

Dosificación de hormigones en las obras de riegos del Alto Aragón

Importancia del problema

En las obras metálicas y de fábrica (ladrillo, sillera, etc.), en que son perfectamente conocidas y constantes las condiciones mecánicas de los materiales empleados, es generalmente sencillo llegar a la solución de seguridad necesaria con el mínimo coste. Conocemos las máximas cargas resistentes y es fácil llegar al mínimo de volumen.

Al emplear el hormigón, bien en masa o armado, el problema se complica extraordinariamente, pues la solución más económica no coincide con la de menor volumen de obra. La resistencia de un hormigón varía entre límites muy extensos, dependientes de la cantidad de cemento a emplear, del agua y de su trabajabilidad. Es decir, puede emplearse hormigón muy resistente, de gran coste, con mínimo volumen de obra y hormigón pobre, de pequeño coste, con máximo volumen.

Con sólo esta división de los hormigones en dos grandes grupos, ya se presenta un problema más a resolver que en el caso anterior: clase de hormigón a emplear.

Pero no terminan aquí las incógnitas tratándose de hormigones, sino que se complica más el problema: *Hormigones de la misma resistencia se pueden obtener con cantidades muy variables de cemento.* Con sólo este enunciado se ve cuán importante es llegar a obtener una buena dosificación, que permita llegar al hormigón más económico dentro de la misma resistencia.

La importancia de la dosificación de hormigones llega al extremo de que su estudio puede preceder al de estructuras. Podría estudiarse una serie de hormigones de resistencias variables y para cada uno de ellos la estructura más económica.

En las obras de Riegos del Alto Aragón, donde el empleo de hormigones alcanza una enorme cifra de metros cúbicos, la Dirección, dándose cuenta de la enorme trascendencia del problema, ordenó la compra del laboratorio que la Sociedad Riegos y Fuerzas del Ebro tenía, para instalarlo en las obras, y los óptimos resultados obtenidos demuestran el acierto de tal disposición.

Expondremos, por si pueden ser útiles a otros constructores, los trabajos ejecutados en el citado laboratorio, que sirvieron de base para redactar el proyecto reformado de las obras de Presa y Canal del Gállego, ya aprobado por la Superioridad, y cuya ejecución está muy avanzada.

Hormigones de diversas características

Sabido es que según el empleo que se dé a un hormigón deberá prevalecer una u otra de sus cualidades.

En los hormigones que se emplean en presas u obras de contención de aguas y trabajando por su propio peso, tiene suma importancia la impermeabilidad, y, por tanto, su compacidad, que contribuye, a la vez,

a dar el mínimo volumen de fábrica. Al dosificar estos hormigones, la cantidad de cemento que se necesita es tal, que, aun empleando exceso de agua para aumentar su factor de trabajabilidad, la resistencia obtenida es muy superior a la exigida por las cargas de trabajo, relativamente pequeñas, aun con grandes coeficientes de seguridad.

En otras obras, los hormigones necesitan el máximo de resistencia, no teniendo importancia su mayor o menor permeabilidad, aunque sí debe procurarse, dentro de la mezcla empleada, que se coloque en obra con el máximo de compacidad; si la impermeabilidad efecta a una pequeña parte de la obra, puede obtenerse con un enlucido; el resto de la obra se caracteriza por ser elemento resistente sometido, por regla general, a cargas de trabajo grandes, y de aquí que la economía esté en obtener hormigones muy resistentes con la menor cantidad de cemento.

La primera clase de hormigones se estudió con motivo de la construcción de la presa. Los trabajos realizados en el laboratorio y resultados obtenidos explican claramente cuanto se refiere a ellos y dan idea exacta de los beneficios obtenidos con una buena dosificación.

Reducción de volumen y economía en la presa

El perfil de presa, en el primer proyecto aprobado (fig. 1.^a), era triangular; con el paramento de agua

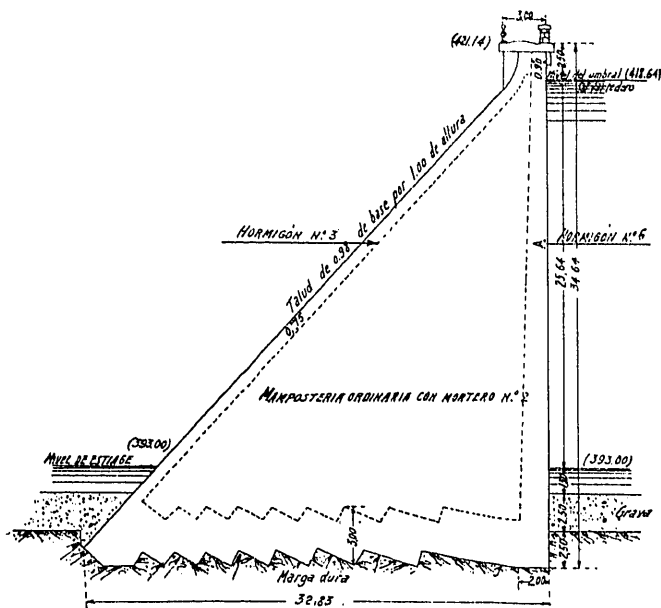


Fig. 1.ª Perfil tipo de la presa

arriba vertical, y el de agua abajo, con talud determinado por $\tan \alpha = 0,98$, según la conocida condición de M. Levy. La fábrica se proyectó de mampostería ciclópea compuesta de la arenisca local y mortero número 2; envolviéndose este núcleo de mampostería

