

Identificación de los compuestos anhidros e hidratados del cemento

FERNANDO TRIVIÑO VAZQUEZ
Dr. en Ciencias Químicas

Para la identificación fácil y sistemática de estos compuestos se efectuó una comprobación experimental de sus líneas de difracción, dadas en la bibliografía.

Se llevó a cabo una clasificación de las líneas de difracción de los compuestos considerados, ordenándolas por sus correspondientes valores d de los espaciados interplanares, expresados en Å, de mayor a menor. Asimismo, se asignó a cada una de las citadas líneas de difracción la intensidad relativa correspondiente, con respecto a la de máxima intensidad para cada especie en particular. Igualmente se indicó en cada caso el valor angular 2θ en grados, de la reflexión obtenida, según la ley de Bragg, con la radiación $\text{Cu K}\alpha_1$, $\lambda = 1,54050 \text{ Å}$.

Con todos los datos disponibles tomados de la bibliografía sin confirmación posterior, o confirmados, relativos a especies obtenidas por síntesis en este Instituto y comparados con los de las mismas especies descritas en la bibliografía, o relativos a especies sintetizadas por nosotros, de las cuales no existen valores precedentes, se confeccionó una tabla y un gráfico transparente. En este último se expresó la intensidad de cada reflexión por la longitud correspondiente de la línea representativa (ordenadas), con una letra distintiva para cada compuesto; los espaciados d , indicados por su correspondiente valor angular 2θ , se sitúan en el eje de abscisas.

Con esta disposición en el transparente, y por superposición del mismo sobre la gráfica de difracción obtenida del problema, para igual velocidad de registro y del goniómetro, es fácil saber con rapidez y garantía:

- Si se halla presente o no en una circunstancia determinada (análisis cualitativo) un cierto compuesto. La presencia de éste se deduce de la coincidencia de varias de sus líneas en la gráfica y en el transparente.
- Cuáles son las líneas no interferidas, aptas para la determinación cuantitativa de cada especie.
- Cuál es la intensidad de las eventuales interferencias, y si éstas invalidan o no la aplicación de una determinada línea para fines cuantitativos.

También se indica con un asterisco las líneas seleccionadas para la más fácil identificación de las respectivas especies.

El transparente está efectuado para gráficas de difracción obtenidas con un aparato Philips PW 1040, con una velocidad angular de 2°/min y velocidad de carta 40, pudiendo también servir para velocidades angulares y de carta de los siguientes valores: 1° — 20, 1/2° — 10, y 1/4° — 5; para otras condiciones será preciso efectuar una ampliación o reducción del transparente.

Tabla para la identificación de compuestos anhidros e hidratados del clínker

COMPUESTOS	SÍMBOLO	ESPACIADOS	INTENSIDAD	2θ°
Tobermorita (C ₅ S ₆ H ₅)	T	11,00	100	8,02
Ettringita (C ₃ A.Cs ₃ .H ₃₂)	E*	9,73	100	9,02
Monosulfoaluminato tricálcico (C ₃ A.Cs.H ₁₂)	M	8,92	100	9,90
Ettringita		8,86	10	9,97
Aluminato tricálcico (C ₃ A)	A	8,82	1	10,02
Aluminato tetracálcico hidratado (C ₄ AH ₁₃)	a*	8,20	100	10,78
Carboaluminato (C ₃ A.Cc.H ₁₂)	c*	7,60	100	11,63
Yeso (CsH ₂)	Y*	7,56	100	11,70
Ferrito aluminato tetracálcico (C ₄ AF)	F*	7,24	60	12,21
Aluminato tricálcico		6,83	6	12,95
Aluminato tricálcico		6,23	1	14,20
Ettringita	*	5,61	60	15,79
Tobermorita		5,60	30	15,81
Aluminato tricálcico		5,40	1	16,40
Aluminato tricálcico		5,09	5	17,41
Ettringita		4,98	35	17,80
Carboaluminato		4,93	1	17,97
Aphthitalita (Ks ₃ .Ns)	Ap*	4,92	17	17,98
Hidróxido de calcio (CH)	H*	4,90	74	18,09
Monosulfoaluminato		4,88	6	18,16
Ettringita		4,86	8	18,23
Monosulfoaluminato		4,72	6	18,78
Ettringita		4,69	59	18,91
Belita (β-C ₂ S)	B	4,65	20	19,06
Aluminato tetracálcico hidratado		4,62	1	19,19
Monosulfoaluminato		4,46	60	19,89
Ettringita		4,41	0,2	20,11
Carboaluminato		4,41	1	20,11
Yeso	*	4,27	51	20,80
Aluminato tricálcico		4,24	12	20,95
Aluminato tetracálcico hidratado		4,09	28	21,71
Aphthitalita		4,06	23	21,81
Ettringita		4,02	8	22,10
Monosulfoaluminato		3,99	1	22,26
Carboaluminato		3,97	1	22,37
Aluminato tetracálcico hidratado		3,88	70	22,90
Ettringita		3,88	80	22,90
Carbonato cálcico (Cc)	C*	3,86	10	23,02
Belita		3,83	4	23,20

