

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

© 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)

Prólogo del autor

La meta propuesta en la elaboración de este libro de datos para la industria del cemento era lograr una descripción, lo más general y concisa posible, de los métodos de fabricación, de las máquinas y de los dispositivos e instalaciones que hoy se aplican internacionalmente. Para lograrlo se ha concedido mayor importancia a los datos numéricos, diagramas y tablas de valores. Con esta limitación a lo más importante, el ingeniero dedicado al cemento dispondrá de bases válidas para su constante y rápida consulta.

Se ha prescindido de valorar los procesos, ya que es completamente imposible hacerlo desde un punto de vista internacional, pues los procesos e instalaciones de fabricación que en algunos países se han llegado a acreditar y han sido considerados como los ideales, no pueden ser aplicados en otros países de condiciones geográficas, técnicas y económicas distintas, como tampoco podrán ser empleados por fábricas de distinta capacidad de producción.

Por lo tanto, únicamente hemos considerado las propiedades cuyos límites y campos de aplicación son considerados igual por todo el mundo.

Tampoco se han tenido en cuenta los métodos de proceso sin futuro cierto, y asimismo hemos prestado poca atención a los procesos que están dando sus primeros pasos, ya que no hemos querido prejuzgar una serie de conocimientos que hasta el momento carecen de fundamento fijo, aunque se espera obtenerlos dentro de algún tiempo.

Por el contrario, las fuentes anglosajonas, alemanas y eslavas, sí se han valorado. También se han tomado en consideración las fuentes francesas y japonesas.

Sin duda, este libro promoverá el intercambio de experiencias a escala internacional, puesto que se consultarán datos, métodos de cálculo, etc., que quizás a causa de dificultades idiomáticas sólo se conocían hasta el momento en determinados países.

Correspondiendo a la situación crítica actual de la energía a escala mundial, el capítulo *Combustibles en la industria del cemento* se trata detalladamente. Es de esperar que el carbón habrá de sustituir en muchas ocasiones al fuel-oil y, por ello, también se trata de modo exhaustivo; lo mismo puede decirse de los hogares a carbón pulverizado.

La sección *Métodos de molienda en estado de desarrollo* se ha concebido como una sugerencia para un eventual desarrollo del proceso de molienda con economía de energía.

Finalmente, deseo expresar mi agradecimiento a las Firmas que han puesto a mi disposición material numérico o gráfico. Igualmente he de agradecer al bibliotecario George Yashur, M.L.S. por su valiosa ayuda bibliográfica. Debo también agradecimiento a mi esposa Helena por su voluntaria renuncia a varios viajes de fin de semana, lo cual me hizo posible trabajar en este libro al mismo tiempo que realizaba mi trabajo profesional.

Walter H. Duda

Allentown, Pennsylvania

Prólogo del traductor

MANUAL TECNOLÓGICO DEL CEMENTO es la versión española de la obra alemana CEMENT DATA BOOK, de la que es autor el prestigioso ingeniero W.H. Duda.

En el prólogo del autor, que antecede, están expuestas, de modo muy concreto, las motivaciones y las metas pretendidas de su trabajo, respectivamente justificadas y plenamente logradas a juicio nuestro.

Nos parece de gran valor el importante caudal de información contenido en la obra para toda persona que dedique su actividad profesional al quehacer cementero, tanto desde el ángulo de la operación directa en la fabricación del portland, como de su planteamiento teórico, investigación o estudio y realización del dispositivo fabril en que se apoya.

Ofrece la panorámica del nivel alcanzado y aceptado a escala internacional como óptimo, en la ejecución de tramos básicos de una tecnología que, a partir del hallazgo de Apsdín, ha ido incorporando, en su devenir a lo largo de ya siglo y medio, los resultados logrados por la labor ingente de una verdadera legión de estudiosos con capacidad creadora, en campos muy diversos.

La información, puede decirse que exhaustiva para cada tema tratado, selectivamente recogida por Duda, expuesta con claridad y marcado acento didáctico, mediante reiterados ejemplos de su aplicación, abarca no sólo las aportaciones teórico-experimentales de científicos y técnicos sino también, con plausible pragmatismo, las realizaciones de las firmas fabricantes de maquinaria cuya fiabilidad está respaldada por el mercado que las sostiene en actividad. Subrayamos también como complemento valioso las referencias bibliográficas de la obra, con sus posibilidades de ampliación informativa.

Todo ello, unido a la impresionante cuantía de datos numéricos, insertos en el texto (tablas de valores, gráficas, etc.) confiere al libro de Duda el carácter de vademécum utilísimo puesto al día y de cómoda manipulación.

Nuestra humilde colaboración de traductor a la edición española de tan interesante trabajo quedaría muy satisfactoriamente premiada si, con ella, hubiéramos ayudado a facilitar el acceso a su rico contenido a los colegas en el quehacer cementero de habla española.

Antonio Sarabia

Indice de materias

	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.	Tritrador de mandíbulas	29
3.7.	Trituradores de cono	36
3.8.	Trituradores giratorios	36
3.9.	Tritrador Symons	39
3.10.	Trituradores de rodillos	41
3.11.	Trituradores de martillos	43
3.12.	Tritrador 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.	Deseccación 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.	Deseccación 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 deseccación	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.	METODOS 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 n° 1	149
15.8.2.	Circuito cerrado, sistema n° 2	150
15.8.3.	Determinación de la fracción fina en el material terminado	151
15.8.4.	Circuito cerrado, sistema n° 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 Geysler	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.	Pre calentadores 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

1. Materias primas

Para fabricar cemento pueden utilizarse tanto minerales de origen natural como productos industriales. Como materiales de partida sirven sustancias minerales, que contienen los componentes principales del cemento: cal, sílice, alúmina y óxidos de hierro. Estos componentes raramente se encuentran en las proporciones deseadas, en una sola sustancia. Por tanto, la mayoría de las veces se ha de elegir la mezcla de un componente rico en cal (componente calcáreo) con otro pobre en cal pero que contiene más alúmina y óxidos de hierro (componente arcilloso). Estos dos componentes son, por regla general, la caliza y la arcilla o la caliza y la marga.

1.1. Componente calcáreo

1.1.1. Caliza

El carbonato cálcico (CaCO_3) abunda en la naturaleza. Para fabricar cemento portland es adecuado el procedente de todas las formaciones geológicas. Las formas más puras de la caliza son el espatocalizo (calcita) y el aragonito. El espatocalizo cristaliza en el sistema hexagonal y el aragonito, en el rómbico. El peso específico del espatocalizo es 2.70 y el del aragonito 2.95. Una variedad de espatocalizo, de grano macroscópico, es el mármol. Sería antieconómico emplear mármol para fabricar cemento.

Las formas más comunes del carbonato cálcico y más parecidas al mármol están constituidas por la caliza y la creta. La caliza posee, por lo general, estructura cristalina de grano fino. La dureza de la caliza viene determinada por su edad geológica; cuanto más antigua es la formación tanto más dura suele ser la caliza. La dureza de la caliza está comprendida entre 1.8 y 3.0 de la escala de Mohs; su peso específico varía de 2.6 a 2.8. Solamente los yacimientos de caliza muy pura son de color blanco.

Usualmente la caliza contiene otros materiales pertenecientes a sustancias arcillosas o a minerales de hierro que influyen en su color.

1.1.2. La creta es una roca sedimentaria, formada durante el cretácico y geológicamente es, en cierto modo, joven. En oposición a la caliza, la creta posee una estructura suelta, térrea; esta propiedad califica a la creta, de modo especial, para la fabricación del cemento por vía húmeda. Como la extracción de la creta no exige explosivos ni tampoco se ha de triturar, el coste de este componente disminuye de modo considerable el de la fabricación del cemento. En algunos yacimientos el contenido en carbonato cálcico de la creta llega al 98-99 % con adiciones de poca monta de SiO_2 , Al_2O_3 y MgCO_3 .

En el crudo para cemento el componente calcáreo alcanza una cuantía del 76-80 %. Por consiguiente, las propie-

dades físicas de este componente tienen una influencia decisiva en la elección del proceso de fabricación del cemento y de los dispositivos de su realización.

1.1.3. Marga. A las calizas que van acompañadas de sílice y de productos arcillosos, así como de óxido de hierro, se les llama margas. Las margas forman el paso de transición a las arcillas. Debido a su abundancia, las margas se utilizan con mucha frecuencia como materia prima para la fabricación de cemento.

Geológicamente, son rocas sedimentarias originadas por la deposición simultánea de carbonato de calcio y de material arcilloso. La dureza de la marga es menor que la de la caliza; cuanto más elevada es su concentración en material arcilloso, tanto menos dura se presenta. A veces, las margas contienen sustancias bituminosas. El color de la marga depende del material arcilloso que contiene y varía desde el amarillo hasta el gris oscuro. Las margas son un excelente material para la fabricación de cemento, puesto que contienen el material calcáreo y arcilloso en estado homogeneizado. Las margas calcáreas, cuya composición coincide con el crudo del cemento portland, hallan aplicación en la fabricación del llamado cemento natural. Sin embargo, es raro hallar yacimientos de tales materias primas. Según las relaciones entre componentes calcáreos y arcillosos en las materias primas podemos distinguir:

Tabla 1.1.3.1.

	CaCO_3 Contenido
Caliza de alto porcentaje	96 - 100 %
Caliza margosa	90 - 96 %
Marga calcárea	75 - 90 %
Marga	40 - 75 %
Marga arcillosa	10 - 40 %
Arcilla margosa	4 - 10 %
Arcilla	0 - 4 %

En la tabla 1.1.3.2. se indica la composición química de diversas calizas y margas empleadas en la fabricación de cemento.

1.2. Componentes de la arcilla

La segunda materia prima importante para la fabricación de cemento es la arcilla. Las arcillas, en esencia, son productos de meteorización de silicatos de los metales alcalinos y alcalinotérreos, en particular de los feldespatos y micas.

1. Materias primas

Tabla 1.1.3.2.

	1	2	3	4	5	6	7
Componente %	Caliza	Caliza	Caliza	Caliza	Marga	Marga	Marga
SiO ₂	3.76	6.75	4.91	4.74	27.98	33.20	21.32
Al ₂ O ₃	1.10	0.71	1.28	2.00	10.87	8.22	4.14
Fe ₂ O ₃	0.66	1.47	0.66	0.36	3.08	4.90	1.64
CaO	52.46	49.80	51.55	51.30	30.12	27.30	39.32
MgO	1.23	1.48	0.63	0.30	1.95	1.02	0.75
K ₂ O	0.18	Indicios	Indicios	0.16	0.20	0.12	0.06
Na ₂ O	0.22	Indicios	Indicios	0.28	0.33	0.18	0.08
SO ₃	0.01	1.10	0.21	—	0.70	0.37	—
Pérdida al rojo	40.38	39.65	40.76	40.86	24.68	24.59	32.62
Suma	100.00	99.96	100.00	100.00	99.91	99.90	99.93

La parte principal de las arcillas está formada por hidrosilicatos de alumina. Las arcillas se clasifican en los siguientes grupos de minerales [6]:

Grupo del caolín

Caolinita	$Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2 \cdot 2 H_2O$
Dickita	$Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2 \cdot 2 H_2O$
Nacrita	$Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2 \cdot 2 H_2O$
Halloysita	$Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2 \cdot 2 H_2O$

Grupo de la montmorillonita

Montmorillonita	$Al_2O_3 \cdot 4 SiO_2 \cdot H_2O + nH_2O$
Beidellita	$Al_2O_3 \cdot 3 SiO_2 \cdot nH_2O$
Nontronita	$(Al, Fe)_2O_3 \cdot 3 SiO_2 \cdot nH_2O$
Saponita	$2 MgO \cdot 3 SiO_2 \cdot nH_2O$

Grupo de las arcillas que contienen metales alcalinos o alcalinotérreos

Micas arcillosas, incluida la illita	{ $K_2O-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ en cantidades variables
--------------------------------------	---

Los minerales del grupo del caolín se distinguen por su diferente riqueza en SiO₂, así como por su estructura cristalográfica y sus propiedades ópticas. La denominación de caolinita se aplica al mineral caolín puro. Los minerales de la arcilla tienen textura de grano fino; el tamaño de grano queda por debajo de las 2 micras de diámetro.

Las superficies específicas de los minerales de la arcilla son [7]:

Caolín	aproximadamente 15 m ² /g
Halloysita	aproximadamente 43 m ² /g
Illita	aproximadamente 100 m ² /g
Montmorillonita	aproximadamente 800 m ² /g

Los pesos específicos son, respectivamente [8]:

Caolín	2.60 - 2.68
Halloysita	2.00 - 2.20
Illita	2.76 - 3.00

El punto de fusión de las arcillas se halla entre los límites de 1150°C hasta 1785°C (conos Seger nº 1 hasta 35).