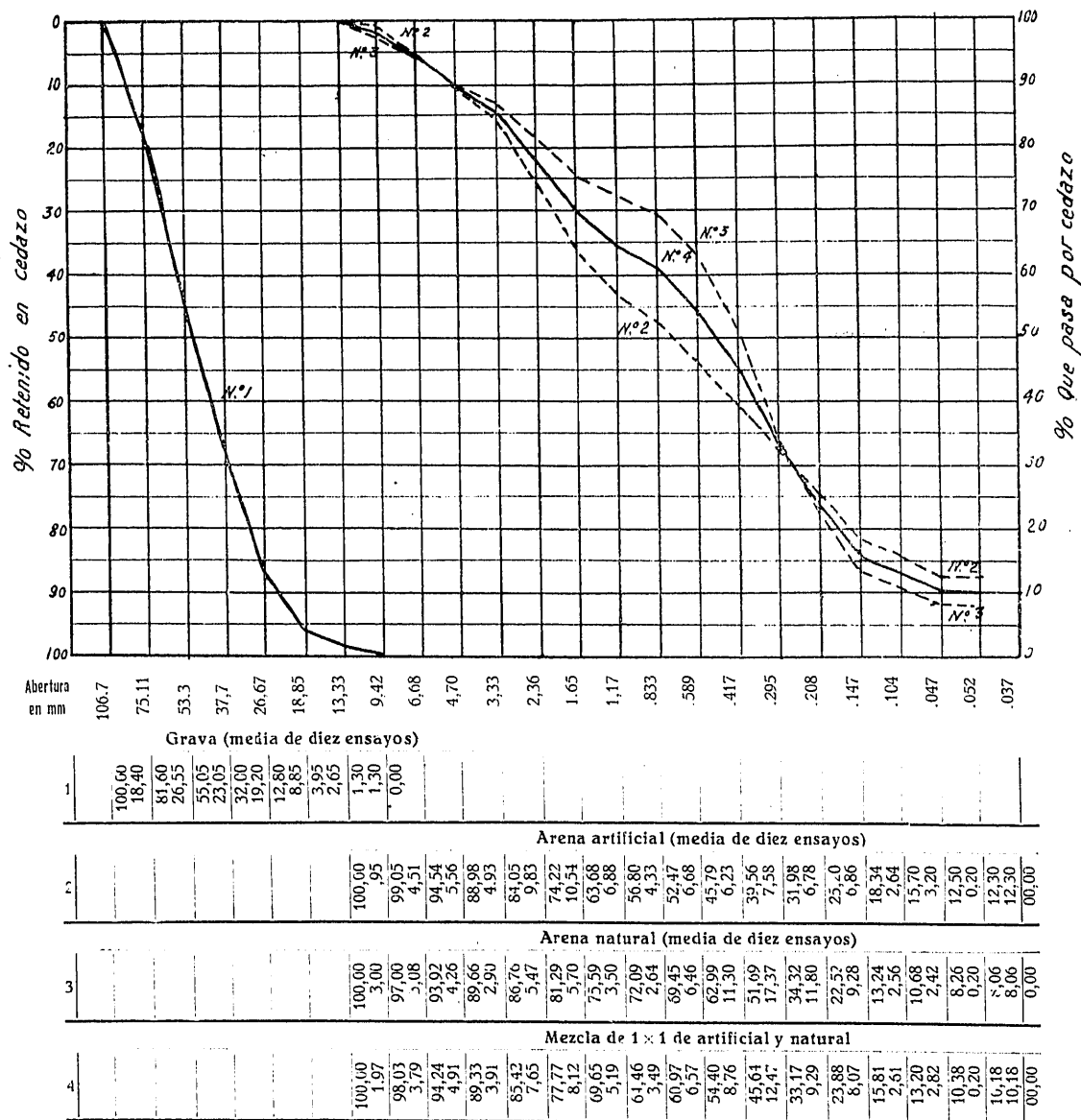


Fig. 2.ª Presa y canal del Gállego: Análisis mecánicos de grava y arenas artificial y natural

en espeso forro de hormigón, tanto por el lado del cimientto como por ambos paramentos. El estudio minucioso del aprovechamiento de los áridos existentes para obtener mezclas más pesadas, más impermeables, esto es, más eficaces y, a la vez, más económicas que las proyectadas, permitió adelgazar el perfil, reduciendo la tangente del ángulo entre paramentos de 0,98, que era en el proyecto aprobado, a 0,87.

La presa, pues, resulta más económica por menos voluminosa y por menor dosis de cemento en metro cúbico.