Tabla para la identificación de compuestos anhidros e hidratados del clínker

COMPUESTOS	SÍMBOLO	ESPACIADOS	INTENSIDAD	2 θ °
Aluminato tricálcico		3,82	2	23,33
Carboaluminato		3,80	45	23,39
Aluminato tetracálcico hidratado		3,80	70	23,39
Belita		3,79	4	23,45
Yeso		3,79	21	23,45
Aluminato tricálcico		3,70	1	24,00
Ettringita		3,67	8	24,22
Aphthitalita		3,66	45	24,29
Monosulfoaluminato		3,65	6	24,36
Carboaluminato		3,65	1	24,36
Aluminato tetracálcico hidratado		3,63	10	24,50
Ferrito aluminato tetracálcico		3,63	20	24,50
Anhidrita	y*	3,49	100	25,44
Ettringita		3,48	50	25,47
Carboaluminato		3,46	1	25,72
Ferrito aluminato tetracálcico		3,39	2	26,26
Belita		3,38	12	26,35
Aluminato tricálcico		3,33	4	26,74
Carboaluminato		3,30	1	26,99
Ettringita		3,27	10	27,24
Aluminato tricálcico		3,25	1	27,40
Belita		3,24	15	27,50
Ettringita		3,24	32	27,50
Belita		3,18	4	28,03
Carboaluminato		3,17	1	28,12
Yeso		3,16	3	28,20
Aluminato tricálcico		3,12	1	28,58
Hidróxido cálcico		3,11	23	28,66
Tobermorita		3,07	100	29,06
Yeso		3,06	57	29,18
Aluminato tricálcico		3,05	3	29,24
Belita		3,05	22	29,24
Carboaluminato		3,04	1	29,35
Alita (C ₃ S)	A*	3,039	65	29,36
Aluminato tetracálcico hidratado		3,035	100	29,40
Ettringita		3,016	3	29,59
Aluminato tricálcico		2,993	100	29,83
Hemihidrato	H*	2,980	100	29,95
Alita	*	2,973	20	30,03
Tobermorita		2,970	70	30,06
Aphthitalita	*	2,936	70	30,42
Belita	*	2,878	12	31,04
Aluminato tetracálcico hidratado		2,873	7	31,10
Monosulfoaluminato		2,870	70	31,13
Yeso		2,867	5	31,18