La composición química de las arcillas varía desde aquellas que se aproximan a los minerales puros de la arcilla hasta las que contienen agregados de hidróxido de hierro, sulfuro de hierro, arena, carbonato de calcio, etc. El hidróxido de hierro es el componente coloreante más frecuente de las arcillas. También pueden prestarle distintas coloraciones las sustancias orgánicas. La arcilla sin impurezas es blanca. La principal fuente de álcalis en los cementos es el componente arcilloso del crudo.

En la tabla 1.2.1. se indica la composición química de diferentes arcillas que se utilizan en la fabricación de cemento.

1.3. Componentes correctores

Los componentes correctores se añaden en los casos en que las materias primas disponibles no contienen en cantidad suficiente uno de los químicamente necesarios en el crudo. Así, se aplica, por ejemplo, arena como material adicional para elevar el contenido en anhídrido silícico, o también arcillas de muy alto contenido en SiO₂ o bien kieselgur. Si carecen de los suficientes óxidos de hierro se utilizan como correctores minerales de hierro o cenizas de la tostación de piritas.

En la tabla 1.3.1. se indica la composición de algunos materiales correctores.

Tabla 1.2.1. Composición química de arcillas

Componente %	Arcilla 1	Arcilla 2	Arcilla 3	Arcilla 4
Pérdida al rojo	7.19	8.67	10.40	6.40
SiO ₂	67.29	62.56	52.30	60.10
Al ₂ O ₃	8.97	15.77	24.70	18.00
Fe ₂ O ₃	4.28	4.47	6.10	8.20
CaO	7.27	4.80	4.40	0.80
MgO	1.97	1.38	0.10	0.20
SO ₃	0.32	—	1.10	3.80
K ₂ O	1.20	} 2.35 }	} 0.80 }	} 2.50 }
Na ₂ O	1.51			
Suma	100.00	100.00	99.90	100.00

1.4. Componentes adicionales de las materias primas

En este epígrafe se reseñan aquellos materiales cuyas cuantías están condicionadas por normas legales o por valores obtenidos experimentalmente.

1.4.1. Óxido magnésico

Este está combinado hasta un 2 % en las fases principales del clínker, más allá de esta cifra aparece como MgO (periclasa) en el clínker. La periclasa se transforma con el agua en Mg(OH)₂; MgO + H₂O = Mg(OH)₂, pero la reacción discurre muy lentamente, cuando las restantes reacciones de endurecimiento ya han concluido. Como el Mg(OH)₂ adquiere mayor volumen que el MgO, en el punto en que está situado el gránulo de periclasa, puede hacer saltar la estructura de la roca de cemento y originar grietas (expansión por la magnesia); véase también la sección 21.2.

Por lo general, el MgO se encuentra en la caliza como dolomita (CaCO₃ · MgCO₃).

También las escorias de horno alto contienen a veces mucho MgO. Si se eligen tales escorias como materia prima para la fabricación de cemento hay que prestar atención a que el contenido de MgO en el clínker permanezca dentro de los límites permisibles (véase el ejemplo 2.5 en la tabla 2.5.).

1.4.2. Alcalis

Los K₂O y Na₂O proceden principalmente de los materiales margosos y arcillosos en que están presentes en forma de inclusiones finamente dispersas en el seno de los feldespatos, de los restos de mica y del mineral illita, y en pequeña cuantía, cuando se aplican combustibles sólidos en las cenizas del carbón [139, 245, 7a]. En la Europa central, el contenido en K₂O es un múltiplo del Na₂O presente; en otras regiones, por ejemplo, los Esta-

Tabla 1.3.1. Composición química de componentes correctores

Componente %	Diatomeas	Bauxita	Cenizas pirita	Mineral de hierro	Polvo de tragante de h. alto	Cenizas volantes	Arena
Pérdida al rojo	6.2	15-20	—	5-12	5-15	0.2-4.0	0.2
SiO ₂	77.0	16-22	6.6-25.0	20-25	11-22	26-36	99.2
Al ₂ O ₃	} 9.6	44-58	2-16	3-9	5-14	6.5-9.5	—
Fe ₂ O ₃		10-16	62-87	45-60	54-69	5-8	0.5
CaO	0.3	2-4	0.7-0.9	0.5-2.5	1-9	42-50	—
MgO	0.9	0.2-1.0	0.2-2	1.5-7	0.5-2.5	3-4	—
SO ₃	—	—	0.8-8	0.3-0.6	0.2-2.5	2.5-3	—
Na ₂ O	} 1.5	—	—	—	—	0.8-3.5	—
K ₂ O		—	—	—	—	—	—

dos Unidos, es superior el contenido en Na_2O (véanse las tablas 1.1.3.2. y 1.2.1.). En la cocción del cemento en el horno rotatorio se volatiliza una parte de los álcalis en la zona de sinterización y da lugar a un ciclo cerrado de álcalis (véase más adelante en 1.4.3., 20.6.1., 20.6.2. y 20.6.3.).

En algunas comarcas de los Estados Unidos, Dinamarca y Alemania del Norte, ciertos agregados (gravas, gravillas) de los empleados para preparar el hormigón, contienen componentes sensibles a los álcalis, por ejemplo el ópalo (sílice hidratada que reacciona con los álcalis del cemento, los cuales, en condiciones dadas, pueden dar lugar a fenómenos de expansión por los álcalis). De acuerdo con la práctica, la expansión por los álcalis se evita si, en el caso de agregados sensibles, los álcalis en el cemento aplicado no rebasan el 0.6 % contándolos, a efectos de aquéllos, como Na_2O (peso de Na_2O + 0.659 % el peso de K_2O). Emparejada con las especificaciones de otros países, en Alemania se ha introducido la limitación del 0.6 % en peso equivalente para el Na_2O pero solamente para el cemento portland; en los cementos de horno alto se ha demostrado que los límites para el contenido permisible de álcalis pueden ser más elevados; y como consecuencia de ello, para un "cemento con bajo contenido de álcalis activos" (Zement-NA), con un contenido por lo menos de 50 % de escorias, el límite para el máximo de álcalis, en total, es del 0.9 % y para, por lo menos, 65 % de escorias, el límite total para los álcalis es de 2.0 % [7b].

En aquellos casos en que es exigible un "Zement-NA", pero en los que el contenido en álcalis del clínker obtenible de las materias primas disponibles rebasa el límite permitido, mediante exhaustor aparte, hay que retirar una fracción de los gases del horno antes de su entrada en el intercambiador de calor para que, con ello, sea eliminada parte de los álcalis vaporizados. Más detalladamente, véase 20.6.1. hasta 20.6.4.

1.4.3. Azufre

Se suele presentar combinado como sulfuro (pirita y marcasita FeS_2) en casi todas las materias primas para cemento. Fueron investigados más de 90 yacimientos calcáreos alemanes, los cuales mostraron un contenido total de azufre (combinado en forma de sulfatos y sulfitos), con un máximo del 0.16 % de S, y en 67 depósitos de arcilla; la media fue de 0.22 % de S. Los combustibles contienen cantidades muy variables de azufre, desde cero para el gas natural hasta un 3.5 % para el fuel-oil pesado. Los carbones del Ruhr tienen, de media, un 1.1 % de S [1]. De una investigación de 21 hornos de cemento alemanes con intercambiador, se dedujo que el crudo aportaba cantidades de azufre que variaban de 0.5 g hasta 11 g

SO_3/kg de clínker. Con el combustible, aplicando fuel-oil pesado, particularmente rico en azufre, a lo sumo 6 g de SO_3/kg de clínker [7a, 139].

A partir del azufre del combustible y del crudo se genera por combustión y se vaporiza, respectivamente, SO_2 gaseoso, el cual se combina con los álcalis volatilizados presentes también en los gases del horno, produciendo sulfatos alcalinos gaseosos que se depositan en las partes frías del horno, y en el intercambiador sobre el material en reacción. Aparte de una pequeña fracción, que es detraída con el polvo de chimenea, los sulfatos alcalinos condensados retornan a la zona de sinterización y de ella salen, gracias a su escasa volatilidad, con el clínker.

Si no hay suficiente SO_2 para que se combine la totalidad de los álcalis, entonces se originan ciclos cerrados de carbonatos alcalinos, fácilmente volatilizables o también cloruros alcalinos, también volatilizables (véase más adelante en 1.4.4.). Los carbonatos alcalinos, en tanto que no estén combinados en las fases del clínker (véase más adelante en 1.5.) se vaporizan de nuevo en la zona de sinterización.

Por exceso de SO_2 puede ocurrir que éste todavía reaccione con el CaCO_3 en el intercambiador para dar CaSO_4 y como tal reingresar en el proceso. En la zona de sinterización se descompone y de modo renovado reingresa al circuito de SO_2 en los gases. Una parte, sin embargo, es detraída en forma de CaSO_4 con el clínker.

La existencia en exceso de álcalis en el crudo sobre la cantidad que pueda combinar el azufre que contiene, presenta la ventaja de que se pueden emplear combustibles ricos en azufre sin que sean emitidas cantidades significativas de SO_2 con los gases del horno. El sulfato alcalino combinado en las fases del clínker es ventajoso para las resistencias iniciales del cemento. Por el contrario, altos contenidos en azufre pueden comportar emisiones elevadas de SO_2 en los gases residuales, taponamientos de crudo en el intercambiador y la formación de anillos de costra en el horno rotatorio.

El cemento necesita una cantidad mínima de sulfato cálcico —en la mayoría de los casos como yeso molido— para regular su tiempo de fraguado; además, también se ha determinado la máxima cantidad permisible en SO_3 en el cemento, que ha de excluir la "expansión por los sulfatos" —según las normas actuales para el cemento— y puede estar entre el 2.5 % y el 4 %. Para el valor mínimo de las normas, en determinadas circunstancias, no queda apenas margen para la sulfatación de los álcalis.

1.4.4. Cloruros

Los crudos alemanes contienen cloruros que van del 0.01 % al 0.1 %; en casos raros por encima del 0.3 %

[7a]. Como ya se ha indicado, en los hornos rotatorios el cloruro reacciona con los álcalis y forma cloruros que son transportables por los gases y que precipitan en el intercambio de calor. Retorna con el material en reacción; pero, a diferencia de los sulfatos, de nuevo son vaporizados en la zona de sinterización sin dejar resto alguno. Puesto que se depositan casi cuantitativamente en el intercambiador, se forma entre la zona de sinterización y el intercambiador un circuito cerrado hasta que por razón de pegaduras o de formación de costras, la explotación del horno se detiene. Tales circuitos cerrados se deberían impedir mediante la desviación (bypass) de una fracción de los gases del horno, de un 10 % hasta un 15 %. De acuerdo con la experiencia, se impone una desviación parcial de los gases cuando el contenido en Cl es del orden del 0.015 % del peso del crudo [7a].

Antes se acostumbraba agregar cloruro cálcico a los cementos de alta resistencia con el fin de elevar su resistencia inicial: desde que se ha demostrado que los cloruros facilitan la corrosión de las armaduras de acero, lo cual es particularmente peligroso en el caso de las armaduras sometidas a tensión del hormigón pretensado, la nueva edición de la norma alemana DIN 1164 de 1970 establece la prohibición de agregar cloruro alguno; sin embargo, el cemento puede tener trazas de cloruros procedentes de las materias primas, pero no superiores a un 0.1 % de Cl [7c, 139].

1.4.5. El contenido en *fluoruros* de las materias primas habituales para el cemento está situado entre los límites del 0.03 % al 0.08 %. A causa de la pequenísima volatilidad de los fluoruros no se forma ningún circuito cerrado —de modo contrario a los cloruros. Se ha prescindido de la adición, que antes se practicaba, de fluoruro de calcio a los crudos (hasta el 1 %) para hacer más fácil la cocción del clinker, porque se ha logrado combinar la cal mediante una mejor homogeneización y una molienda más fina.

1.4.6. El contenido en *fósforo* de la mayor parte de las materias primas naturales para el cemento es muy bajo en Alemania (el contenido en P_2O_5 está entre el 0.05 % y el 0.25 %) [139]. En el caso de que se utilicen materiales más ricos en fósforo (por ejemplo, calizas ricas en P_2O_5 , o se trabaje con residuos de la fabricación del ácido fosfórico), el límite permisible en P_2O_5 en el clinker es del 2.5 % [12b]. Sin embargo, contenidos en P_2O_5 más altos de un 0.5 % ya pueden tener como consecuencia fuertes retrocesos, particularmente en las resistencias iniciales [12c].

1.5. Fases minerales del clinker de cemento portland

El clinker de cemento portland contiene, de modo aproximado, los siguientes componentes químicos:

Tabla 1.5.1.

