

500.01
D 810
100

Dipl. - Ing. Walter H. Duda



MANUAL TECNOLOGICO DEL CEMENTO

Traducido al español por
ANTONIO SARABIA GONZALEZ
Dr. Ingeniero Industrial



editores técnicos asociados, s. a.

Maignón, 26 — Barcelona - 12 — España

1 9 7 7

Este libro es una traducción de la obra alemana del Dipl. - Ing. Walter H. Duda

CEMENT DATA BOOK

Publicada por Bauverlag GmbH - Wiesbaden - Berlín

11.51.57.
© EDITORES TECNICOS ASOCIADOS, S.A.
Barcelona, 1977
Depósito Legal: B. 26.897 - 1977
ISBN 84-7146-095-5

Impreso en España

Printed in Spain

ROMARGRAF, S. A. — Juventud, 55
Hospitalet de Llobregat (Barcelona)

	PROLOGO DEL AUTOR	V
	PROLOGO DEL TRADUCTOR	VII
1.	MATERIAS PRIMAS	1
1.1.	Componente calcáreo	1
1.1.1.	Caliza	1
1.1.2.	Creta	1
1.1.3.	Marga	1
1.2.	Componentes de la arcilla	1
1.3.	Componentes correctores	2
1.4.	Componentes adicionales de las materias primas	3
1.4.1.	Oxido magnésico	3
1.4.2.	Alcalis	3
1.4.3.	Azufre	4
1.4.4.	Cloruros	4
1.4.5.	Contenido en fluoruros	5
1.4.6.	Contenido en fósforo	5
1.5.	Fases minerales del clinker de cemento portland	5
1.6.	Composición potencial del clinker	6
1.7.	Módulos del cemento	8
1.7.1.	Módulo hidráulico	8
1.7.2.	Módulo de silicatos	8
1.7.3.	Módulo de alúmina	8
1.8.	Fórmulas para la cal	9
1.8.1.	Grado de saturación por la cal	9
1.8.2.	Standard de cal.	9
1.9.	Otros módulos	10
2.	CALCULO DE LA COMPOSICION DEL CRUDO	13
2.1.	Método del cálculo cruzado (regla de aligación)	13
2.2.	Cálculo según el módulo hidráulico	13
2.3.	Cálculo a partir del grado de saturación por la cal	14
2.4.	Cálculo con el grado de saturación por la cal y el módulo de silicatos	15
2.5.	Cálculo de las cenizas del carbón absorbidas por el clinker	17
2.6.	Cálculo con cuatro materias primas componentes del crudo	21
2.7.	Cálculo del crudo según el contenido potencial buscado en minerales del clinker	22
2.8.	Contenido en óxidos y composición potencial	25
3.	DESMENUZAMIENTO PRELIMINAR DE LAS MATERIAS PRIMAS	27
3.1.	Métodos y máquinas para el desmenuzamiento	27
3.2.	Revisión sistemática	27
3.3.	Grado de desmenuzamiento	27
3.4.	Creación de superficie y exigencia de energía	28
3.5.	Elección de las dimensiones del triturador	29
3.6.	Triturador de mandíbulas	29
3.7.	Trituradores de cono	36
3.8.	Trituradores giratorios	36
3.9.	Triturador Symons	39
3.10.	Trituradores de rodillos	41
3.11.	Trituradores de martillos	43
3.12.	Triturador por choque	47
3.13.	Trituradores por choque Compound (combinados)	49