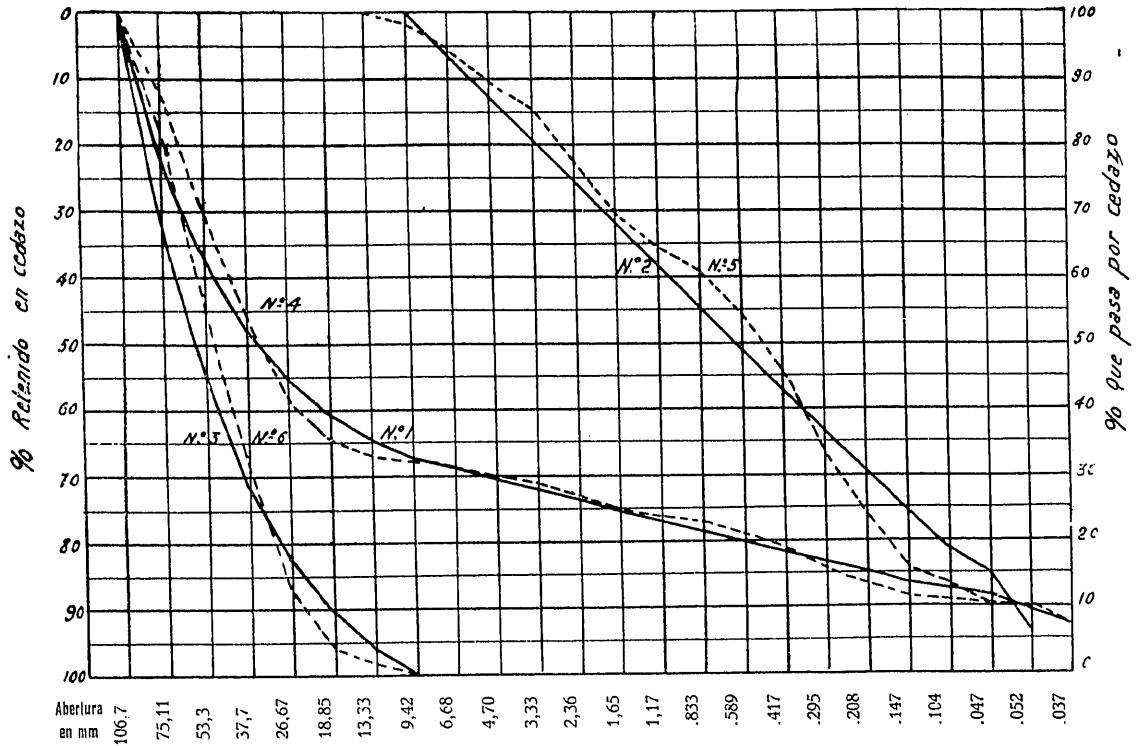
Detallemos.

Procedimiento empleado para el estudio de las mezclas

Vistos los elementos de trituración de piedra y de clasificación, se comenzó fijando el tamaño máximo del aglomerado, que, según la teoría, debe ser el mayor posible, puesto que ello disminuye la cantidad de aglomerante, sin disminuir la resistencia y compacidad: se fijó en 106,70 mm, que es el dado por las clasificadoras, y que puede manejarse fácilmente en las hormigoneras.

Fijado el tamaño máximo se procedió al estudio

de la curva de máxima compacidad, tomando como abscisas las dimensiones de las mallas de los cedazos empleados en la clasificación, y como ordenadas los tantos por ciento, en peso, retenidos en cada cedazo. Los cedazos empleados en el análisis mecánico son los llamados «serie de Taylor», en los que cada uno tiene una superficie de huecos doble que el anterior, o sea una dimensión igual al inmediato inferior multiplicada por $\sqrt{2}$. La curva, para gravas y arenas, tiene la figura de una elipse en la parte correspondiente a los pequeños tamaños, prolongada por la tangente a la elipse trazada desde la ordenada correspondiente al tamaño máximo. Pero como dibujar las curvas de análisis en la forma indicada tiene el inconveniente de que para los pequeños tamaños quedan muy próximas las ordenadas, resultando un dibujo confuso, en la práctica se toman como abscisas no las dimensiones de las mallas, sino sus logaritmos, los cuales se diferenciarán siempre en una cantidad constante, puesto que los tamaños crecen en progresión geométrica cuya razón es $\sqrt{2}$. Hemos empleado este artificio para el dibujo de los gráficos de análisis mecánico, empezando por dibujar la curva sobre abscisas en escala aritmética y trasladándola seguidamente



Curva teórica para un 7,50 por 100 de cemento	
1	100,00
	22,18
	77,82
	15,05
	62,77
	10,76
	52,01
	7,61
	44,40
	5,39
	39,01
	3,81
	35,20
	2,70
	32,50
	1,59
	30,91
	1,59
	29,32
	1,59
	27,73
	1,59
	26,14
	1,59
	24,55
	1,59
	22,96
	1,59
	21,37
	1,59
	19,78
	1,59
	18,19
	1,59
	16,60
	1,53
	15,07
	1,41
	13,66
	1,44
	12,22
	0,86
	11,36
	2,15
	9,21
	1,71
	7,50

Curva teórica de arena	
2	100,00
	6,36
	93,64
	6,36
	87,28
	6,36
	80,82
	6,36
	74,46
	6,36
	68,10
	6,36
	61,74
	6,36
	55,38
	6,36
	49,02
	6,36
	42,66
	6,36
	36,30
	6,12
	30,18
	5,64
	24,54
	5,70
	18,78
	3,45
	15,23
	8,60
	6,63
	7,50

Curva teórica de grava	
3	100,00
	32,85
	67,15
	22,29
	44,86
	15,94
	28,97
	11,27
	41,15
	7,98
	35,18
	5,64
	33,39
	4,03
	32,00
	0,00

Curva real de hormigón	
4	100,00
	12,42
	87,58
	17,92
	69,66
	15,55
	54,11
	12,96
	41,15
	5,97
	35,18
	1,79
	33,39
	1,39
	32,00
	0,95
	31,05
	1,23
	29,82
	0,98
	28,54
	1,90
	26,94
	2,03
	24,91
	1,30
	23,61
	0,88
	22,73
	1,64
	21,09
	2,19
	18,90
	3,11
	15,79
	2,32
	13,47
	2,01
	11,46
	0,66
	10,80
	0,70
	10,10
	0,05
	10,18
	2,55
	7,50

Mezcla 1 x 1 de la arena artificial y natural	
5	100,00
	98,03
	3,79
	94,24
	4,91
	89,33
	3,91
	85,42
	7,65
	77,77
	8,12
	69,65
	5,19
	64,46
	3,49
	60,97
	6,57
	54,40
	8,76
	45,64
	12,47
	33,17
	9,29
	23,88
	8,07
	15,81
	2,61
	13,20
	2,82
	10,38
	0,20
	10,18
	10,18
	0,00

Curva de la grava	
6	100,00
	18,40
	81,60
	26,55
	55,05
	23,05
	32,00
	19,20
	12,80
	8,85
	3,95
	2,65
	1,30
	1,30
	0,00

Fig. 3.ª Estudio de curvas ideales de grava y arena para un 7,50 por 100 de cemento «Aslancl»

al gráfico de abscisas en escala logarítmica. Así, hechos los gráficos teóricos, bastará compararlos con los gráficos de análisis de los materiales empleados.

