedores, revestimento do moinho, menor produção horária, aumentando o custo da moagem.

2^a - uma farinha muito grossa acarretará dificuldades na homogeneização, produzirá um clínquer de qualidade inferior com maior consumo de combustível. Explica-se: partículas maiores são mais difíceis de serem penetradas pela ação termoquímica do forno, podendo acarretar a ocorrência de grãos de farinha não-queimados no meio do clínquer.

3^a - deve-se evitar o "embuchamento" do moinho (espécie de entupimento), causado por alimentação em excesso, material difícil de moer, aberturas de saída entupidadas, teor/ de água elevado, mau funcionamento do filtro coletor de mangas. O fenômeno é perceptível através do som da moagem que vai ficando gradualmente abafado e irregular. As medidas corretivas são: cortar a alimentação, adicionar areia, operar o moinho sem alimentação até eliminar o embuchamento. Nos casos de umidade elevada, recomenda-se insuflar ar quente para dentro do separador de partículas.

Considerações sobre moagem de cimento:

1^a - Os materiais a serem moídos são: clínquer, gesso, escória de alto-forno.

2^a - A moagem de cimento ocorre em moinhos de bolas dotado de uma câmara com revestimento (placas) classificador acoplado em cimento fechado com um separador.

DPI

CIMENTO

AZ 16/05/84

14

3^a - Durante a moagem, só uma pequena porção de energia introduzida é usada na redução dos tamanhos das partículas de clínquer e gesso. Com a movimentação dos corpos moedores, uma grande quantidade de calor é liberada e a temperatura do cimento aumenta consideravelmente. Torna-se necessário evitar que o cimento atinja níveis superiores a 100°C para não desidratar o gesso (limite de segurança).

4^a - A temperatura do cimento em moinhos grandes alcança até 120°C. Quando ocorre moagem de cimento com temperatura acima de 130°C, ocorrerá o fenômeno de "pega falsa" (misturando-se água no cimento, ele endurece imediatamente, voltando depois ao normal).

5^a - Uma moagem com temperatura baixa também não é conveniente pois o cimento perde parte de sua resistência, podendo ainda hidratar e endurecer dentro dos silos, provocar entupimentos na grelha de saída do moinho, nas tubulações de tiragem e baixar a vida útil das mangas do coletor de pó.

6^a - Um cimento muito grosso não terá uma boa resistência e um cimento fino causará menor produção de moinho, maior desgaste dos corpos moedores e revestimento, e problemas na ensacadeira.

7^a - Um cimento grosso apresentará os tempos de início e fim de pega maiores enquanto um cimento fino apresentará menores tempos.

As temperaturas de operação adequadas dos moinhos de farinha e cimento são entre 80 e 100°C. A temperatura do clínquer introduzido no moinho de cimento deve ser inferior a 40°C. Caso esteja acima desse valor, o clínquer deverá ser estocado durante um período de "espera" ou resfriamento. Outros aspectos operacionais para manter a faixa de temperaturas acima envolvem corrigir as deficiências de tiragem do filtro de mangas ou problemas eletromecânicos e verificar a ocorrência de embuchamentos.

Noções gerais sobre Moagem e Moinhos podem ser encontrados no "Perry 5^a", Seção 8. Os moinhos apresentam dois componentes que podem se desgastar e provocar alterações na composição química do produto: são os revestimentos e os corpos moedores. Os fabricantes de materiais de moagem geralmente apresentam literatura técnica suplementar aos consumidores.

DPI

CIMENTO

AZ 16/05/84

15

- EQ/CT -

FIGURA 3

SISTEMA DE CIRCUITO FECHADO

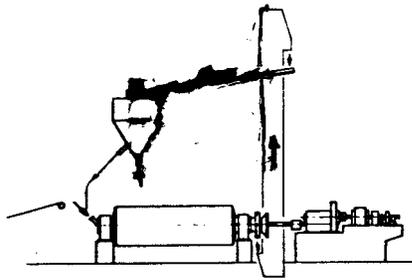


FIGURA 4

SISTEMA DE CIRCUITO ABERTO

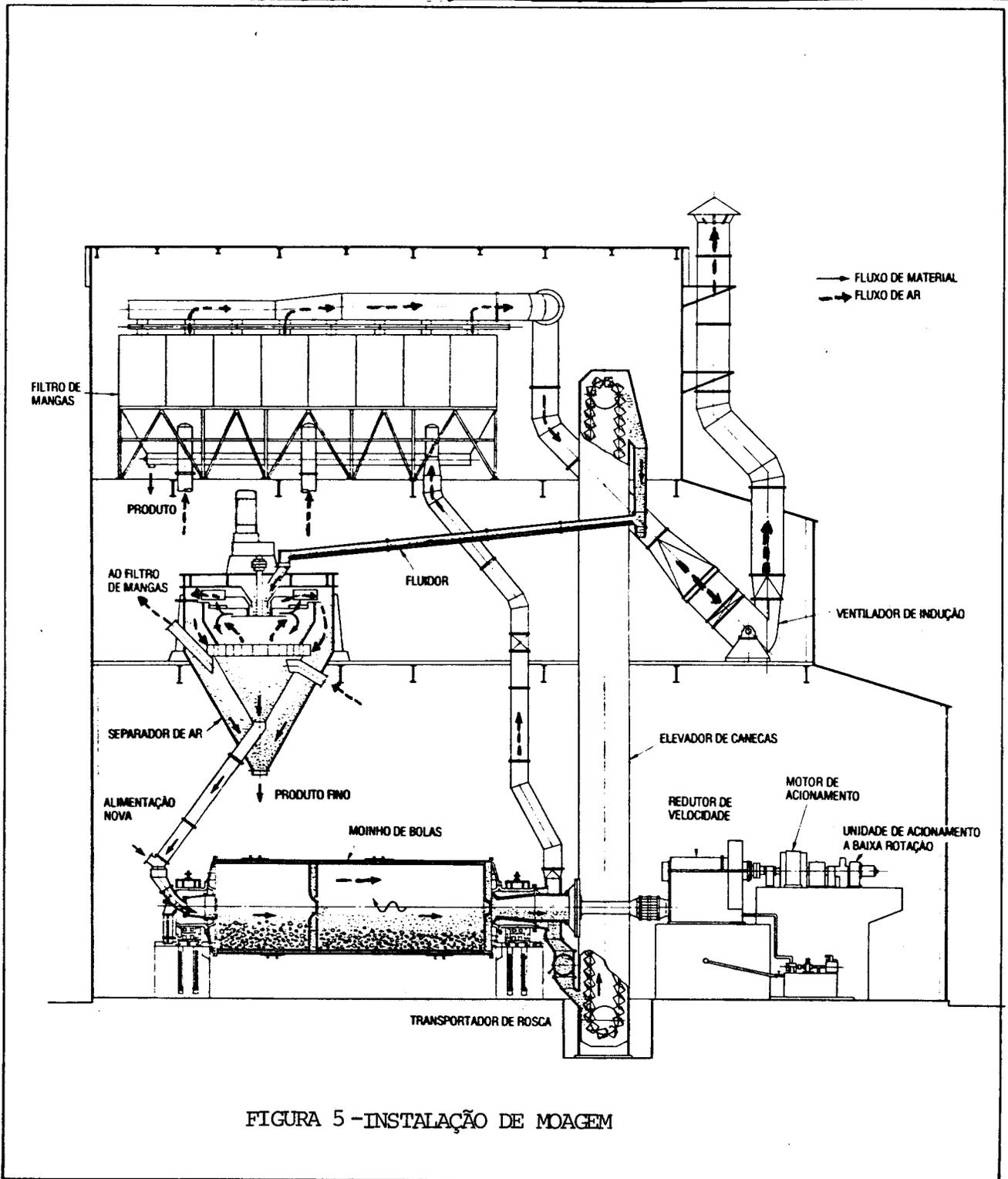
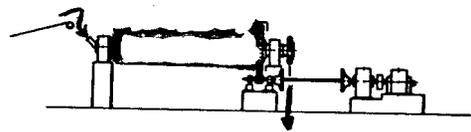


FIGURA 5 -INSTALAÇÃO DE MOAGEM

FONTE: DEDINI

DPI

CIMENTO

AZ 30/03/83

16

- EQ/CT -

Os revestimentos internos das carcaças dos moinhos com tambor rotativo podem ser substituídos quando desgastados. O revestimento efetua ação defletora, seja por ter uma forma ondulada, seja pelas aletas de pega que mantêm a carga de bolas solidária com a carcaça e impede o escorregamento. Um problema operacional ocorre com os moinhos de revestimento liso - é o provocado pelo escorregamento caprichoso da carga contra a parede. Nas velocidades baixas, a carga pode movimentar-se pendularmente de um lado para o outro sem realmente girar. Nas velocidades altas pode ocorrer o movimento rotatório com oscilações.

Os revestimentos internos de moinhos são construídos em diversos tipos e classificam-se em:

- a - lisos - mantem contato por atrito simples com a carga;
- b - grelhas - atingem a camada mais externa do minério e corpos moedores, permitindo infiltração de pó nas suas aberturas, formando uma capa de desgaste.
- c - elevadores - englobam os formatos ondulados, frisos e ressaltos, cunhas e pinos que provocam a aderência do material até um certo grau na ascensão rotatória.

A Figura 6 abaixo apresenta os modelos de frisos, barras, ressaltos e cunhas ou pinos nos tipos (a), (b), (c), (i) e (j). Os modelos de chapas sobrepostas são vistos nas letras (f), (g), (h) e (k) e os ondulados em (d), (e), (l), (m) e (n).

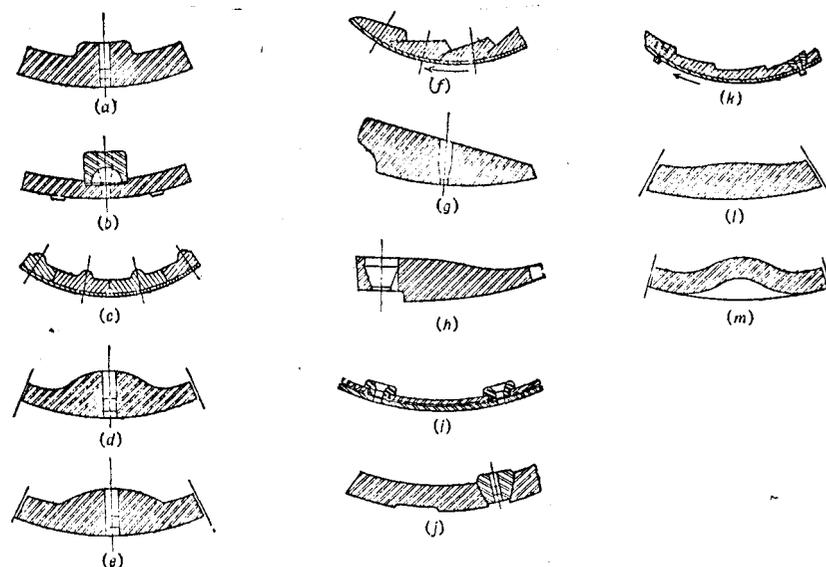
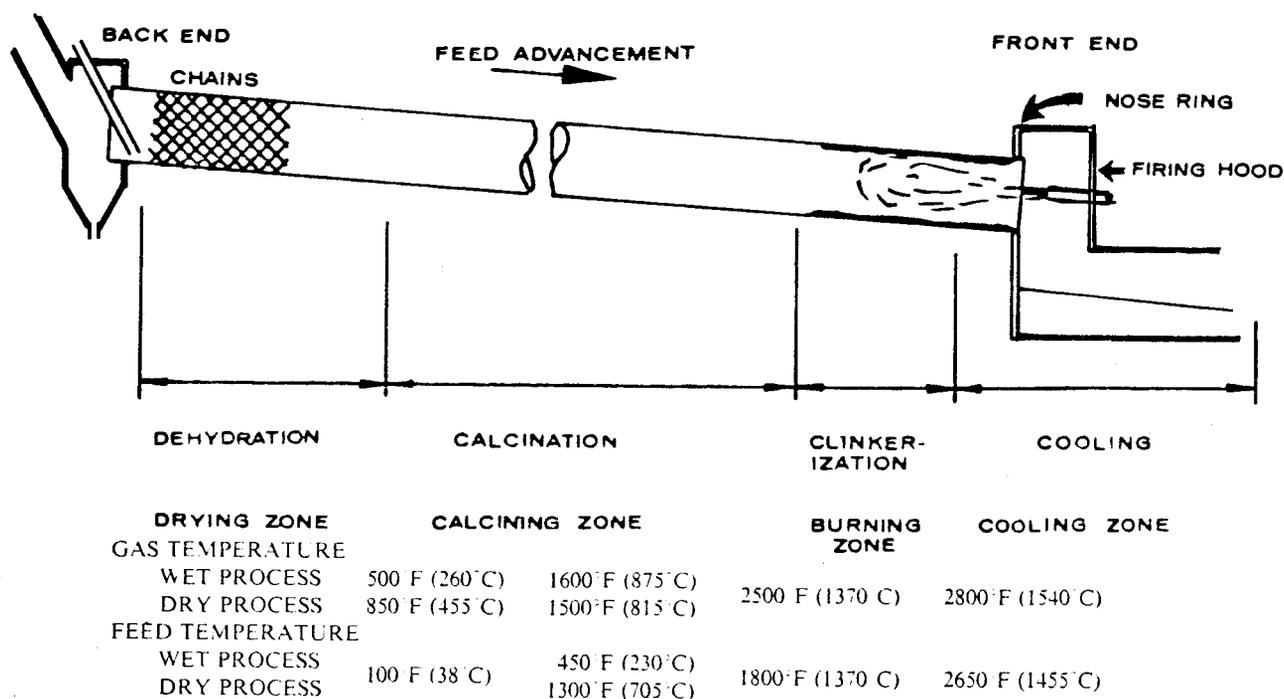


FIGURA 6 TIPOS DE PLACAS DE REVESTIMENTOS INTERNOS DE MOINHOS COM TAMBOR ROTATIVO.

5. SISTEMAS DE CLINQUERIZAÇÃO

5.1 Construção e Funcionamento dos Fornos - são do tipo rotatório, em sua grande / maioria. Cada forno é composto de um casco cilíndrico de aço, revestido de material refratário, com diâmetro entre 3 a 8m e comprimento entre 50 a 230m, equipado com motores elétricos capazes de girá-lo com velocidade entre 1 a 3 rpm. É montado com uma leve inclinação sobre o plano horizontal de modo que o material sólido alimentado no terminal superior (frio) percorra lentamente, por ação da gravidade e da rotação, toda sua extensão e seja descarregado no resfriador. O queimador no terminal inferior / (quente) produz uma corrente de gases quentes que aquece o clínquer, o cru calcinado / e as matérias-primas, em regime contracorrente, à medida que estes escoam para o terminal frio.



Feed, entering the back end of the kiln, flows counter to the movement of hot gas, passing first through the chain section (cross-hatched) and finally emerging in the form of hot clinker at the front end. The hot clinker passes through the cooler on its way to storage or final grinding.

Figura 7 - Distribuições típicas de temperatura nos fornos rotatórios de cimento nos processos seco e úmido

Os refratários são materiais, não metálicos, capazes de suportar elevadas temperaturas, choques térmicos, abrasão, ataques químicos de líquidos e gases, bem como deposições de crostas químicas (colagens) resultantes de evaporação, queima, fusão e solidificação.

Os problemas e substituições de refratários ocorrem principalmente nas zonas de queima e resfriamento do forno rotatório, onde ocorrem as maiores temperaturas. Os revestimentos nas zonas de calcinação e secagem com menor frequência tem de ser substituídos; por isso, é possível empregar refratários com desempenhos inferiores, porém resistentes à abrasão. De um modo geral, para evitar gradientes e tensões térmicas excessivos é conveniente proporcionar formação de uma crosta protetora de clínquer (colagem) na face quente dos tijolos da zona de queima.

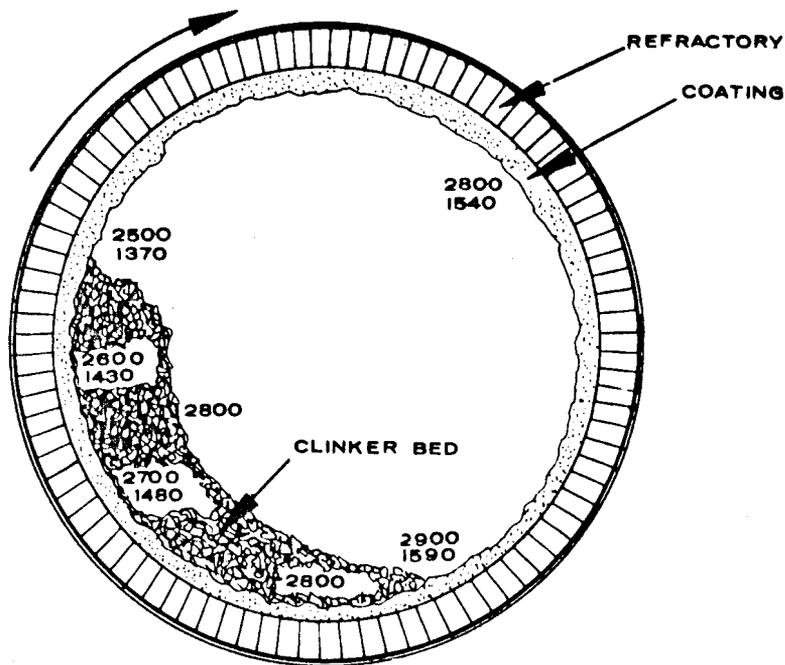


FIGURA 8

Wall temperature of the kiln in the burning zone, reaching a maximum just before it comes in contact with the feed bed as the kiln turns, drops about 400° F (200°C) as it gives up much of its heat to the bed of material.

Os refratários para uso na zona de queima podem ser classificados em dois grupos: 1º - de alumina e sílica, 2º - básicos. Quanto maior o teor de alumina no primeiro grupo maiores são as resistências aos choques térmicos (termofraturas), aos ataques químicos e mecânica, mas a expansão térmica reversível é maior. De qualquer modo a resistência aos ataques químicos é sempre menor do que a oferecida pelos refratários básicos.

Quanto maior o teor de sílica mais ácidos serão os refratários. Os tijolos de argila refratária são classificados, geralmente, no grupo neutro, embora possam pertencer a qualquer das duas classes, dependendo do teor relativo entre a sílica e a alumina.

Os refratários básicos são produzidos principalmente a partir de magnésita-cromo (maior percentagem de Periclásio), cromo-magnésita (predomínio do cromo) e forsterita (magnésia-sílica). A desvantagem dos refratários básicos reside na sua menor / resistência às temperaturas.

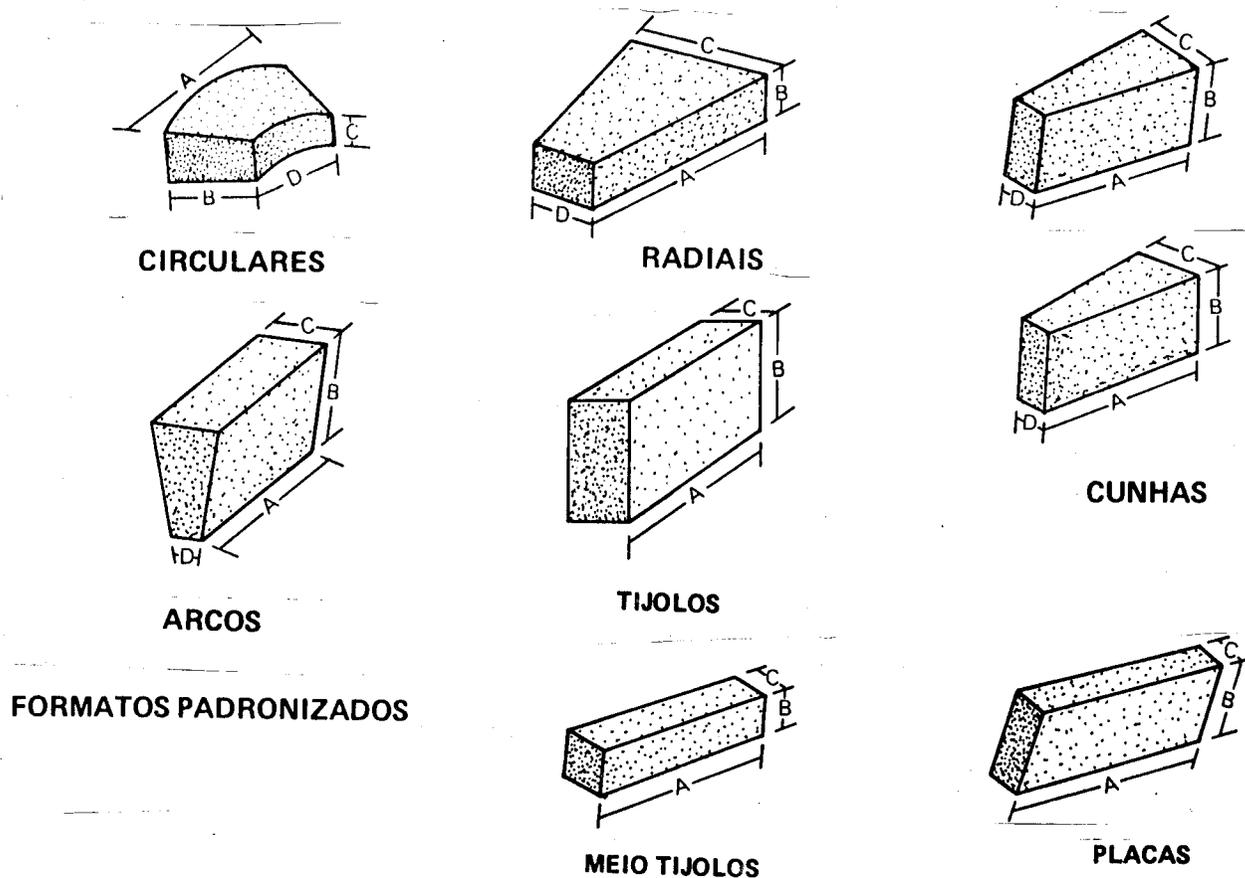


FIGURA 9. TIPOS DE REFRATÁRIOS PARA FORNOS

FONTE: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA-ANUÁRIO DE 1983

Observações: 1^a - As zonas dos fornos não possuem limites rigidamente definidos. 2^a - Em fornos de mesmo projeto podem ser diferentes as temperaturas de queima, a profundidade da chama, carga, escoamento, química da alimentação e remoção de gases e poeiras etc. 3^a - A variação da temperatura de uma zona para a próxima é gradativa de modo que o ponto de mudanças de uma qualidade de refratário para outra é melhor determinado pelas condições operacionais do forno em si. 4^a - Não é aconselhável, em geral, empregar um tijolo ácido em contato com um outro alcalino, ou vice-versa. (Ver Shreve e Brink Jr.).