4.	DESECACION DE LAS MATERIAS PRIMAS	51
4.1.	Secaderos a contracorriente	51
4.2.	Secaderos con igual dirección del flujo de los gases y del material	51
4.3.	Elección del tambor secadero	51
4.4.	Tipos de humedad	52
4.5.	Intercambio térmico	52
4.6.	Temperaturas	53
4.7.	Caída de presión	53
4.8.	Dispositivos internos del tambor secadero	53
4.9.	Grado de llenado	54
4.10.	Consumo específico de calor	54
4.11.	Balance térmico del secadero de tambor	54
4.12.	Caudal específico de evaporación	55
4.13.	Capacidad (caudal) de los secaderos de tambor	55
4.14.	Combustibles	55
4.15.	Transporte del material en los secaderos de tambor	56
4.16.	Molienda-secado	56
4.16.1.	Molienda-secado en molinos de tubo	57
4.16.2.	Desección en selector por aire	58
4.16.3.	Molienda-secado en molinos barridos por aire	59
4.16.4.	Molienda-secado en molinos por rodadura	60
4.16.5.	Secaderos rápidos	61
4.16.6.	El molino Aerofall utilizado como secadero	61
4.17.	Desección simultaneada con trituración por choque	64
4.18.	Instalación de molienda y secado en tándem	64
4.19.	Molino Doppelrotator	65
4.20.	Desempolvadura en la desección	68
5.	LA MOLIENDA EN LA PRODUCCION DE CEMENTO	71
5.1.	Velocidad crítica de rotación	71
5.2.	Angulo de elevación de las bolas de molienda	72
5.3.	Distribución de los cuerpos moledores en la sección del molino	72
5.4.	Número de choques de las bolas por vuelta	72
5.5.	Número de choques de las bolas contra el material	72
5.6.	Llenado de bolas en los molinos	73
5.7.	Carga total de cuerpos moledores	73
5.8.	Indicaciones para el llenado de los molinos	74
5.9.	Llenado de cuerpos moledores y de material que se ha de moler	75
5.10.	Llenado del molino con cuerpos moledores	75
5.11.	Fórmulas para el tamaño de las bolas de molturación	76
6.	INDICE DEL TRABAJO DE MOLIENDA, SEGUN BOND	79
6.1.	Indice de molturabilidad de Hardgrove	79
6.2.	Fórmula de Starke	80
6.3.	Potencia exigida por los molinos	80
6.4.	Superficie específica y tamaño de grano (por la ecuación de Bond)	81
6.5.	Conversión a molienda en circuito abierto	82
6.6.	Caudal de los molinos de bolas	82
6.6.1.	Cálculo del caudal según la fórmula de Towarow	82
6.6.2.	Según Jacob	83
6.7.	Exigencias de potencia de los distintos sistemas de molienda	84
7.	DATOS ACERCA DE LAS BOLAS PARA MOLIENDA	85
7.1.	Información acerca de las bolas para molienda (unidades habituales en EE.UU.)	85

7.2.	Composición química de las bolas para molienda	85
7.3.	Dureza de las bolas para molienda, de acero aleado, forjadas	86
7.4.	Desgaste del material metálico en la molienda	86
7.4.1.	Reacciones mecanoquímicas	86
7.5.	Desgaste de las bolas para molienda	86
7.6.	Material Ni-Hard en la molienda	88
7.7.	Velocidad lineal de desgaste del acero al cromo-molibdeno/hora de molienda en μm	88
7.7.1.	Desgaste específico	89
7.7.2.	Mejora del desgaste específico de los cuerpos de molienda	89
7.7.3.	Desgaste de las bolas para molienda con alta resistencia al desgaste (59 Rc) en molinos de cemento en circuito abierto	89
7.7.4.	Valores del desgaste específico de material no aleado, para molinos de cemento	90
7.7.5.	Valores del desgaste específico de las bolas de acero de elevada dureza en los molinos de cemento	90
8.	ACCIONAMIENTO DE LOS MOLINOS	93
8.1.	Diversos tipos de accionamientos centrales	93
8.2.	Diversos tipos de accionamientos por corona y piñón	93
8.2.1.	Dimensionado de motores para molinos	94
8.3.	Accionamiento de molinos de tubo sin reductores	94
8.4.	Accionamiento central con reductor planetario en dos escalones	96
9.	DIMENSIONES OPTIMAS DEL TUBO DE UN MOLINO	101
9.1.	Espesor de la chapa del tubo del molino	101
9.2.	Tubos de molinos. Normas	101
9.3.	Frentes de los molinos	102
9.4.	Soportes de los molinos	102
9.5.	Refrigeración de los apoyos de los molinos de tubo	104
9.6.	Superficies de las placas de blindaje de los molinos	104
9.7.	Fijación de las placas de blindaje	104
9.8.	Diafragmas para dividir el molino en cámaras	105
9.9.	Superficie activa de los diafragmas	106
9.10.	Anillos de retención	107
9.11.	Tiempo de permanencia del material en los molinos de tubo	108
9.12.	Puesta en marcha de molinos de tubo nuevos	108
10.	MOLIENDA DE CEMENTO	109
10.1.	Superficie específica según Wagner y Blaine	110
10.2.	Coadyuvantes (aditivos) de la molienda	111
10.3.	Formación de películas en los cuerpos moledores	111
10.4.	Influencia de la composición química y potencial sobre la molturabilidad	112
10.5.	Influencia de la humedad sobre el proceso de molienda	114
10.6.	Molienda y generación de calor	114
10.7.	Refrigeración durante la molienda del cemento	115
10.7.1.	Aireación del molino	115
10.7.2.	Refrigeración por agua de la chapa del molino	115
10.7.3.	Inyección de agua en el molino	115
10.7.4.	Ejemplos numéricos	116
10.7.5.	Refrigeración del cemento en separadores por aire	117
10.7.6.	Refrigeración del cemento en el enfriador Fuller para cemento	119
10.7.7.	Tamaños de enfriadores de cemento	119