Curva teórica de máxima densidad del aglomerante

El trazado de la curva teórica de máxima densidad, en la escala aritmética (elipse y recta), se hace con los datos experimentales suministrados por Taylor y Thompson. Estos datos son: semiejes de la elipse y altura del punto de tangencia o de la intersección de la tangente con la ordenada cero. La elipse se dibuja con su eje horizontal a la altura 7 por 100, pues se supone este mínimo porcentaje para los granos ínfimos cuyas abscisas es imposible dibujar. Trazada la elipse se une la ordenada 100, correspondiente a la abscisa de tamaño máximo, con la

altura marcada en la ordenada cero, y gráficamente se deducen los tantos por cientos correspondientes a los diversos tamaños.

Prácticamente, con una aproximación suficiente, puede dibujarse la curva de máxima densidad tomando, desde el tamaño máximo hasta el décimo de éste, una proporción constante de piedras por cada unidad de diferencia en la dimensión lineal de la misma (segmento recto de la curva antes descrita). Desde este tamaño hasta el polvo impalpable, que es el material llamado «arena», la proporción de cada componente se fija por una función que varía inversamente a la dimensión lineal que lo caracteriza, resultando así que, para los tamices de la serie Taylor, es constante el porcentaje retenido en cada tamiz, encontrándose en mayor proporción los materiales pequeños.

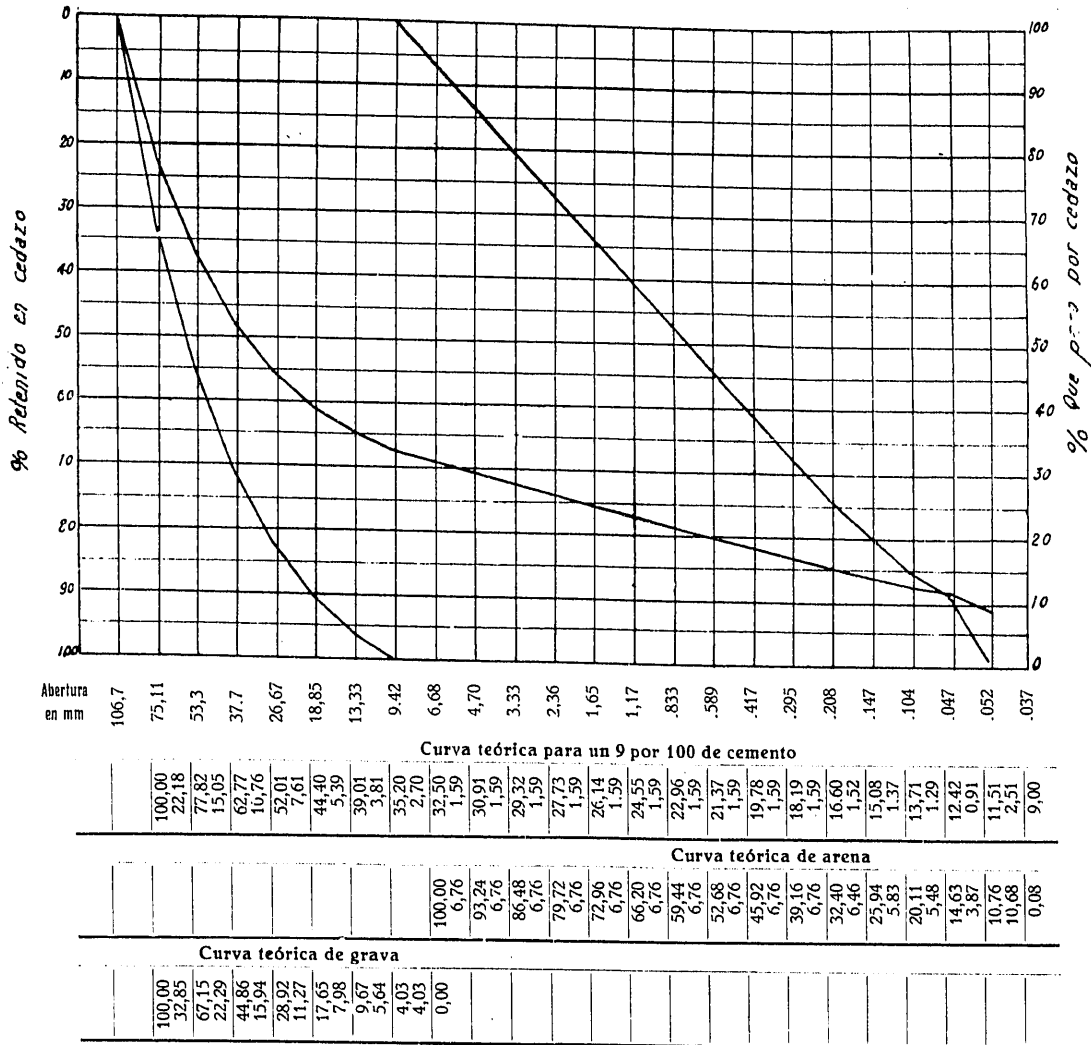


Fig. 4.ª Estudio de curvas idóneas de grava y arena para un 9 por 100 de cemento «Asland»

En resumen, el segmento de curva de los mayores tamaños corresponde a la piedra, el intermedio a la arena y el de polvo fino al cemento.