5.2 Fornos para Processos Úmidos - são longos. A lama ou pasta introduzida sofre/ simultaneamente aquecimento e secagem no terminal de alimentação (superior, frio). O revestimento refratário interno é alternadamente aquecido pelos gases, quando exposto pela rotação do forno, e resfriado pela lama quando coberto por esta, servindo, portanto, de agente acumulador e condutor de calor. Sendo grandes as quantidades de / água a serem evaporadas (em torno de 0,8 l/Kg de clínquer formado) a maioria dos fornos longos é equipada com correntes para maximizar a transferência de calor entre os gases e a lama. As correntes também servem para quebrar o material e facilitar seu escoamento, evitando a formação de obstruções.

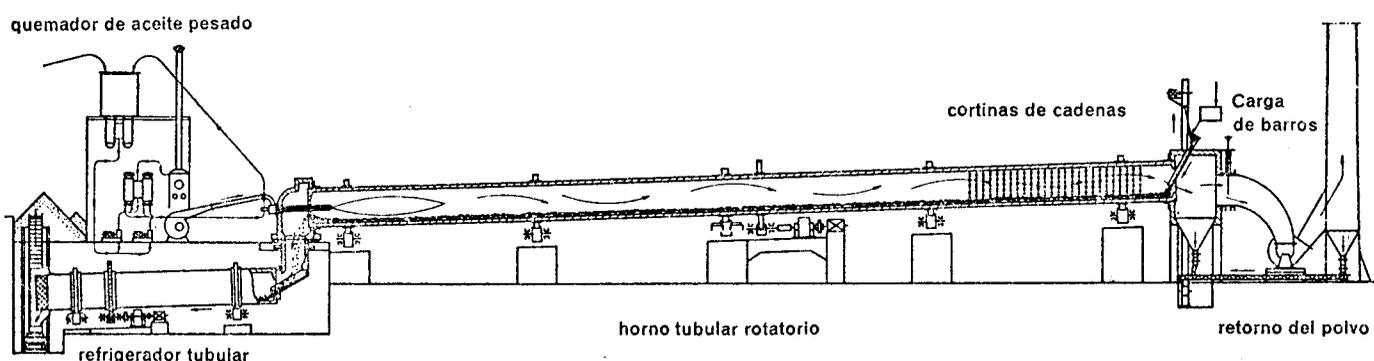


FIGURA 10 ESQUEMA TÍPICO DE UM FORNO ROTATÓRIO VIA ÚMIDA

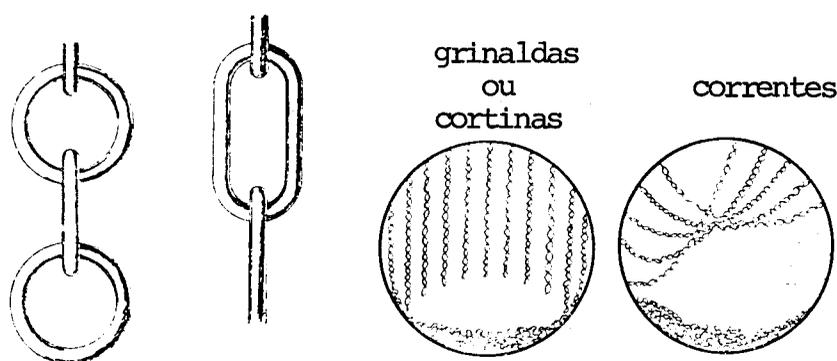
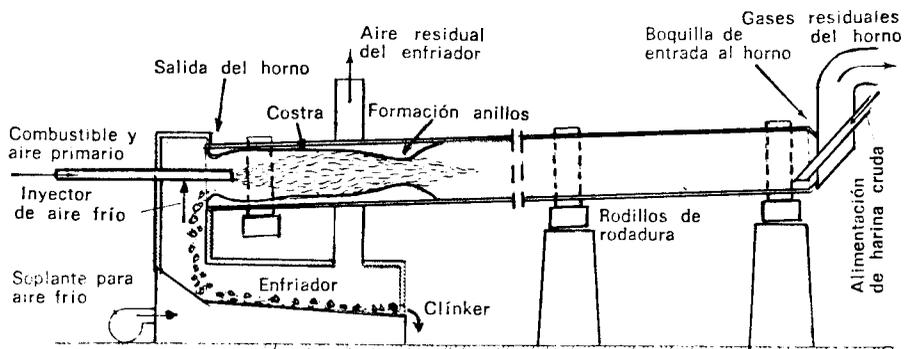


FIGURA 11 TIPOS DE ELOS DE CORRENTES E MONTAGENS

- EQ/CT -

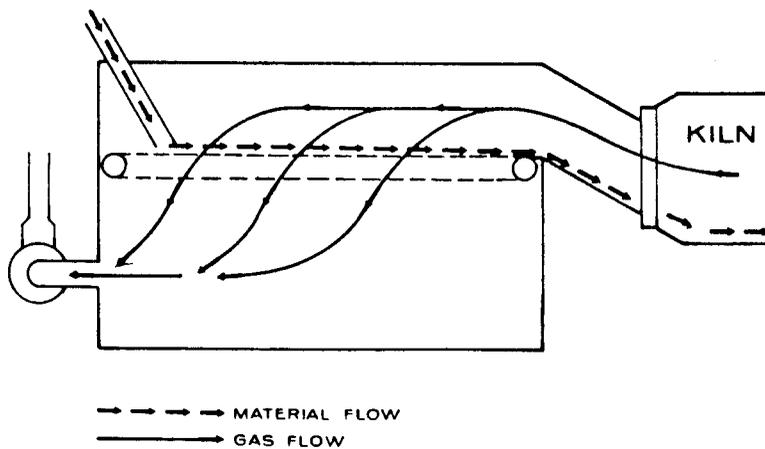
5.3 Fornos para Processos Secos - modernamente são curtos.



Horno rotatorio via seca, representado aqui con intensa formación de costra y de anillos antes y después de la llama.

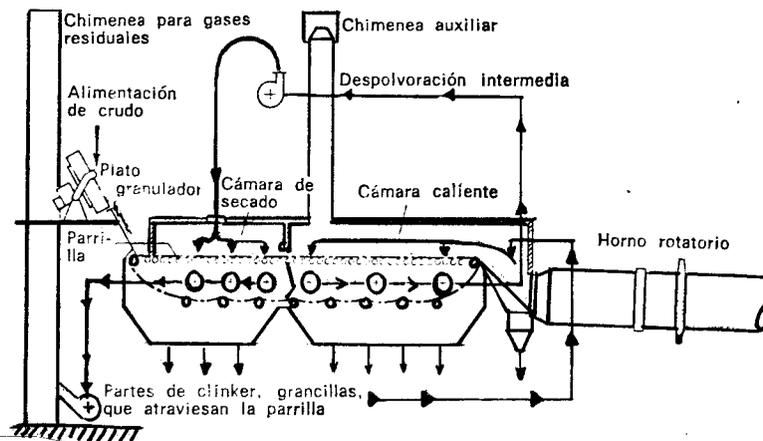
FIGURA 22 - FORNO ROTATÓRIO VIA SECA - MODELO CONVENCIONAL

Nos Processos Lepol e SP parte da secagem, pré-aquecimento e calcinação ocorre no pré-aquecedor e o restante dentro do forno rotatório. O Processo Lellep emprega uma grelha constituída de uma esteira interna que permite o contato em escoamento cruzado dos gases quentes com as pelotas de crú, resultantes da aglutinação da mistura crua com água no pelletizador. As pelotas (ou bolas) com D_p entre 1 a 3 cm permitem um deslocamento melhor do crú-clinquer ^{a)} longo do forno e melhoram o contato com os gases quentes.



Flow diagram of a Lepol preheater. Pelletized feed fed onto a traveling grate, is heated and partly calcined by hot kiln exit gases before it enters the kiln.

FIGURA 13 - DIAGRAMA DE UMA GRELHA LEPOL DE UMA CÂMARA



Parrilla de precalentamiento con doble circulación de gases (parrilla Lepol).

FIGURA 14 - DIAGRAMA DE UMA GRELHA LEPOL DE DUAS CÂMARAS

No Processo Semi-Seco Lepol a farinha é pelotizada com adição de água de 10 a 17%.

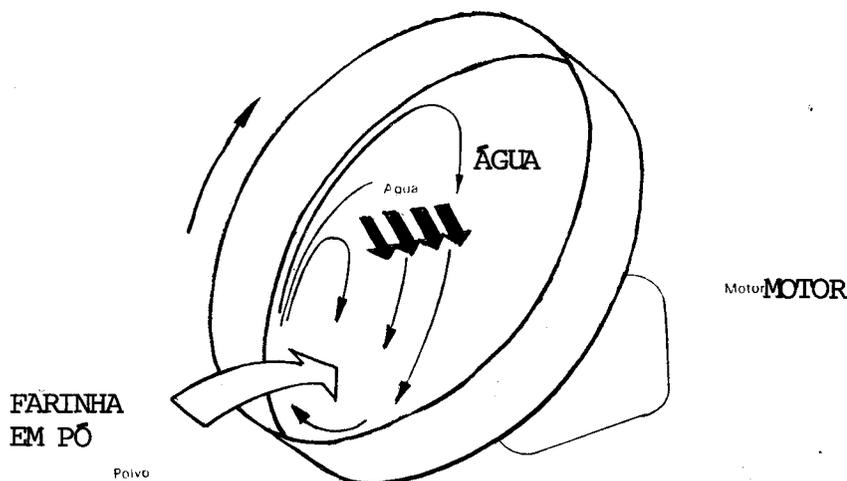
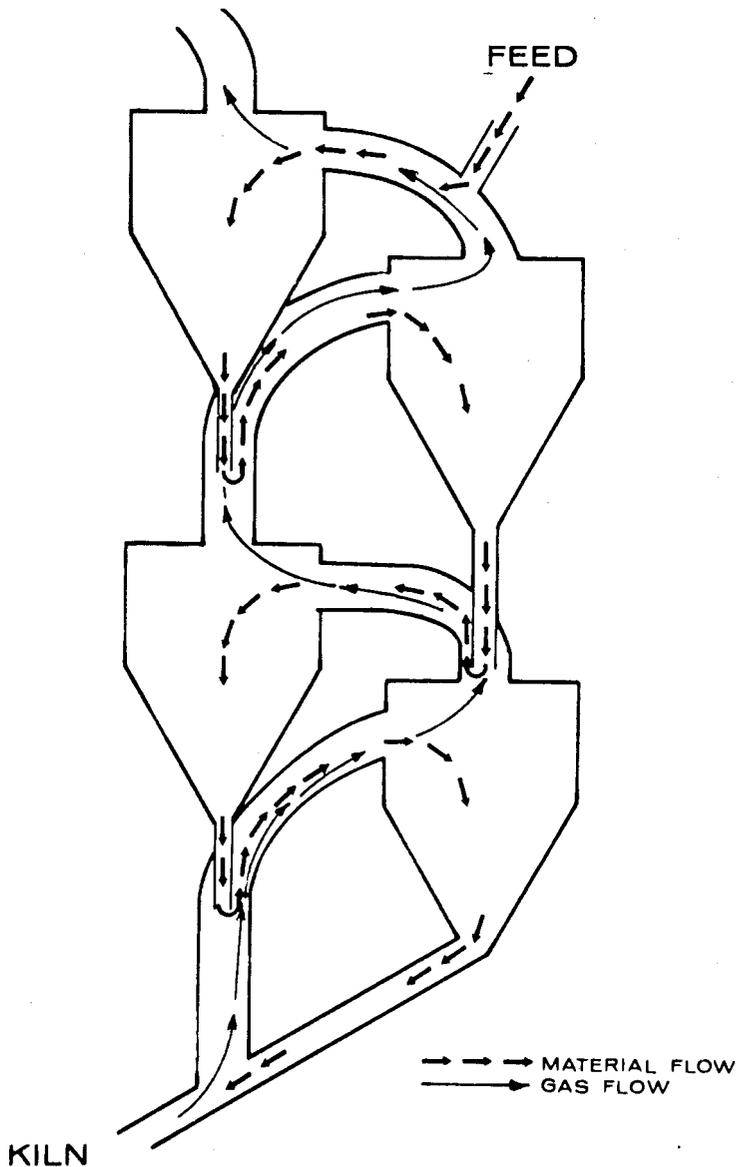


FIGURA 15 - ESQUEMA DO FUNCIONAMENTO DE UM PELOTIZADOR

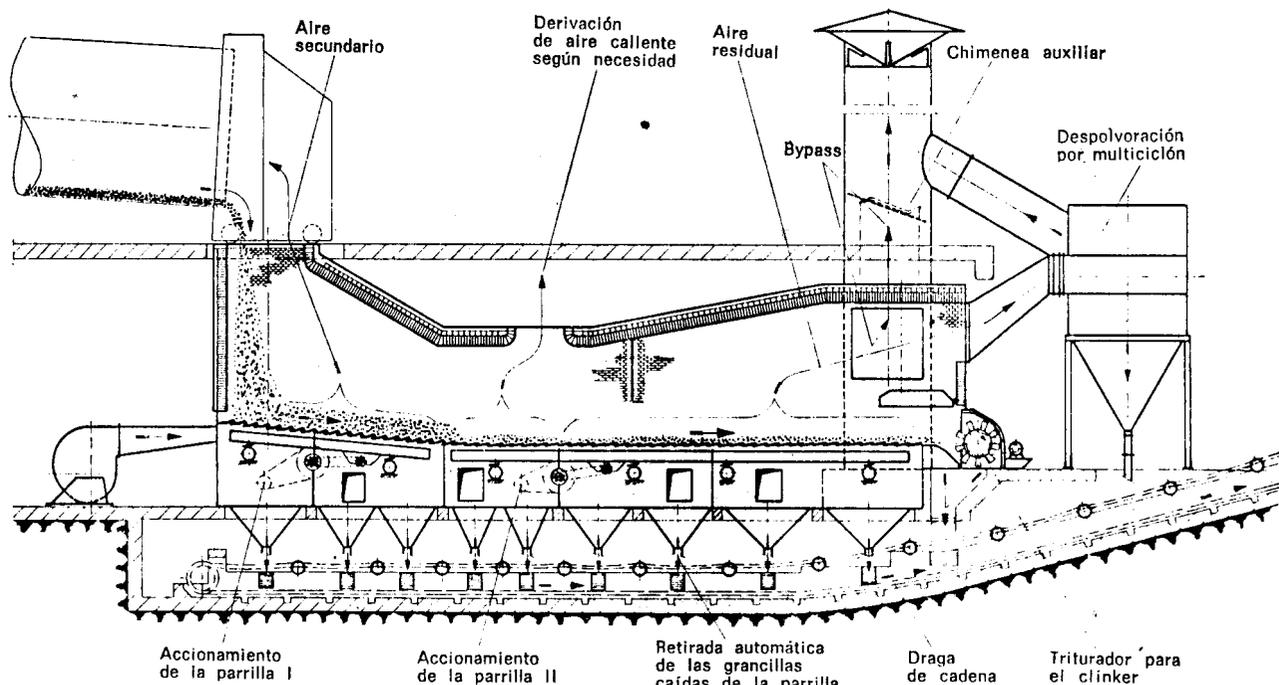
O pelotizador é constituído por um prato giratório inclinado de 45 a 55° em relação ao plano horizontal, com uma altura de borda de 1/5 do diâmetro, o qual varia de 1 a 5 m. A velocidade de rotação depende do ângulo de inclinação e do diâmetro do prato. A figura acima indica as melhores posições de entrada da mistura pulverulenta (farinha) e de água no equipamento.

O Processo SP ("Suspension Preheater") utiliza uma série de ciclones, por onde passa a alimentação seca e pulverizada de crú, que é separada e pré-aquecida várias vezes, entrando no forno parcialmente calcinada entre 800 e 900°C. O comprimento do forno é bem menor que o exigido para os fornos convencionais e a troca térmica é muito boa.



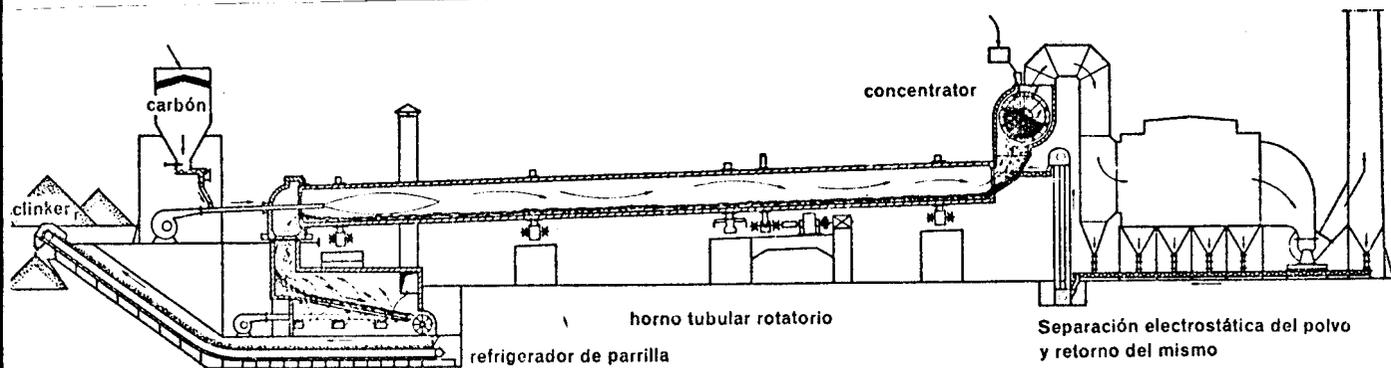
Flow diagram of a Humboldt gas suspension preheater, a multi-stage counterflow process which draws the gases through a series of cyclone collectors. The pulverized material, which is fed counter to the gas flow, becomes suspended in the gas stream and is heated in successive stages until discharged through the kiln-feed pipe.

FIGURA 16 - PRÉ-AQUECEDOR DE SUSPENSÃO



— Enfriador con parrilla horizontal e inclinada (enfriador Combi-Fuller).

FIGURA 18A RESFRIADOR DE ESTEIRA



Horno tubular rotatorio corto, con concentrador

FIGURA 18B RESFRIADOR DE ESTEIRA ACOPLADO AO FORNO ROTATÓRIO

- EQ/CT -

LAYOUT DA FÁBRICA DE CIMENTO - PROCESSO A SECO (SISTEMA DE PRÉ-AQUECIMENTO A SUSPENSÃO)

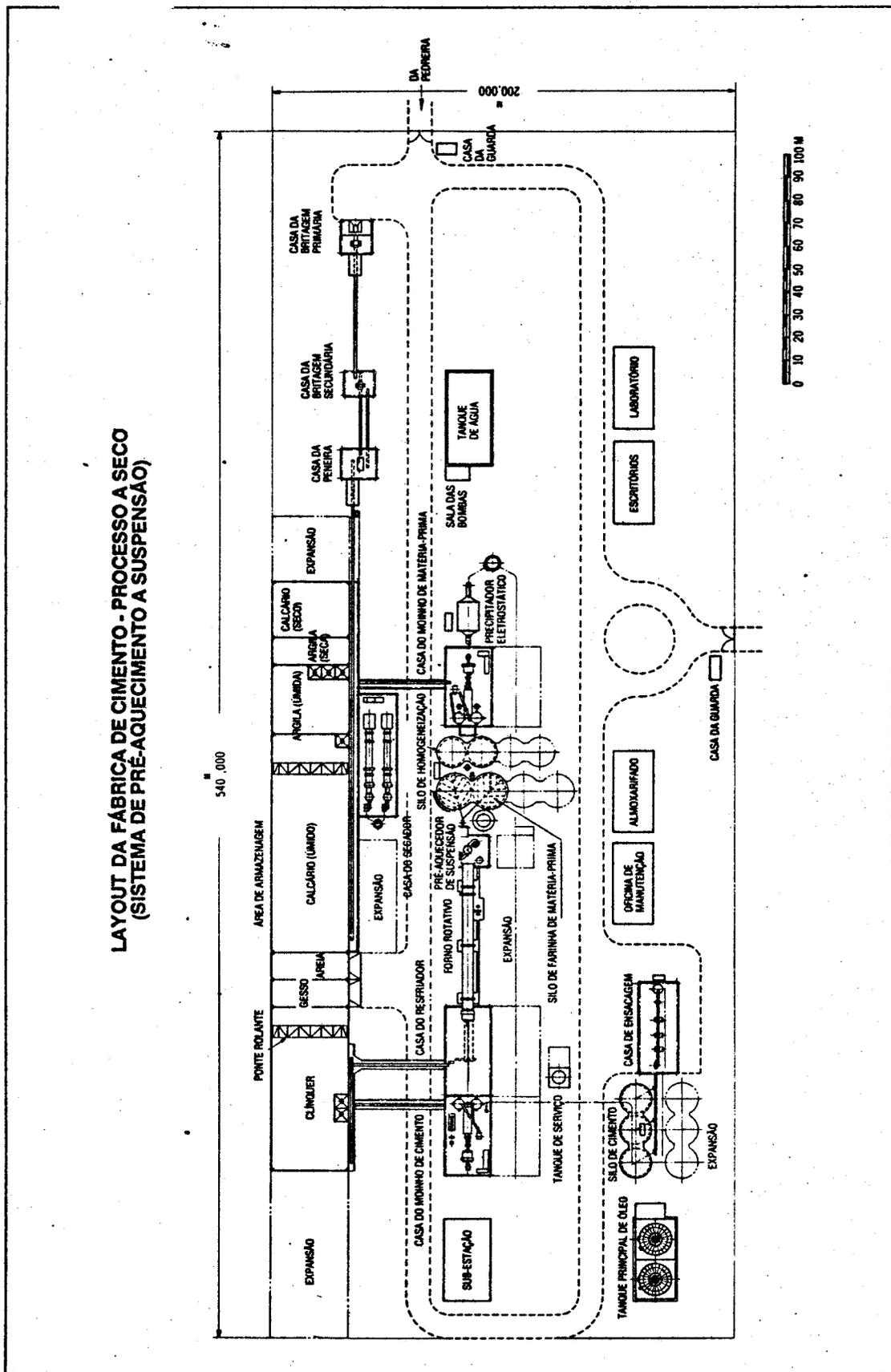


FIGURA 049

FONTE: DEDINI

DPI

CIMENTO

AZ 28/03/83

6. QUÍMICA DO CLINQUER E DO CIMENTO

6.1 Estequiometria Cimenteira - envolve três etapas básicas:

- a - produção do crú: farinha(via seca),
pasta ou lama(via úmida);
- b - clinquerização: queima do crú;
- c - produção do cimento: moagem do clinquer com ou sem adições.