11.	VOLUMEN ESPECIFICO DEL MOLINO Y POTENCIA REQUERIDA .	121
11.1.	Relación L/D de los molinos de tubo y potencia requerida	121
11.2.	Diámetro de los molinos de tubo y potencia requerida	121
11.3.	Costes de inversión de los molinos de tubo	122
11.4.	Datos técnicos de instalaciones de molienda	123
11.5.	Tamaño de los molinos de tubo	126
11.6.	Datos técnicos de algunos molinos de cemento instalados en la URSS y en la República Democrática Alemana (molinos en circuito abierto) . .	126
12.	MOLIENDA EN CIRCUITO CERRADO	127
12.1.	Comparación de la capacidad de caudales de los molinos	129
12.2.	Superficie edificada para instalaciones de molienda	129
12.3.	Examen de los molinos en circuitos abierto y cerrado	130
13.	MOLINOS POR RODILLOS	131
13.1.	Molino de rodillos Loesche	131
13.2.	Molinos de anillos de bolas (molino Peters)	133
13.3.	Molino Raymond de rodillos comprimidos por muelles	134
13.4.	Molino de rodillos y solera móvil MPS	135
13.5.	Molino de rodadura Polysius	136
14.	MÉTODOS DE MOLIENDA EN PERIODO DE DESARROLLO O ESTUDIO	139
14.1.	Molino de bolas planetario	139
14.2.	Desmenuzamiento con chispas explosivas	141
15.	SEPARADORES POR AIRE	143
15.1.	Relaciones dimensionales en los separadores por aire convencionales .	145
15.2.	Tamaños de los separadores por aire	145
15.3.	Consumo específico de energía de los separadores por aire	146
15.4.	Separadores por aire con velocidad angular controlada en el ventilador auxiliar	146
15.5.	Tamaños y capacidades de producción de los separadores con velocidad controlada	146
15.6.	Valores de la carga circulante y finura del cemento	147
15.6.a.	Turboseparador por aire, tipo TSU (Polysius)	147
15.7.	Caudales de los separadores por aire y finura del cemento	148
15.8.	Fórmulas en los separadores por aire	148
15.8.1.	Circuito cerrado, sistema nº 1	149
15.8.2.	Circuito cerrado, sistema nº 2	150
15.8.3.	Determinación de la fracción fina en el material terminado	151
15.8.4.	Circuito cerrado, sistema nº 2, con dos separadores por aire	151
15.9.	Cantidad de aire en los separadores	152
16.	MOLIENDA POR VIA HUMEDA EN CIRCUITO CERRADO	155
16.1.	Ejemplos de realizaciones con cribas DSM	156
16.2.	Esquema de molienda con criba DSM	157
16.3.	Criba DSM en explotación	157
16.4.	Pasta cruda para cemento	158
16.a.	PREHOMOGENEIZACION	161
17.	HOMOGENEIZACION NEUMATICA DEL CRUDO	167
17.1.	Proceso Fuller	167
17.2.	Sistema de homogeneización Polysius	169