Obtenida la curva teórica de todos los aglomerados (piedra, arena y polvo), para determinar la proporción de cada uno de ellos en la realidad, bastará hacer su análisis mecánico, dibujar sus curvas y estudiar, por tanteos de diversas proporciones, la que da la curva más aproximada.

Como los elementos empleados en esta obra son gravas naturales del río y arena natural y artificial, claro está que sólo podemos hacer la regulación sobre esta última. Es decir, procuramos tomar de la grava el tanto por ciento necesario para que la curva resultante se aleje lo menos posible de la teórica; y de las arenas hacemos una mezcla que cumpla las mismas condiciones, pero que podrá ser regulada por la variación de gruesos de la arena artificial. En nuestro caso hay que aprovechar la arena natural por dos razones: primera, la necesidad de aproximar la curva práctica de arena a la teórica; segunda, economía apreciable y mejor utilización de los materiales extraídos de la excavación del canal.

En cuanto al cemento, debe integrar los elementos finos, y aun sustituir a los más finos de la arena, según la dosis de aglomerante a emplear en cada caso, la cual ha de fijarse según la resistencia mecánica requerida, que a su vez depende del agua que

se necesita añadir, o sea la plasticidad precisa para su colocación en obra, puesto que un hormigón muy seco será de costosa manipulación, y muy fluido perderá resistencia e impermeabilidad.

Dosis del cemento

El objetivo que perseguimos es éste: partiendo del compuesto árido de mayor capacidad lograble en nuestro caso, determinar el mínimo de cemento a emplear para obtener mezcla suficientemente resistente e impermeable.

Aridos disponibles.—Los análisis mecánicos de gravas y arenas natural y artificial se resumen en la figura 2.ª (medias de diez ensayos). La densidad de las arenas procedentes de los cantos rodados del río, determinada con balanza hidrostática, es 2,707, y las densidades aparentes de gravas, 1,707. Aunque sólo con las curvas de análisis mecánico podíamos haber determinado las dosificaciones, es necesario conocer estos datos para tener la seguridad de no excederse en las cantidades de grava (aunque es conveniente sean las mayores posibles) y de que el mortero es suficiente para llenar los huecos.

Como punto de partida de los ensayos, y para comparación, se ha tomado el hormigón prescrito para la presa en el proyecto aprobado, que fija la siguiente dosificación:

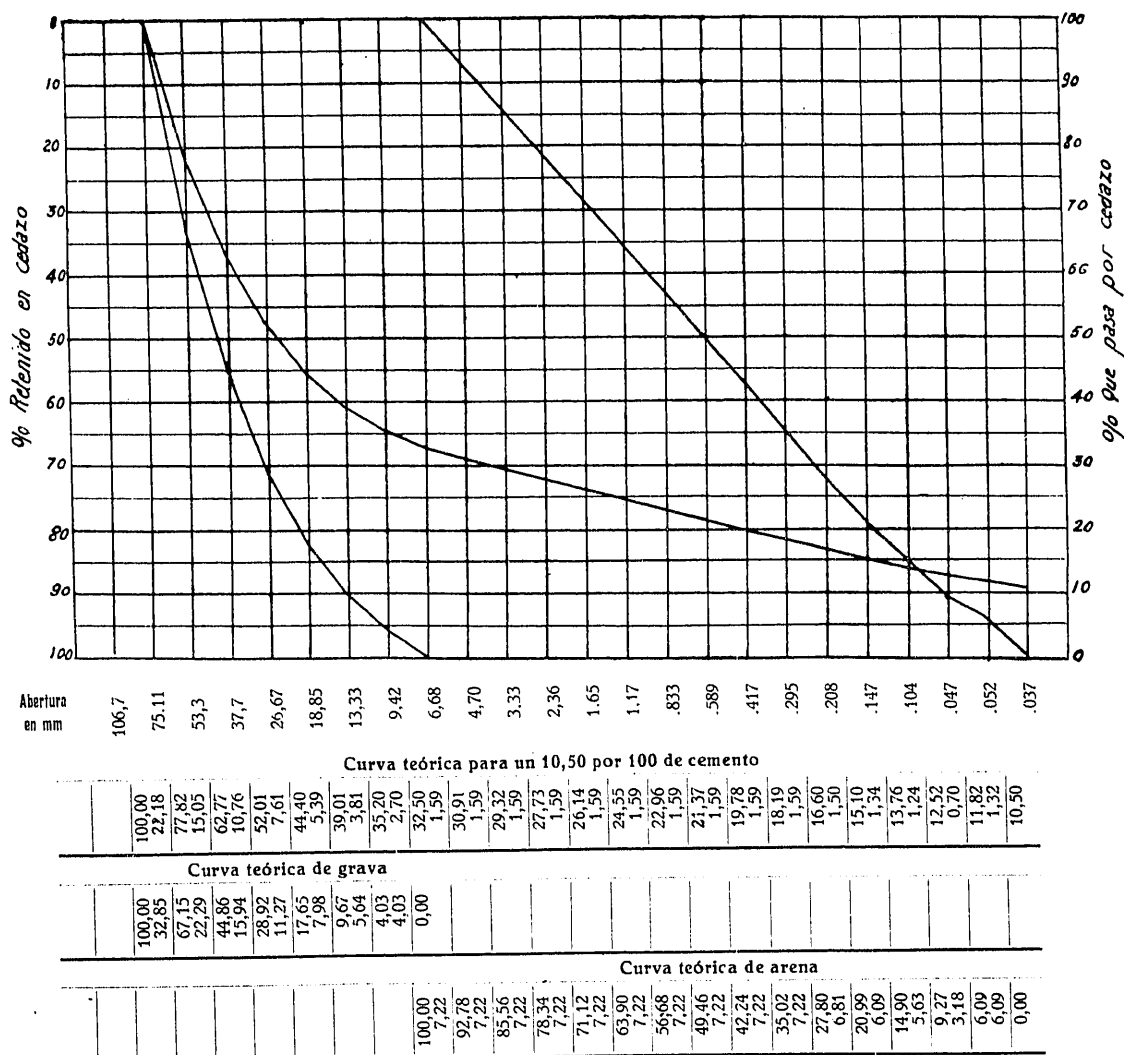


Fig. 5.ª Estudio de curvas ideales de grava y arena para un 10,50 por 100 de cemento «Asland»

Mortero, 575 kg por metro cúbico de arena.