SiO ₂	16–26 %	CaO	58–67 %
Al ₂ O ₃	4–8 %	MgO	1–5 %
Fe ₂ O ₃	2–5 %	K ₂ O+Na ₂ O	0–1 %
Mn ₂ O ₃	0–3 %	SO ₃	0.1–2.5 %
TiO ₂	0–0.5 %	P ₂ O ₅	0–1.5 %
Pérdida al rojo 0.5–3 %			

1.5.1. Pueden estar contenidas en el cemento portland las fases minerales indicadas en (véase la tabla 1.5.2.):

Los minerales del clinker no son una combinación pura, sino fases de cristales mixtos que contienen los componentes de otras fases, en pequeñas cantidades, en enlace cristalino, así como también las restantes sustancias químicas que acompañan al clinker, incapaces de formar fases autónomas. Para caracterizar conceptualmente la diferencia entre combinaciones puras y los minerales del clinker, se han conservado las designaciones de alita y belita para los minerales principales del clinker: el C_3S y el C_2S , tal como los designó Törnebohm en 1897, el cual distinguió las fases microscópicamente, a pesar de que aún no conocía su composición.

1.5.2. La *alita* (C_3S) es el principal y decisivo mineral del clinker para sus cualidades resistentes. Del C_3S se conocen seis modificaciones: en el clinker sólo aparecen dos modificaciones a alta temperatura, que son estabilizadas por la presencia de átomos extraños a ella [12a, 139].

1.5.3. La *belita* es, fundamentalmente, la β -modificación del C_2S . Se produce a la temperatura de sinterización del clinker; si aquella está por encima de 1420 °C, la modificación es el α - C_2S ; si la temperatura está por debajo de 1420 °C, es el α - C_2S . Esta se transforma durante el enfriamiento del clinker, a 670 °C, en la forma metastable β - C_2S . Por enfriamiento ulterior más lento puede formar, a partir del β - C_2S , la modificación γ -estable; proceso que se produce con un aumento del 10 % del volumen, dando lugar a la pulverización del clinker. Por enfriamiento rápido y la presencia, normal en la belita, de componentes extraños, se impide ese desventajoso fenómeno de transformación en el γ - C_2S hidráulicamente inactivo.

La belita se endurece mucho más lentamente que la alita; sin embargo, después de largos plazos, alcanza la misma resistencia de aquella.

1.5.4. Si en el clinker hay menos alúmina que óxido de hierro (contados en moléculas), entonces ambos componentes se combinan con la cal para producir *ferritoaluminato cálcico* (véase la tabla 1.5.2.), fase de cristales mix-

1. Materias primas

Tabla 1.5.2.

Designación	Rango de validez	Fórmula	Abreviatura	
Silicato tricálcico (alita)		$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	
Silicato dicálcico (belita)		$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	
Aluminato tricálcico	$\text{Al}_2\text{O}_3 \geq \text{Fe}_2\text{O}_3$	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	
Ferrito aluminato tetracálcico		$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	
Ferrito aluminato cálcico (fase de cristales mixtos)	$\text{Al}_2\text{O}_3 < \text{Fe}_2\text{O}_3$	$2\text{CaO} \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)$	$\text{C}_2 (\text{A},\text{F})$	
Cal libre		CaO		
Magnesia libre (periclasa)		MgO		
Aluminato, rico en álcalis	$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} > \text{SO}_3$	$(\text{K}, \text{Na})_2\text{O} \cdot 8\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$	$(\text{K}, \text{N}) \text{C}_8\text{A}_3$	
Sulfato alcalino				$(\text{K}, \text{Na})_2\text{SO}_4$
Sulfato cálcico				CaSO_4

tos que ofrece como término final $2 \text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, en los cuales el hierro sustituye, de modo continuo, al Al. Esta serie de cristales mixtos tiene capacidad de existencia para la relación molar de $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Fe}_2\text{O}_3$, hasta valor superior de 2:1; sin embargo, en el clinker para portland, que comprende solamente combinaciones ricas en cal, concluye la serie cuando la relación anterior es 1:1; si hay más alúmina en el clinker, la que está en exceso sobre esa relación, a la que corresponde la combinación $4 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, se combina con la cal formando una combinación todavía más rica en cal; el *aluminato tricálcico*.

El aluminato tricálcico reacciona muy rápidamente con el agua; sin embargo, no posee ninguna propiedad hidráulica destacable, aunque eleva la resistencia inicial del cemento en combinación con los silicatos. El ferritoaluminato cálcico contribuye poco al endurecimiento hidráulico del cemento [7b].

1.5.5. Los álcalis, como ya se ha indicado en 1.4.3., están combinados solamente en las fases del clinker si la cantidad de SO_3 no es suficiente para la combinación

total de los álcalis como sulfatos alcalinos. Pasan a todas las fases del clinker; sin embargo, lo hacen con preferencia en las fases de aluminatos. También en éstas están contenidos solamente como combinación de cristales mixtos, por lo que la fórmula de composición dada en la tabla 1.5.2. sólo es alcanzable si simultáneamente está inserto SiO_2 [12.b].

1.6. Composición potencial del clinker

El análisis químico ofrece una panorámica de la composición de óxidos en el clinker, o, respectivamente, del cemento. R. H. Bogue [13] ha desarrollado un proceso de cálculo según el cual, a partir del análisis químico, se puede calcular el contenido en minerales, ante todo el C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF . Interesa señalar aquí que Bogue llamó composición potencial a la composición del clinker así calculada. En lenguaje habitual, en el idioma inglés, potencial significa posible pero no actual, "posible pero no de hecho", con lo cual se afirma que la composición potencial calculada según Bogue posiblemente no es igual a la composición mineralógica efectiva.

El método de cálculo de Bogue está muy extendido, a causa del cuadro claro que ofrece de la composición del clinker y de las posibles predicciones acerca de las propiedades del cemento. Este método de cálculo está ya en las normas norteamericanas, de la URSS y de muchos otros países. Sin embargo, las normas estadounidenses del cemento entrañan una limitación, al decir que la expresión de los compuestos calculados no significa, de modo necesario, que los óxidos correspondientes están actual o enteramente presentes como tales compuestos [14]

Si a los óxidos $\text{CaO, SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$
 se les designa con a, b, c, d
 y a las combinaciones $\text{C}_3\text{S, C}_2\text{S, C}_3\text{A, C}_4\text{AF}$
 con w, x, y, z,
 entonces puede realizarse el cálculo siguiente:

En primer lugar, se sabe que el C_3S contiene un 73.69 % de CaO y un 26.31 % de SiO_2 ; el C_2S contiene un 65.12 % de CaO y un 34.88 % de SiO_2 ; también la composición del C_3A , así como la del C_4AF se dan en la tabla 1.6.1. Ahora se establecerán las relaciones que siguen (véase la tabla 1.6.1.):

Tabla 1.6.1.

	C_3S (w)	C_2S (x)	C_3A (y)	C_4AF (z)
a CaO	0.7369	0.6512	0.6227	0.4616
b SiO_2	0.2631	0.3488	—	—
c Al_2O_3	—	—	0.3773	0.2098
d Fe_2O_3	—	—	—	0.3286

Por tanto, en una mezcla de las cuatro combinaciones, la cantidad de CaO en el C_3S es igual 0.7369 veces el porcentaje de C_3S ; la fracción de CaO en C_2S es igual a 0.6512 veces el porcentaje en C_2S , etc. El contenido total en CaO da la suma de los valores y procediendo así para cada uno de los óxidos se tiene:

$$\begin{aligned} a &= 0.7369w + 0.6512x + 0.6227y + 0.4616z \\ b &= 0.2631w + 0.3488x \\ c &= 0.3773y + 0.2098z \\ d &= 0.3286z \end{aligned}$$

Resolviendo el sistema según w, x, y, z se obtiene:

$$\begin{aligned} w &= 4.071a - 7.600b - 6.718c - 1.430d \\ x &= 8.602b + 5.068c - 3.071a + 1.078d \\ y &= 2.650c + 1.692d \\ z &= 3.043d \end{aligned}$$

Aplicándolo a los cuatro compuestos:

$$\begin{aligned} \text{C}_3\text{S} &= 4.071 \text{CaO} - 7.600 \text{SiO}_2 - 6.718 \text{Al}_2\text{O}_3 - \\ &\quad - 1.430 \text{Fe}_2\text{O}_3 \\ \text{C}_2\text{S} &= 8.602 \text{SiO}_2 + 5.068 \text{Al}_2\text{O}_3 + 1.078 \text{Fe}_2\text{O}_3 - \\ &\quad - 3.071 \text{CaO} = 2.867 \text{SiO}_2 - 0.7544 \text{C}_3\text{S} \\ \text{C}_3\text{A} &= 2.650 \text{Al}_2\text{O}_3 - 1.692 \text{Fe}_2\text{O}_3 \\ \text{C}_4\text{AF} &= 3.043 \text{Fe}_2\text{O}_3 \end{aligned}$$

Las combinaciones en otros sistemas se pueden calcular de modo parecido. En la práctica aparecen las fases siguientes:

- N.º 1. Cemento normal $\text{C}_3\text{S} + \text{C}_2\text{S} + \text{C}_3\text{A} + \text{C}_4\text{AF}$
- N.º 2. Cementos ricos en óxido de hierro $\text{C}_3\text{S} + \text{C}_2\text{S} + \text{C}_4\text{AF} + \text{C}_2\text{F}$
- N.º 3. Cementos ricos en cal $\text{CaO} + \text{C}_3\text{S} + \text{C}_3\text{A} + \text{C}_4\text{AF}$
- N.º 4. Cementos ricos en óxido de hierro y en cal $\text{CaO} + \text{C}_3\text{S} + \text{C}_4\text{AF} + \text{C}_2\text{F}$

En la URSS se utiliza otro método de cálculo para determinar la composición de las fases, que aplica la fórmula de la saturación por la cal de Kind.

$$K_{S_k} = \frac{\text{CaO} - (1.65 \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.35 \text{Fe}_2\text{O}_3)}{2.8 \text{SiO}_2}$$

véase más adelante 1.8.1.

$$\begin{aligned} \text{C}_3\text{S} &= 3.8 \text{SiO}_2 \cdot (3 K_{S_k} - 2) \\ \text{C}_2\text{S} &= 8.6 \text{SiO}_2 (1 - K_{S_k}) \\ \text{C}_4\text{AF} &= 3.04 \text{Fe}_2\text{O}_3 \\ \text{C}_3\text{A} &= 2.65 (\text{Al}_2\text{O}_3 - 0.64 \text{Fe}_2\text{O}_3) \end{aligned}$$

En un trabajo de investigación acerca de las propiedades del cemento, *Brown* [17] ha determinado microscópicamente el contenido en minerales de diversos clínkeres y simultáneamente los calculó siguiendo el método de Bogue. En la tabla 1.6.2. se indican las diferencias particularmente altas encontradas por *Brown*.

La experiencia actual permite, sin embargo, afirmar que la calificación de los cementos a base de su composición mineralógica presta servicios suficientemente buenos.

En la URSS se elaboró también un análisis químico por vía húmeda para la determinación cuantitativa de C_3S , C_2S y C_3A . Este método se apoya en la distinta solubilidad de esos minerales en el ácido bórico y en el acético [18].

1. Materias primas

Tabla 1.6.2. **Minerales del clinker determinado al microscopio y contenido calculado**

Clinker N ^o	C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF	
	M	B	M	B	M	B	M	B
11	57.7	55.1	12.8	19.4	5.4	12.6	2.8	7.3
18	60.3	48.9	16.9	26.3	6.3	14.0	3.9	6.6
33	70.2	63.5	4.2	12.4	10.0	11.2	4.3	7.9
51	39.6	46.7	44.5	36.5	1.0	4.0	6.3	9.8

M = determinado al microscopio
B = calculado según R.H. Bogue

1.7. Módulos del cemento

Durante largo tiempo, el cemento portland se fabricó a partir de la experiencia adquirida sobre la marcha de la producción. Comparando los análisis químicos del cemento portland se ha descubierto que existen determinadas relaciones en los porcentajes de cal, por un lado, y los del SiO₂, del Al₂O₃ y del Fe₂O₃ por el otro. Esta relación entre unos y otros de los óxidos es el

1.7.1. Módulo hidráulico

Tiene la forma siguiente:

$$HM^* = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} = 1.7 - 2.3$$

Los cementos de buena calidad tienen un módulo hidráulico del orden de 2. Los cementos con HM < 1.7 suelen presentar resistencias mecánicas insuficientes; los cementos con MH = 2.4 y por encima de este valor, la mayoría de las veces no eran de volumen estable.

Como se aprecia en la fórmula, el módulo hidráulico caracteriza el cemento por la relación de CaO con los factores hidráulicos SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃. En general, el módulo hidráulico varía entre 1.7 y 2.3. Se encontró que, con módulo hidráulico creciente, era menester mayor cantidad de calor para la cocción del clinker y que las resistencias, especialmente las iniciales, aumentaban, el calor de hidratación también aumentaba y disminuía la resistencia química. El módulo hidráulico todavía se sigue utilizando esporádicamente. Para poder formar mejor juicio se introdujeron después los módulos de silicatos y de alúmina, que en cierto sentido complementan al módulo hidráulico.