Tabla para la identificación de compuestos anhidros e hidratados del clinker

COMPUESTOS	SÍMBOLO	ESPACIADOS	INTENSIDAD	2 θ
Carboaluminato		2,860	25	31,25
Carbonato cálcico		2,845	3	31,42
Aluminato tricálcico		2,834	8	31,54
Aluminato tetracálcico hidratado		2,830	20	31,58
Aphthitalita	*	2,830	100	31,58
Belita		2,813	12	31,78
Ettringita		2,806	12	31,86
Tobermorita		2,800	80	31,93
Belita		2,794	100	32,00
Aluminato tricálcico		2,787	13	32,09
Yeso		2,786	5	32,10
Belita		2,785	100	32,12
Carboaluminato		2,780	8	32,19
Oxido cálcico (C)	<u>C</u>	2,778	34	32,20
Alita		2,778	100	32,22
Ettringita		2,773	64	32,26
Ferrito aluminato tetracálcico		2,770	25	32,29
Alita		2,748	95	32,56
Belita		2,748	78	32,56
Alita		2,744	65	32,60
Belita		2,732	12	32,75
Monosulfoaluminato		2,730	40	32,77
Carboaluminato		2,730	8	32,77
Aluminato tetracálcico hidratado		2,720	60	32,90
Belita		2,718	12	32,92
Ettringita		2,714	3	32,97
Aluminato tricálcico	A*	2,700	100	33,14
Ettringita		2,697	3	33,19
Ettringita		2,680	11	33,40
Aluminato cálcico (C ₁₂ A ₇)	a*	2,680	100	33,40
Ferrito bicálcico (C ₂ F)	<u>f*</u>	2,680	100	33,40
Yeso		2,679	28	33,42
Ferrito aluminato tetracálcico	F*	2,670	35	33,54
Aphthitalita		2,646	5	33,85
Ferrito aluminato tetracálcico	F*	2,630	100	34,06
Hidróxido cálcico	*	2,628	100	34,09
Aluminato tetracálcico hidratado		2,619	30	34,21
Ettringita		2,616	30	34,25
Belita		2,609	48	34,34
Alita		2,606	90	34,38
Monosulfoaluminato		2,600	5	34,46
Aluminato tetracálcico hidratado		2,590	10	34,60
Aluminato tricálcico		2,581	3	34,73
Ferrito aluminato tetracálcico		2,570	15	34,88
Ettringita		2,564	75	34,97

Tabla para la identificación de compuestos anhidros e hidratados del clinker

COMPUESTOS	SÍMBOLO	ESPACIADOS	INTENSIDAD	2θ°
Aluminato tetracálcico hidratado		2,547	60	35,21
Belita		2,546	10	35,22
Carboaluminato		2,530	10	35,45
Yeso		2,530	1	35,45
Ettringita		2,524	5	35,53
Aluminato tricálcico		2,512	1	35,71
Carbonato cálcico		2,495	15	35,96
Yeso		2,495	6	35,96
Carboaluminato		2,490	8	36,06
Aluminato tetracálcico hidratado		2,490	10	36,06
Ettringita		2,487	6	36,08
Aluminato tricálcico		2,477	1	36,23
Aluminato tetracálcico hidratado		2,466	5	36,40
Aphthitalita		2,462	16	36,46
Belita		2,452	11	36,62
Monosulfoaluminato		2,450	60	36,65
Aluminato tetracálcico hidratado		2,450	90	36,65
Yeso		2,450	4	36,65
Carboaluminato		2,450	30	36,65
Hidróxido cálcico		2,447	3	36,69
Aphthitalita		2,440	7	36,80
Aluminato tetracálcico hidratado		2,440	70	36,80
Belita		2,434	11	36,90
Ettringita		2,434	1	36,90
Ferrito aluminato tetracálcico		2,430	2	37,00
Ettringita		2,422	14	37,08
Carboaluminato		2,420	7	37,11
Aluminato tricálcico		2,413	8	37,23
Monosulfoaluminato		2,410	50	37,27
Belita		2,409	11	37,30
Oxido cálcico	*	2,405	100	37,35
Ettringita		2,401	0,5	37,41
Yeso		2,400	4	37,44
Aluminato tricálcico		2,384	5	37,70
Aluminato tricálcico		2,355	2	38,18
Monosulfoaluminato		2,350	10	38,26
Ettringita		2,347	6	38,31
Carboaluminato		2,340	16	38,43
Aluminato tetracálcico hidratado		2,340	6	38,43
Monosulfoaluminato		2,330	16	38,61
Aphthitalita		2,327	15	38,66
Alita		2,323	16	38,72
Belita		2,322	2	38,74
Alita		2,320	20	38,78
Aluminato tetracálcico hidratado		2,307	2	39,02