Podemos considerar o seguinte diagrama de blocos simplificado para a produção de cimento portland comum:

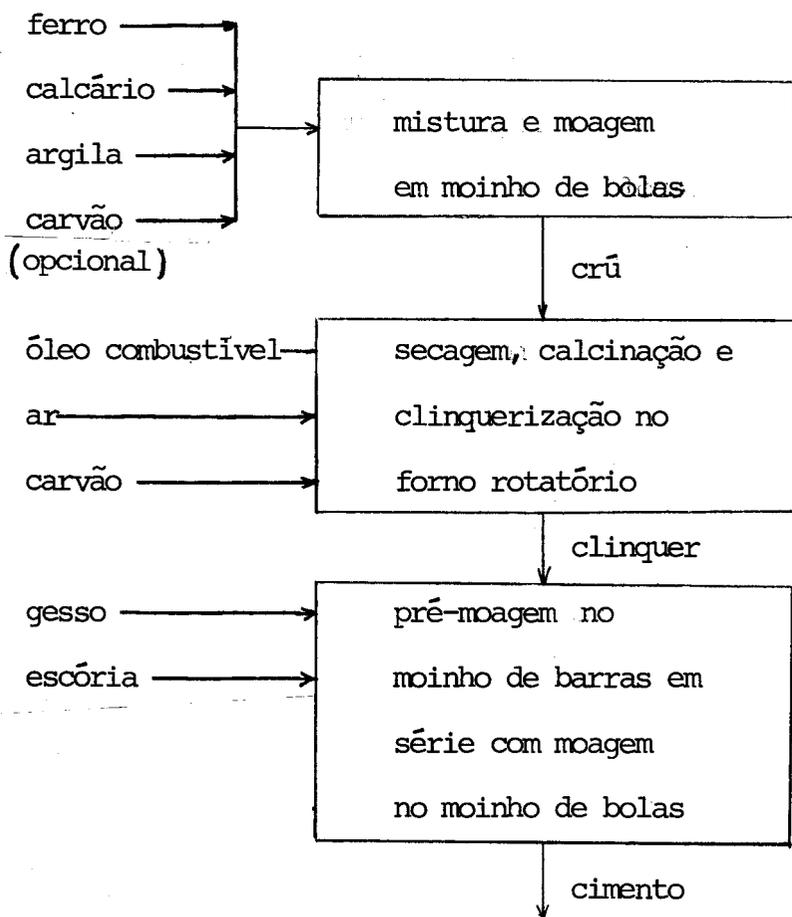


FIGURA 20

Diagrama de Blocos Simplificado para produção de Cimento / Portland Comum

Os cálculos estequiométricos são efetuados sobre as vazões mássicas de alimentação dos moinhos de farinha e de cimento e consideram as relações entre os óxidos formadores das matérias-primas e os silicatos e aluminatos contidos no clinquer e no cimento.

A farinha constitui-se num somatório dos óxidos CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e SiO_2 contidos no calcário, argila e ferro (minério ou carepa ou sucata) que reagem para formar os silicatos e aluminatos de cálcio do clínquer, bem como estão presentes outras substâncias, aqui designadas em conjunto pela letra R, que seriam outros óxidos, traços de metais e não-metais, além de impurezas diversas.

Matematicamente, pode-se considerar a relação abaixo para uma farinha destinada a clínquerização:

$$F = f(\text{CaO}, \text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3, R) \quad (\text{I})$$

Admitindo-se que cada matéria-prima contenha tais óxidos, outra relação matemática pode ser escrita:

$$F = m \Sigma \text{CaO} + n \Sigma \text{SiO}_2 + p \Sigma \text{Al}_2\text{O}_3 + q \Sigma \text{Fe}_2\text{O}_3 + R \quad (\text{II})$$

onde CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 representam seus respectivos teores percentuais nas matérias-primas e os somatórios correspondem aos teores na farinha F, sendo m, n, p e q fatores cujos valores podem variar entre zero e um.

Da expressão (II), obtêm-se:

$$F - R - m \Sigma \text{CaO} = n \Sigma \text{SiO}_2 + p \Sigma \text{Al}_2\text{O}_3 + q \Sigma \text{Fe}_2\text{O}_3 \quad (\text{III})$$

Dividindo ambos os lados da equação (III) por $(m \Sigma \text{CaO})$:

$$\frac{F - R - m \Sigma \text{CaO}}{m \Sigma \text{CaO}} = \frac{n \Sigma \text{SiO}_2 + p \Sigma \text{Al}_2\text{O}_3 + q \Sigma \text{Fe}_2\text{O}_3}{m \Sigma \text{CaO}} \quad (\text{IV})$$

Invertendo as razões acima, obtêm-se um módulo adimensional, M_1 :

$$M_1 = \frac{m \Sigma \text{CaO}}{n \Sigma \text{SiO}_2 + p \Sigma \text{Al}_2\text{O}_3 + q \Sigma \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (\text{V})$$

Empregando tratamento semelhante, obtemos outro módulo, M_2 :

$$M_2 = \frac{n \Sigma \text{SiO}_2}{F - R - m \Sigma \text{CaO} - n \Sigma \text{SiO}_2} = \frac{n \Sigma \text{SiO}_2}{p \Sigma \text{Al}_2\text{O}_3 + q \Sigma \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (\text{VI})$$

Do mesmo modo, um terceiro módulo cimenteiro pode ser obtido:

$$M_3 = \frac{p \Sigma \text{Al}_2\text{O}_3}{F - R - m \Sigma \text{CaO} - n \Sigma \text{SiO}_2 - p \Sigma \text{Al}_2\text{O}_3} = \frac{p \Sigma \text{Al}_2\text{O}_3}{q \Sigma \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (\text{VII})$$

Nas expressões de M_1 , M_2 e M_3 , os fatores m, n, p e q podem assumir valores arbitrários ou convenientes ou empíricos. Por exemplo, M_1 foi definido por Kùhl de

de "Fator de Saturação de Cal", (FSC), através da relação abaixo:

$$FSC = \frac{\% \text{ CaO total}}{\% \text{ CaO máximo}} \quad (\text{VIII})$$

que relaciona o teor de CaO existente na mistura (farinha, pelotas ou pasta) e o teor/ de CaO máximo que reagiria com a argila para formar os silicatos e aluminatos de cálcio durante a clínquerização. Desta concepção, surgiram diversas expressões para o teor de CaO máximo, como, por exemplo:

- a - $\text{CaO máx.} = 2,8 \text{ SiO}_2 + 1,1 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,7 \text{ Fe}_2\text{O}_3$ (Kühl)
- b - $\text{CaO máx.} = 2,33 \text{ SiO}_2 + 1,65 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 1,05 \text{ Fe}_2\text{O}_3$ (Hendrickx)
- c - $\text{CaO máx.} = 2,8 \text{ SiO}_2 + 1,65 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,35 \text{ Fe}_2\text{O}_3$ (Guttman e Gille) (IX)
- d - $\text{CaO máx.} = 2,8 \text{ SiO}_2 + 1,18 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \text{ Fe}_2\text{O}_3$ (Lea e Parker)
- e - $\text{CaO máx.} = 2,8 \text{ SiO}_2 + 1,18 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 0,75 \text{ MgO}$ (Lea e Parker)

Tais concepções teóricas permitem o uso de diversas expressões dos módulos / e fatores cimenteiros, por exemplo, relacionados no Quadro I.

Para nossa abordagem serão considerados os seguintes parâmetros adimensionais:

MS = variando entre 2 e 2,4;

MA = variando entre 1,0 e 1,8;

FSC = variando entre 90 e 95%.

Quanto maior MS e/ou MA mais difícil é a queima do cru; o inverso é verdadeiro. Considera-se, ainda, que seja possível localizar os módulos cimenteiros selecionados do seguinte modo:

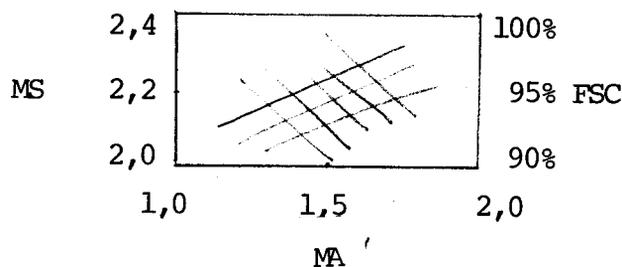


FIGURA 21 Curvas de variação dos módulos cimenteiros para produção de cimento portland comum

As varreduras dos intervalos de valores considerados conduzem a duas curvas cuja intercessão indica uma composição adequada para a mistura das matérias-primas / formadoras da farinha.

DPI

CIMENTO

AZ 16/05/84

30

QUADRO I

MÓDULOS E FATORES CIMENTEIROS

$$\text{Módulo Sílica, MS} = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

$$\text{Módulo Alumina ou Aluminoso, MA} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$$

(ou Ferro ou Férnico)

$$\text{Módulo Hidráulico, MH} = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

(Fórmula de Michaelis)

$$\text{Módulo de K\ddot{u}hl, MK} = \frac{\text{CaO}}{2,8 \text{ SiO}_2 + 1,1 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,7 \text{ Fe}_2\text{O}_3}$$

(ou padrão de Cal I)

$$\text{Fator de Saturação da Cal, FSC} = \frac{100 \text{ CaO}}{2,8 \text{ SiO}_2 + 1,18 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \text{ Fe}_2\text{O}_3}$$

(Fórmula de Lea e Parker ou Padrão de Cal II)

$$\text{FSC} = \frac{((\text{MS}) \text{Ma} (1 + (1/\text{MS})) (1 + (1/\text{MA}))) \text{MH}}{2,8(\text{MS}) \text{MA} (1 + (1/\text{MA})) + 1,18(\text{MA}) + 0,65}$$

100 CaO

$$\text{Fator de Saturação da Cal, FSC} = \frac{100 \text{ CaO}}{2,8 \text{ SiO}_2 + 1,65 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,35 \text{ Fe}_2\text{O}_3}$$

(quando MA > 0,64)

$$\text{Fator de Saturação da Cal, FSC} = \frac{100 \text{ CaO}}{2,8 \text{ SiO}_2 + 1,1 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,7 \text{ Fe}_2\text{O}_3}$$

(quando MA < 0,64)

$$\text{Fator de Saturação da Cal, FSC}_B = \frac{100 (\text{CaO} - 0,7 \text{ SO}_3)}{2,8 \text{ SiO}_2 + 1,2 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \text{ Fe}_2\text{O}_3}$$

$$\text{Fator de Saturação da Cal, FSC} = \frac{100 (\text{CaO} - 0,75 \text{ MgO})}{2,8 \text{ SiO}_2 + 1,18 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \text{ Fe}_2\text{O}_3}$$

(ou Padrão de Cal III, quando MgO ≤ 2%)

$$\text{Fator de Saturação da Cal, FSC} = \frac{(\text{CaO} - 1,5 \text{ MgO}) 100}{2,8 \text{ SiO}_2 + 1,18 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \text{ Fe}_2\text{O}_3}$$

(quando MgO > 2%)

$$\text{Fator de Saturação da Cal, FSC}_R = \frac{\text{CaO} - (1,65 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,35 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + 0,7 (\text{SO}_3))}{2,8 \text{ SiO}_2}$$

* expressos em termos de percentagens.

- EQ/CT -

6.2 Composições das matérias-primas, do crú, do clínquer e aditivos finais

TABELA 8

Composições de calcários *

Dados Analíticos	Calcário A	Calcário B
Perda ao Fogo(P.F.)	41,65 %	39,11 %
SiO ₂	3,62	10,57
Al ₂ O ₃	0,28	1,69
Fe ₂ O ₃	0,16	0,56
CaO	52,60	47,10
MgO	0,76	0,75
Na ₂ O	0,69	0,71
K ₂ O	0,06	0,18
Σ =	99,82	99,67

A qualidade do calcário depende dos seus teores de CaO e carbonatos totais , com relação à sua aplicação final(cimento comum ou branco). Admite-se que um teor de CaO acima de 50% (p/p) classifique o calcário de "bom", e que abaixo deste valor seja "inferior".

TABELA 9

Composições de argilas comuns(secas) *

Dados Analíticos	Argila A	Argila B
Perda ao Fogo(P.F)	11,10	9,60
SiO ₂	52,70	56,35
Al ₂ O ₃	24,42	25,70
Fe ₂ O ₃	11,28	7,90
Na ₂ O	0,10	0,52
K ₂ O	0,03	0,04
Σ =	99,63	100,11

As argilas comuns contêm ferro e apresentam cores e tonalidades amarela e vermelha.

TABELA 10

Composições de sucatas de ferro(carepas) *

Dados Analíticos	A	B
SiO ₂	1,50	0,68
Al ₂ O ₃	7,86	0,44
Fe ₂ O ₃	90,64	98,88

- EQ/CT -

TABELA : COMPOSIÇÕES DE ALGUNS COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS USADOS NA INDÚSTRIA DE CIMENTO

Dados Analíticos	Carvão Mineral	Resíduo de Alto-Forno	Moinha de Carvão Mineral	Moinha de Carvão Vegetal					
A n á l i s e I m e d i a t a									
Umidade [†]	0,66	2,15	3,18	13,59	0,76	6,78	4,20	8,52	6,12
Matéria Volátil [†]	24,44	23,28	44,32	25,26	11,57	23,69	27,02	28,48	39,07
Carbono Fixo [†]	39,18	1,73	10,28	13,38	26,34	51,45	57,86	43,65	37,21
Cinzas [†]	35,72	77,14	45,14	61,36	62,09	18,08	10,92	6,65	17,56
Poder Calorífico Inferior ^{††}	5.168	505 [†]	1.732 [†]	1.122 [†]	3.425 [†]	6.498	7.339	5.857	4.146 [†]
A n á l i s e d a s C i n z a s									
Perda ao Fogo [†]	0,28	0,85	0,20	19,78	53,62	1,14	1,43	1,64	0,40
SiO ₂ [†]	54,90	10,40	19,60	11,88	10,80	57,48	64,58	66,12	51,90
Al ₂ O ₃ [†]	15,00	5,66	6,78	14,69	2,14	8,72	8,52	11,35	16,73
Fe ₂ O ₃ [†]	8,09	76,36	64,74	27,06	27,68	5,60	5,44	4,53	5,41
CaO [†]	4,17	5,61	5,60	10,37	2,80	19,43	13,88	12,77	15,34
MgO [†]	0,60	0,20	0,40	0,81	1,01	1,60	1,60	1,20	2,82
Na ₂ O [†]	0,20	0,16	0,12	-	0,20	0,12	0,24	0,16	0,42
K ₂ O [†]	1,40	0,56	1,12	-	2,64	1,20	2,48	2,04	2,12

Observações: + unidades em % p/p

†† em kcal/kg

† combustíveis pouco vantajosos: excesso - RAF, que permite suprir o óxido de ferro necessário.

A determinação do teor de cada componente na mistura crua depende essencialmente da composição química das matérias-primas e do tipo de cimento que se deseja fabricar. Para a formação do crú do, CPC as proporções podem ser:

TABELA 12 Composições do Crú para CPC

Matéria-Prima	Sem Carvão	Com Moinha de Carvão
Calcário / Bom / Inferior	80 a 84%	80 a 82%
	83 a 88%	82 a 85%
Argila	10 a 15%	10 a 15%
Ferro	1,5 a 2%	1,0 a 2%
Carvão	-	2 a 4%

TABELA 13 Composições do Clinquer de CPC

Dados Analíticos	A	B
Perda ao Fogo (P.F.) *	0,14	0,26
SiO ₂	21,71	20,65
Al ₂ O ₃	5,40	5,30
Fe ₂ O ₃	5,21,	6,50
CaO	65,50	64,11
MgO *	1,18	1,21
Na ₂ O *	0,26	0,28
K ₂ O *	0,29	0,30
SO ₃	0,29	0,68
C ₃ S *	50,23	44,63
C ₂ S *	24,34	25,61
C ₃ A *	5,51	3,14
C ₄ AF *	15,83	19,77
CaO livre*	1,6	3,39

C₃S acima de 50% é considerado bom. Para conferir a composição potencial podemos somar os teores em asterisco(*) - ver adiante.

DPI

CIMENTO

AZ 16/05/84

34

- EQ/CT -

TABELA 14 - Composições de Escória

Dados Analíticos	BÁSICA (%)	ÁCIDA (%)
SiO ₂	34,30	36,22
Al ₂ O ₃	16,77	13,73
Fe ₂ O ₃	1,20	3,44
CaO	40,38	33,09
MgO	4,04	9,68
SO ₃	0,16	0,75
Na ₂ O ₃	0,33	0,29
K ₂ O	1,24	1,20
Σ	98,42	98,40
MS	1,91	2,11
MA	13,98	4,00
I	1,01	0,83

$$I = \frac{\text{CaO} + 1/3 \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + 2/3 \text{Al}_2\text{O}_3} \gg 1$$

$I \geq 1$ BÁSICA

$I < 1$ ÁCIDA

O teor de CaSO₄.2H₂O pode ser calculado a partir do teor de umidade (água combinada na fase de gesso natural) pelo produto deste pelo fator 4,778 ou, então, multiplicando-se o teor de enxôfre por 2,15 (Norma ASTM).

A umidade do gesso sintético geralmente não é água de combinação; então, é preferível usar o teor de SO₃ para avaliar a qualidade. Existe também a possibilidade de existirem presentes Na₂SO₄ e K₂SO₄ mascarando o CaSO₄.2H₂O.

TABELA 15 - Composições de Gesso para CPC (*)

Dados Analíticos	GESSO DE ROCHA OU NATURAL		GESSO INDUSTRIAL OU SINTÉTICO	
	A	B	A	B
Umidade	20,76	18,93	14,82	18,05
SiO ₂	0,10	0,05	0,38	1,60
Al ₂ O ₃	0,55	0,61	0,30	0,51
Fe ₂ O ₃	0,08	0,16	0,16	0,80
CaO	32,81	32,92	35,75	32,41
MgO	0,20	0,40	0,18	1,01
SO ₃	46,52	43,64	47,53	39,92
Na ₂ O	0,21	0,50	0,10	0,72
K ₂ O	0,08	0,48	0,12	0,05
Σ	101,81	97,64	99,34	95,07
CaSO ₄ .2H ₂ O	99,19	90,44		85,83 ?

(*) RESULTADOS MÉDIOS MENSALS

DPI

CIMENTO

AZ 16/05/84

35

6.3. Cálculos para Produção de Farinha - o algoritmo estequiométrico para o cálculo de uma farinha consiste em:

- a - organizar os dados analíticos químicos das matérias-primas em função dos óxidos formadores e dos teores de perda ao fogo e/ou umidade, numa tabela que inclua uma linha ou uma coluna para "totais";
- b - estimar valores iniciais das proporções de calcário, argila, ferro e carvão / (se for o caso) e multiplicar estes pesos pelos teores percentuais originais/ dos dados analíticos respectivos de cada uma daquelas matérias-primas e registrar os resultados (numa nova tabela semelhante à anterior, quando não for usado o computador ou calculadora programável);
- c - efetuar os somatórios dos teores dos óxidos formadores de farinha;
- d - calcular os módulos cimenteiros e verificar se estão dentro dos intervalos / aceitáveis; em caso afirmativo, para os cálculos;
- e - em caso negativo, plotar os resultados obtidos para os módulos e usar novas / estimativas.