1.7.2. El *módulo de silicatos* representa la relación en peso de SiO₂ a la suma de Al₂O₃ y Fe₂O₃:

$$SM^* = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

El valor del módulo de silicatos varía entre 1.9 y 3.2. Los valores favorables están entre 2.2 y 2.6. A veces también se hallan valores más altos, por ejemplo, de 3 hasta 5 y hasta más elevados, precisamente para cementos de alta riqueza en sílice y en los cementos blancos. De modo general, los valores que se presentan son más bajos, por ejemplo, entre 2 y 1.5. Módulo de silicato creciente implica empeoramiento de las condiciones de cocción del clinker por descenso de fase líquida y baja tendencia a la formación de costra. Además de ello, los cementos con módulo de silicatos altos suponen cementos de fraguado y endurecimiento lento. Por descenso del módulo de silicatos crece la cuantía de fase líquida; esto condiciona la buena aptitud a la cocción del clinker y a la formación de costra.

Módulo silícico

Mussgnug llamó módulo silícico a la relación $\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$. En

la cocción del clinker de horno rotatorio se obtienen buenas condiciones de formación de costra en la zona de cocción si el valor de ese cociente está situado entre 2.5 y 3.5 y si, simultáneamente, el valor del módulo de alúmina se halla entre los límites de 1.8 a 2.3. Este módulo no se ha de confundir con el módulo de silicatos dado antes.

1.7.3. Módulo de alúmina

El módulo de alúmina caracteriza al cemento por la relación en peso de alúmina a óxido de hierro.

$$TM^* = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

En general, el módulo de alúmina exhibe valores entre 1.5 y 2.5. Hay cementos con contenidos bajos en alúmina

* HM - Hydraulische Modul. - SM - Silikat Modul. - TM - Tonerde Modul.

con módulo de alúmina por debajo de 1.5 (llamados ferrocementos). El módulo de alúmina es decisivo para la composición de la fase líquida del clinker. Si el módulo de alúmina es 0.637, coexisten los dos óxidos en proporciones molares y en el clinker sólo habrá ferritoaluminato tetracálcico $4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$; tal clinker no puede contener, por lo menos, según el cálculo, nada de $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Este es el caso del cemento Ferrari, que se caracteriza por su bajo calor de hidratación, fraguado lento y estabilidad de volumen. Un módulo de alúmina alto para módulo de silicato bajo da como resultado, entre otras cosas, un cemento de fraguado rápido ya que exige mayor cantidad de yeso para su regulación.

1.8. Fórmulas para la cal

1.8.1. Grado de saturación por la cal

La saturación total por la cal en el clinker ocurre cuando toda la sílice está combinada en forma de C_3S ; se han combinado todo el óxido férrico y la cantidad de alúmina que le corresponda en forma de C_4AF y el exceso de alúmina como C_3A .

La unidad de peso de SiO_2 se combina para dar C_3S según $\frac{3 \cdot 56}{60} = 2.8$ unidades en peso de CaO

La unidad de peso de Al_2O_3 se combina para dar C_3A según $\frac{3 \cdot 56}{103} = 1.65$ unidades en peso de CaO .

La unidad de peso de Al_2O_3 se combina para dar C_4AF según $\frac{2 \cdot 56}{102} = 1.1$ unidades en peso de CaO .

La unidad de peso de Fe_2O_3 se combina para dar C_4AF según $\frac{2 \cdot 56}{160} = 0.7$ unidades en peso de CaO .

Para poder expresar la alúmina total en *un solo término* se supone que el C_4AF está descompuesto en $\text{C}_3\text{A} + \text{CF}$. Por cada unidad de Fe_2O_3 en peso se combinan 0.35 unidades en peso de CaO .

La máxima cantidad de cal es, por consiguiente:

$$\text{CaO}_{\max} \begin{matrix} (\text{TM} > 0.64) \\ (\text{TM} < 0.64) \end{matrix} = 2.8 \text{ SiO}_2 + 1.65 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.35 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

Naturalmente se obtiene igual resultado si en la fórmula de Bogue se hace $\text{SC}_2 = 0$ o en la fórmula de Kind (véase más adelante) se hace $\text{KS}_K = 1$.

Entonces, el nivel en cal de un clinker se caracteriza por el grado de saturación por la cal que es la relación del contenido efectivo de cal en tal clinker, al contenido máximo posible.

$$\text{KSG}^* = \frac{100 \text{ CaO}}{2.8 \text{ SiO}_2 + 1.65 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.35 \text{ Fe}_2\text{O}_3}$$

La fórmula de Kind aplicada en la URSS parte de que la saturación incompleta por la cal sólo resulta de una combinación a nivel reducido de la cal con el anhídrido silícico.

$$\text{CaO} = \text{KS}_K \cdot 2.8 \text{ SiO}_2 + 1.65 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.35 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

de donde:

$$\text{KS}_K = \frac{\text{CaO} - (1.65 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.35 \text{ Fe}_2\text{O}_3)}{2.8 \text{ SiO}_2}$$

Para los fines técnicos, el valor para el grado de saturación por la cal, determinado según la fórmula anterior, se mueve entre 0.80 y 0.95.

En los clínkeres ricos en óxido férrico ($\text{TM} \leq 0.64$) la alúmina está combinada solamente en la fase de cristales mixtos $\text{C}_2(\text{AF})$ y la máxima cantidad de cal y el grado de saturación serán:

$$\text{CaO}_{\max}(\text{TM} \leq 0.64) = 2.8 \text{ SiO}_2 + 1.1 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.7 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$\text{KSG}(\text{TM} \leq 0.64) = \frac{100 \text{ CaO}}{2.8 \text{ SiO}_2 + 1.1 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.7 \text{ Fe}_2\text{O}_3}$$

Para $\text{TM} \leq 0.64$ varían, del mismo modo, los factores de la fórmula de Kind.

1.8.2. Standard de cal (Kalkstandard)

La saturación por la cal tratada en 1.8.1. da por supuesto, así como para el cálculo de las fases según Bogue tratado en 1.6.1., que el enfriamiento del clinker se ha realizado tan lentamente, desde la temperatura de sinterización, que el sínter fundido ha estado siempre en equilibrio con las fases sólidas.

Este no es el caso en clínkeres con contenidos en C_3A . A la temperatura de 1450°C , la sinterización de los minerales de los silicatos C_3S y C_2S y, en casos dados, la cal libre todavía no combinada, están en estado sólido; el C_3A y el C_4AF están fundidos. Sin embargo, este fundido es más pobre en cal que lo que le corresponde al C_3A y sólo puede tomar la cal que le falta para la cristalización total del C_3A , del C_3S y de la CaO libre presentes [18a] más ricos en cal. Esos procesos no pueden desarrollarse en el rápido enfriamiento técnico del clinker; prácticamente, el fundido de aluminatos no puede combinar más cal que la que había tomado ya a la temperatura de

* KSG = Kalksättigungsgrad.

1. Materias primas

sinterización ("equilibrio congelado", según Kühl). Investigaciones experimentales han demostrado que, en el fundido de aluminatos, más rico en cal, en la práctica se combinan dos moléculas de cal por cada una de alúmina. Este, por consiguiente, es el límite alcanzable de cal en condiciones de trabajo técnico, o sea el denominado standard de cal.

$$\text{CaO}_{\text{Stand.}} = 2.8 \text{ SiO}_2 + 1.1 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.7 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

Esta fórmula tiene los mismos coeficientes que la del grado de saturación por la cal para $\text{TM} \leq 0.64$. De ahí se deduce que el standard de cal es la relación del contenido efectivo de CaO al standard de cal, o sea:

$$\text{KS}_t = \frac{100 \text{ CaO}}{2.8 \text{ SiO}_2 + 1.1 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.7 \text{ Fe}_2\text{O}_3}$$

Más adelante se le designó como KSt I para diferenciarlo del concepto más exacto, basado en la consideración del sistema de cuatro componentes: $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$.

$$\text{KS}_{t\text{II}} = \frac{100 \text{ CaO}}{2.8 \text{ SiO}_2 + 1.18 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.65 \text{ Fe}_2\text{O}_3}$$

La variación introducida en los coeficientes estriba en que, según la investigación aludida, en el fundido se encontraron 2.15 molécula de cal por cada molécula de Al_2O_3 , y para la combinación del Fe_2O_3 , de acuerdo con el cálculo, sólo quedaban $4 - 2.15 = 1.85$ moléculas de CaO disponibles. Hace poco se ha propuesto una modificación del standard de cal de Kühl, bajo la consideración del contenido de MgO [21]:

$$\text{KS}_{t\text{III}} = \frac{100 (\text{CaO} + 0.75 \text{ MgO})}{2.8 \text{ SiO}_2 + 1.18 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.65 \text{ Fe}_2\text{O}_3}$$

En la fórmula afinada, los valores del MgO sólo se pueden introducir hasta el valor 2, pues, por encima de él, el MgO está presente en forma de periclusa (véase 1.4.1.).

En la práctica se aplica el standard de cal II [7b]. Este valor corresponde exactamente al índice británico "Lime Saturation Factor" que, por tanto, tiene idéntica significación que el (KSt) alemán; sin embargo, no es igual al del grado de saturación por la cal alemán (KSG). Para $\text{TM} \leq 0.64$ no existe diferencia alguna entre KSt y KSG.

Las normas británicas toman en consideración el "Lime Saturation Factor" para definir el contenido permisible de cal [23].

$$\text{LSF} = \frac{\text{CaO} - 0.7 \text{ SO}_3}{2.8 \text{ SiO}_2 + 1.2 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.65 \text{ Fe}_2\text{O}_3} = \leq 1.2 - \geq 0.66$$

En esa fórmula el LSF se refiere al cemento. El término 0.7 SO_3 del numerador significa que la cal correspondiente al SO_3 es deducida de la cal total, porque se da por supuesto que todo el SO_3 procede del yeso agregado durante la molienda y que el clinker no contiene nada de tal combinación.

Por lo general, un standard de cal alto condiciona altas resistencias en el cemento. Los valores que damos a continuación para los standards de cal cabe considerarlos como cifras de partida para los cementos portland.

Portland normal	90 - 95
Portland de calidad alta	95 - 98

Un standard de cal superior a 100 implica cal libre en el clinker. Sin embargo, altos valores para el standard de cal exigen una inversión de calor más alta para la cocción del clinker.

1.9. Otros módulos

En Francia se enjuicia el contenido en cal mediante el llamado índice hidráulico (indice d'hydraulicité); tiene por expresión (en moles) [3]:

$$\frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}} = 0.42 - 0.48$$

No obstante, la norma francesa más reciente (NFP 15-302, 1964) ya no contiene tal concepto.

Citemos también las fórmulas que damos a continuación. La siguiente es un ensayo para dar el módulo ya conocido de silicatos en otra forma [3]:

$$\text{SM} = \frac{\text{C}_3\text{S} + \text{C}_2\text{S}}{\text{C}_4\text{AF} + \text{C}_3\text{A} (+ \text{C}_2\text{F})}$$

Con módulo de silicatos creciente aumenta la resistencia del cemento frente a las influencias químicas y atmosféricas y sobre todo se eleva su resistencia mecánica.

Módulo de endurecimiento:

$$M_E^* = \frac{\text{C}_3\text{S}}{\text{C}_2\text{S}}$$

* M_E = Erhärtungsmodul.

Con M_E creciente aumentan las resistencias iniciales de los cementos, crece el calor de hidratación y decrece la resistencia frente a la agresión química. Los cementos corrientes tienen un M_E superior a 0.5. El correspondiente a los cementos de alta resistencia a edad temprana es de 8, aproximadamente; los cementos con $M_E < 0.5$ son cementos beléticos y tienden a la autopulverización del clinker.

Una combinación de los dos módulos, es decir, M_s y M_E muestra una profunda dependencia entre estos módulos, y el C_3S y el C_2S , respectivamente:

$$C_3S = \frac{M_s \cdot M_E}{(M_s + 1) \cdot (M_E + 1)}$$

$$C_2S = \frac{M_s}{(M_s + 1) (M_E + 1)}$$

Módulo calórico:

$$M_K^* = \frac{C_3S + C_3A}{C_2S + C_4AF}$$

Con M_K creciente aumenta el calor de hidratación del cemento. Se han dado valores para M_K que están entre 0.3 y 1.8.

* M_K = Kalorische Modul.



2. Cálculo de la composición del crudo

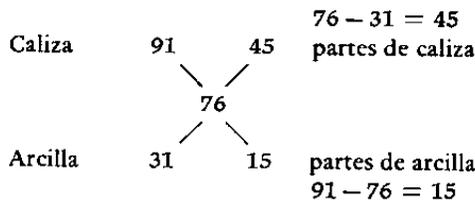
El cálculo de la composición del crudo tiene por objeto determinar las relaciones de las cantidades de materias primas que hay que aportar para dar al clinker que se va a cocer la composición química y mineralógica deseada. Para ello, hay diferentes métodos de cálculo, desde los más sencillos a los más complicados. Como base sirve la composición química de las materias primas. Los resultados de los análisis han de expresarse con dos cifras decimales. Los resultados de análisis cuya suma rebasa 100, se han de llevar a este valor; para ello se reducen proporcionalmente todos los valores participantes. Si por otro lado, la suma es inferior a 100, entonces no se eleva a 100; en este caso el resto a 100 se designa como componente residual y así la suma es 100.