Tabla para la identificación de compuestos anhidros e hidratados del clinker

COMPUESTOS	SÍMBOLO	ESPACIADOS	INTENSIDAD	2 θ
Belita		2,305	2	39,04
Carboaluminato		2,290	8	39,31
Carbonato cálcico		2,285	18	39,40
Belita		2,282	12	39,45
Aluminato tricálcico		2,277	4	39,54
Aluminato tetracálcico hidratado		2,270	2	39,67
Monosulfoaluminato		2,250	16	40,02
Carboaluminato		2,240	6	40,20
Ettringita		2,230	12	40,40
Yeso		2,216	6	40,68
Aluminato tetracálcico hidratado		2,210	7	40,79
Ettringita		2,209	62	40,82
Yeso		2,216	6	40,68
Aluminato tetracálcico hidratado		2,210	7	40,79
Ettringita		2,209	62	40,82
Aluminato tricálcico		2,204	14	40,92
Ferrito aluminato tetracálcico		2,200	15	40,98
Belita		2,196	12	41,18
Monosulfoaluminato		2,190	15	41,19
Belita		2,189	46	41,20
Aphthitalita		2,186	3	41,26
Ettringita		2,185	8	41,29
Alita		2,184	40	41,30
Aluminato tricálcico		2,181	2	41,36
Alita		2,180	40	41,39
Carboaluminato		2,170	8	41,58
Alita		2,170	10	41,58
Aluminato tetracálcico hidratado		2,169	1	41,60
Alita		2,166	10	41,66
Belita		2,166	12	41,66
Alita		2,163	10	41,72
Ettringita		2,154	30	41,90
Ferrito aluminato tetracálcico		2,150	15	41,98
Yeso		2,139	1	42,22
Aluminato tricálcico		2,138	2	42,23
Belita		2,132	10	42,36
Ettringita		2,130	3	42,40
Ettringita		2,124	8	42,52
Carboaluminato		2,110	8	42,82
Aluminato tricálcico		2,097	3	43,10
Carbonato cálcico		2,095	18	43,14
Belita		2,094	25	43,16
Aluminato tetracálcico hidratado		2,047	4	44,20
Belita		2,042	25	44,32
Aphthitalita		2,040	3	44,36

Tabla para la identificación de compuestos anhidros e hidratados del clinker

COMPUESTOS	SÍMBOLO	ESPACIADOS	INTENSIDAD	2 θ
Ferrito aluminato tetracálcico		2,040	42	44,36
Ettringita		2,033	0,1	44,52
Ettringita		2,027	2	44,66
Belita		2,026	25	44,69
Aluminato tricálcico		2,021	0,5	44,80
Belita		2,020	20	44,83
Carboaluminato		2,010	9	45,06
Yeso		1,990	4	45,58
Monosulfoaluminato		1,990	17	45,58
Aluminato tricálcico		1,988	4	45,59
Belita		1,984	12	45,69
Alita		1,983	10	45,71
Aluminato tetracálcico hidratado		1,983	5	45,71
Ettringita		1,979	5	45,81
Alita		1,977	10	45,86
Yeso		1,955	2	46,46
Aluminato tricálcico		1,955	4	46,46
Ettringita		1,940	17	46,80
Carboaluminato		1,940	7	46,80
Aluminato tricálcico		1,940	0,5	46,80
Aluminato tetracálcico hidratado		1,939	2	46,81
Alita		1,938	10	46,83
Hidróxido cálcico		1,934	10	46,94
Carbonato cálcico		1,927	5	47,12
Ferrito aluminato tetracálcico		1,920	54	47,30
Belita		1,913	12	47,49
Carbonato cálcico		1,913	17	47,49
Aluminato tricálcico		1,908	47	47,62
Ettringita		1,898	3	47,85
Yeso		1,898	16	47,85
Belita		1,897	11	47,92
Aluminato tricálcico		1,893	6	48,02
Belita		1,893	11	48,02
Carboaluminato		1,880	8	48,36
Yeso		1,880	8	48,40
Carbonato cálcico		1,875	17	48,51
Ettringita		1,873	2	48,56
Aluminato tetracálcico hidratado		1,860	1	48,90
Ferrito aluminato tetracálcico		1,860	22	48,90
Carboaluminato		1,860	8	48,90
Ettringita		1,852	10	49,15
Aphthitalita		1,850	5	49,21
Belita		1,847	3	49,29
Yeso		1,843	1	49,40
Aluminato tricálcico		1,838	2	49,55