Hormigón, 0,625 m³ de mortero por metro cúbico de grava.

Las cantidades de los distintos materiales que corresponden a esta dosificación, son:

	Porcentaje en peso
Cemento, 150 kgs	10,72
Arena, 0,261 m ³	36,16
Grava, 0,417 m ³	53,12
Suman	100,00
Agua, 0,09557 m ³	6,86

Para los ensayos de variantes de este hormigón se ha empleado arena artificial y porcentajes de cemento de 10,50, que es casi exactamente el del proyecto aprobado, y rebajados a 9 y 7,50. Los bloques o probetas llevan marca C₁ y C₁ en los gráficos y estados.

En las figuras 3.ª, 4.ª y 5.ª presentamos las curvas teóricas de aglomerados correspondientes a las tres proporciones de cemento indicadas, después de haber segregado éste, y en las mismas aparecen las

curvas de grava y arena teóricas, sobre las que se han hecho los estudios de las mezclas. Desde luego se observa que, material de tamaño comprendido entre 105 mm (máximo) y 9,42 mm (arena), debe haber un 67,50 por 100 del total. Respecto de las arenas, después de varios tanteos, pudo comprobarse que una mezcla por partes iguales de arena natural y artificial es la que más se aproxima a la teórica.

Además de los ensayos con las proporciones dichas, se hicieron con proporciones de 8,50, 8 y 7 por 100 de cemento, sin construir curvas teóricas, ya que se diferenciarían poco de las anteriores y que los materiales son los mismos.

En resumen, en la figura 3.ª aparecen sobre la curva para dosificación del 7,50 por 100 de cemento, y representadas en trazos, las curvas dadas en la práctica por los materiales empleados para la confección de los bloques. Con objeto de que puedan verse rápidamente y con facilidad las dosificaciones detalladas de todas las series, ofrecemos un estado, que comprende: las dosificaciones en tanto por ciento, los kilogramos de cada material por metro cúbico de hormigón y los volúmenes de cada material, de huecos y de mortero.

Serie	MATERIAL	Tanto por ciento	Peso por metro	Peso total	Volúmenes por	Volúmenes de	Volumen del
		en peso	cúbico	—	metro cúbico	huecos	mortero
		Kgs.	Kgs.	Kgs.	Litros	Litros	Litros
C ₁	Grava.....	53,10	1 196	2 281	704	258	544
	Arena artificial.....	36,16	839		500	180	
	Cemento.....	10,72	246		233		
	Agua.....	6,86	146				
C ₂	Grava.....	67,50	1 560	2 311	818	337	418
	Arena.....	22,00	509		344	154	
	Cemento.....	10,50	242		229		
	Agua.....	8,50	196				
C ₃	Grava.....	67,50	1 579	2 328	929	341	412
	Arena natural.....	11,75	275		186	83	
	Arena artificial.....	11,75	274		164	62	
	Cemento.....	9,00	200		199		
C ₄	Grava.....	67,50	1 626	2 406	957	352	394
	Arena natural.....	12,50	300		203	91	
	Arena artificial.....	12,50	300		180	68	
	Cemento.....	7,50	180		170		
C ₅	Grava.....	67,50	1 621	2 392	945	343	402
	Arena natural.....	12,00	285		193	87	
	Arena artificial.....	12,00	285		191	64	
	Cemento.....	8,50	201		190		
C ₆	Grava.....	67,50	1 615	2 391	950	349	399
	Arena natural.....	12,25	293		198	88	
	Arena artificial.....	12,25	292		175	66	
	Cemento.....	8,00	191		181		
C ₇	Grava.....	67,50	1 647	2 418	969	356	386
	Arena natural.....	12,75	310		210	93	
	Arena artificial.....	12,75	293		176	66	
	Cemento.....	7,00	168		159		
	Agua.....	7,00	169				

El agua que se ha empleado en cada serie se fijó por tanteos, poniendo la cantidad necesaria para resbalar la masa por una canal colocada con la misma inclinación que la de las obras. Anotemos que se ha cuidado de que el agua no excediera de lo suficiente. La cantidad que se debe emplear no puede ser constante, pues depende del grado de humedad en que se encuentren las gravas y arenas. Por medio de ensayos de fluidez puede determinarse exactamente, pero este procedimiento, seguido con rigor en otras obras más exigentes, aquí no es necesario; influye más en la resistencia que en la impermeabilidad, y disponemos de un coeficiente de seguridad que veremos no baja de 15. El procedimiento en la presa es no aumentar la dosis de agua mientras la mezcla sea perfectamente trabajable y puedan colocarse fácilmente los bloques.

Confeccionados los bloques citados, y conservados en agua a una temperatura constante de 18° C, se han hecho los ensayos de densidad y rotura por compresión a los siete y veintiocho días. En las series C₃ y C₄ se prolongó el ensayo noventa días y seis meses.