2.1. Método del cálculo cruzado (regla de aligación)

El método más sencillo de calcular la solución de los problemas de las mezclas es el del cálculo cruzado de éstas, con lo cual se determina la proporción en que han de estar dos materias primas componentes. Basta con fijar el contenido deseado en cal para derivar, mediante la fórmula, la proporción de los dos componentes.

Ejemplo 2.1.

¿En qué proporciones hay que mezclar caliza con un 91 % de CaCO_3 y arcilla con un 31 % de CaCO_3 para obtener un crudo con un 76 % de CaCO_3 ? Según la regla de la mezcla en cruz (regla de aligación):



Para obtener un crudo con un 76 % de CaCO_3 hay que mezclar 45 partes de caliza con 15 partes de arcilla. Por consiguiente, el crudo estará compuesto por la mezcla de los dos componentes en la relación: caliza:arcilla = 45:15 o 3:1, respectivamente.

2.2. Cálculo según el módulo hidráulico

Este método es aplicable a dos materias componentes con un módulo hidráulico elegido para el clinker [15, 16]. Para simplificar los cálculos que se dan más adelante, se utilizan símbolos con los cuales se designa a los componentes del clinker, las materias primas y las cenizas del carbón; estos símbolos están incluidos en la tabla 2.1.

Considerando estos símbolos, los módulos hidráulicos para el clinker y el crudo serán:

$$\text{para el clinker} \quad \text{HM} = \frac{C}{S + A + F}$$

$$\text{para el crudo} \quad \text{HM} = \frac{C_m}{S_m + A_m + F_m}$$

Puesto que ambos módulos tienen el mismo valor pueden igualarse:

$$\text{HM} = \frac{C}{S + A + F} = \frac{C_m}{S_m + A_m + F_m}$$

Según este método de cálculo se acepta que x partes de la primera materia prima corresponden a una parte de la segunda. Con este supuesto se pueden calcular las materias primas componentes individualmente con las siguientes fórmulas:

$$C_m = \frac{x C_1 + C_2}{x + 1} \quad S_m = \frac{x S_1 + S_2}{x + 1}$$

$$A_m = \frac{x A_1 + A_2}{x + 1} \quad F_m = \frac{x F_1 + F_2}{x + 1}$$

Introduciendo los valores C_m, S_m, A_m, F_m en la fórmula para el módulo hidráulico obtenemos:

$$\text{HM} = \frac{\frac{x C_1 + C_2}{x + 1}}{\frac{x S_1 + S_2}{x + 1} + \frac{x A_1 + A_2}{x + 1} + \frac{x F_1 + F_2}{x + 1}}$$

Tabla 2.1. Símbolos para el cálculo en la designación de los componentes del clinker y del crudo

Componentes	Clinker	Crudo	Mat. prima N° 1	Mat. prima N° 2	Mat. prima N° 3	Mat. prima N° 4	Cenizas del carbón
CaO	C	C_m	C_1	C_2	C_3	C_4	C_a
SiO_2	S	S_m	S_1	S_2	S_3	S_4	S_a
Al_2O_3	A	A_m	A_1	A_2	A_3	A_4	A_a
Fe_2O_3	F	F_m	F_1	F_2	F_3	F_4	F_a

2. Cálculo de la composición del crudo

Tabla 2.2.

	1	2	3	4	5	6
Componente	Caliza	Marga	Caliza 77.05 %	Marga 22.95 %	Crudo 100 %	Clinker
SiO ₂	8.70	33.01	6.70	7.58	14.28	21.86
Al ₂ O ₃	2.35	7.31	1.81	1.68	3.49	5.34
Fe ₂ O ₃	1.32	4.83	1.02	1.11	2.13	3.26
CaO	47.80	30.22	36.83	6.94	43.77	67.00
MgO	1.50	0.66	1.16	0.15	1.31	2.00
SO ₃	0.30	0.20	0.23	0.04	0.27	0.41
Pérdida al rojo	37.96	23.77	29.25	5.45	34.70	—
Resto	0.01	—	0.05	—	0.05	0.13
Suma	100.00	100.00	77.05	22.95	100.00	100.00

Puesto que a partir del análisis químico de las materias primas se conocen los óxidos componentes y se ha fijado el módulo hidráulico según exigencias cualitativas, queda como única incógnita la x . Por transformación de la ecuación que antecede y el cálculo de x se obtiene la fórmula que sigue:

$$x = \frac{HM(S_2 + A_2 + F_2) - C_2}{C_1 - HM(S_1 + A_1 + F_1)} = \frac{C_2 - HM(S_2 + A_2 + F_2)}{C_1 - HM(S_1 + A_1 + F_1)}$$

Ejemplo 2.2.

Se dan dos materias primas de la composición siguiente (véanse las columnas 1 y 2 de la tabla 2.2.).

Se trata de calcular la composición de la mezcla de tales materias primas para obtener un módulo hidráulico dado = 2.2.

$$x = \frac{2.2(33.01 + 7.31 + 4.83) - 30.22}{47.80 - 2.2(8.70 + 2.35 + 1.32)} = 3.357$$

es decir, para obtener un clinker con módulo hidráulico de 2.2. tenemos que tomar 3.357 partes de caliza por cada una de marga.

Por consiguiente la mezcla se compone de:

un 77.05 % de caliza y
un 22.95 % de marga.

La participación de las materias primas componentes están calculadas en la tabla 2.2., columnas 3 y 4, y la composición del crudo figura en la columna 5 (columnas 3 + 4 = 5). La 6 contiene la composición del clinker como crudo sin pérdida al rojo de la columna 5. De la columna 6 resulta que el módulo hidráulico es 2.2.

2.3. Cálculo a partir del grado de saturación por la cal

por consideración del grado de saturación de Kind (véase la sección 1.8.1).

Ejemplo 2.3.

Dadas dos materias primas (véase la tabla 2.3., columnas 1 y 2); teniendo presente que el módulo de Kind sea:

$$KS_K = \frac{CaO - (1.65 Al_2O_3 + 0.35 Fe_2O_3)}{2.8 SiO_2} = 0.92$$

utilizando, en la fórmula de Kind, los símbolos para cálculo ya empleados obtenemos:

$$KS_K = \frac{\frac{x C_1 + C_2}{x + 1} - \left(1.65 \frac{x A_1 + A_2}{x + 1} + 0.35 \frac{x F_1 + F_2}{x + 1} \right)}{2.8 \cdot \frac{x S_1 + S_2}{x + 1}}$$

Tabla 2.3.

	1	2	3	4	5	6
	Caliza	Arcilla	Caliza × 0.8020	Arcilla × 0.1980	Crudo Col. 3+4	Clinker
SiO ₂	1.42	62.95	1.14	12.46	13.60	21.27
Al ₂ O ₃	0.48	18.98	0.39	3.76	4.15	6.49
Fe ₂ O ₃	0.38	7.37	0.30	1.46	1.76	2.75
CaO	52.60	1.40	42.18	0.28	42.46	66.47
MgO	1.11	0.98	0.89	0.19	1.08	1.69
SO ₃	0.85	0.85	0.68	0.17	0.85	1.33
Pérdida al rojo	43.16	7.47	34.62	1.48	36.10	—
Suma	100.00	100.00	80.20	19.80	100.00	100.00

Resolviendo, según x:

$$x = \frac{(2.8 K_{SK} \cdot S_2 + 1.65 A_2 + 0.35 F_2) - C_2}{C_1 - (2.8 K_{SK} \cdot S_1 + 1.65 A_1 + 0.35 F_1)} =$$

$$= \frac{C_2 - (2.8 K_{SK} \cdot S_2 + 1.65 A_2 + 0.35 F_2)}{C_1 - (2.8 K_{SK} \cdot S_1 + 1.65 A_1 + 0.35 F_1)}$$

Con esta fórmula calculamos cuántas partes de caliza corresponden por cada parte de arcilla.

$$x = \frac{(2.8 \cdot 0.92 \cdot 62.95 + 1.65 \cdot 18.98 + 0.35 \cdot 7.37) - 1.40}{52.60 - (2.8 \cdot 0.92 \cdot 1.42 + 1.65 \cdot 0.48 + 0.35 \cdot 0.38)}$$

$$= 4.053$$

Por tanto, a 4.053 partes de caliza corresponde una parte de arcilla en la composición del crudo, o

un 80.20 % de caliza y
un 19.80 % de arcilla.

Las columnas 3, 4, 5 y 6 de la tabla 2.3. contienen la participación de los componentes del crudo, así como la composición del clinker. El grado de saturación, calculado a partir de ellos, es:

$$K_{SK} = \frac{66.47 - (1.65 \cdot 6.49 + 0.35 \cdot 2.75)}{2.8 \cdot 21.27} = 0.92$$

Esto prueba la exactitud del cálculo.

2.4. Cálculo con el grado de saturación por la cal y el módulo de silicatos

Ejemplo 2.4.

Cálculo de un crudo con tres componentes: se quiere lograr un grado de saturación por la cal, según Kind, de 0.92 y un módulo de silicatos de 2.70. Los análisis de las materias primas están en las columnas 1, 2 y 3 de la tabla 2.4.

Solución:

Ya hemos dado la manera de trabajar con el grado de saturación por la cal de Kind en el ejemplo 2.3. Aplicando los mismos símbolos, el cálculo de la fórmula para el módulo de silicatos es:

$$SM = \frac{S}{A + F} = \frac{S_m}{A_m + F_m}$$

El cálculo se realiza aplicando el supuesto de que, para x partes de caliza (componente 1) e y partes de arcilla (componente 2) le corresponde una parte en peso del componente de cenizas de piritas (componente 3), como corrector. Entonces son válidas para los componentes del crudo las fórmulas siguientes [19]:

$$C_m = \frac{x C_1 + y C_2 + C_3}{x + y + 1} \quad S_m = \frac{x S_1 + y S_2 + S_3}{x + y + 1}$$

$$A_m = \frac{x A_1 + y A_2 + A_3}{x + y + 1} \quad F_m = \frac{x F_1 + y F_2 + F_3}{x + y + 1}$$

2. Cálculo de la composición del crudo

Tabla 2.4.

	1	2	3	4	5	6	7	8
	Caliza	Arcilla	Cenizas de piritita	Columna 1 × 0.7831	Columna 2 × 0.2021	Columna 3 × 0.0148	Crudo	Clinker
SiO ₂	0.95	68.00	11.00	0.74	13.74	0.16	14.64	22.31
Al ₂ O ₃	0.92	12.60	1.50	0.72	2.55	0.02	3.29	5.01
Fe ₂ O ₃	0.38	2.95	84.20	0.30	0.60	1.25	2.15	3.28
CaO	54.60	5.70	0.76	42.76	1.15	0.01	43.92	66.93
MgO	0.95	1.45	0.55	0.74	0.29	0.01	1.04	1.58
SO ₃	—	1.28	1.25	—	0.26	0.02	0.28	0.43
Pérdida al rojo	42.03	7.20	0.67	32.91	1.46	0.01	34.38	—
Resto	0.17	0.82	0.07	0.14	0.16	—	0.30	0.46
Suma	100.00	100.00	100.00	78.31	20.21	1.48	100.00	100.00
KS _K Módulo	—	—	—	—	—	—	0.92	0.92
Módulo silicatos	0.73	4.37	0.12	—	—	—	2.7	2.7
Módulo alúmina	2.42	4.27	0.02	—	—	—	1.5	1.5

Introduciendo los valores anteriores en las expresiones que anteceden en la fórmula del grado de saturación por la cal y en la fórmula del módulo de silicatos, obtenemos dos ecuaciones con dos incógnitas x e y; por transformación:

$$\begin{aligned}
 & x [(2.8 \text{ KS}_K \cdot S_1 + 1.65 A_1 + 0.35 F_1) - C_1] + \\
 & + y [(2.8 \text{ KS}_K \cdot S_2 + 1.65 A_2 + 0.35 F_2) - C_2] = \\
 & = C_3 - (2.8 \text{ KS}_K \cdot S_3 + 1.65 A_3 + 0.35 F_3) \\
 & x [\text{SM} (A_1 + F_1) - S_1] + y [\text{SM} (A_2 + F_2) - S_2] = \\
 & = S_3 - \text{SM} (A_3 + F_3)
 \end{aligned}$$

a efectos de una mejor visibilidad hemos hecho las abreviaturas siguientes utilizando los símbolos:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= (2.8 \text{ KS}_K \cdot S_1 + 1.65 A_1 + 0.35 F_1) - C_1 \\
 b_1 &= (2.8 \text{ KS}_K \cdot S_2 + 1.65 A_2 + 0.35 F_2) - C_2 \\
 c_1 &= C_3 - (2.8 \text{ KS}_K \cdot S_3 + 1.65 A_3 + 0.35 F_3) \\
 a_2 &= \text{SM} (A_1 + F_1) - S_1 \\
 b_2 &= \text{SM} (A_2 + F_2) - S_2 \\
 c_2 &= S_3 - \text{SM} (A_3 + F_3)
 \end{aligned}$$

aplicando estos símbolos, las ecuaciones anteriores toman la forma:

$$\begin{aligned}
 a_1 x + b_1 y &= c_1 \\
 a_2 x + b_2 y &= c_2
 \end{aligned}$$

resolviendo estas ecuaciones obtenemos los valores x e y:

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{c_1 b_2 - c_2 b_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \\
 y &= \frac{a_1 c_2 - a_2 c_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1}
 \end{aligned}$$

Para calcular en lugar del módulo de silicatos el módulo de alúmina, es decir, si queremos fijar el grado de saturación por la cal y el módulo de alúmina obtendremos para a₂, b₂, c₂ los valores (a₁, b₁, c₁ permanecen invariables):

$$\begin{aligned}
 a_2 &= \text{TM} \cdot A_1 - F_1 \\
 b_2 &= \text{TM} \cdot A_2 - F_2 \\
 c_2 &= F_3 - \text{TM} \cdot A_3
 \end{aligned}$$

Para el cálculo de las partes de caliza x y arcilla, y, que corresponden a una parte de cenizas de piritita se aplican

las fórmulas antedichas. Pero primero hay que calcular los valores a_1 , b_1 , c_1 y a_2 , b_2 y c_2 .

$$a_1 = (2.8 K S_K \cdot S_1 + 1.65 A_1 + 0.35 F_1) - C_1 = \\ = (2.8 \cdot 0.92 \cdot 0.95 + 1.65 \cdot 0.92 + 0.35 \cdot 0.38) - 54.60 = \\ = -50.502$$

$$b_1 = (2.8 K S_K \cdot S_2 + 1.65 A_2 + 0.35 F_2) - C_2 = \\ = (2.8 \cdot 0.92 \cdot 68.00 + 1.65 \cdot 12.60 + 0.35 \cdot 2.95) - 5.70 = \\ = 191.290$$

$$c_1 = C_3 - (2.8 K S_K \cdot S_3 + 1.65 A_3 + 0.35 F_3) = \\ = 0.76 - (2.8 \cdot 0.92 \cdot 11.00 + 1.65 \cdot 1.50 + 0.35 \cdot 84.20) = \\ = -59.521$$

$$a_2 = SM (A_1 + F_1) - S_1 = 2.70 (0.92 + 0.38) - 0.95 = \\ = 2.560$$

$$b_2 = SM (A_2 + F_2) - S_2 = 2.70 (12.60 + 2.95) - 68.00 = \\ = -26.015$$

$$c_2 = S_3 - SM (A_3 + F_3) = 11.00 - 2.70 (1.50 + 84.20) = \\ = -220.390$$

Ahora se introducen los valores obtenidos en la fórmula para x-y

$$x = \frac{[-59.521 \cdot (-26.015)] - [(-220.390) \cdot 191.290]}{[-50.502 \cdot (-26.015)] - (2.560 \cdot 191.290)} = \\ = 53.03$$

$$y = \frac{[-50.502 \cdot (-220.390)] - [2.560 (-59.521)]}{[-50.502 \cdot (-26.015)] - (2.560 \cdot 191.290)} = \\ = 13.69$$

Con lo que resulta que a una parte de cenizas de pirita corresponden 53.03 partes de caliza y 13.69 partes de arcilla, de modo que expresándolo en porcentajes hay que poner:

Caliza	78.26 %
Arcilla	20.24 %
Cenizas de pirita	1.50 %

La exactitud del cálculo lo prueban las cifras de las columnas 4, 5, 6, 7 y 1 de la tabla 2.4.

Ejemplo 2.5.

Cálculo de un crudo constituido por tres componentes: caliza, escorias de horno alto y cenizas de pirita. El grado de saturación por la cal debe de ser 0.90 y el módulo de silicatos 2.5. Los análisis de las materias primas están en las columnas 1, 2 y 3 de la tabla 2.5.; las columnas 4, 5, 6, 7 y 8 de esa tabla contienen los valores calculados.

La marcha del cálculo es la misma que en el ejemplo 2.4.

$$a_1 = (2.8 K S_K \cdot S_1 + 1.65 A_1 + 0.35 F_1) - C_1 = \\ = (2.8 \cdot 0.90 \cdot 6.75 + 1.65 \cdot 0.71 + 0.35 \cdot 1.47) - 48.90 = \\ = -31.1040$$

$$b_1 = (2.8 K S_K \cdot S_2 + 1.65 A_2 + 0.35 F_2) - C_2 = \\ = (2.8 \cdot 0.90 \cdot 39.45 + 1.65 \cdot 9.67 + 0.35 \cdot 0.67) - 42.09 = \\ = 73.5140$$

$$c_1 = C_3 - (2.8 K S_K \cdot S_3 + 1.65 A_3 + 0.35 F_3) = \\ = 0.87 - (2.8 \cdot 0.90 \cdot 11.21 + 1.65 \cdot 1.57 + 0.35 \cdot 83.72) = \\ = -59.2717$$

$$a_2 = SM (A_1 + F_1) - S_1 = 2.5 (0.71 + 1.47) - 6.75 = \\ = -1.300$$

$$b_2 = SM (A_2 + F_2) - S_2 = 2.5 (9.67 + 0.67) - 39.45 = \\ = -13.600$$

$$c_2 = S_3 - SM (A_3 + F_3) = 11.21 - 2.5 (1.57 + 83.72) = \\ = -202.015$$

$$x = \frac{c_1 b_2 - c_2 b_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1} = \frac{15,657 \cdot 258}{518.5826} = 30.1919 \quad \begin{array}{l} \text{partes} \\ \text{de caliza} \end{array}$$

$$y = \frac{a_1 c_2 - a_2 c_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1} = \frac{6206.4213}{518.5826} = 11.9680 \quad \begin{array}{l} \text{partes} \\ \text{de escorias} \end{array}$$

$$1.000 \quad \begin{array}{l} \text{partes} \\ \text{de cenizas} \\ \text{de pirita} \end{array}$$

$$\text{Suma total } 43.1599 \cdot x = 100$$

que igualada a 100 da

$$x = \frac{100}{43.1599} = 2.317$$

$$\text{Caliza: } 30.1919 \cdot 2.317 = 69.95 \%$$

$$\text{Escorias: } 11.9680 \cdot 2.317 = 27.73 \%$$

$$\text{Cenizas de pirita: } 1.0000 \cdot 2.317 = 2.32 \%$$

$$\text{Suma total } 100.00 \%$$

La exactitud del cálculo lo prueban las cifras de las columnas 4, 5, 6, 7 y 8 de la tabla 2.5.

2.5. Cálculo de las cenizas del carbón absorbidas por el clinker

Si en la fabricación del clinker se aplica gas natural o fuel-oil, no hay incorporación de cenizas del combustible en aquél. Pero frente a esto se ha de considerar la absorción de cenizas del carbón cuando se emplea este combustible.

2. Cálculo de la composición del crudo

Tabla 2.5.

	1	2	3	4	5	6	7	8
	Caliza	Escorias de horno alto	Cenizas de pirita	Columna 1 × 0.6995	Columna 2 × 0.2773	Columna 3 × 0.0232	Crudo	Clinker
SiO ₂	6.75	39.45	11.21	4.72	10.94	0.26	15.92	22.03
Al ₂ O ₃	0.71	9.67	1.57	0.50	2.68	0.04	3.22	4.45
Fe ₂ O ₃	1.47	0.67	83.72	1.03	0.19	1.95	3.17	4.38
CaO	49.80	42.09	0.87	34.85	11.69	0.02	46.56	64.44
MgO	1.48	7.36	0.64	1.04	2.04	0.01	3.09	4.28
SO ₃	0.10	0.70	1.36	0.07	0.19	0.03	0.29	0.40
Pérdida al rojo	39.65	—	0.63	27.74	—	0.01	27.75	—
Resto	0.04	0.06	—	—	—	—	—	0.02
Suma	100.00	100.00	100.00	69.95	27.73	2.32	100.00	100.00
Satur. por la cal							0.90	0.90
Módulo silicatos							2.50	2.50

En modernos hornos largos, vía seca, y en los cortos dotados de intercambiador de calor, es decir, allí donde prácticamente no hay pérdida alguna de polvo, el clinker absorbe por completo las cenizas; los hornos rotatorios cortos con grandes pérdidas, muestran absorción pequeña. En general, en hornos rotatorios se puede contar con un 30 % hasta un 100 % de absorción de cenizas de carbón, según el tipo de horno. En los hornos de cuba (verticales) para cocción de clinker, éste siempre absorbe el 100 % de las cenizas del carbón. Para un determinado tipo constructivo de horno rotatorio la absorción de cenizas es constante.

Ejemplo 2.6.

Para el cálculo de la absorción de cenizas son válidos los análisis de las materias primas y el de las cenizas del carbón. Los símbolos para los componentes individualizados y los óxidos son los mismos que los dados antes. El porcentaje de cenizas absorbidas se representará por la letra q , con lo cual obtenemos las siguientes ecuaciones: [24]:

$$\begin{aligned} 100 C &= (100 - q_1) \cdot C_m + q_1 C_a \\ 100 S &= (100 - q_2) \cdot S_m + q_2 S_a \\ 100 A &= (100 - q_3) \cdot A_m + q_3 A_a \\ 100 F &= (100 - q_4) \cdot F_m + q_4 F_a \end{aligned}$$

Después de resolver estas ecuaciones según q , tenemos las expresiones siguientes:

$$q_1 = \frac{C - C_m}{C_a - C_m} \cdot 100; \quad q_2 = \frac{S - S_m}{S_a - S_m} \cdot 100;$$

$$q_3 = \frac{A - A_m}{A_a - A_m} \cdot 100; \quad q_4 = \frac{F - F_m}{F_a - F_m} \cdot 100.$$

La media aritmética de q_1 a q_4 da el valor buscado para q . En la tabla 2.6. figuran los análisis químicos del crudo, clinker y cenizas de carbón (el crudo está dado sin pérdida al rojo).

Tabla 2.6.

Oxido	Crudo	Clinker	Cenizas de carbón
SiO ₂	19.00	19.85	42.95
Al ₂ O ₃	8.25	8.92	27.88
Fe ₂ O ₃	2.80	3.31	17.60
CaO	66.60	64.45	4.95

Entonces es:

$$q_1 = \frac{64.45 - 66.60}{4.95 - 66.60} \cdot 100 = 3.49$$

$$q_2 = \frac{19.85 - 19.00}{42.95 - 19.00} \cdot 100 = 3.55$$

$$q_3 = \frac{8.92 - 8.25}{27.88 - 8.25} \cdot 100 = 3.41$$

$$q_4 = \frac{3.31 - 2.80}{17.60 - 2.80} \cdot 100 = 3.44$$

2.5. Cálculo de las cenizas del carbón absorbidas por el clinker

y la media aritmética

$$q = \frac{3.49 + 3.55 + 3.41 + 3.44}{4} = 3.47$$

Esto significa que la cantidad de cenizas de carbón que el clinker ha absorbido durante el proceso de cocción supone el 3.47 % del peso del clinker.

Ejemplo 2.7.

Aquí se aporta otro método para el cálculo de la influencia de las cenizas del carbón sobre la composición del clinker.

La composición química de las cenizas del carbón es:

SiO ₂	47.0 %
Al ₂ O ₃	29.1 %
Fe ₂ O ₃	12.5 %
CaO	6.6 %
MgO	1.8 %
K ₂ O } Na ₂ O }	2.8 %
Total	99.8 %

El clinker tiene la siguiente composición:

SiO ₂	21.5 %
Al ₂ O ₃	5.2 %
Fe ₂ O ₃	3.7 %
CaO	67.5 %
MgO	1.6 %
K ₂ O } Na ₂ O }	0.5 %
Total	100.0 %

La composición del clinker sin cenizas del carbón es:

$$\Delta = \frac{\% \text{ cantidad de carbón} \times \text{contenido en cenizas} \times \% \text{ del óxido componente}}{100 \times 100}$$

Se acepta que la cantidad de carbón es el 19 % del peso del clinker, las cenizas del carbón el 12 % y la absorción de cenizas del carbón el 100 %. Entonces, los componentes de las cenizas están en la siguiente proporción en el clinker:

$$\begin{aligned} \Delta \text{ SiO}_2 &= 0.19 \times 0.12 \times 47.0 = 1.07 \\ \Delta \text{ Al}_2\text{O}_3 &= 0.19 \times 0.12 \times 29.1 = 0.67 \\ \Delta \text{ Fe}_2\text{O}_3 &= 0.19 \times 0.12 \times 12.5 = 0.28 \\ \Delta \text{ CaO} &= 0.19 \times 0.12 \times 6.6 = 0.15 \\ \Delta \text{ MgO} &= 0.19 \times 0.12 \times 1.8 = 0.04 \\ \Delta \text{ Na}_2\text{O} \} &= 0.19 \times 0.12 \times 2.8 = 0.06 \\ \Delta \text{ K}_2\text{O} \} & \\ \hline & \qquad \qquad \qquad 99.8 \quad 2.27 \end{aligned}$$

En la tabla 2.7. se indica la composición corregida del clinker.