EXEMPLO I: Cálculos para farinha sem carvão

Podemos adotar critérios de variação dos teores das matérias-primas com base nas informações da Tabela 12, considerando que MA, MS e FSC abrigam em suas fórmulas de definição os teores indispensáveis de Al_2O_3 necessários à formação do clínquer portland. Assim, consideramos os seguintes resultados analíticos tabelados pelo Laboratório de Controle de Qualidade:

Dados Analíticos / Matérias Primas	CALCÁRIO (? %)	ARGILA (? %)	ÓX.FERRO (? %)	FARINHA
Perda ao Fogo (%)	39,08	10,30	-	?
SiO ₂ (%)	7,94	60,08	1,08	?
Al ₂ O ₃ (%)	1,44	23,60	2,12	?
Fe ₂ O ₃ (%)	0,72	5,60	96,20	?
CaO (%)	49,35	-	-	?
MgO (%)	0,60	-	-	?

DPI

CIMENTO

AZ 16/05/84

36

- EQ/CT -

Critérios para as varreduras e iterações estequiométricas:

- 1º - manter, inicialmente, elevado o teor de calcário e reduzido e constante o /
percentual de óxido de ferro;
- 2º - variar o teor de argila a partir do valor mais baixo admissível;
- 3º - adotar as seguintes variações dos teores das matérias-primas:
- calcário ruim : reduzir de 0,5 em 0,5%;
- calcário bom : reduzir de 1,0 em 1,0%;
- argila : variar de acordo com a variação do teor de calcário;
- ferro : variar de 0,1 em 0,1% ou 0,2 em 0,2%, ou, ainda de 0,5 em 0,5% (para obter uma varredura mais rápida).

A aplicação do algoritmo iterativo conduz aos seguintes valores:

1ª Tentativa	CALCÁRIO (88%)	ARGILA (10,5%)	OX. FERRO (1,5%)	FARINHA (Σ)
Perda ao Fogo	34,39	1,08	-	35,47
SiO ₂	6,99	6,31	0,02	13,32
Al ₂ O ₃	1,27	2,48	0,03	3,78
Fe ₂ O ₃	0,63	0,59	1,44	2,66
CaO	43,43	-	-	43,43
MgO	0,53	-	-	0,53
	Total			99,19 %

Desta tabela resultam: MS = 2,07 ; MA = 1,42 e FSC = 99,68 % (resultado ruim)

2ª Tentativa	CALCÁRIO (87,5%)	ARGILA (11%)	ÓX. FERRO (1,5%)	FARINHA ()
Perda ao Fogo	34,20	1,13	-	35,33
SiO ₂	6,95	6,61	0,02	13,58
Al ₂ O ₃	1,26	2,60	0,03	3,89
Fe ₂ O ₃	0,63	0,62	1,44	2,69
CaO	43,18	-	-	43,18
MgO	0,53	-	-	0,53
	Total			99,20 %

Então: MS = 2,06 (bom); MA = 1,45 (bom); FSC = 97,16 % (ruim)

DPI

CIMENTO

AZ 16/05/84

37

- EQ/CT -

3ª Tentativa	CALCÁRIO (87%)	ARGILA (11,5%)	OX. FERRO (1,5%)	FARINHA (Σ)
Perda ao Fogo	34,00	1,18	-	35,18
SiO ₂	6,91	6,91	0,02	13,84
Al ₂ O ₃	1,25	2,71	0,03	3,99
Fe ₂ O ₃	0,63	0,64	1,44	2,71
CaO	42,93	-	-	42,93
MgO	0,52	-	-	0,52
	Total			= 99,17 %

MS = 2,07 (bom) ; MA = 1,47 (bom) ; FSC = 94,77%

Prosseguindo as iterações, apesar do resultado satisfatório encontrado e tabelando e locando os valores dos módulos, obtêm-se:

Tentativas	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª
Teores e Módulos						
Calcário (%)	88,0	87,5	87,0	86,5	86,0	85,0
Argila (%)	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0
Óx. Ferro (%)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Carvão (%)	-	-	-	-	-	-
MS	2,07	2,06	2,07	2,06	2,06	2,05
MA	1,42	1,45	1,47	1,51	1,53	1,55
FSC (%)	99,68*	97,16*	94,77	92,43	90,17	88,00*

* resultados insatisfatórios

Os resultados da Figura A indicam que as terceira, quarta e quinta tentativas foram satisfatórias e que as curvas são aproximadamente lineares para intervalos de variação estreitos. Tal situação permite ao programador de produção através de duas ou tres tentativas lançadas em gráfico localizar a faixa dos teores / de matérias-primas adequada para formar a mistura. Uma calculadora programável ou um micro-computador poderá obter valores mais precisos para os resultados das análises químicas disponíveis.

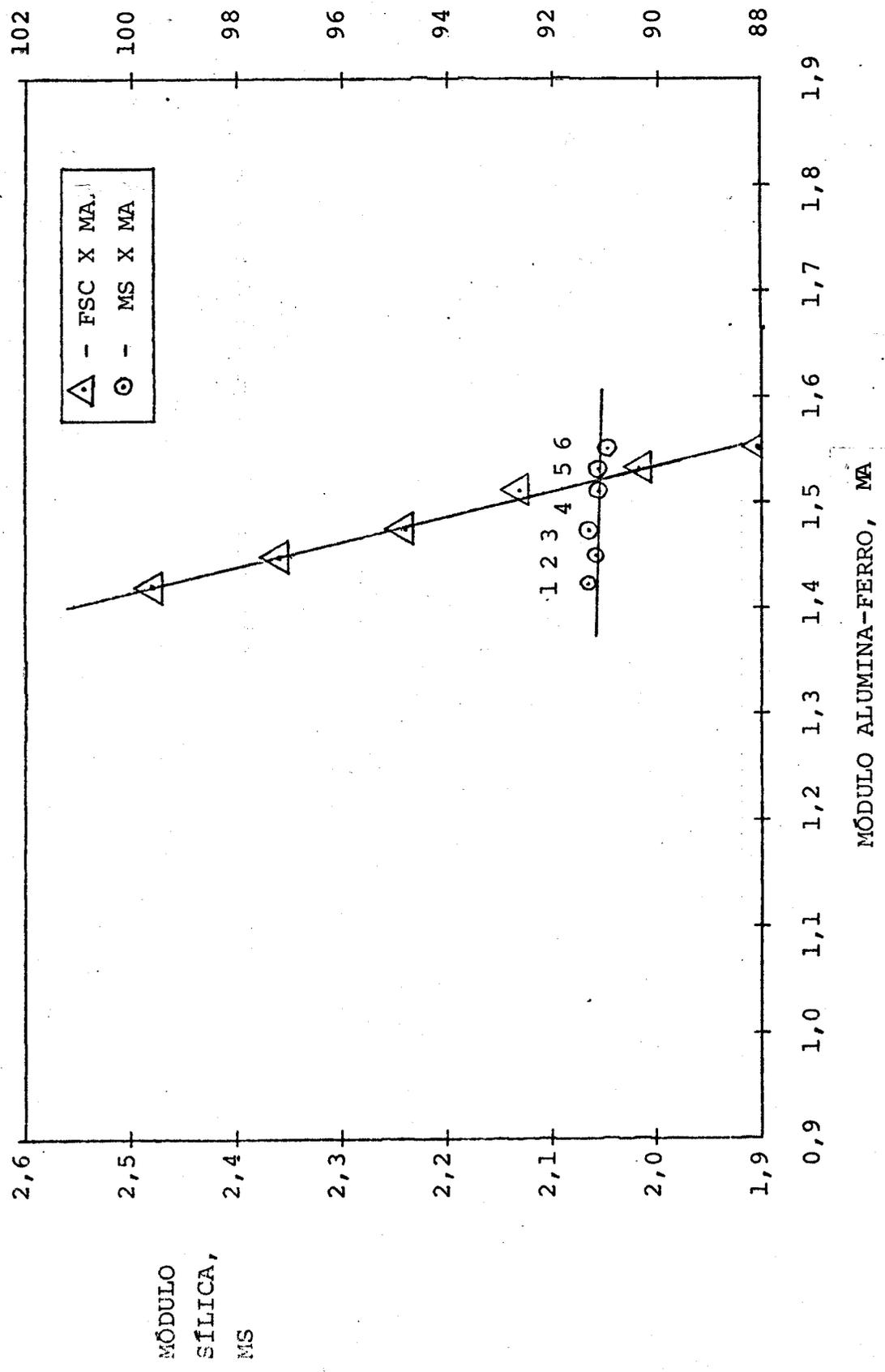


Figura A CURVAS DE VARIAÇÃO DOS MÓDULOS CIMENTEIROS PARA UMA FARINHA SEM CARVÃO

EXEMPLO II: Cálculos para farinha com carvão

Matérias Primas Dados Analíticos	CALCÁRIO (? %)	ARGILA (? %)	ÓX.FERRO (? %)	CARVÃO (? %)	FARINHA
Perda ao fogo (%)	38,25	10,16	0,81	0,34	?
SiO ₂ (%)	8,73	48,39	1,42	4,44	?
Al ₂ O ₃ (%)	1,18	24,94	7,45	0,43	?
Fe ₂ O ₃ (%)	0,59	2,55	85,87	1,43	?
CaO (%)	47,55	-	-	2,83	?
MgO (%)	0,89	-	-	0,36	?
Na ₂ O (%)	0,64	0,23	-	0,12	?
K ₂ O (%)	0,17	0,45	-	0,35	?
SO ₃ (%)	-	-	-	0,17	?
Umidade (%)	1,81	13,40	5,26	8,10	?
Mat.Volátil (%)	-	-	-	46,53	?
Carbono Fixo (%)	-	-	-	33,91	?

Os critérios de variação dos teores das matérias-primas são semelhantes aos anteriores, com a diferença de que é possível manter teores constantes para o carvão e a argila e variar, inicialmente, os de calcário e ferro. Para o programador de produção prudente talvez seja preferível analisar passo a passo os resultados encontrados para os módulos cimenteiros. Um aspecto fundamental para uma boa clínquerização é que a farinha deve "queimar bem" no forno, ou seja, evitar desperdício de combustível. Quanto maiores MS e MA mais difícil é a queima; o inverso é verdadeiro. Utilizando o algoritmo estequiométrico usado para farinhas sem carvão, podemos tabelar os resultados do mesmo modo:

Tentativas Teores e Módulos	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
Calcário (%)	85,0	84,5	84,0	84,0	83,8
Argila (%)	12,0	12,0	12,0	12,2	12,2
Óx. Ferro (%)	1,0	1,5	2,0	1,8	2,0
Carvão (%)	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
MS	2,38	2,13	1,98*	2,04	2,00
MA	2,64*	1,93*	1,62	1,74	1,69
FSC (%)	93,71	92,39	91,41	91,21	90,89

* resultados insatisfatórios

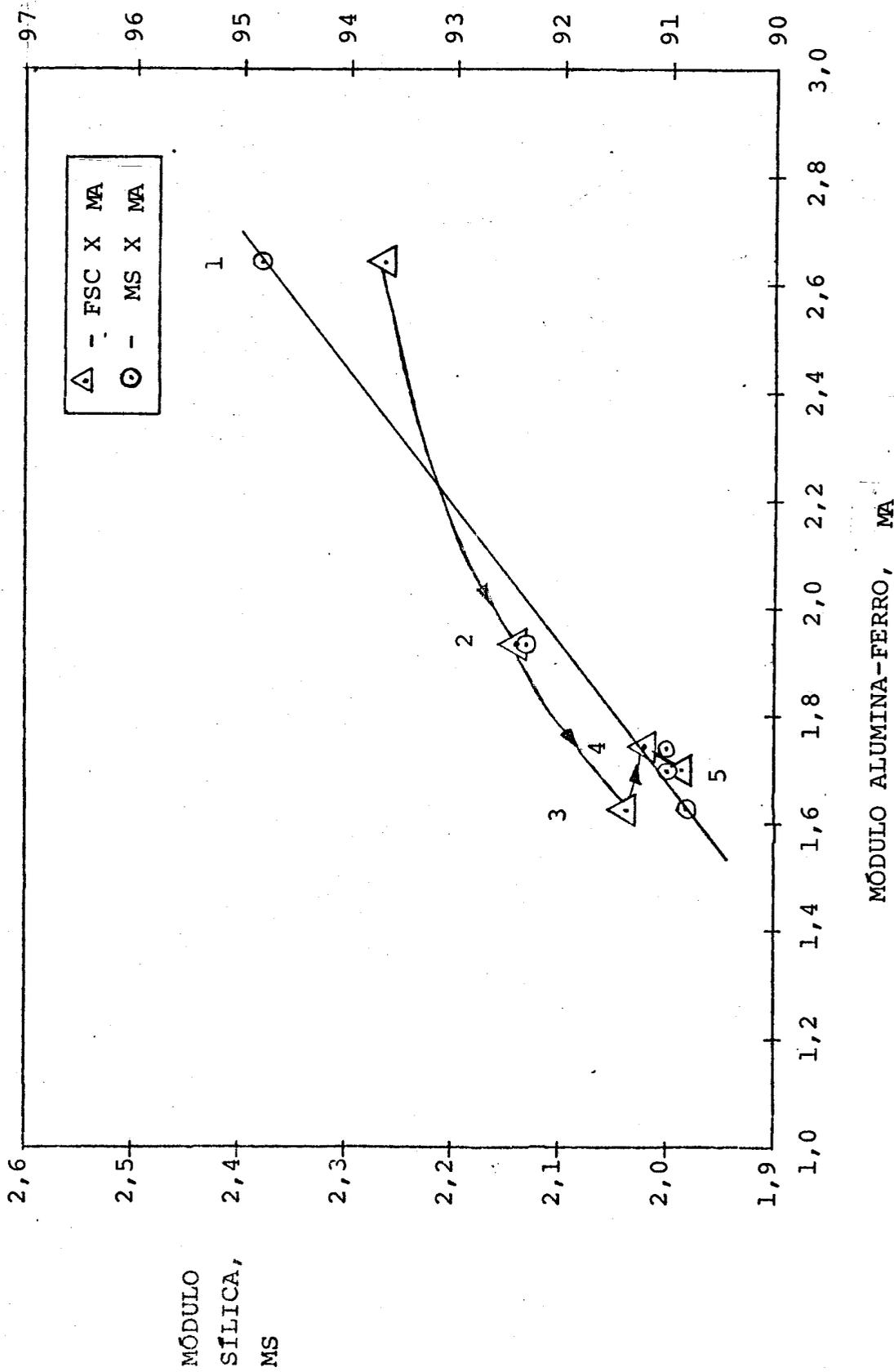


Figura B CURVAS DE VARIAÇÃO DOS MÓDULOS CIMENTEIROS PARA UMA FARINHA SEM CARVÃO

Os valores da primeira e segunda tentativas permitem inferir a necessidade/ de diminuir o teor de calcário e elevar o de ferro, mantendo-se os demais cons - tantes. Dos dados da terceira tentativa é possível admitir-se que os resultados/ sejam aproximadamente satisfatórios, pois o valor do módulo silicático atinge um valor pouco inferior ao mínimo admissível. Assim, com pequenas alterações dos / teores de argila e óxido de ferro é possível obter nas quarta e quinta tentati - vas valores satisfatórios. Os resultados acima estão locados na Figura

Conforme previsto, os dados dos módulos locados na figura B resultaram nu ma reta para MS contra MA e numa curva oscilatória para FSC contra MA. Apa - rentemente, existem dois pontos de intercessão entre ambas: um deles está fora/ dos limites aceitáveis para cimento portland comum para os módulos cimenteiros , ao passo que o segundo ponto indica uma região de valores e proporções aceitá veis para as matérias-primas na farinha. No caso de produção de cimento alumino - so, o ponto de intercessão gerado entre as primeiras e segunda tentativas seria/ satisfatório, mas não é para cimento portland comum; e o maior consumo de combus tível resultante seria compatível com a fabricação daquela cimento especial.

Freqüentemente, as análises das matérias-primas são efetuadas nas ocasiões/ das suas chegadas a fábrica, para liberação do pagamento ou devolução do material fora das suas especificações aceitáveis. Após aprovação da carga, esta pode ser estocada ao relento, ou debaixo de galpões ou em silos. Existem, portanto, pos - sibilidade do pó contido na atmosfera industrial, ou das chuvas ou da oxidação / atmosférica alterarem a composição química das matérias estocadas a céu aberto.

Se as análises das matérias-primas forem efetuadas em épocas distantes ou datas diferentes da sua utilização no preparo da farinha, então, dificilmente / uma composição teórica irá coincidir plenamente com a real. Se, ao contrário , forem efetuadas análises horárias das matérias-primas que estejam sendo ali - mentadas ao um moinho-misturador, então poderá ocorrer coincidência entre valo - res teóricos e reais.

Por outro lado, para uma utilização eficiente do algoritmo iterativo é necessário que todas as matérias-primas sejam analisadas por completo e seus re - sultados sejam expressos do mesmo modo, isto é, em base seca ou úmida, incluídos

DPI

CIMENTO

AZ 16/05/84

42

os efeitos de oxidações atmosféricas possíveis.

Os demorados tempos de análises químicas das matérias-primas inviabilizam a rapidez desejável para os ajustes estequiométricos em linhas de produção de cimento portland. Portanto, empregam-se os ajustes dos teores de calcário e argila nas esteiras alimentadoras do moinho-misturador após determinação do teor de carbonatos totais da farinha resultante.

Quando ocorrerem variações acentuadas na qualidade do calcário, por exemplo, presença de argila em excesso, o teor de carbonatos totais da farinha, usualmente/na faixa de 76 à 77% pode diminuir e, conforme os efeitos acarretados, é possível usar as expressões de Peray para correção da mistura, que são:

a) adições de calcário para correção do teor de carbonatos totais

$$X = A + \frac{(M-F) (100 + A)}{L - M}$$

onde: M = teor de CaCO_3 desejado na mistura (farinha),

F = teor de CaCO_3 encontrado na mistura (antes da correção),

A = teor de calcário já adicionado,

L = teor de CaCO_3 no calcário,

X = teor de calcário corrigido necessário para obter M.

b) adições de argila para correção do teor de carbonatos totais

$$Y = B - \frac{(M-F) (100 + B)}{F - C}$$

onde: M = teor de CaO ou CaCO_3 desejado na mistura (farinha),

F = teor de CaO ou CaCO_3 encontrado na mistura,

B = teor de argila já adicionado,

C = teor de CaO ou CaCO_3 na argila,

Y = teor de argila necessário para obter M.

Aos interessados em outros métodos matemáticos, é recomendável a leitura do artigo "Mathematical Programming Approach to the Problem of Cement Blending Optimization", escrito por D.A. Xirokostas e C.E. Zoppas, publicado em Cement and Concrete Research, Vol. 7, p.p. 503-514, 1977.

DPI

CIMENTO

AZ 16/05/84

43

6.4 Notação dos Cimenteiros - embora a maioria das substâncias constituintes dos cimentos hidráulicos contenha três ou mais elementos num estado de combinação, é possível simplificar-se o seu estudo, considerando-as como resultantes da associação de compostos binários mais simples. Sendo a maioria dos elementos presentes, tanto metálicos quanto não-metálicos, combinados com o oxigênio, podemos representar os compostos complexos como sendo formados por óxidos, alguns dos quais são básicos e outros de caráter ácido.

O trabalho dos mineralogistas com os silicatos e outros minerais resultou no hábito de representá-los como sendo a soma de óxidos ou como sais de hipotéticos ácidos silícicos ou alumino-silícicos. Deste modo, o ortosilicato de cálcio pode ser representado pela fórmula $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (combinação dos óxidos separados) ou por Ca_2SiO_4 (sal de cálcio de um ácido ortosilícico H_2SiO_4).

A simbologia convencional adotada pelos químicos do cimento emprega as seguintes abreviaturas para a maioria dos seus componentes:

$\text{CaO} = \text{C}$	$\text{MgO} = \text{M}$	$\text{K}_2\text{O} = \text{K}$
$\text{SiO}_2 = \text{S}$	$\text{SO}_3 = \bar{\text{S}}$	$\text{CO}_2 = \bar{\text{C}}$
$\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$	$\text{Na}_2\text{O} = \text{N}$	$\text{H}_2\text{O} = \text{H}$
$\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$		

Exemplos:

QUADRO 5

Constituintes Anidros do Clinquer Portland

Fórmula Química	Nomes	Símbolo
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Silicato dicálcico ou de dicálcio	C_2S
$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ou Ca_3SiO_5	Silicato tricálcico ou de tricálcio	C_3S
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminato tricálcico ou de tricálcio	C_3A
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	Ferroaluminato tetracálcico ou Aluminoferrito de tetracálcio	C_4AF

Os nomes são adotados pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) e PCA (Portland Cement Association).

DPI

CIMENTO

AZ 28/03/83

44

6.5. Formação do Clinguer Portland - é formado pelas reações do óxido de cálcio / com sílica, alumina e óxido de ferro, sendo composto principalmente por C_3S , C_2S , C_3A e uma fase ferrítica que se aproxima da composição C_4AF .

Segundo a ABCP, tais compostos formam-se no interior do forno quando a temperatura é elevada a ponto de transformar a mistura crua num líquido pastoso, que, ao se esfriar, origina substâncias cristalinas, p.ex., C_3S , C_2S e C_3A , e um material intersticial amorfo, contendo o C_4AF e outras substâncias. Tais compostos tem a propriedade de, por hidrólise, gerar compostos hidratados.

Segundo a PCA, durante a queima no forno, cerca de 20 a 30% da mistura forma líquido nas temperaturas de clinquerização (1100 a 1300°C). As reações de formação do cimento ocorrem nas superfícies dos sólidos e no líquido. As fases / cristalinas de silicatos que são formadas são separadas pelo líquido intersticial.