17.3.	Proceso de homogeneización por franjas (de la VEB Zement Anlage)	170
17.4.	Proceso Geyser	170
17.5.	Proceso Möller de corriente en cizalla	170
17.6.	Sistema IBAU de cámara central	170
18.	COMBUSTIBLES EN LA INDUSTRIA DEL CEMENTO	173
18.1.	Combustibles sólidos. Carbón	176
18.1.1.	Componentes volátiles	177
18.1.2.	Análisis del carbón	177
18.1.3.	Poder calorífico	177
18.1.4.	Poder calorífico y consumo de calor	178
18.1.5.	Reacciones termoquímicas y volúmenes de gases	178
18.1.6.	Temperatura de ignición del carbón	179
18.1.7.	Tiempo de combustión	180
18.1.8.	Transmisión de calor en la llama del polvo de carbón	180
18.1.9.	Gases de combustión	180
18.1.10.	Preparación del carbón	181
18.1.11.	Desecación del carbón	182
18.1.12.	Molienda del carbón	182
18.1.13.	Modo de explotación de los molinos de carbón	182
18.1.13.1.	Molino para inyección directa del carbón	182
18.1.13.2.	Instalación central de molienda de carbón	184
18.2.	Combustibles líquidos. Fuel-oil	184
18.2.1.	Viscosidad	184
18.2.2.	Peso específico	185
18.2.3.	Poder calorífico	188
18.2.4.	Temperatura de las llamas	188
18.2.5.	Preparación previa del fuel-oil	189
18.2.6.	Combustión del fuel-oil	191
18.2.7.	Nebulización del fuel-oil	192
18.2.8.	Comparación del carbón con el fuel-oil	192
18.3.	Combustibles gaseosos. Gas natural	193
18.3.1.	Poder calorífico	194
18.3.2.	Temperatura de la llama	195
18.3.3.	Volumen de los gases de combustión	195
18.3.4.	Combustión del gas natural	197
18.3.5.	Volumen de los gases de combustión del carbón, fuel-oil y gas natural	198
19.	EL HORNO ROTATORIO	199
19.1.	Tipos de horno rotatorio	200
19.1.1.	Grado de llenado del horno	201
19.1.2.	Pendiente del horno	201
19.1.3.	Designación para la pendiente de los hornos rotatorios	202
19.1.4.	Velocidad angular (número de vueltas) del horno rotatorio	203
19.1.5.	Transporte del material en el horno rotatorio	203
19.1.6.	Cálculo de la energía eléctrica necesaria para accionar el horno	204
19.1.7.	Dilatación térmica del horno	207
19.1.8.	Zonas del horno rotatorio	207
19.1.9.	Dispositivos para estanqueidad al aire en los hornos rotatorios	208
19.2.	Calefacción por combustión en el horno rotatorio	211
19.2.1.	Disposición del mechero	211
19.2.2.	Quemador de polvo de carbón	212
19.2.3.	Mechero para fuel-oil	213
19.2.3.1.	Atomizador por presión	213

19.2.3.2.	Otro tipo de atomizador del fuel-oil por presión	214
19.2.3.3.	Quemador con retorno de fuel-oil	214
19.2.3.4.	Quemador de fuel-oil a presión y con aire comprimido	214
19.2.3.5.	Quemador ultrasónico	214
19.2.4.	Quemador de gas natural	215
19.3.	Proceso de preparación del material que se ha de cocer en el horno rotatorio	216
19.3.1.	Comparación entre los procesos por vía seca y húmeda	216
19.3.2.	Caudal del horno rotatorio	218
19.3.2.1.	Hornos largos para vía húmeda	219
19.3.2.2.	Datos acerca de hornos rotatorios, vía húmeda, de la URSS	221
19.4.	Eliminación de agua en las pastas	222
19.4.1.	Eliminación del agua por vía química en las pastas	222
19.4.2.	Eliminación del agua por vía mecánica	223
19.4.2.1.	Cadenas en el interior del horno	223
19.4.3.	Dispositivos internos en hornos para vía húmeda	226
19.4.3.1.	Precalentadores de pasta	226
19.4.3.2.	Secadores de pasta	227
19.4.4.	Intercambiadores externos para hornos vía húmeda	227
19.5.	Hornos largos para vía seca	229
19.5.1.	Dispositivos internos de cerámica	230
19.5.2.	Ladrillos y listones elevadores de material en el horno	231
19.5.3.	Intercambiador de calor de un solo tramo	231
19.5.4.	Dimensiones y cifras de caudales	231
19.6.	Refrigeración del cilindro de chapa del horno rotatorio	233
19.7.	Enfriamiento de los gases residuales del horno	234
19.8.	Horno Lepol	235
20.	EL INTERCAMBIADOR DE CALOR POR SUSPENSIÓN DEL CRUDO EN LOS GASES	239
20.1.	Primera patente del intercambiador de ciclones	239
20.2.	Intercambiador de ciclones Humboldt	240
20.2.1.	Tamaño de las partículas y su precipitación	240
20.2.2.	Tamaño de las partículas y tiempo necesario para su calefacción	240
20.2.3.	Dimensiones de los ciclones del intercambiador	241
20.2.4.	Transmisión del calor en el intercambiador de ciclones	241
20.2.5.	Temperatura de los gases y del material	242
20.2.6.	Carga específica de caudal en el horno: Grado de descarbonatación	242
20.3.	Intercambiador de ciclones soviético	242
20.4.	Consumo específico de calor y exigencia de energía eléctrica	243
20.5.	Balance térmico	244
20.6.	Sistema intercambiador con bypass	244
20.6.1.	Contenido de álcalis en el cemento y áridos para hormigón	244
20.6.2.	Álcalis en el proceso de cocción; circuito de los álcalis	244
20.6.3.	Volatilidad de los álcalis	245
20.6.4.	Cálculo de la magnitud del circuito de los álcalis	246
20.6.5.	Tipos de instalaciones con bypass	248
20.7.	Intercambiadores de ciclones de dos y de cinco tramos	249
20.8.	Diversos sistemas de intercambiadores de calor	250
20.8.1.	Intercambiador Dopol de Polysius	250
20.8.2.	Intercambiador Miag de calor para crudo	251
20.8.3.	Intercambiador Wedag por suspensión de polvo en la vena gaseosa	251
20.8.4.	Intercambiador Krupp a contracorriente	253
20.8.5.	Intercambiador Prerau a contracorriente, de la Prerau Maschinenfabrik, Checoslovaquia	254