Como comprobación de los resultados, presentamos un estado completo de las resistencias y densidades de los bloques confeccionados y un gráfico (figura 6.^a) de las medias obtenidas. En el gráfico van colocados los bloques por orden de proporción de cemento, y puede comprobarse la caída de la curva de resistencia desde la C₁, máxima dosificación, hasta la C₇, que es la mínima. (En la C₃ se nota una anomalía, debida, sin duda, a resultar excesiva el agua, por encontrarse los materiales más húmedos.)

Ensayos de hormigones: Bloques confeccionados en el Laboratorio

Serie	ROTURA					DENSIDAD								OBSERVACIONES
	BLOQUES		FECHA		Edad	CARGAS				PESO		Diferencia	Densidad	
	Núm.	Dimensiones	Confección	Rotura		INICIAL		FINAL		En el aire	En el agua			
Kilo-gramos						Kgs por cm ²	Kilo-gramos	Kgs por cm ²	Kilo-gramos	Kilo-gramos				
C ₁	1	175 mm	10/IX/21	17/IX/21	7 días	41,000	130,7	48,800	159,4	13,300	7,820	5,480	2,427	
	2				35,000	114,3	41,000	130,7	13,400	7,900	5,500	2,436		
					SUMAS	76,000	245,0	89,800	280,1	26,700	15,720	10,980	4,863	
					Media	38,000	222,5	44,900	140,05	13,350	7,860	5,490	2,4315	
	3	"	10/IX/21	8/X/21	28 días	44,000	143,7	65,000	212,4	13,200	7,740	5,460	2,417	
	4				48,000	156,8	57,200	186,9	13,300	7,850	5,450	2,440		
				SUMAS	92,000	300,5	122,200	399,3	26,500	15,590	10,910	4,857		
				Media	46,000	150,25	61,100	199,65	13,250	7,795	5,455	2,4285		
C ₂	1	"	12/IX/21	19/IX/21	7 días	21,600	70,9	39,600	126,1	13,450	7,900	5,550	2,423	
	2				19,000	62,0	41,400	135,3	13,520	7,950	5,570	2,436		
					SUMAS	40,600	132,9	81,000	258,4	26,970	15,850	11,120	4,851	
					Media	20,300	66,45	40,500	129,2	13,485	7,925	5,560	2,4255	
	3	"	"	10/X/21	28 días	34,000	111,2	56,200	183,6	13,400	7,900	5,500	2,436	
	4				32,000	104,9	52,000	171,6	13,500	7,960	5,540	2,437		
				SUMAS	66,000	216,1	108,200	355,2	26,900	15,860	11,040	4,873		
				Media	33,000	108,05	54,100	177,6	13,450	7,930	5,520	2,4365		
C ₃	1	"	14/IX/21	21/IX/21	7 días	30,000	98,0	40,600	132,7	13,650	8,140	5,510	2,470	
	2				21,000	68,6	33,800	110,5	13,450	7,940	5,510	2,441		
					SUMAS	51,000	166,6	74,400	243,2	27,100	16,080	11,020	4,911	
					Media	25,500	83,3	37,200	121,6	13,550	8,040	5,510	2,4555	
	3	"	14/IX/21	14/X/21	30 días	35,000	114,3	55,000	179,7	13,550	8,020	5,530	2,450	
	4				31,000	101,3	51,000	166,9	13,500	7,960	5,540	2,437		
				SUMAS	66,000	215,6	106,000	346,6	27,050	15,980	11,070	4,887		
				Media	33,000	107,8	53,000	173,3	13,525	7,990	5,535	2,4435		
C ₄	1	155 por 150	8/X/21	31/1/22	97 días	28,000	120,7	47,800	206,0	8,600	5,060	3,540	2,429	
	2				22,000	97,8	38,200	169,7	8,700	5,170	3,540	2,457		
					Media					8,650	5,110	3,540	2,443	
	3	"	"	29/IV/22	203 días	35,000	155,5	37,000	164,4	8,300	4,940	3,360	2,470	
	4				32,000	142,2	33,000	146,7	8,800	5,180	3,620	2,430		
					SUMAS	67,000	297,7	70,000	311,1	17,100	10,120	6,980	4,900	
				Media	33,500	148,85	35,000	155,55	8,550	5,060	3,490	2,450		
C ₅	1	175 mm	17/IX/21	24/IX/21	7 días	22,000	71,9	39,200	128,1	13,800	8,180	5,620	2,455	
	2				24,000	78,4	35,400	115,7	13,850	8,200	5,650	2,451		
					SUMAS	46,000	150,3	74,600	243,8	27,650	16,380	11,270	4,906	
					Media	23,000	75,15	37,300	121,9	13,825	8,190	5,635	2,453	
	3	"	"	15/X/21	28 días	29,000	94,8	51,200	167,0	13,850	8,260	5,590	2,440	
	4				32,000	104,6	45,000	147,0	13,500	8,000	5,500	2,455		
				SUMAS	61,000	199,4	96,200	314,0	27,350	16,260	11,090	4,932		
				Media	30,500	99,7	48,100	157,0	13,675	8,130	5,545	2,466		
C ₆	1	150 por 150	8/X/21	31/1/22	97 días	28,000	124,4	37,000	164,4	8,500	5,070	3,430	2,478	
	2				22,000	97,8	36,000	160,0	8,800	5,220	3,580	2,458		
					SUMAS	50,000	222,2	73,000	324,4	17,300	10,290	7,010	4,926	
					Media	25,000	111,1	36,500	162,2	8,650	5,145	3,505	2,468	
	3	"	"	29/IX/22	203 días	34,000	151,1	34,400	152,9	9,100	5,400	3,700	2,458	
	4				34,000	151,1	35,000	155,5	8,400	4,960	3,440	2,441		
				SUMAS	68,000	302,2	69,400	308,4	17,500	10,360	7,140	4,899		
				Media	34,000	151,1	34,700	154,2	8,750	5,180	3,570	2,440		
C ₇	1	175 mm	25/XI/21	2/XII/21	7 días	28,000	91,5	37,200	121,5	13,150	7,830	5,320	2,471	
	2				28,000	91,5	43,800	143,1	13,400	7,940	5,460	2,436		
					SUMAS	56,000	183,0	81,000	264,6	26,550	15,770	10,780	4,907	
					Media	28,000	91,5	40,500	132,3	13,275	7,885	5,390	2,4585	
	3	"	"	22/XII/21	27 días	25,000	81,7	48,000	156,8	13,150	7,820	5,330	2,467	
	4				28,000	91,5	46,000	150,3	13,450	8,000	5,450	2,468		
				SUMAS	53,000	173,2	94,000	307,1	26,600	15,820	10,780	4,935		
				Media	26,500	86,6	47,000	153,55	13,300	7,910	5,390	2,4675		
C ₈	1	175 mm	23/XI/21	30/XI/21	7 días	22,000	71,9	33,600	109,8	13,300	7,900	5,400	2,463	
	2				24,000	78,4	33,600	109,8	13,300	7,900	5,410	2,458		
					SUMAS	46,000	150,3	67,200	219,6	26,600	15,790	10,810	4,921	
					Media	23,000	75,15	33,600	109,8	13,300	7,895	5,405	2,4605	
	3	"	"	21/XII/21	28 días	30,000	98,0	48,000	156,8	13,200	7,870	5,330	2,476	
	4				30,000	98,0	52,000	169,3	13,400	7,960	5,440	2,463		
				SUMAS	60,000	196,0	100,000	326,1	26,600	15,830	10,770	4,939		
				Media	30,000	98,0	50,000	163,05	13,300	7,915	5,385	2,4695		
C ₉	1	"	29/XI/21	6/XII/21	7 días	22,000	71,8	33,000	107,8	13,300	7,800	5,400	2,445	
	2				22,000	71,8	33,000	107,8	13,450	7,930	5,520	2,436		
					SUMAS	44,000	143,6	66,000	215,6	26,650	15,730	10,920	4,881	
					Media	22,000	71,8	33,000	107,8	13,325	7,865	5,460	2,4405	
	3	"	"	31/XII/21	32 días	15,000	49,0	36,000	117,0	13,300	7,870	5,430	2,449	
	4				26,000	84,9	44,400	145,0	13,050	7,780	5,320	2,453		
				SUMAS	41,000	133,9	80,400	262,6	26,350	15,600	10,750	4,902		
				Media	20,500	66,95	40,200	131,3	13,175	7,800	5,375	2,451		