As reações que se formam dentro do forno, de acordo com as temperaturas, apesar da complexidade química de qualquer clinquer, podem ser resumidas em:

QUADRO 6 - REAÇÕES QUE OCORREM NA CLINQUERIZAÇÃO

Temperatura Aproximada		Reação
°F	°C	
212	100	- Evaporação da água livre contida na alimentação
930	> 500	- Desprendimento da água combinada com argila
1480	> 850	- Desprendimento do dióxido de carbono do calcário; início da calcinação
1470 a 1650	800 a 900	- Formação do silicato dicálcico (C_2S)
2000 a 2200	1095 a 1205	- Formação do aluminato tricálcico (C_3A) e do ferro aluminato tetracálcico (C_4AF)
2300 a 2650	1260 a 1455	- Formação do silicato tricálcico (C_3S) com desaparecimento progressivo da cal livre (CaO)

A Figura 22 abaixo apresenta a relação entre consumo e recuperação de calor dentro do forno de clínquerização e a distribuição de materiais e suas temperaturas ao longo do percurso.

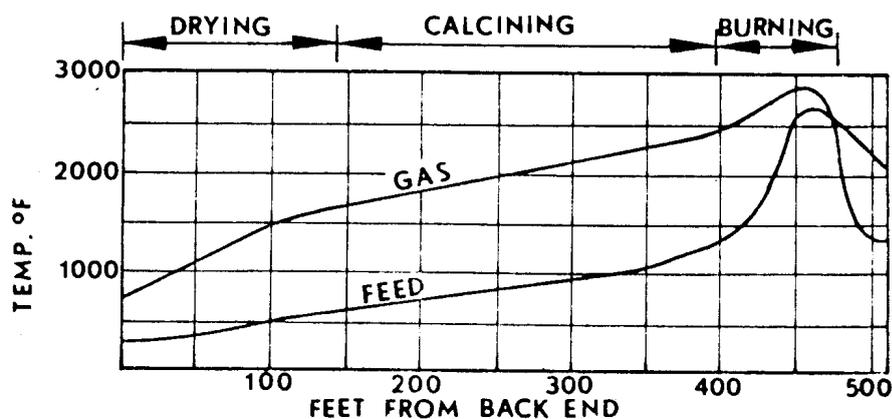


FIGURA 22

FIGURA 22 - PERFIS DAS TEMPERATURAS DOS MATERIAIS NO FORNO ROTATÓRIO DE CLÍNQUERIZAÇÃO

Quando observadas por meio de raios-x, as fases intersticiais, formadas durante o esfriamento a partir do líquido, em clínqueres normais, são completamente cristalinas. Ao microscópio podem apresentar-se finamente subdivididas, aparentando vitrificação (aspecto óticamente amorfo).

O C_3S quando observado ao microscópio em superfícies polidas de clínquer, convenientemente tratadas, apresenta-se em cristais pseudo-hexagonais, normalmente de contornos bem definidos. O C_2S apresenta-se sob a forma de cristais de formato arredondado e, às vezes, denteado.

O C_3A e o C_4AF apresentam-se como materiais intersticiais, preenchendo o espaço vazio deixado pelos cristais de C_3S e C_2S . O material intersticial claro corresponde ao C_4AF e o escuro com características cristalinas identifica o C_3A .

O material intersticial claro não-cristalino é o vidro, resultante do esfriamento brusco do clínquer e cristalização parcial das demais substâncias. Pode conter, total ou parcialmente dissolvido o MgO . Caso o esfriamento fosse lento, o MgO formaria periclase, substância capaz de hidratar-se e proporcionar um aumen-

to de volume no cimento, que pode ser danoso.

A maioria dos componentes do clínquer incorpora pequenas quantidades / de outros componentes para formar soluções sólidas. A fase mais conhecida é a solu_{ção} sólida de C_3S denominada alita. As demais fases de ocorrência possível estão / relacionadas no Quadro seguinte. Convém notar que uma variedade de fases não-pred_o minantes pode ocorrer no clínquer, quando certos elementos apresentarem pequenas / concentrações que possam estar dissolvidas em outras fases. Sob certas condições / redutoras no forno é possível que se formem fases reduzidas como, p.ex., FeO e CaS_2 .

Todas as fases predominantes contêm impurezas, as quais de fato estabi_{lizam} as estruturas formadas sob temperaturas elevadas, de modo que não ocorram de composições ou transformações durante o esfriamento, as quais seriam possíveis com os compostos puros.

As estruturas dos clínqueres portland variam consideravelmente com a composição, tamanhos de partícula das matérias-primas e condições de queima, resul_{tando} em variações da porosidade do clínquer, tamanhos, formas e agregações dos cristais.

Além da formação de CO_2 durante a queima, as altas temperaturas promo_{vem} a vaporização de álcalis presentes, enxôfre e halogenetos, que são arrastados / pelos gases de combustão para o terminal frio, onde condensam-se, ou então para um coletor de pó (ciclones, filtros ou precipitador eletrostático). O crú parcialmente calcinado ou não processado pode ser arrastado pelos gases. O pó pode ser reusado, desde que respeitadas as especificações do cimento quanto aos teores de SO_3 e impurezas.

OBSERVAÇÕES:

1^a - Entende-se por cristalização a passagem de uma substância dum estado fluido / (líquido ou gás) para o estado cristalino ou de uma solução para esse estado. Uma fase cristalina tem um arranjo atômico definido, com uma estrutura repeti_{tiva} que se estende por muitas distâncias atômicas. O número de fases crist_{alinas} é imenso, porque há muitas permutações e combinações de átomos e grupos de átomos.

DPI

CIMENTO

AZ 16/05/84

47

2^a - Entende-se por vitrificação a conversão de um líquido em vidro ou um material com aparência de vidro ou "líquido rígido". Os vidros podem ser inorgânicos / ou orgânicos e são caracterizados pela ordem nuclear/atômica em pequenas distâncias (e ausência de ordem em grandes distâncias). Como as fases amorfas não tem ordem em grandes distâncias, seus arranjos atômicos são menos definidos e permitem maiores diferenças na composição que as fases cristalinas.

QUADRO 7

Phases in Portland Cement Clinker ^a			
Name of impure form	CAS Registry No.	Chemical name	Cement chemists' notation
free lime	[1305-78-8]	calcium oxide	C
periclase (magnesia)	[1309-48-4]	magnesium oxide	M
	and [1317-74-4]		
alite	[12168-85-3]	tricalcium silicate	C ₃ S
belite	[10034-77-2]	dicalcium silicate	C ₂ S
C ₃ A	[12042-78-3]	tricalcium aluminate	C ₃ A
ferrite	[12612-16-7]	calcium aluminoferrite ^b	C ₂ A _x F _{1-x}
	[12068-35-8]	tetracalcium aluminoferrite	C ₄ AF
	[12013-62-6]	dicalcium ferrite ^c	C ₂ F
mayenite	[12005-57-1]	12-calcium-7-aluminate	C ₁₂ A ₇
gehlenite	[1302-56-3]	dicalcium alumino monosilicate	C ₂ AS
apthitalite	[12274-74-4]	sodium, potassium sulfate ^d	N _x K _y S
	and [17926-93-1]		
arcanite	[7778-80-5]	potassium sulfate	K \bar{S}
	and [14293-72-2]		
metathenardite	[7757-82-6]	sodium sulfate form I	N \bar{S}
calcium langbeinite	[14977-32-8]	potassium calcium sulfate	2X \bar{S} .K \bar{S}
anhydrite	[7778-18-9]	calcium sulfate	C \bar{S}
	and [14798-04-0]		
calcium sulfoaluminate	[12005-25-3]	tetracalcium trialuminatesulfate	C ₄ A ₃ \bar{S}
alkali belite	[15669-83-7]	α' - or β -dicalcium (potassium) silicate ^e	K _x C ₂₃ S ₁₂
alkali aluminate	[12004-54-3]	8-calcium disodium trialuminate	NC ₈ A ₃
	[65430-58-2]	5-calcium disilicate monosulfate	2C ₂ S.C \bar{S}
spurrite	[1319-44-42]	5-calcium disilicate monocarbonate	2C ₂ S.C \bar{C}
	[12043-73-1]	calcium aluminate chloride	C ₁₁ A ₇ .CaCl ₂
	[12305-57-6]	calcium aluminate fluoride	C ₁₁ A ₇ .CaF ₂ ^f

^a Refs. 10-12.

^b Solid solution series ($x = A/(A + F)$; $0 < x < 0.7$).

^c End member of series.

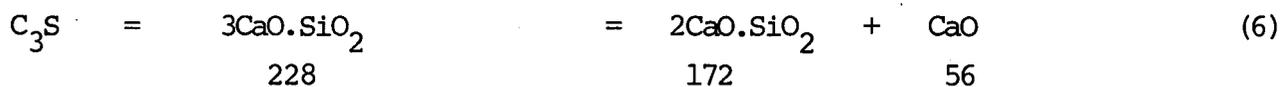
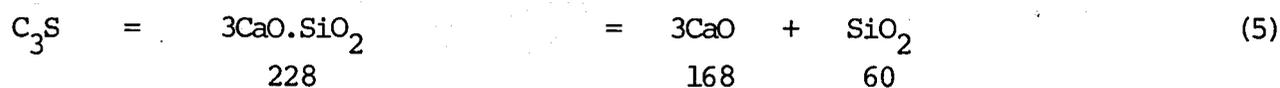
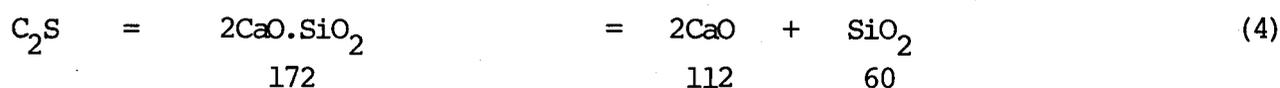
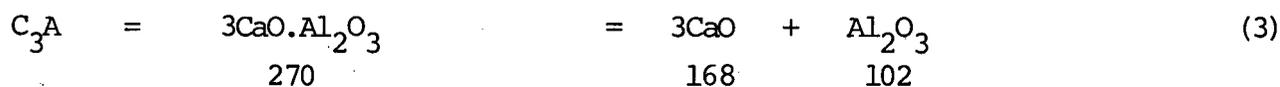
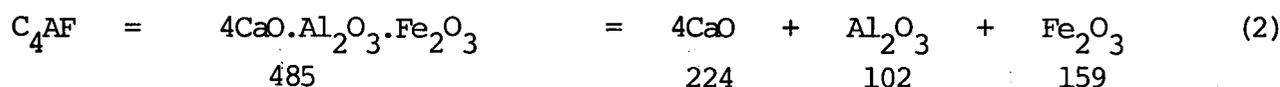
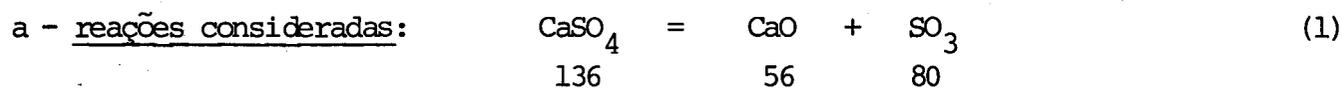
^d Solid solution series ($\frac{1}{2} \leq x/y$).

^e Solid solution series ($x \leq 1$).

^f Mixed notation.

- EQ/CT -

6.6 Composição Potencial do Cimento Portland - é obtida a partir da análise química do cimento, em função dos teores dos óxidos presentes e expressa em termos dos silicatos C_3S e C_2S e aluminatos C_3A e C_4AF , calculados pelo método de BOGUE. O procedimento consta de:



b - razões entre os óxidos:

De (1): $\text{CaO} / \text{SO}_3 = 0,700$

De (2): $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,642$ $4\text{CaO} / \text{Fe}_2\text{O}_3 = 1,409$

$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3 = 3,050$

De (3): $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Al}_2\text{O}_3 = 2,647$ $3\text{CaO} / \text{Al}_2\text{O}_3 = 1,647$

De (4): $2\text{CaO} / \text{SiO}_2 = 1,867$ $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 / \text{SiO}_2 = 2,867$

De (5): $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 / \text{SiO}_2 = 3,80$ $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 / 3\text{CaO} = 1,357$

De (6): $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 / \text{CaO} = 4,071$ $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 / \text{CaO} = 3,071$

c - algoritmo para cálculo da composição potencial (de acordo com as reações vistas):

1º - a partir do teor de SO_3 expresso na análise química do cimento, calcular o teor de CaO necessário para formar CaSO_4 , usando a razão entre ambos os óxidos.

2º - a partir do teor de Fe_2O_3 expresso na análise química, calcular os teores de CaO e Al_2O_3 necessários para formar C_4AF (usando as razões entre óxidos) e o teor potencial de C_4AF (pelo mesmo modo).

3º - a partir do teor de Al_2O_3 expresso na análise química, subtrair a quantidade para formação do C_4AF e obter o percentual remanescente para formação de C_3A .

4º - subtrair os teores de CaO livre, CaO para formação de CaSO_4 , C_4AF e C_3A e obter o percentual remanescente destinado a formar os silicatos C_3S e C_2S , denominando-o de "P".

5º - considerar o teor de sílica expresso na análise química do cimento igual a "Q" e calcular os teores potenciais de C_3S e C_2S pelas equações abaixo:

$$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2 (\%) = 4,071 \text{ P} - 7,600 \text{ Q}$$

$$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2 (\%) = 8,601 \text{ Q} - 3,071 \text{ P}$$

A composição potencial pode ser determinada, de modo direto pelas equações seguintes:

$$\text{C}_3\text{S} = 4,07 \text{ CaO} - (7,60 \text{ SiO}_2 + 6,72 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 1,43 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + 2,85 \text{ SO}_3)$$

$$\text{C}_2\text{S} = 2,87 \text{ SiO}_2 - 0,754 \text{ C}_3\text{S}$$

$$\text{C}_3\text{S} = 2,65 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,69 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$\text{C}_4\text{AF} = 3,04 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

DPI

CIMENTO

AZ 16/05/84

50

EXEMPLO: Um cimento portland possui a seguinte análise química:

componente	teor (%)
CaO	64,10 (cal livre = 0,9%)
SiO ₂	22,90
Al ₂ O ₃	4,50
Fe ₂ O ₃	3,11
MgO	0,79
TiO ₂	0,24
Na ₂ O	0,54
K ₂ O	0,64
SO ₃	2,37
Perda por diferença	<u>0,81</u>
	100,00

cálculos: teor de CaO para formar CaSO₄ = 2,37(0,700) = 1,66 % CaO

teor de CaO para formar C₄AF = 3,11(1,409) = 4,382 % CaO

teor de Al₂O₃ para C₄AF = 3,11(0,642) = 1,997 % Al₂O₃

teor potencial de C₄AF = 3,11(3,050) = 9,486 % C₄AF

teor de Al₂O₃ para formar C₃A = 4,50 - 1,997 = 2,503 %

teor de CaO para formar C₃A = 2,503(1,647) = 4,122%

teor potencial de C₃A = 2,503(2,647) = 6,625 % C₃A

teor remanescente de CaO = 64,10 - 1,66 - 0,9 - 4,382 - 4,122 =
= 53,036 %

teor potencial de C₃S = 4,07(53,036) - 7,60(22,90) = 41,817 %

teor potencial de C₂S = 8,60(22,900) - 3,07(53,036) = 34,119 %

Admite-se que ainda estão presentes 0,9% de cal livre, 4,0% de gesso, bem como a magnésia, titânio, umidade, dióxido de carbono e álcalis.

DPI

CIMENTO

AZ 16/05/84

51

- EQ/CT -

6.7 Influência das Matérias-Primas no Clinquer e CPC - podemos considerar tanto as matérias-primas propriamente ditas quanto os seus óxidos característicos para denominá-las a seguir:

Um aumento no teor de cal dificulta a clinquerização, porém aumenta a resistência inicial do cimento. Acima do teor máximo da combinação da cal, esta torna-se livre, possibilitando fragilizar o cimento.

A sílica forma com a cal os silicatos C_3S e C_2S . Qualquer aumento na proporção de sílica para aumentar o teor de C_3S resultará na elevação da resistência inicial, ainda que a resistência após vários dias de cura dependerá de ambos os silicatos C_3S e C_2S .

Um aumento no teor de sílica às custas da redução de alumina e óxido de ferro dificultará a clinquerização e facilitará o controle do tempo de pega. Um aumento da sílica às custas do teor de cal diminuirá a taxa de desenvolvimento da resistência mecânica do cimento.

Os teores de alumina e óxido de ferro devem ser abordados em conjunto porque seus efeitos estão muito associados na formação de C_4AF e C_3A .

Altos teores de alumina e óxido de ferro são facilmente clinquerizados mas devem ser cuidadosamente queimados para evitar a formação de nódulos. Um aumento de alumina, sem variação ou com redução do óxido de ferro, apressa a pega do cimento e pode provocar a perda de controle do tempo de pega. Um aumento do óxido de ferro reduz o teor de C_3A e aumenta o de C_4AF , aumentando o tempo de pega do cimento. Um aumento conjunto de óxido de ferro e alumina não causa problemas.

6.8 Qualidades Cementíferas dos Silicatos e Aluminatos do Clinquer - incidem diretamente nas propriedades físico-químicas. Podemos considerar:

C_3S - é importante para conseguir rapidamente resistências elevadas mas necessita de hidratação lenta. Apresenta calor de hidratação moderado, contração moderada e comportamento plástico insatisfatório. O clinquer portland comum possui geralmente um teor potencial de C_3S de 52 a 62%. Se o forno for alimentado com um teor excessivo de 65% a queima será extremamente difícil e a colagem será pobre.

C_2S - hidrata-se lentamente porém atinge resistências iguais às do C_3S , apresentando calor de hidratação reduzido. Consiste aproximadamente 22% do clinquer. Caso a temperatura de queima seja reduzida formar-se-á C_2S em detrimento do C_3S que exige isotermas maiores.

C_3A - hidrata-se intensamente, gerando elevados calores de hidratação. A adição de gesso serve para retardar a hidratação turbulenta. Apresenta resistência mecânica moderada ou reduzida atingindo seu grau máximo em 24 horas. Contraí-se fortemente. É o responsável pela plasticidade da argamassa. Constitui 6 a 8% do clinquer portland comum. O concreto que contenha elevado teor de C_3A não é tão resistente ao ataque por sulfatos em solos ou águas sulfatadas quanto o concreto produzido com baixos teores de C_3A .

C_4AF - reage rapidamente com a água de modo mais moderado que o aluminato tricálcico; seu calor de hidratação é moderado. Influi favoravelmente sobre a contração, a facilidade de manipulação e a estabilidade frente aos sulfatos. Governa a cor do cimento. Quanto maior o teor de C_4AF mais escuro é o cimento. A presença de ferro na farinha crua, porém, é necessária para atuar como fundente.

Dentre outras substâncias presentes no clinquer podemos salientar:

CaO livre - geralmente presente em baixos teores; a ocorrência de teores altos resultará em perigoso aumento de volume na hidratação.

MgO - assim como a cal livre, expande-se na hidratação, afetando a resistência.

DPI

CIMENTO

AZ 16/05/84

53

6.9 Adições Finais ao Clinguer - antes da moagem final, o clinguer recebe uma certa/ quantidade de gesso limitada pela norma técnica correspondente, destinado ao contro le do tempo de início de pega. Os cimentos portland ARI; MRS e ARS não recebem/ outros aditivos além do gesso.

O cimento portland AF recebe, além do gesso, 25 a 65% de escória bási ca granulada de alto forno, cujo teor de óxidos deve obedecer à relação abaixo:

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \frac{1}{3} \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \frac{2}{3} \text{Al}_2\text{O}_3} > 1$$

O cimento portland POZ recebe, além do gesso, adições de material pozo lânico(cinzas volantes, argila calcinada ou pozolana natural) nos seguintes teores:

10 a 40 % para o tipo 250

10 a 30 % para o tipo 320

Para o cimento portland CPC é permitida a adição de escória granulada de alto forno num teor de até 10% do peso total do aglomerante.

O gesso deve ser adicionado durante a moagem e não antes. Se estiver / presente em grande quantidade poderá provocar um aumento de volume perigoso.

6.10 Hidratação do Cimento - ocorre frequentemente nas temperaturas comuns da constru ção civil(5 a 40°C). Temperaturas elevadas ou reduzidas devem ser evitadas. As rea ções exotérmicas de hidratação podem atuar substancialmente para manter temperaturas/ adequadas em ambientes frios. Qualquer cálculo ou dosagem de cimento para estruturas/ de cimento deve considerar a geração de calor durante a sua hidratação para evitar / rupturas devido a choques térmicos com aumentos de temperaturas excessivos e esfria - mentos subsequentes.