Tabla para la identificación de compuestos anhidros e hidratados del clinker

COMPUESTOS	SÍMBOLO	ESPACIADOS	INTENSIDAD	2 θ °
Ettringita		1,833	4	49,69
Aphthitalita		1,832	5	49,72
Tobermorita		1,830	70	49,80
Carboaluminato		1,830	10	49,80
Aluminato tricálcico		1,824	4	49,96
Alita		1,823	10	49,96
Belita		1,820	1	50,07
Ettringita		1,813	3	50,28
Ettringita		1,812	3	50,30
Yeso		1,812	10	50,30
Ferrito aluminato tetracálcico		1,810	22	50,36
Belita		1,809	2	50,39
Belita		1,803	3	50,58
Aluminato tricálcico		1,799	1	50,70
Hidróxido cálcico		1,796	40	50,79
Yeso		1,796	4	50,79
Belita		1,791	1	50,95
Aluminato tricálcico		1,785	0,5	51,13
Yeso		1,778	10	51,34
Aluminato tetracálcico hidratado		1,773	21	51,49
Belita		1,768	1	51,65
Alita		1,766	10	51,71
Aluminato tricálcico		1,763	0,5	51,81
Belita	*	1,762	1	51,84
Alita		1,761	40	51,86
Aluminato tetracálcico hidratado		1,754	3	52,10
Ettringita		1,750	2	52,23
Aluminato tricálcico		1,740	0,5	52,25
Ferrito aluminato tetracálcico		1,730	9	52,87
Aluminato tricálcico		1,727	0,5	52,97
Belita		1,718	1	53,27
Yeso		1,711	1	53,48
Belita		1,707	1	53,65
Aluminato tricálcico		1,706	0,5	53,68
Oxido cálcico	*	1,701	45	53,85
Ettringita		1,700	5	53,86
Belita		1,696	1	54,02
Aluminato tricálcico		1,695	0,5	54,05
Carboaluminato		1,690	2	54,23
Aluminato tetracálcico hidratado		1,688	1	54,29
Hidróxido cálcico		1,687	21	54,34
Yeso		1,684	1	54,45
Aluminato tricálcico		1,675	0,5	54,75
Tobermorita		1,670	80	54,93
Carboaluminato		1,666	6	55,10

Tabla para la identificación de compuestos anhidros e hidratados del clinker

COMPUESTOS	SÍMBOLO	ESPACIADOS	INTENSIDAD	2θ°
Aluminato tetracálcico hidratado		1,662	3	55,22
Yeso		1,662	4	55,22
Ettringita		1,660	6	55,28
Aphthitalita		1,654	8	55,50
Monosulfoaluminato		1,650	60	55,64
Aluminato tricálcico		1,646	0,5	55,81
Yeso		1,645	2	55,84
Carboaluminato		1,640	8	56,02
Belita		1,635	3	56,21
Aphthitalita		1,635	9	56,21
Hidróxido cálcico		1,634	1	56,25
Alita		1,629	20	56,45
Aluminato tetracálcico hidratado		1,628	20	56,49
Aluminato tricálcico		1,627	1	56,52
Belita		1,627	3	56,52
Carbonato cálcico		1,626	4	56,56
Alita		1,625	10	56,60
Belita		1,621	1	56,74
Yeso		1,621	6	56,74
Ettringita		1,620	2	56,78
Aluminato tricálcico		1,618	2	56,85
Belita		1,615	1	56,97
Aluminato tricálcico		1,610	0,5	57,16
Carbonato cálcico		1,604	8	57,40
Carboaluminato		1,600	8	57,54
Yeso		1,599	1	57,58
Carbonato cálcico		1,587	2	58,06