Los módulos del crudo, exento de pérdida al rojo (columna 5 de la tabla 2.7.) son:

Módulo hidráulico	2.36
Módulo de silicatos	2.58
Módulo de alúmina	1.32

Estos módulos constituyen la base para el cálculo del crudo, que consiste en dos o más componentes, por aplicación del método de cálculo, adecuado para varios componentes. El clinker cocido a partir del crudo calculado tiene la composición dada en la columna 2 de la tabla 2.7.

Tabla 2.7.

1	2	3	4	5
Oxido	Clinker	Δ	Crudo calcinado	Calculado a 100
SiO ₂	21.5	- 1.07	20.43	20.97
Al ₂ O ₃	5.2	- 0.67	4.53	4.63
Fe ₂ O ₃	3.7	- 0.28	3.42	3.49
CaO	67.5	- 0.15	67.35	68.87
MgO	1.6	- 0.04	1.56	1.59
Na ₂ O	0.5	- 0.06	0.44	0.45
K ₂ O				
Suma	100.0	2.27	97.73	100.00

2. Cálculo de la composición del crudo

Ejemplo 2.8.

Se trata de calcular un crudo, a partir de dos componentes, caliza y arcilla, teniendo en cuenta la influencia de las cenizas del carbón sobre la composición del clinker. El grado de saturación por la cal, KS_K , (según Kind) debe ser 0.90.

La composición química de estas tres materias primas componentes viene en las columnas 2, 3 y 4 de la tabla 2.8. [19].

El consumo de carbón referido al peso del clinker asciende al 35 %, el contenido de cenizas es de un 16.4 % y el porcentaje absorbido de cenizas del carbón representa el 65 %. Entonces, el contenido de cenizas tomadas por el clinker será:

$$q = \frac{35 \cdot 16.4 \cdot 65}{100 \cdot 100} = 3.73 \%$$

Ahora se calcularán los valores para a_1 , b_1 , c_1 , y para a_2 , b_2 , c_2 .

Para la marcha de este cálculo hay que aceptar que x partes de caliza con y partes de arcilla (sin pérdida al rojo) más q partes de cenizas dan 100 partes de clinker, por tanto:

$$x + y + q = 100$$

Aplicando los símbolos establecidos en la tabla 2.1. se puede establecer, para los óxidos en el clinker, las ecuaciones siguientes:

$$S = \frac{x S_1 + y S_2 + q S_a}{100}$$

$$F = \frac{x F_1 + y F_2 + q F_a}{100}$$

Si se introducen los datos anteriores en la fórmula para el grado de saturación por la cal para el clinker, se obtienen entonces las siguientes ecuaciones con dos incógnitas:

$$\begin{aligned} & x [(2.8 KS_K \cdot S_1 + 1.65 A_1 + 0.35 F_1) - C_1] + \\ & + y [(2.8 KS_K \cdot S_2 + 1.65 A_2 + 0.35 F_2) - C_2] = \\ & = [C_a - (2.8 KS_K \cdot S_a + 1.65 A_a + 0.35 F_a)] \cdot q \end{aligned}$$

La ecuación toma entonces la forma siguiente:

$$a_1 x + b_1 y = c_1$$

Utilizando estas abreviaturas obtenemos:

$$\begin{aligned} a_1 &= (2.8 KS_K \cdot S_1 + 1.65 A_1 + 0.35 F_1) - C_1 \\ b_1 &= (2.8 KS_K \cdot S_2 + 1.65 A_2 + 0.35 F_2) - C_2 \\ c_1 &= [C_a - (2.8 KS_K \cdot S_a + 1.65 A_a + 0.35 F_a)] \cdot q \end{aligned}$$

Tabla 2.8.

1	2	3	4	5	6	7	8
	Caliza	Arcilla	Cenizas de carbón	Columna 2 × 0.7139	Columna 3 × 0.2488	Columna 4 × 0.0373	Clinker
SiO ₂	3.89	70.03	51.32	2.78	17.42	1.92	22.12
Al ₂ O ₃	1.93	17.17	10.19	1.38	4.27	0.38	6.03
Fe ₂ O ₃	0.93	5.00	16.11	0.66	1.25	0.60	2.51
CaO	91.19	4.25	10.30	65.10	1.06	0.38	66.54
MgO	1.41	3.17	4.15	1.01	0.79	0.15	1.95
SO ₃	0.50	—	6.58	0.36	—	0.25	0.61
Resto	0.15	0.38	1.35	0.10	0.09	0.05	0.24
Suma	100.00	100.00	100.00	71.39	24.88	3.73	100.00
KSG							0.90
Módulo de silicatos							2.59
Módulo de alúmina							2.40

Para el cálculo de x e y hay que resolver estas dos ecuaciones:

$$\begin{aligned} a_1 x + b_1 y &= c_1 \\ x + y &= 100 - q \end{aligned}$$

Para obtener las fórmulas tal como se aplicaron en los cálculos anteriores, se utilizan de nuevo las abreviaturas siguientes para la segunda ecuación:

$$\begin{aligned} a_2 &= 1 \\ b_2 &= 1 \\ c_2 &= 100 - q \end{aligned}$$

La resolución de las dos ecuaciones

$$\begin{aligned} a_1 x + b_1 y &= c_1 \\ a_2 x + b_2 y &= c_2 \end{aligned}$$

da la fórmula para x e y .

$$\begin{aligned} x &= \frac{c_2 b_1 - c_1 b_2}{a_2 b_1 - a_1 b_2} \\ y &= \frac{a_2 c_1 - a_1 c_2}{a_2 b_1 - a_1 b_2} \end{aligned}$$

Ahora se calcula como sigue el ejemplo:

$$\begin{aligned} a_1 &= (2.8 \text{ KS}_K \cdot S_1 + 1.65 A_1 + 0.35 F_1) - C_1 = \\ &= (2.8 \cdot 0.90 \cdot 3.89 + 1.65 \cdot 1.93 + 0.35 \cdot 0.93) - 91.19 = \\ &= -77.878 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_1 &= (2.8 \text{ KS}_K \cdot S_2 + 1.65 A_2 + 0.35 F_2) - C_2 = \\ &= (2.8 \cdot 0.90 \cdot 70.03 + 1.65 \cdot 17.17 + 0.35 \cdot 5.00) - 4.25 = \\ &= 202.306 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_1 &= [C_a - (2.8 \text{ KS}_K \cdot S_a + 1.65 A_a + 0.35 F_a)] q = \\ &= [10.30 - (2.8 \cdot 0.90 \cdot 51.32 + 1.65 \cdot 10.19 + \\ &+ 0.35 \cdot 16.11)] \cdot 3.73 = -527.709 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_2 &= 1 \\ b_2 &= 1 \\ c_2 &= 100 - q = 100 - 3.73 = 96.27 \end{aligned}$$

Si se introducen esos valores en las fórmulas para x e y , se obtiene después de realizar la transformación en

$$x = \frac{c_2 b_1 - c_1 b_2}{a_2 b_1 - a_1 b_2} = \frac{96.27 \cdot 202.306 - (-527.709 \cdot 1)}{1 \cdot 202.306 - (-77.878 \cdot 1)} = 71.39$$

$$\begin{aligned} y &= \frac{a_2 c_1 - a_1 c_2}{a_2 b_1 - a_1 b_2} = \frac{(1 - 527.709) - (-77.878 \cdot 96.27)}{1 \cdot 202.306 - (-77.878 \cdot 1)} = \\ &= 24.88 \end{aligned}$$

Del cálculo resulta que en la formación del clinker participan un 71.39 % de caliza (exenta de pérdida al rojo), un 24.88 % de arcilla (sin pérdida al rojo) y un 3.73 % de cenizas del carbón.

La composición del clinker está dada en las columnas 5, 6 y 7 de la tabla 2.8.; como se deduce del cálculo, el grado de saturación por la cal es 0.90, es decir, el mismo que se había aceptado. Eso prueba la exactitud del curso del cálculo. Para realizar de modo práctico la dosificación de las materias primas, hemos de transformar las fórmulas para que sean aplicables a las materias primas en estado natural. Esto se realiza como sigue:

$$x_o = \frac{100 \cdot x}{(100 - \text{pérdida al rojo de la caliza})}$$

$$y_o = \frac{100 \cdot y}{(100 - \text{pérdida al rojo de la arcilla})}$$

2.6. Cálculo con cuatro materias primas componentes del crudo

El ejemplo siguiente contiene fórmulas para el cálculo del crudo, cálculo que parte de cuatro materias primas para grados de saturación por la cal, módulo de silicatos y módulo de alúmina elegidos.

Ejemplo 2.9.

Aceptemos que los cuatro componentes se comportan como la relación: componente 1 : componente 2 : componente 3 : componente 4 = $x:y:z:1$; además se introducirán las fórmulas de los óxidos, el grado de saturación por la cal, el módulo de silicatos y el módulo de alúmina. Las tres ecuaciones obtenidas se transformarán en la forma sencilla de tres ecuaciones lineales con tres incógnitas; como resultado obtendremos:

$$\begin{aligned} a_1 x + b_1 y + c_1 z &= d_1 \\ a_2 x + b_2 y + c_2 z &= d_2 \\ a_3 x + b_3 y + c_3 z &= d_3 \end{aligned}$$

En las cuales, por razón de simplificación, valen:

$$\begin{aligned} a_1 &= (2.8 \text{ KS}_K \cdot S_1 + 1.65 A_1 + 0.35 F_1) - C_1 \\ b_1 &= (2.8 \text{ KS}_K \cdot S_2 + 1.65 A_2 + 0.35 F_2) - C_2 \\ c_1 &= (2.8 \text{ KS}_K \cdot S_3 + 1.65 A_3 + 0.35 F_3) - C_3 \\ d_1 &= C_4 - (2.8 \text{ KS}_K \cdot S_4 + 1.65 A_4 + 0.35 F_4) \end{aligned}$$

2. Cálculo de la composición del crudo

$$\begin{aligned} a_2 &= SM (A_1 + F_1) - S_1 & a_3 &= TM \cdot F_1 - A_1 \\ b_2 &= SM (A_2 + F_2) - S_2 & b_3 &= TM \cdot F_2 - A_2 \\ c_2 &= SM (A_3 + F_3) - S_3 & c_3 &= TM \cdot F_3 - A_3 \\ d_2 &= S_4 - SM (A_4 - S_4) & d_3 &= A_4 - TM \cdot F_4 \end{aligned}$$

Después de resolver las ecuaciones anteriores según x, y, z, encontramos las fórmulas siguientes para el cálculo del crudo compuesto por cuatro materias primas componentes

$$\begin{aligned} x &= \frac{d_1 (b_2c_3 - b_3c_2) - d_2 (b_1c_3 - b_3c_1) + d_3 (b_1c_2 - b_2c_1)}{a_1 (b_2c_3 - b_3c_2) - a_2 (b_1c_3 - b_3c_1) + a_3 (b_1c_2 - b_2c_1)} \\ y &= \frac{a_1 (d_2c_3 - d_3c_2) - a_2 (d_1c_3 - d_3c_1) + a_3 (d_1c_2 - d_2c_1)}{a_1 (b_2c_3 - b_3c_2) - a_2 (b_1c_3 - b_3c_1) + a_3 (b_1c_2 - b_2c_1)} \\ z &= \frac{a_1 (b_2d_3 - b_3d_2) - a_2 (b_1d_3 - b_3d_1) + a_3 (b_1d_2 - b_2d_1)}{a_1 (b_2c_3 - b_3c_2) - a_2 (b_1c_3 - b_3c_1) + a_3 (b_1c_2 - b_2c_1)} \end{aligned}$$

2.7. Cálculo del crudo según el contenido potencial buscado en minerales del clinker

En este apartado se propondrá un método de cálculo que suministra las partes componentes, en porcentajes, para conseguir un clinker de una composición mineral posible y buscada.

Tabla 2.9.

	1	2	3	4	5	6
Componentes químicos	Caliza	Arcilla	Columna 1 × 0.6859	Columna 2 × 0.3141	Clinker	Composición potencial
SiO ₂	2.18	65.75	1.50	20.65	22.15	C ₃ S : 60.00
Al ₂ O ₃	0.88	17.05	0.60	5.36	5.96	C ₂ S : 18.14
Fe ₂ O ₃	0.67	6.95	0.46	2.18	2.64	C ₃ A : 11.67
CaO	95.33	5.55	65.39	1.74	67.13	C ₄ AF : 8.07
MgO	0.94	1.90	0.64	0.60	1.24	1.24
No determinado	—	2.80	—	0.88	0.88	0.88
Suma	100.00	100.00	68.59	31.41	100.00	100.00

Tabla 2.10.