20.9.	Intercambiadores con precalcinador	255
20.9.1.	Intercambiador SF	255
20.9.2.	Intercambiador de calor MFC	259
20.9.3.	Intercambiador RSP	260
20.9.4.	Proceso de precalcinación Polysius	261
21.	ENFRIAMIENTO DEL CLINKER	265
21.1.	Velocidad de enfriamiento del clinker	265
21.2.	Estabilidad de volumen y enfriamiento del clinker	265
21.3.	Enfriamiento del clinker y capacidad de resistencia a la agresión química	265
21.4.	Enfriamiento y molturabilidad del clinker	266
22.	ENFRIADORES DE CLINKER	267
22.1.	Enfriador de tambor rotatorio	267
22.2.	Enfriador planetario: construcción antigua	268
22.3.	Enfriador planetario: construcción moderna	269
22.3.1.	Volumen del enfriador y caudal del horno	270
22.3.2.	Diámetro del horno y enfriador planetario	270
22.3.3.	Elementos de elevación en los enfriadores planetarios	271
22.3.4.	Balance térmico de los enfriadores planetarios	272
22.3.5.	Enfriadores planetarios: accionamiento y consumo de energía	272
22.4.	Enfriador de parrilla	273
22.4.1.	Enfriador de parrilla Fuller	273
22.4.2.	Enfriador Fuller "combinación"	274
22.4.3.	Conexión Duotherm	276
22.4.4.	Designación del tamaño de los enfriadores Fuller	277
22.4.5.	Balance térmico de los enfriadores Fuller	277
22.4.6.	Rendimiento del enfriador	277
22.5.	Otros enfriadores de parrilla	277
22.5.1.	Enfriador Recupol de Polysius	278
22.6.	Enfriador de cuba (vertical)	280
23.	REVESTIMIENTO INTERNO DEL HORNO	283
23.1.	Resistencia mecánica	283
23.2.	Poder refractario	283
23.3.	Estabilidad ante los cambios de temperatura	284
23.4.	Capacidad de resistencia química	284
23.5.	Dilatación por el calor o estabilidad de volumen	285
23.6.	Conductividad térmica	285
23.7.	Resistencia al rozamiento	286
23.8.	Porosidad	287
23.9.	Colocación del revestimiento de refractario	287
23.9.1.	Ejemplos de colocación de ladrillos en los hornos rotatorios	290
24.	DESEMPOLVADURA	291
24.1.	Clases de polvo	291
24.2.	Cifras de partida acerca de las cantidades de aire a efectos de desempolvadura	292
24.3.	Contenido de polvo en el aire y gases residuales de la industria del cemento. Valores de orientación para la desempolvadura	293
24.4.	Cifras de partida acerca de la distribución granulométrica de los polvos de la industria del cemento	294
24.5.	Normas referentes al mantenimiento de la limpieza del aire	294
24.6.	Tipos de desempolvadores	297

24.6.1.	Cámaras de sedimentación de polvo	297
24.6.2.	Ciclones	298
24.6.3.	Ciclones múltiples o multiciclones	299
24.6.4.	Filtros de tejidos	299
24.6.5.	Filtros de tejidos de vidrio	301
24.6.6.	Filtros de lechos de gravillas	304
24.6.7.	Filtros electrostáticos	305
	Bibliografía	307
	Índice de autores	317
	Índice alfabético	321