As condições iniciais para ocorrência normal das reações de hidratação estão relacionadas com:

- a - tamanho das partículas de cimento - entre 0,2 e 100 µm
- b - concentração das partículas na água
- c - finura do cimento - 2500 a 5000 cm²/g

- EQ/CT -

DPI

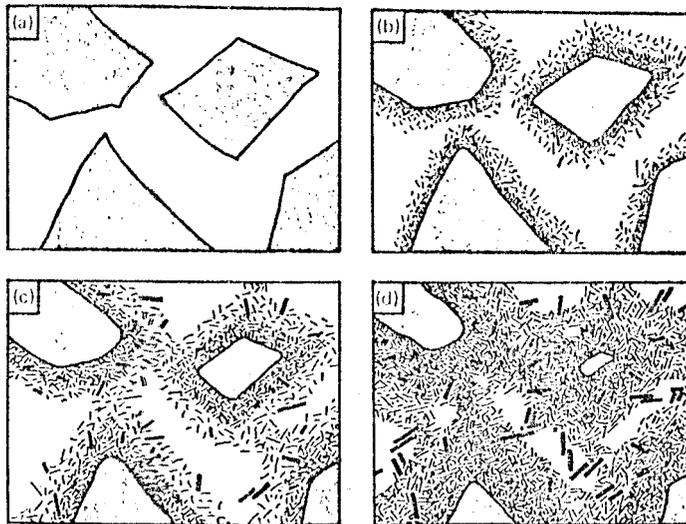
CIMENTO

AZ 16/05/84

54

O processo de hidratação consta de quatro etapas:

- 1^a - Dispersão dos grãos de clínquer não-reagidos em água: as partículas em suspensão do clínquer são envolvidas por películas de água com espessura média 1 μm .
- 2^a - Após alguns minutos, as fases anidras reagem: formando e liberando produtos de hidratação na superfície de cada grão, diluindo-os na fase líquida. A solução satura-se rapidamente com íons Ca^{++} e SO_4^- e a concentração dos cátions alcalinos aumenta com rapidez. Os produtos da reação tendem a ocupar os espaços originalmente preenchidos com água. O gel poroso formado, na sua configuração mais densa, ocupa duas vezes o volume do material anidro reagido. A maioria dos produtos de hidratação nesta etapa é coloidal (tamanhos menores que 0.1 μm) mas já surgem cristais maiores dos hidratos dos aluminatos de cálcio, sulfoaluminatos e outros.
- 3^a - Pega: as camadas de gel aumentam sua espessura e formam pontes entre os grãos originais. Apesar da solubilidade e mobilidade baixas dos anions silicatos, também ocorre crescimento dos hidratos de silicatos nas fases cristalinas (formadas a partir das soluções) que se incorporam ao hidróxido de cálcio e outras fases.
- 4^a - Endurecimento e Desenvolvimento da Resistência: ocorre com o preenchimento total dos espaços entre grãos com produtos da hidratação.



Four stages in the setting and hardening of portland cement: simplified representation of the sequence of changes. (a) Dispersion of unreacted clinker grains in water. (b) After a few minutes: hydration products eat into and grow out from the surface of each grain; (c) After a few hours: the coatings of different clinker grains have begun to join up, the gel thus becoming continuous (setting). (d) After a few days: further development of the gel has occurred (hardening). Courtesy of Academic Press Inc. (London) Ltd. (35).

FIGURA 23. HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

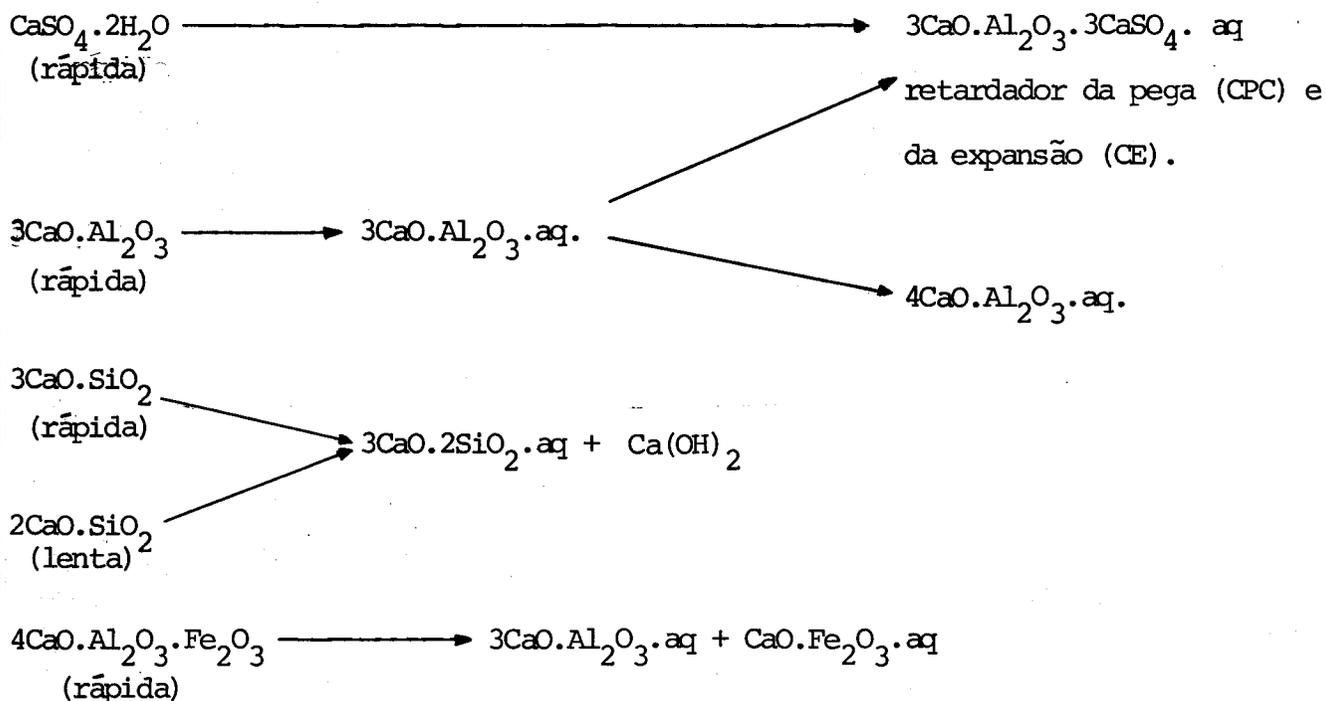
DPI

CIMENTO

AZ 28/03/83

55

As reações de hidratação do cimento incluem:



O C_3A é o primeiro a reagir (Provavelmente C_4AF também).

O C_3S reage a seguir.

O C_2S reage muito mais tarde (vide tabela abaixo).

TABELA 16

Penetração da Hidratação (em μm)
dos principais componentes do cimento

Tempo	C_3A	C_3S	C_2S
3 horas	4,35	1,68	-
1 dia	-	2,25	0,28
3 dias	5,68	-	-
7 dias	-	4,32	0,62
28 dias	5,68	4,44	0,83
5 meses	-	-	3,5

A inspeção do quadro acima evidencia que a resistência do cimento por-

tland:

- até os 3 dias é assegurada pela hidratação dos aluminatos e silicatos tricálcicos;
- até os 7 dias - praticamente pelo aumento da hidratação de C_3S ;
- até os 28 dias - continua a hidratação do C_3S responsável pelo aumento de resistência, com pequena contribuição do C_2S ;
- acima de 28 dias - o aumento de resistência passa a ser devida à hidratação de / C_2S .

DPI

CIMENTO

AZ 28/03/83

57

7. OPERAÇÃO DE UM FORNO ROTATÓRIO DE CIMENTO

Apesar do tamanho do equipamento, a "operação" de um forno é um processo / muito sensível, que depende de diversos fatores, tais como:

- a) característica da chama e temperaturas correspondentes;
- b) qualidade da farinha(via seca) ou pasta(via úmida);
- c) formação de colagem e anel;
- d) ciclos dos álcalis, sulfatos e cloretos;
- e) circuitos gasosos;
- f) sistemas de controle do processo.

A qualidade da farinha depende dos cálculos estequiométricos já vistos e da distribuição granulométrica de suas partículas, a qual é resultante da moagem(que não será abordada nestas notas de aulas).

7.1. Características das chamas e temperaturas - as chamas dos queimadores (combustores) a gás, líquido e misturas fluido-sólida possuem características semelhantes. As atuais pesquisas e aplicações de fontes alternativas de energia térmica no Brasil justificam, uma abordagem conjunta das chamas formadas pelos combustíveis fluidos e sólidos.

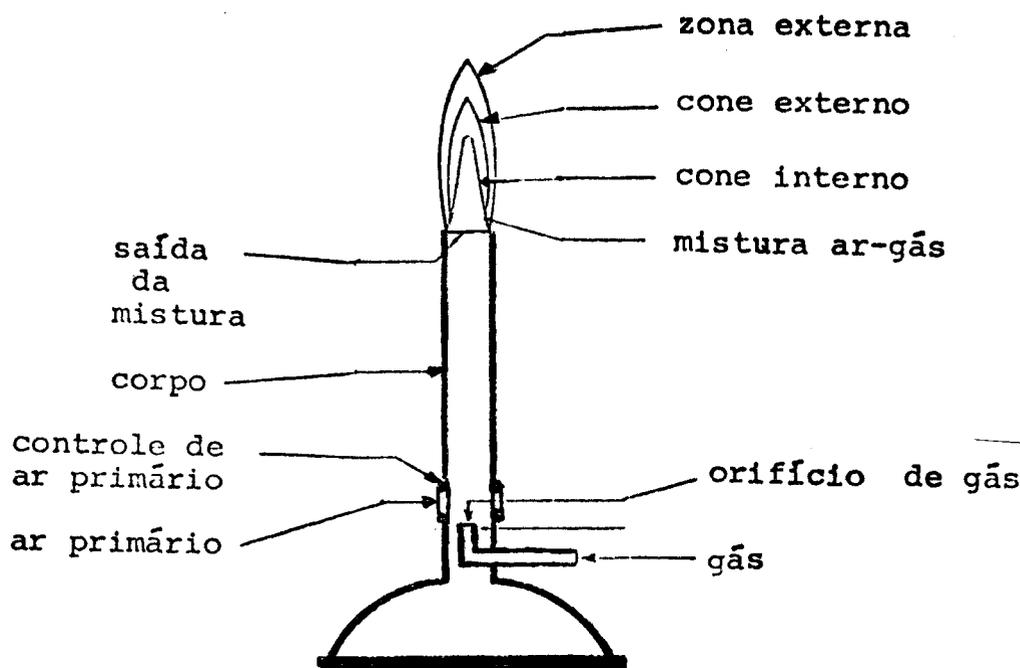


FIGURA 24 - Queimador de gás para Laboratório

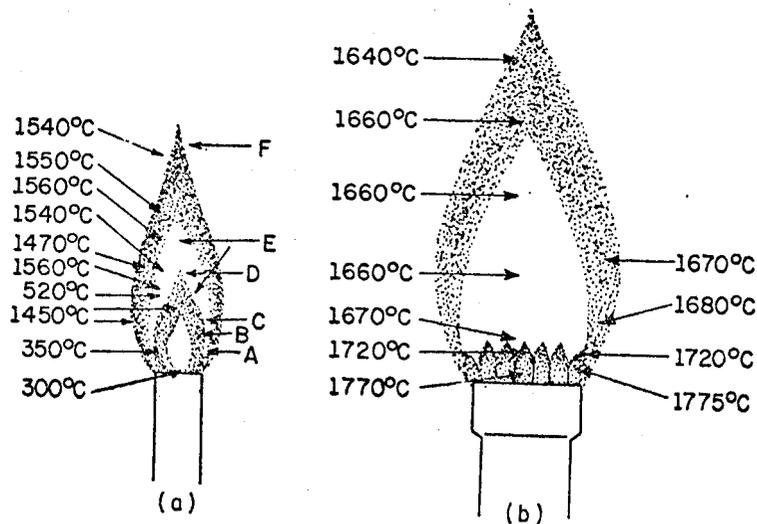


FIGURA 25 - CHAMAS OBTIDAS EM COMBUSTORES DE BUNSEN (a) e MEKER (b) ALIMENTADOS COM GÁS ARTIFICIAL

O maçarico é um combustor que faz uso de gás ou acetileno e oxigênio ou ar comprimidos. A temperatura da chama obtida com o maçarico e gás-ar não é muito mais alta do que a chama do combustor de Meker.

O aquecimento de um cadinho de platina na chama do combustor de Bunsen pode atingir 1000°C e na chama do combustor de Meker, 1200°C; no caso de um cadinho de porcelana, as temperaturas alcançadas são 700 e 850°C, respectivamente.

A temperatura atingida, por um objeto quando aquecido, pode ser estimada grosseiramente mediante observação da coloração assumida pelo objeto:

Vermelho escuro	—————	700°C
Vermelho cereja incipiente	—————	800°C
Vermelho cereja	—————	900°C
Vermelho brilhante	—————	1000°C
Alaranjado	—————	1100°C
Alaranjado brilhante	—————	1200°C
Branco	—————	1300°C
Branco-brilhante	—————	1400°C
Branco-ofuscante	—————	1500 - 1600°C

- a) queima sem injeção de ar - é lenta e irregular; chama amarela, luminosa, grande e instável; temperaturas maiores na periferia do cone de combustão, porém relativamente baixas.
- b) queima com injeção de ar primário - é rápida e regular; menos luminosa e estável; quanto maior a proporção de ar primário + ar secundário, mais rápida será a combustão e menos luminosa será a chama.
- c) queima com injeção correta de ar - os cones de combustão e ignição parecem confundir-se; a chama é não-luminosa quase violeta; as velocidades de chama e de fluxo da mistura combustível-vel-ar são iguais.
- d) queima com injeção excessiva de ar - ocorre descolamento ("lift") da chama de cor violeta provocando ruído ruco característico; a combustão pode ser incompleta e formar CO ou aldeídos; a velocidade de fluxo da mistura é maior que a de chama.
- e) queima dentro do combustor - quando a velocidade da chama é maior do que a velocidade da mistura ar-gás ocorre o retorno de chama ("flash back").

Observação: as extremidades amarelas das chamas são causadas por partículas de carbono incandescentes.

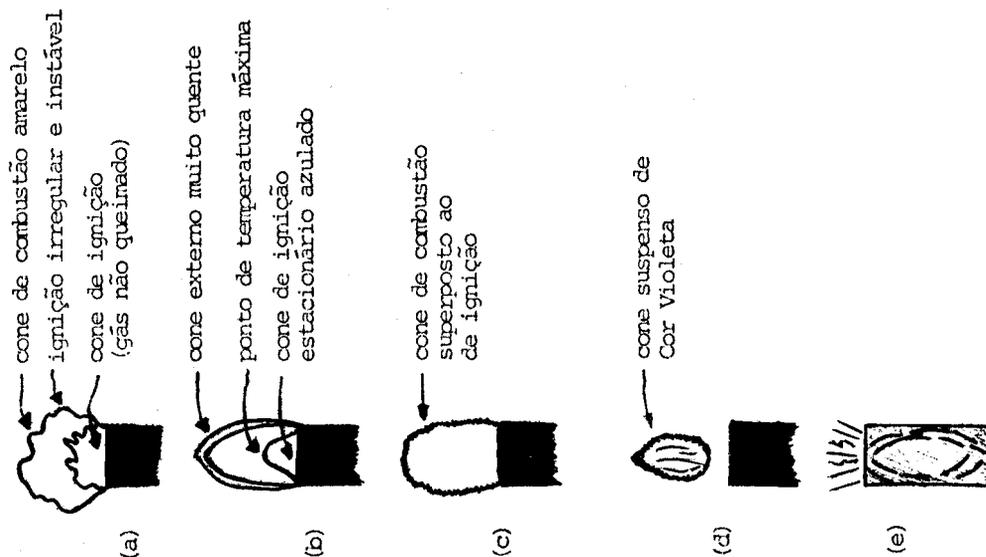


FIGURA 26. Tipos de chamas e aspectos formados em queimadores de gás

7.2. A combustão de líquidos e sólidos - A combustão de um gás, desde que exista / uma mistura adequada entre gás e ar, pode ser iniciada por uma simples faísca. A própria temperatura desenvolvida na queima mantém a combustão.

A combustão dos líquidos ocorre pela sua vaporização e pela queima dos vapores formados de acordo com os princípios válidos para os gases.

Os combustíveis líquidos de baixas temperaturas de ebulição podem ser queimados apenas por efeito térmico da radiação da chama que os vaporizam e aquecem os vapores até a temperatura de ignição. Forma-se o mesmo cone de ignição dos gases, significando que os vapores, antes de inflamarem-se, misturaram-se por difusão com pequenas quantidades de ar. Porém, as intensidades destas combustões são fracas e não são aplicáveis para fins industriais.

Para combustíveis líquidos de elevadas temperaturas de ebulição é necessário pré-atomizá-los, isto é, reduzi-los a pequenas gotículas por processos mecânicos. Daí em diante ocorrerão o aquecimento das partículas, sua vaporização ou gaseificação, mistura com o ar e combustão.

A luminosidade da chama é muito mais acentuada (amarela brilhante) pelo fato dos combustíveis líquidos conterem teores mais elevados de carbono. A temperatura do cone externo será mais elevada que no interior (onde ocorre os processos eletrotérmicos, de aquecimento, evaporação e mistura com o ar) pois as partículas periféricas de combustível tem acesso fácil ao ar secundário.

Durante a combustão de uma partícula o consumo de oxigênio não é constante, pois o fluxo dos gases de entrada e saída é turbulento e as condições térmicas do ambiente e as dimensões das gotículas ou partículas variam dentro de intervalos. O processo de combustão seria "ideal" se cada partícula de combustível encontrasse a cada instante a quantidade exata de oxigênio necessário estequiometricamente. É óbvio que tal condição não é atingida na prática e o que se faz é acrescentar um excesso de ar.

A combustão dos sólidos (que são compostos de carbono fixo, matérias voláteis, água e sais minerais) inicia-se lentamente. O calor inicial desprende as matérias voláteis e a unidade, produtos que queimam segundo as teorias anteriores. O resíduo inicial é composto de carbono fixo e cinzas. Admite-se que a

DPI

CIMENTO

AZ 16/05/84

61

- EQ/CT -

queima do carbono fixo é proporcionada pelo oxigênio que rompe sob ação térmica a estrutura do carvão, removendo os átomos periféricos e formando compostos instáveis gasosos, cuja ação contínua desagrega progressivamente o combustível, até formar CO e CO₂.

O maçarico de um forno de cimento pode ser visualizado na figura seguinte : é composto de uma tubulação central para o combustível, que será envolvido por um anel tubular onde passa o ar primário. Ao longo do maçarico, no seu eixo central / existe uma vareta acoplada a um bico-misturador, que pode ser manipulada por um volante. Pelo avanço ou recuo da vareta é possível regular a abertura proporcionada pelo bico e, portanto, controla-se as pressões do óleo combustível e do ar primário.

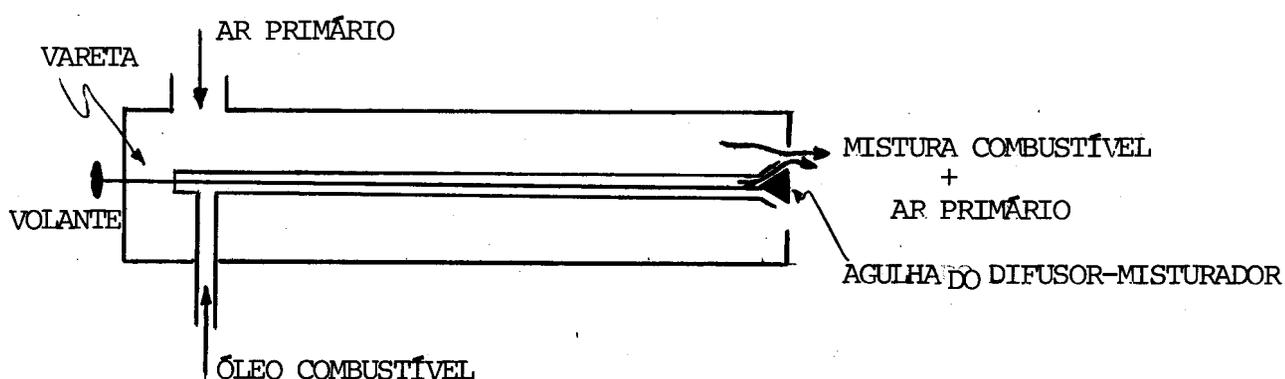


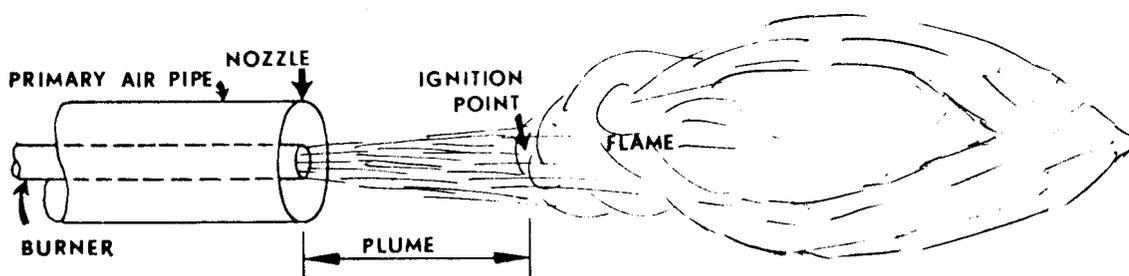
Figura 27 - Esquema de um maçarico típico de forno de cimento

Outra forma de queima de combustíveis, válida para os sólidos, consiste em associar dois maçaricos: um para o óleo e outro para carvão em paralelo ou com uma leve inclinação entre ambos para que o jato da mistura carvão pulverizado + ar seja lançada dentro da chama da mistura óleo-ar.

7.3. A chama do forno de clinkerização - para um olho destreinado, todas as chamas na zona de queima de um forno rotatório são mais ou menos iguais. As chamas variam consideravelmente em comprimento, forma, cor, direção, ponto de ignição e temperatura. Quanto ao tamanho, podem ser:

- longa - maior que 10 m;
- média - variando entre 6 e 9 m;
- curta - variando de 4 a 6m.

Pela figura seguinte, verifica-se que ao invés de um "cone de ignição" ocorre a existência de uma "pluma" ou "pavio", formado pela mistura de ar e combustível ejetado pelo bico; na sua ponta ocorre a ignição e inicia-se o cone de combustão.