	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	MgO	No dosado	Suma
Caliza	363.00	— 267.23	1.26	2.05	0.94	—	100.00
Arcilla	— 601.62	641.45	34.34	21.13	1.90	2.80	100.00

Ejemplo 2.10.

Sean dos materias primas caliza y arcilla, cuyas composiciones están en las columnas 1 y 2 de la tabla 2.9. Las columnas 3, 4, 5 y 6 contienen la composición calculada del clinker y la potencial de las fases. Utilizando las fórmulas de las secciones del apartado 1.6. se han calculado los cuatro minerales principales para las dos materias primas (libres de pérdida al rojo). La composición calculada de los minerales del clinker figura en la tabla 2.10. El paso próximo es mezclar la caliza y la arcilla en tal relación que la mezcla de los dos componentes dé un contenido en C₃S del 60 [12].

Esta relación se encuentra mediante la fórmula:

$$x = \frac{A - R}{A - B}$$

en donde x es la parte del segundo componente (arcilla); A, el porcentaje del mineral deseado en el componente 1 (caliza); B, el porcentaje de ese mismo mineral en el componente 2 (arcilla) y R, el porcentaje del mineral en la mezcla de los dos componentes: crudo o clinker. La tabla 2.11. contiene el cálculo de las partes, en peso, de caliza y arcilla que dan un 60 % de C₃S. Resulta evidente que para ello se necesita un 68.59 % de caliza y un 31.41 % de arcilla en la mezcla.

2.7. Cálculo del crudo según el contenido potencial buscado en minerales del clinker

Tabla 2.11.

Materias primas	C ₃ S		Proporción	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	MgO	No dosado	Suma
Caliza 1	(A) 363.00	A - R 303.00	0.6859	248.97	- 183.34	0.89	1.43	0.64	-	68.59
Arcilla 2	(B) - 601.62	A - B 964.62	$\frac{(A - R)}{(A - B)}$ 0.3141	- 188.97	201.48	10.78	6.64	0.60	0.88	31.41
Necesario	(R) 60.0		1.0000	60.00	18.14	11.67	8.07	1.24	0.88	100.00

Ejemplo 2.11.

Cálculo de un crudo compuesto por tres componentes (caliza, arcilla y arena) para obtener unos contenidos fijados de antemano para el silicato tricálcico y el silicato bicálcico.

Para esto se aplicará el cálculo con determinantes.

La composición de las materias primas viene en las columnas 1, 2 y 3 de la tabla 2.12. Se quiere determinar un crudo que contenga un 50 % de C₃S y un 25 % de C₂S.

La composición potencial de los minerales de los tres componentes figura en la tabla 2.13.

Sean:

- x = Partes de caliza
- y = Partes de arcilla
- z = Partes de arena

Por cada parte de arena corresponden x partes de caliza e y partes de arcilla.

Para resolver el problema establecemos, en primer lugar, tres ecuaciones lineales, como en el ejemplo 2.9.

$$\begin{aligned} a_1x + b_1y + c_1z &= d_1 \\ a_2x + b_2y + c_2z &= d_2 \\ a_3x + b_3y + c_3z &= d_3 \end{aligned}$$

y resolvemos x, y, z con ayuda de determinantes de tercer orden [26, 5]:

$$x = \frac{\begin{vmatrix} d_1 & b_1 & c_1 \\ d_2 & b_2 & c_2 \\ d_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}}; \quad y = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & d_1 & c_1 \\ a_2 & d_2 & c_2 \\ a_3 & d_3 & c_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}}; \quad z = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & d_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}}$$

La solución se logra multiplicando los tres elementos que se encuentran sobre una diagonal, como está representado esquemáticamente. A efectos de una mejor percepción se llevan las dos primeras columnas verticales a la derecha

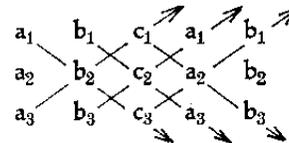


Tabla 2.12.

	1	2	3	4	5	6	7	8
	Caliza	Arcilla	Arena	Columna 1 × 0.7380	Columna 2 × 0.1635	Columna 3 × 0.0985	Clinker	Minerales %
SiO ₂	3.6	59.2	96.6	2.66	9.68	9.52	21.86	C ₃ S : 50
Al ₂ O ₃	3.5	28.1	2.1	2.58	4.59	0.21	7.38	C ₂ S : 25
Fe ₂ O ₃	2.7	11.6	1.3	1.99	1.90	0.12	4.01	C ₃ A : 13
CaO	90.2	1.1	-	66.57	0.18	-	66.75	C ₄ AF : 12
	100.00	100.00	100.00	73.80	16.35	9.85	100.00	100.-

2. Cálculo de la composición del crudo

Tabla 2.13.

	Caliza %	Arcilla %	Arena %
C ₃ S	312	- 651	- 750
C ₂ S	- 225	661	843
C ₃ A	5	55	3
C ₄ AF	8	35	4
Suma	100	100	100

Si se multiplica hacia abajo, los productos se suman y si la multiplicación es en dirección hacia arriba, los productos se restan como sigue:

$$a_1b_2c_3 + b_1c_2a_3 + c_1a_2b_3 - a_3b_2c_1 - b_3c_2a_1 - c_3a_2b_1$$

Pongamos ahora en las ecuaciones los contenidos en minerales de los componentes:

$$\begin{aligned} 312x - 651y - 750z &= 50 \\ -225x + 661y + 843z &= 25 \\ x + y + z &= 1 \end{aligned}$$

Solución

$$x = \frac{\begin{array}{ccc} 50 & -651 & -750 \\ 25 & 661 & 843 \\ 1 & 1 & 1 \end{array}}{\begin{array}{ccc} 312 & -651 & -750 \\ -225 & 661 & 843 \\ 1 & 1 & 1 \end{array}} = \frac{-64,618}{-87,552} = 0.7380 \text{ partes de caliza}$$

Tabla 2.14.

Minerales	Caliza	Arcilla	Arena	Clinker %
C ₃ S	312 × 0.7380 = 230.2	- 651 × 0.1635 = - 106.4	- 750 × 0.0985 = - 73.8	50
C ₂ S	- 225 × 0.7380 = - 166.0	661 × 0.1635 = 108.0	843 × 0.0985 = 83.0	25
C ₃ A	5 × 0.7380 = 3.7	55 × 0.1635 = 9.0	3 × 0.0985 = 0.3	13
C ₄ AF	8 × 0.7380 = 5.9	35 × 0.1635 = 5.7	4 × 0.0985 = 0.4	12
Suma	73.8	16.3	9.9	100

Tabla 2.15.

Minerales	Caliza	Arcilla	Arena	Clinker %
C ₃ S	312 × 0.7146 = 222.95	- 651 × 0.1651 = - 107.48	- 750 × 0.1203 = - 90.22	25
C ₂ S	- 225 × 0.7146 = - 160.78	661 × 0.1651 = 109.13	843 × 0.1203 = 101.41	50
C ₃ A	5 × 0.7146 = 3.57	55 × 0.1651 = 9.08	3 × 0.1203 = 0.36	13
C ₄ AF	8 × 0.7146 = 5.72	35 × 0.1651 = 5.18	4 × 0.1203 = 0.48	12
Suma	71.46	16.51	12.03	100

$$y = \frac{\begin{array}{ccc} 312 & 50 & -750 \\ -225 & 25 & 843 \\ 1 & 1 & 1 \end{array}}{\begin{array}{ccc} 312 & -651 & -750 \\ -225 & 661 & 843 \\ 1 & 1 & 1 \end{array}} = \frac{-14,316}{-87,552} = 0.1635 \text{ partes de arcilla}$$

El valor para z se halla por diferencia:

$$\begin{aligned} x + y + z &= 1 \\ 0.7380 + 0.1635 + 0.0985 &= 1.0000 \end{aligned}$$

Las fracciones porcentuales son (sin pérdida al rojo):

$$\begin{aligned} x &= 73.80 \% \\ y &= 16.35 \% \\ z &= 9.85 \% \end{aligned}$$

El cálculo de comprobación viene en la tabla 2.14.

La composición del clinker calculada, así como el contenido redondeado en minerales del clinker, como es habitual, se indica en las columnas 4, 5, 6, 7 y 8 de la tabla 2.12.

Si hubiéramos puesto en lugar de un 50 % de C₃S y un 25 % de C₂S, un 25 % de C₃S y un 50 % de C₂S, habríamos encontrado la composición en materias primas (sin pérdida al rojo):

$$\begin{aligned} x &= 71.46 \% \\ y &= 16.51 \% \\ z &= 12.03 \% \end{aligned}$$

La prueba se ha realizado en los cálculos tabulados para los minerales (véase la tabla 2.15.).

2.8. Contenido en óxidos y composición potencial

De lo que antecede se deduce que, pequeñas diferencias en las cantidades correspondientes a las dosificaciones y, por tanto, en los óxidos que las integran, producen fuertes variaciones en la composición potencial de las fases del clinker; en el último caso considerado, el C₃S disminuyó en un 50 % y el C₂S aumentó en un 100 %. El siguiente resumen tabulado de tres clínkeres, muestra también que con pequeñas variaciones en los contenidos de aquéllos en los distintos óxidos provocan grandes oscilaciones en la composición porcentual de la composición potencial. Véase la tabla 2.16. [27].

Tabla 2.16.

Análisis del clinker y composición potencial			
Componente	Clinker I %	Clinker II %	Clinker III %
SiO ₂	20.0	21.8	20.0
Al ₂ O ₃	7.0	7.6	5.5
Fe ₂ O ₃	3.0	3.3	4.5
CaO	66.0	63.0	66.0
Resto	4.0	4.3	4.0
Suma	100.0	100.0	100.0
C ₃ S	65.0	35.0	73.0
C ₂ S	8.0	36.0	2.0
C ₃ A	14.0	15.0	7.0
C ₄ AF	9.0	10.0	14.0

La tabla 2.16. contiene la composición química de los tres clínkeres diferentes. El contenido en óxidos de los mismos no difiere notablemente entre sí; sin embargo, la composición potencial calculada presenta diferencias importantes. Por tanto, en el cálculo de la composición del crudo se ha de tener en cuenta que una variación del orden del 1 % de CaO implica una variación del contenido en silicato tricálcico de, aproximadamente, un 10-14 %. Inversamente una variación del 1 % en silicato tricálcico, hacia arriba o hacia abajo, implica 1/14 = 0.07 X 1.78 = 0.12 % de la variación correspondiente en el contenido de cal. Si para valores constantes del CaO, varían los contenidos en los otros óxidos, se obtienen, en todo caso, valores distintos para los minerales resultantes en el clinker.

Aun para uno y el mismo clinker numéricamente se obtendrán diferentes composiciones potenciales, si, por un lado, se consideran solamente los cuatro óxidos principales que intervienen en la formación de los minerales o si se tienen en cuenta los componentes adicionales que los acompañan. Para representarlo numéricamente, se ha considerado el análisis del clinker como se ve al pie [28] de la página.

La composición potencial calculada es:

C ₃ S	=	48.25 %
C ₂ S	=	28.12 %
C ₃ A	=	8.18 %
C ₄ AF	=	7.61 %
Total		92.16 %

La relación de C₃S:C₂S = 1.71:1.

Los componentes accesorios contribuyen a la formación de los minerales:

- K ——— K₂SO₄; el resto de SO₃ para CaSO₄
- SO₃ ——— CaSO₄.
- TiO₂ ——— CaO · TiO₂
- Na₂O ——— 8 CaO · Na₂O₃ · 3 Al₂O₃ (C₃NA₃)
- Mn₂O₃ ——— 4 CaO · Al₂O₃ · Mn₂O₃ (C₄AMn)
- CaO libre

Por consideración de la formación de los minerales indicados, la composición potencial consiste en:

	%	MgO	1.80
CaO libre	1.0	C ₄ AF	7.61
K ₂ SO ₄	0.74	C ₄ AMn	0.92
CaSO ₄	3.84	C ₃ A	3.28
CaO · TiO ₂	0.86	C ₃ S	37.89
C ₃ NA ₃	5.27	C ₂ S	36.29
		Total	99.50

El examen de los dos resultados muestra grandes diferencias en la composición potencial del mismo clinker. También ha variado la relación entre los dos silicatos, C₃S:C₂S, que en el segundo ajuste de fases es sólo de 1:1. La diferencia en la composición potencial es fruto del diferente tipo de formaciones minerales que se haya aplicado para el cálculo.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	CaO*	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Insoluble	Pérdida al rojo	Suma
22.5	5.0	2.5	0.5	0.3	63.0	1.8	0.4	0.4	2.6	0.5	0.5	100.0

*Incluido el 1 % de CaO libre