The flames from all types of fuels have certain common characteristics.

FIGURA 28 - ESQUEMA TÍPICO DAS CHAMAS DOS FORNOS ROTATÓRIOS

A chama normal num forno rotatório possui um cone externo oxidante e não deverá apresentar o cone interno (redutor). Entretanto, o cone redutor pode formar-se caso haja excesso de combustível (ou comburente que possua a capacidade de resfriar o combustível).

Com o tempo, o iniciante (fornheiro, químico, engenheiro, gerente) aprende a reconhecer as características e seus efeitos sobre a eficiência do forno e como controlá-las. Expressões como "curta, longa, preguiçosa ("lazy"), teimosa ("suappy"), fria, quente", assumirão significados reais e tornar-se-ão comuns na linguagem da operação do forno.

O cabeçote do forno ("burner end") é equipado com uma viseira adotada de porta, onde o operador pode olhar a zona de queima. Devido ao brilho da mistura incandescente, é necessário olhar através de um vidro colorido especial de azul cobalto

QUADRO 8 FATORES INFLUENTES NAS CARACTERÍSTICAS DA CHAMA DE UM FORNO DE CLINQUERIZAÇÃO

<p>Grupo I - Variáveis que o operador pode controlar pouco ou nada.</p> <p>Diâmetro do bico do ar primário</p> <p>Tamanho do orifício do queimador do óleo (*)</p> <p>Diâmetro do forno</p> <p>Projeto do queimador</p> <p>Poder calorífico do combustível</p> <p>(*) pode ser substituído de acordo com a carga do forno: após a fase de aquecimento, após completa da 1/3 da alimentação normal do cruze para operar com a carga nominal ou normal; ou seja; é necessário operar com pelo menos tres tipos de queimadores</p>	<p>Grupo II - Variáveis que podem ser ajustadas ou controladas pelo operador ou por meio de uma terceira parte ou de uma parada do forno</p> <p>Finura do carvão queimado</p> <p>Temperatura do óleo combustível</p> <p>Temperatura do ar primário</p> <p>Temperatura do ar secundário</p> <p>Vazão volumétrica do ar primário</p> <p>Vazão volumétrica do ar secundário</p> <p>Vazão do combustível</p> <p>Temperatura da parede na zona de queima</p> <p>Posição do queimador</p> <p>Grau de pureza (concentração de poeira) de ar de combustão que entra no forno.</p> <p>Carga de material na seção reta do forno</p> <p>Exigências de ar do combustível</p> <p>Densidade da corrente primária (ar primário mais combustível)</p> <p>Densidade dos gases de combustão</p>
---	---

Qualquer mudança numa das variáveis acima poderá modificar as características da chama, as quais podem variar consideravelmente de uma fábrica para outra e mesmo de um forno para outro na mesma fábrica.

Regra geral para o controle da chama: obter a menor chama possível com temperatura máxima, sem prejudicar a qualidade do clínquer, a formação da colagem e do anel, a vida dos refratários e sem causar danos às áreas de descarga, câmara de fumaça, resfriadores e cabeçote.

(filtrante aos raios ultravioletas) para proteger os olhos do operador. Quando observa a chama, o operador deve avaliar o ponto de ignição, o comprimento, a direção, a forma e sua cor, sendo esta uma boa indicação da temperatura de chama.

D P H

CIMENTO

AZ 16/05/84

OBSERVAÇÕES PRELIMINARES:

1ª - Qualquer forno forma um anel de ponta de chama, apesar da condição ideal de operação ser a da formação de uma colagem uniforme protetora do refratário.

2ª - A massa total de ar de combustão é a soma do ar primário mais ar secundário mais ar parasita (que entra pelas portinhadas, anel de selagem e frestas) - o calor é liberado num longo trecho além da zona de queima; a chama possui uma tendência a flutuar de modo instável; é indesejável porque não completa a combustão; não faz barulho.

A - se houver insuficiência de ar, o combustível aquecido irá procurar o oxigênio ao longo do forno, queimando desta maneira.

- e mais ruidosa, porém é indesejável pois não completa a combustão

B

- o calor é liberado num pequeno trecho da zona de queima; favorece o controle do forno, melhor qualidade do clinger e torna mais eficiente a queima / do combustível; tende a permanecer fixa na posição quando ocorreu pequenas variações de vazão ou temperatura do ar.

C

- é capaz de produzir temperaturas elevadas antes de alcançar o anel, esquentar o cabeçote e erodir a zona de queima, eliminando antes do bloqueio a colagem e o refratário, provocando os retrocessos da chama e dos fornos produzidos.

D

- a formação do anel estrangulador pode ocorrer devido a óleo frio (ou chama / redutora) e/ou material heterogêneo ou nódulos fora das especificações.

- o ar secundário entra pelo fundo e induz a chama para o topo; este fenômeno ocorre durante o período inicial da partida do forno, corrigindo-se depois pois com o aumento da temperatura.

E

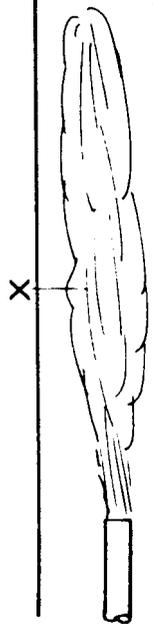
- se o queimador for inclinado a região central da chama poderá ser posicionada em torno do eixo, longitudinal da zona da queima; esta condição é indesejável; é preferível parar a combustão e ajustar o queimador.

F

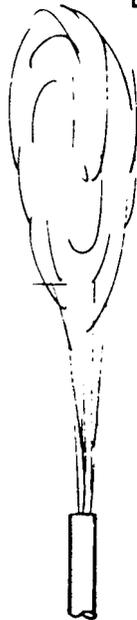
50 FT

FIGURA 29 - Tipos de chamas de fornos de clingerização com formatos exagerados e

simplificados para mostrar as diferenças essenciais



A



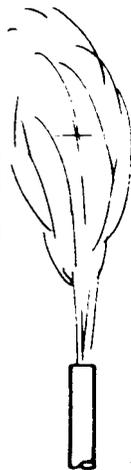
B



C



D



E

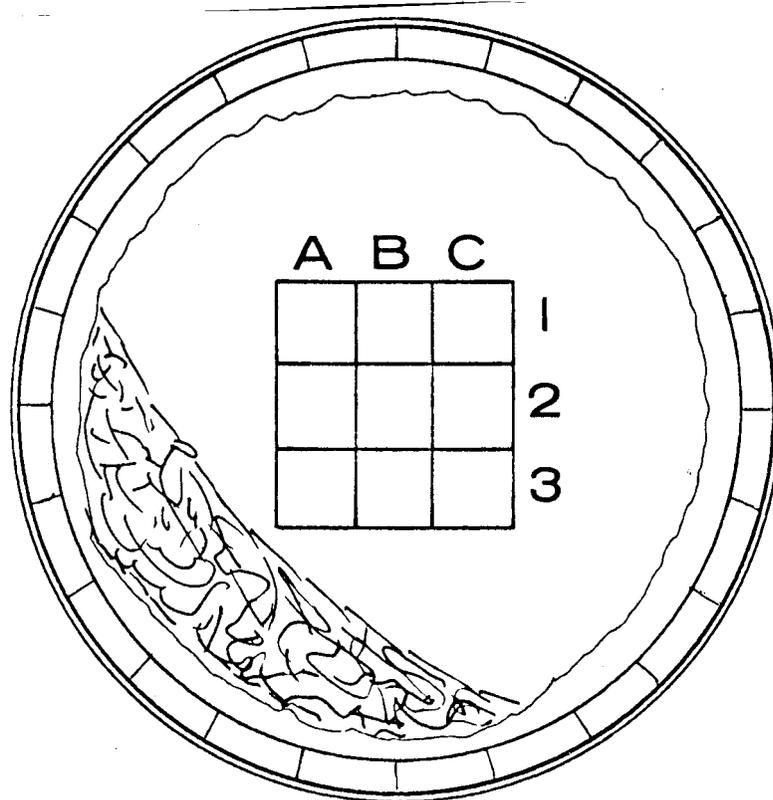


F

X

O tamanho da chama não pode ser excessivamente curto para não elevar muito a temperatura da zona de queima, a não ser que se deseje eliminar algum anel formado / nesta região. A chama longa só é recomendável para destruir anel formado no fundo do forno. Em condições normais de operação, a chama média é a ideal.

A direção da chama deve ser ajustada com relação ao ponto "x" da Figura 29 (Tipos de Chamas) cuja seção reta correspondente do forno pode ser visualizada na Figura seguinte:



Imaginary targets in the kiln indicate the correct and incorrect areas toward which the flame should be directed.

FIGURA 30 - POSIÇÕES DE DIRECIONAMENTO DA CHAMA

As posições 2A ou 2B são favoráveis à melhor transferência de calor. Se houver direcionamento da chama para 3A surge o perigo de promover a penetração de combustível não queimado no leito de clínquer. Uma chama direcionada para 1B, 1C ou 2C pode resultar em lançamento da combustão sobre a colagem com efeitos danosos.

- EQ/CT -

Os fornos aquecidos por carvão moído e óleo combustível formam plumas (ou pavios) reconhecíveis por assemelharem-se a nuvens ou jatos pretos. Em fornos a carvão é possível diminuir o comprimento da pluma (e antecipar a ignição) moendo-se o sólido para obter maior área de superfície das partículas. Em fornos a óleo combustível é possível obter ignição antecipada preaquecendo-se o óleo até temperaturas maiores e selecionando-se bicos com menor abertura para obter maior atomização.

As temperaturas da chama correspondentes a cores observadas através de viseira com vidro azul cobalto são:

Cor	°F	°C
Vermelho débil	875	475
Vermelho débil a vermelho escuro	875 - 1200	475 - 650
Vermelho escuro a vermelho cereja	1200 - 1375	650 - 750
Vermelho cereja a vermelho cereja brilhante	1375 - 1500	750 - 825
Vermelho cereja brilhante a laranja	1500 - 1650	825 - 900
Laranja a amarelo	1650 - 2000	900 - 1090
Amarelo a amarelo débil	2000 - 2400	1090 - 1320
Amarelo débil a branco	2400 - 2800	1320 - 1540
Branco a branco ofuscante	acima de 2800	acima de 1540

Os pirômetros óticos são direcionados para o ponto mais quente da chama para apresentar a sua temperatura.

7.4. Auto-Combustão e Pré-Ignição

Em muitos fornos rotatórios emprega-se ar primário pré-aquecido para promover a ignição do combustível. A temperatura de ignição para vários combustíveis pode ser tão baixa quanto 425°C (800°F) em países frios (hemisfério norte) ou 400°C (caso do Brasil).

Por questões de segurança industrial, é necessário observar que a atual tecnologia de utilização do carvão em fornos rotatórios abrange os carvões minerais e vegetais, sujeitos aos fenômenos de "auto-combustão".

O carvão mineral ou vegetal, estocado ao ar livre oxida-se lentamente promovendo uma verdadeira combustão à baixas temperaturas. Se o calor gerado nessa oxidação for maior do que o dissipado no ambiente ou não puder ser eliminado por ventilação, a temperatura da reação aumentará até o ponto de gerar uma combustão espontânea.

Consequências da auto-combustão do carvão:

- 1^a - incêndio na pilha de carvão moído estocado ao ar livre,
- 2^a - explosão no carvão pulverizado estocado em silo, que possua poeira de carvão em suspensão.

A maior absorção do oxigênio do ar se dá em carvão recém-extraído da mina, estocado para consumo. Isto explica-se pelo fato das superfícies nuas formarem progressivamente uma película de óxido que aos poucos torna-se uma barreira à difusão do ar. Sabe-se que:

- a - com a temperatura em torno de 50°C, o carvão passa a absorver mais oxigênio, sendo acompanhado nesta reação pela elevação progressiva da temperatura;
- b - entre 150 e 200°C passa a gerar dióxido de carbono (CO₂) e vapor d'água;
- c - entre 250°C e 400°C o carvão entra em ignição e passa a queimar produzindo chamas.

Uma solução para o problema da oxidação do carvão pelo ar consiste em injetar CO₂ gasoso na parte inferior do silo para fluidizá-lo e inertizá-lo.

DPI

CIMENTO

AZ 16/05/84

68

Dentre os diversos fatores que podem contribuir para o surgimento da combustão espontânea ou mesmo acelerá-la, podemos citar os seguintes:

- elevado teor de componentes voláteis no carvão;
- carvão de granulometria fina, oferecendo maior superfície de reação;
- mistura de carvões de granulometria heterogênea, finos e grossos, oferecendo maior penetração do ar para o miolo da pilha;
- carvão de mineração recente, que tende a reagir mais rapidamente com o oxigênio do ar, ao contrário daquele estocado há mais tempo;
- umidade residual muito baixa;
- condições climáticas com temperaturas maiores na estocagem.

Conhecidos estes aspectos recomendam-se os limites:

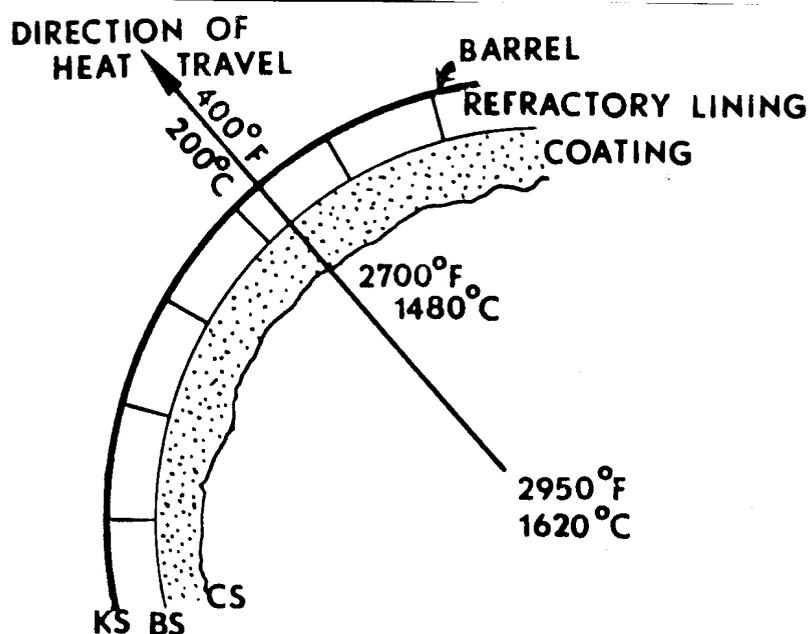
- 1º - controlar as temperaturas das pilhas de carvão para que não superem 70°C;
- 2º - evitar de aquecer o ar primário de queimadores de carvão acima de 350°C (ou menos!)

A ultrapassagem do segundo limite pode resultar em ignição do carvão dentro do tubo do queimador e provocar resultados desastrosos. As épocas mais prováveis para ocorrência de tal, ultrapassagem térmica são correspondentes aos períodos imediatamente após o apagar da chama, ou sua ignição durante pequenas paradas do forno, isto é, quando a zona de queima ainda esteja numa temperatura elevada.

- EQ/CT -

7.5. Formação da Colagem e do Anel - uma colagem protetora sobre o refratário serve para prolongar sua vida útil na zona de queima. A reposição do refratário representa altos custos de material e de perda de produção. Qualquer operador deve estar atento para a formação da colagem para que apresente uma espessura protetora do refratário sem alterar os parâmetros de escoamento e térmico da operação.

A colagem é uma massa de clínquer ou partículas de poeira que aderem à parede do forno que passaram de um estado líquido ou semi líquido para um estado solidificado. As partículas solidificadas aderem à superfície da colagem(ou do refratário quando não existe colagem) à medida que a temperatura desta esteja abaixo do ponto de solidificação das partículas. A colagem prossegue até que se estabeleça o equilíbrio. Quando o forno opera sob tal condição de equilíbrio, a colagem manter-se-á por si própria.



Heat, passing through the shell of the kiln, must be constantly replenished by the flame in order to maintain a condition of equilibrium necessary for coating formation.

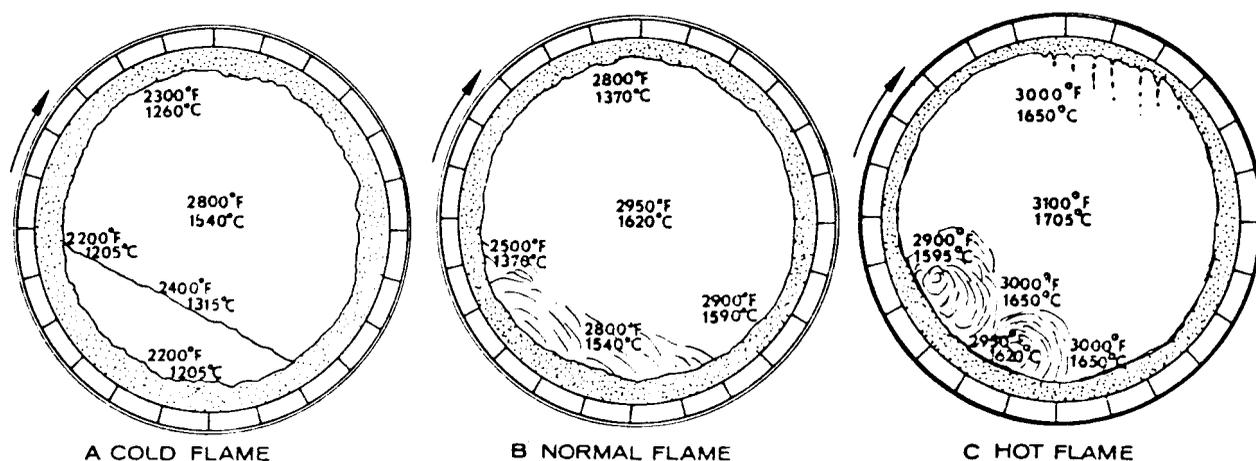
FIGURA 31 - FLUXO TÉRMICO ATRAVÉS DA COLAGEM REFRATÁRIO E CASCO DO FORNO ROTATÓRIO DE CIMENTO

Aparentemente, a condição de equilíbrio significa que não se formam novas camadas de colagem. Entretanto, quando a temperatura de equilíbrio é ultrapassada, as partículas da superfície se liquefazem e a colagem começa a desprender-se.

A transferência de calor entre o interior e o exterior é controlada pela condutividade térmica do refratário. Quanto maior a condutividade térmica, melhor a chance de se formar colagem pois será mais fácil resfriar o material.

As alimentações dos fornos (as farinhas) que contenham agentes fundentes ou fusíveis em fase líquida (ferro, alumina, magnesia e álcalis) favorecem a formação de colagem. Por outro lado, as farinhas com elevados teores de sílica e cal não favorecem a formação da colagem, pois são difíceis de queimar. Os álcalis dispersos na corrente gasosa promovem a formação de colagem (e eventualmente de anéis) devido às suas características altamente fusíveis.

Considerando-se que a temperatura de solidificação seja de 1315° e que a proporção ideal de líquido seja de 24%, podemos encontrar três casos básicos de operação; vistos na Figura abaixo:



Kiln A, being in a hole, is not hot enough for proper formation of coating; good coating is being formed in kiln B at normal operating temperatures; the high temperature in kiln C causes too much liquid to form and can result in a serious loss of coating.

FIGURA 32- EFEITOS TÍPICOS DAS CHAMAS "FRIA", "NORMAL" e "QUENTE" SOBRE A MASSA ROLANTE DE CLINQUER

Estudando as incrustações em fornos de cimento, a ABCP indica que na região/da entrada do forno formam-se as primeiras fases líquidas compostas pelo ferro aluminato tetracálcico (C_4AF) e aluminato cálcico ($C_{12}A_7$). Na região da zona de queima, a colagem que apresenta um teor maior de fase líquida é devida principalmente ao C_4AF e C_3A . No caso dos anéis a frequência do C_4AF é significativamente maior, bem como de C_2S e, ocorre a presença eventual de compostos alcalinos sulfatados e, conseqüentemente, menores porcentagens de C_3S .

A ABCP admite que o anel resulta de uma combinação de cinzas do combustível com o material que está sendo queimado. Os aneis apresentam maiores teores em sílica e alumina, déficit em cal e elevados teores de sulfatos e álcalis. Um forno aquecido com carvão pulverizado é mais susceptível à formação de aneis de que pelo uso de combustível líquido. Esta é uma Teoria formulada pela ABCP.

Quando o forno é aquecido por combustível líquido ou gasoso, a formação do anel pode ocorrer por dosagem excessiva de ferro, má homogeneização de farinha crua, ou um certo desconhecimento das matérias-primas ou, ainda, por queima excessiva.

Os anéis podem ser formados nas diversas zonas do forno rotatório e podem ser eliminados de acordo com as formas abaixo indicadas:

QUADRO 9 MÉTODOS DE ELIMINAÇÃO DE ANÉIS DE COLAGEM PARA FORNOS ROTATÓRIOS

ZONA DO FORNO	MATERIAL	MEIOS PARA ELIMINAÇÃO
secagem ou pré-calcinação	pasta ou farinha crua	- destruição por meio de correntes - redução da reciclagem do pó coletado nos ciclones ou eletrofiltros
sinterização ou ponta de chama	farinha em reação cinzas e componentes de fase gasosa	- por ação da chama, ou por aquecimentos e resfriamentos repetidos 5 a 6 vezes; - por choques térmicos (resfriamentos rápidos repetidos em intervalos de algumas horas por meio de jatos de água. - pelo uso de canhão industrial, atirando balas especiais em vários pontos.
clinkerização ou queima	clinker	- reduzir o arraste de pó do esfriador pelo ar secundário; - aplicar um jato de água; - golpeamento com barras de ferro; - reposicionar o maçarico.

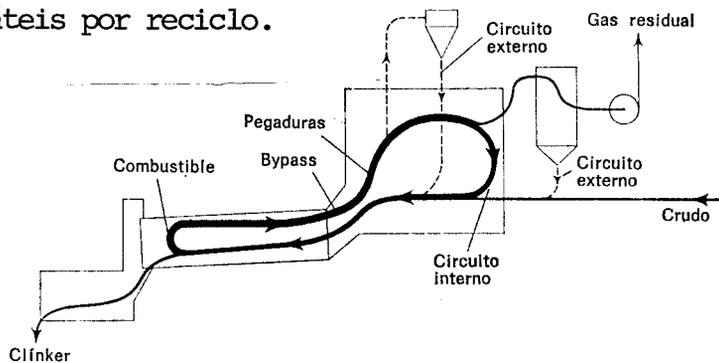
7.6. Ciclos dos álcalis, sulfatos e cloretos - a formação das incrustações (anel e cola gem) fora da zona de queima é atribuída, normalmente, ao acúmulo de álcalis e/ou / enxôfre e cloretos no interior de fornos rotativos, provocado por suas recircula - ções, ou, então, devido à presença de spurrita ($Ca_5(SiO_4)_2CO_3$).

Existem dois ciclos de voláteis:

- 1º - interno ao forno - a condensação ocorre dentro do próprio forno nas zonas me - nos quentes e mais afastadas da queima.
- 2º - externo ao forno - a condensação alcalina ocorre nos pré-aquecedores.

A separação dos álcalis ocorre por evaporação do material submetido à zona/ de queima, passagem ao seio dos gases do forno. Daí, são, então condensados a qua - se 900°C e captados parcialmente pelo crú e retornam às zonas de sinterização e clinquerização.

Se a captação de pó é de alto rendimento (eletrofiltros), os álcalis vola - tizados condensam-se e são devolvidos junto com o pó ao forno, aumentando assim a massa de voláteis por reciclo.



Circuito cerrado de los álcalis en un horno rotatorio para cemento con intercambiador (esquema). Según P. WEBER

FIGURA 33 - PERCURSO DOS ÁLCALIS NUM FORNO ROTATÓRIO DE CIMENTO

Os álcalis atuam também como fundentes; reagem com SO_2 , cloretos e, talvez, com CO_2 formando os sulfetos alcalinos, cloretos alcalinos e carbonato alcalino.

A formação de sais alcalinos resulta na sua formação e cristalização dentro do forno, unindo as partículas do crú por pontes desalinas, formando uma estrutura / (incrustação-colagem ou anel) rígida. Como resultado, do processo cíclico, a concen - tração de sais no crú torna-se maior, reduzindo sua fluidez e facilitando sua aderência.

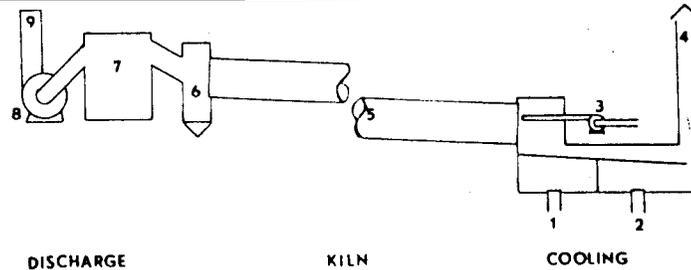
- EQ/CT -

7.7. Circuitos gasosos - por conveniência, costuma-se dividir o percurso do ar, dos gases de combustão e dos vapores, através do forno e equipamentos conexos, em três circuitos sucessivos:

1º - circuito do resfriador de clínquer - abrange o ar de combustão;

2º - circuito do forno - abrange suas zonas internas;

3º - circuito da descarga gasosa - abrange o ar, gases, vapores e a poeira.



Schematic diagram of air circuits in a kiln system. 1 and 2 are air inlets into the undergrate chamber of the clinker cooler; 3 is primary air fan; 4, excess cooler-air stack; 5, kiln; 6 and 7, dust collectors; 8, induced draft fan; 9, stack.

FIGURA 34 - ESQUEMA DOS CIRCUITOS GASOSOS NUM SISTEMA DE CLINQUERIZAÇÃO

Os três circuitos estão interligados: formam um conjunto sensível a qualquer perturbação causada por ar parasita ou por corte ou excesso de fornecimento de ar para combustão ou por entupimento em qualquer equipamento dos percursos.

O circuito do resfriador de clínquer serve também para pré-aquecer ar (primário e secundário).

O circuito do forno, após sua estabilização, deve evitar a formação de monóxido de carbono e, também a presença de excesso de ar (5%) que cause perdas térmicas e deve, ainda, manter um perfil térmico tão constante quanto possível.

O circuito de descarga além do excesso de ar não-queimado compõe-se de dióxido de carbono, água e pó arrastado. Em base seca, a corrente gasosa da descarga contém aproximadamente 75% de nitrogênio, 23% de dióxido de carbono e 1% de oxigênio (p/v).

7.8. Sistemas de Controle de Processo - os métodos de operação de um forno variam / de fábrica para fábrica e mesmo entre diferentes operadores. Mas o controle do forno deve ser um procedimento contínuo e repetitivo, para que seja operado da mesma / forma. Isto significa que todos os operadores devem ser treinados nos mesmos princí-
pios operacionais do forno.

O controle de um forno de cimento pode ser efetuado com os seguintes recur-
sos:

- a - observação visual do seu casco metálico e complementos;
- b - observação visual (com máscara protetora) do seu interior;
- c - observação pirométrica da chama;
- d - uso de termopares acoplados a transdutores e registradores;
- e - uso de tomadas de pressão ou vácuo, acopladas a transdutores e registradores.
- f - uso de analisadores de gases em linha acoplados a transdutores e registradores

As tomadas de pressão ou vácuo são acopladas a diafragmas-transdutores e con-
vertem os sinais recebidos em elétricos ou pneumáticos. As tomadas de pressão e tem-
peratura podem fornecer sinais para a sala de controle e, por derivação, para termô-
metros e manômetros, posicionados nas diferentes regiões do equipamento. Assim, os
sinais podem servir ao controle automático (por retro alimentação ou "feed-back") e
ao controle manual.

Nos sistemas ar-sólido (particulados) ocorrem depósitos de pó sobre os poços/
de termopares e os furos de tomadas de pressão. A limpeza, no caso dos termopares,
pode ser por percussão mecânica e, para as tomadas manométricas é possível empre-
gar injeção de ar comprimido bem como percussão mecânica.

Uma solução visual, barata e útil para o controle das pressões e vácuo con-
siste no emprego de colunas d'água em "U" ou inclinadas, aplicáveis aos fornos e ,
filtros de manga para medir e controlar perdas de carga. Usa-se colorir a água com
tintas de registradores ou óleos com densidades conhecidas.

Recomenda-se, para manter a temperatura ideal na zona de queima, controlar a
velocidade do forno, a taxa do combustível, a velocidade do ventilador de tiragem
induzida ou abertura da gelosia em qualquer combinação adequada.

- EQ/CT

DPI

CIMENTO

AZ 16/05/84

75

Esta técnica significa "controlar um forno de trás para diante", é adotada/ em muitos fornos europeus mas permite obter proteção do equipamento e do pessoal , produzir um clínquer bem queimado, manter operação contínua, e estável e produção máxima com máxima eficiência do uso de combustível.

Devido à importância do teor do oxigênio nos gases do forno, emprega-se um analisador de oxigênio automático no seu terminal frio(atrás).

Para indicar o perfil das pressões utilizam-se manômetros no cabeçote(terminal quente, frente) e na saída(atrás). As pressões são muito sensíveis às variações de temperatura, formação de anel e colagem e carga da alimentação, além das mudanças de posição do regulador de tiragem da chaminé; portanto, não podem ser usadas / como elementos de controle direto do forno.

Velocidades elevadas de corrente gasosa na saída podem arrastar muito pó e esta situação é indesejável, pois a corrente gasosa irá resfriar-se e sua densidade aumentará.

7.9. PARTIDA E PARADA DO FORNO

É comum aos profissionais de pouca vivência em fábricas imaginarem que: quanto maior e mais robusto seja um equipamento, mais fácil será sua operação. No entanto, um equipamento de grande porte funcionando em condições árduas pode ser muito / sensível a pequenas variações de temperatura, pressão, vazão de fluidos de aquecimento, resfriamento, etc. Os procedimentos gerais de partida e parada .

Os procedimentos gerais de partida e parada de um forno incluem dados e critérios envolvendo um equipamento operando em altas temperaturas, cujo revestimento interno sobre a ação de dilatação térmica, abrasão e ataques químicos , não podendo sofrer perturbações ou variações bruscas de suas condições operacionais. Podemos admitir que a responsabilidade da operação de um forno industrial de grande porte é análoga a de um computador de elevada capacidade de processamento de dados, pois ambos envolvem anos acumulados de vastos conhecimentos tecnológicos e custos / elevados de construção, manutenção e pessoal especializado. As reações químicas / que ocorrem são sensíveis e variadas.

DPI

CIMENTO

AZ 16/05/84

76

PROCEDIMENTOS GERAIS DE PARTIDA

(VÍDE FIGURA 14)

1. Efetuar inspeção geral dos equipamentos:
 - 1.1. Sistema de alimentação do forno rotatório: pelotizador, filtros, elevadores, roscas transportadoras, balança dosadora, água para pelotizar.
 - 1.2. Óleo lubrificante nos mancais dos rolos de apoio.
 - 1.3. Nível de água de refrigeração nas bacias dos rolos de apoio.
 - 1.4. Óleo combustível e vapor.
 - 1.5. Inspeccionar e testar todos os equipamentos auxiliares: motores, ventiladores, roscas e correias transportadoras, elevadores, esfriador e eletrofiltro.
2. Cobrir o leito da grelha para proteção das placas fundidas.
3. Preparar a tocha embebida em óleo diesel para acender o macarico.
 - 3.1. Circular óleo pela tubulação mantendo aberto o sistema de retorno.
 - 3.2. Passar vapor no macarico para limpeza e prévio aquecimento do mesmo.
 - 3.3. Ligar o ar primário com pressão inicial de, aproximadamente, 0,6 Kg/cm².
 - 3.4. Colocar a tocha (acesa) a frente da ponta do macarico uns 20 cm e injetar o óleo combustível, controlando a vazão, pois esta fase do aquecimento deve ser bem lenta (chama branda).
4. A tampa da chaminé (de alívio) da grelha deverá estar aberta 60% do seu curso.
5. Ligar o ventilador do coletor de pó do resfriador, que auxiliará no controle da chama. A gelosia do ventilador deverá estar com, aproximadamente, 30% de abertura.
6. Quando a chama puder se manter sozinha, retirar a tocha.
7. Após, aproximadamente, 20 minutos da retirada da tocha, girar o forno com 1/4 de volta usando o motor auxiliar. Após 15 minutos girar mais 1/4 de volta. Após 10 minutos mais 1/4 de volta. Após 5 minutos girar outro 1/4 de volta. Durante aproximadamente uma hora, girar 1/4 de volta de 5 em 5 minutos. Girar o forno, com o motor auxiliar, durante aproximadamente duas horas ininterruptamente; a velocidade do motor auxiliar é constante e não varia.
8. Após este período, coloca-se o forno em marcha lenta usando-se o motor elétrico; na sua velocidade mínima. Quando o forno for movimentado pelo motor elétrico deve-se ligar os ventiladores: da aliança, do lado de descarga, do lado da alimentação.
9. Aumentar a vazão do óleo combustível gradativamente.
10. Quando a zona superior de pré-aquecimento alcançar a uma temperatura de aproximadamente 650°C a 700°C, a grelha será movimentada da vagarosamente, alimentando uma pequena quantidade de pelotas ao forno (velocidade mínima).
11. Ligar os ventiladores de tiragem, com as gelosias fechadas: primeiro, liga-se o ventilador 2 e, em seguida, o ventilador 1.
 - 11.1. Ajustar a abertura dos ventiladores de tiragem:
 - ventilador 2... aproximadamente 50% de abertura;
 - ventilador 1... aproximadamente 60% de abertura.
 - 11.2. Fechar a tampa de alívio da chaminé da grelha.
12. Antes de colocar-se a grelha em movimento deve-se:
 - 12.1. avisar ao operador do pelotizador para começar a pelotizar a farinha;
 - 12.2. Ligar o sistema de transporte de pó do eletrofiltro, dos ciclones e, também, o transporte de arraste de pelotas que caem através das aberturas das placas da grelha, ou seja: elevador de silo metálico; roscas; elevador de retorno / da grelha; transportador de arraste e bomba de lubrificação de engrenagem.
13. Quando a temperatura de saída do eletrofiltro (termopar nº 2) alcançar aproximadamente 100°C, pode-se ligar o eletrofiltro.
14. Quando o material calcinado se aproximar da zona de queima, ligar: correias, transportador arrastador de clínquer e resfriador.
15. Quando o clínquer começar a cair no resfriador, liga-se o ventilador de ar secundário e ajusta-se a abertura de sua gelosia em, aproximadamente, 20%.

EQ/CT

DPI

CIMENTO

AZ 16/05/84

77

PROCEDIMENTOS GERAIS DE PARADA

1. Cortar a alimentação.
2. Parar a grelha, carregada de pelotas.
3. Abrir a tampa de alívio da grelha(100%).
4. Fechar as gelosias e parar os ventiladores 1 e 2, respectivamente.
5. Desligar o eletrofiltro.
6. Desligar o sistema de transporte de pó do eletrofiltro, ciclone e do retorno da grelha. Isto é: transportador de arraste, rosca, elevador de retorno da grelha ; roscas; elevador de silo metálico.
7. Quando as temperaturas da grelha aumentarem, principalmente a temperatura da zona/ superior de pré-aquecimento, diminuir a vazão de óleo.
8. Fechar gradativamente as gelosias do ventilador de ar.
9. Após descarga total do forno, cortar o fogo, fechando o registro de alimentação de óleo combustível para maçarico.
 - 9.1. Parar o forno.
 - 9.2. Abrir registro de vapor para maçarico, até notar ausência de inflamação (aproximadamente 5 minutos). O ar primário deve continuar ligado.
 - 9.3. Fechar a linha geral de vapor e parar a bomba de óleo combustível.
 - 9.4. Parar os ventiladores: de ar secundário, do coletor de pó do resfriador, da aliança, do lado da alimentação e do lado de descarga.
10. Após o corte do fogo, o procedimento de resfriamento do forno será:
1ª - girar o forno 1/4 de volta de 5 em 5 minutos; 2ª hora - ídem de 10 em 10 minutos ; 3ª hora - ídem de 15 em 15 minutos; 4ª hora - ídem de 20 em 20 minutos ; 5ª hora - ídem de 25 em 25 minutos; 6ª hora - ídem de 30 em 30 minutos; 7ª hora - ídem de 35 em 35 minutos; 8ª hora - ídem de 40 em 40 minutos; 9ª hora - ídem de 45 em 45 minutos; 10ª hora - ídem de 50 em 50 minutos; 11ª hora - ídem de 55 em 55 minutos; da 12ª hora em diante, o quarto de volta deverá ser de hora em hora, ou interromper a rotação para atender aos trabalhos de manutenção mecânica, limpeza e troca de revestimento.
OBS.: Quando o forno perder sua cor rubro(sem chama), o ar primário deverá ser desligado.
11. Quando o resfriador estiver vazio, desligá-lo.
12. Desligar o britador de clínquer.
13. Quando o transportador-arrastador estiver vazio, desligá-lo.
14. Quando a correia estiver vazia, desligá-la.
OBS.: A descarga da grelha deverá ser feita quando a temperatura da zona superior/ de pré-aquecimento estiver abaixo de 400°C.

- EQ/CT -

DPI

CIMENTO

AZ 16/05/84

78

1. BIBLIOGRAFIA

1. HELMUTH, R.A., MILLER, F.M., O'CONNOR, T.R. e GREENING, N.R.
"Cement"
"Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology", 3rd Ed, Vol 5
John Wiley & Sons, New York, 1979
2. LEA, F.M. e DESCH, C.H.
"The Chemistry of Cement and Concrete"
Edward Arnold, London, 1937
3. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
"Materiais para Concreto e Concreto Armado - Especificações e métodos de Ensaio"
Rio de Janeiro, 1983
4. SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO
"1980/1981" e "1980/1983"
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND
"Simpósio do Cimento no Brasil 1982"
6. BASÍLIO; FRANCISCO DE ASSIS
"Cimento Portland", 4.ed. (ET-28)
ABCP, São Paulo, 1979
7. M. DEDINI S.A. METALÚRGICA
"Fábricas de Cimento"
São Paulo, 1982
8. SECRETARIA DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL DO MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E DO COMÉRCIO
"Subprograma de Apoio Tecnológico em Conservação de Energia e Substituição de Fontes Energéticas Importadas no Setor Cimenteiro"
STI-MIC, Brasília, 1982
9. PLANK, F.H.
"Morteros y Cementos"
"Tecnologia Química - Química Industrial Inorgânica", Tomo I
Editores: Karl Winnacker e Ernst Weingaertner
Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona, 1954
10. SHREVE, R.N. e BRINK, J.R., J.A.
"Indústrias de Processos Químicos", 4^a Ed.
Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980

11. PERAY, K.E. e WADELL J.I.
"The Rotary Cement Kiln"
Chemical Publishing Co., Inc., New York, 1972.
12. PAPANOKIS, M. e VENUAT, M.
"Fabricación, características y aplicaciones de los diversos tipos de cemento"
Editores Técnicos Asociados S.A., Barcelona, 1968
13. KEIL, F.
"Cemento"
Editores Técnicos Asociados S.A., Barcelona, 1973.
14. CHATERJEE, A.K.
"Cement raw materials and raw mixes: Part I"
Pit & Quarry, September 1979, pp. 103-111
15. TAVARES, D. e RIBEIRO, V.N.
"Cimento Portland"
Química, Diretório Acadêmico da Escola Nacional de Química da Universidade do Brasil, 8 (1): 21-27, abril, 1952
16. LEA, F.M.
"The Chemistry of Cement and Concrete", 3rd Ed.
Edward Arnold(Publishers) Ltd. , Glasgow, 1970
17. LABAHN, O.
"Prontuário Del Cemento"
Editores Técnicos Asociados, S.A., Barcelona, 1966.
18. PERAY, K.E.
"Cement Manufacturer's Handbook"
Chemical Publishing Co., Inc., New York, 1979
19. PRYOR, E.J.
"Mineral Processing", 3rd Ed.
Elsevier Publishing Co., Ltd., London, 1965
20. ZAKON, A.
"Métodos Tentativos, Aproximados e Iterativos na Engenharia Química"
Revista Brasileira de Engenharia Química, 5(1):11-20 março, 1981
21. CAETANO, ANTONIO CARLOS
"Fornos rotativos de Cimento; ações de diversas espécies - zona de queima"
Magnesita S.A., Belo Horizonte, 1977.

22. MARCIANO Jr., E.
"Contribuição ao Estado de Incrustações em Fornos de Cimento"
ABCP, Estudo Técnico 46, São Paulo, 1980
23. KIHARA, Y., BATTAGIN, A.F., MARCIANO Jr., E. e SHUKUZAWA, J.K.
"Aptidão à Clinquerização de Farinhas de Cimento"
ABCP, Estudo Técnico 48, São Paulo, 1980
24. BOGUE, R.H., "Calculations of Compounds in Portland Cement"
Industrial and Engineering Chemistry, Anal. Ed., Vol.1, No.4, october 15,
1929, pp. 192-197
25. "Curso de Informação sobre Combustíveis e Combustão"
Instituto Brasileiro de Petróleo, Rio de Janeiro, 1982
26. PERA, H.
"Geradores de Vapor de Água(Caldeiras)"
Deptº Eng. Mecânica. EPUSP, São Paulo, 1966

DPI

CIMENTO

AZ 16/08/84

81

AGRADECIMENTOS:

Pela concretização do estágio
e pela orientação fraterna,
ao
Engº Volney do Nascimento Ribeiro
Diretor da Cimento Irajá S.A.

Pela idéia dos estágios
em indústrias para professores,
ao
Engº Álvaro de Sá
Ex-Presidente da
Associação dos Ex-Alunos da
Escola de Química da UFRJ

Pelo estímulo ao aprimoramento
didático e profissional,
ao
Prof. Bernardo J.G.Mascarenhas
Chefe do Departamento de
Processos Inorgânicos - DPI, da
Escola de Química da UFRJ

Pelo apoio e pelos exemplos
de atuação, competência e
convívio,
aos

Eng. Rakami Pedro Fernandes - Gerente, Deptº Controle de Qualidade
Adm. Olney João Ferri - Gerente, Deptº Produção
Eng. Luís Roberto Giralardi - Gerente, Deptº Manutenção Elétrica
Eng. Sérgio Luís Evangelista - Gerente, Deptº Manutenção Mecânica
Adm. Gilberto José Muniz - Gerente, Deptº Recursos Humanos
Sr. Cícero Barbosa - Encarregado do Laboratório
Sr. Nildo Pereira dos Santos - Analista Químico
Sr. Geraldo Rodrigues - Chefe, Seção de Fornos
Sr. Adolfo Fabrício Barreto Martins - Técnico Químico "Trainee"
Sr. Jorge Guimarães Machado - Desenhista-Projetista

Pela datilografia
à

Srta. Márcia Lucina de Andrade Costa, Secretária do
Departamento de Processos Inorgânicos - DPI, da
Escola de Química da UFRJ

DPI

CIMENTO

AZ 16/08/84

82