Estos bloques han sido confeccionados de 31 cm y aserrados.

Estos bloques han sido confeccionados de 31 cm y aserrados.

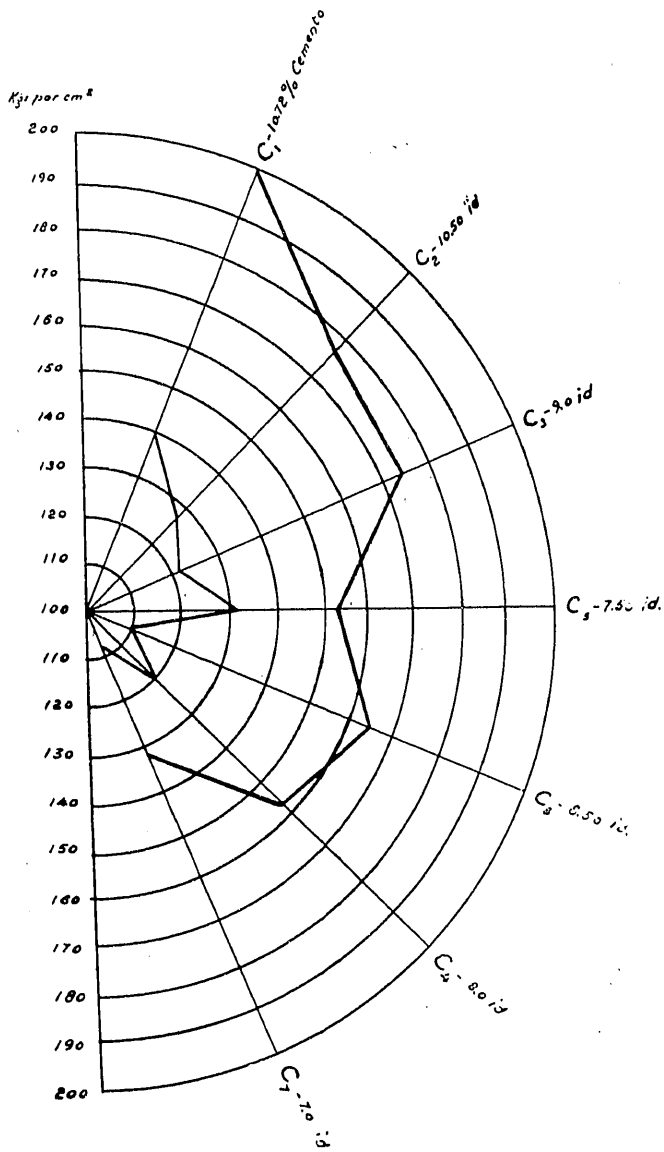


Fig. 6.ª Gráfico de roturas por compresión de hormigones confeccionados en el laboratorio

Respecto a las densidades, puede observarse en las series C_1 , C_2 y C_7 una densidad menor que las C_3 , C_4 , C_5 y C_6 , en las cuales es casi constante. La razón de estas diferencias resulta clara: las series C_1 y C_2 , con gran cantidad de cemento, llevan a su vez una cantidad excesiva de mortero, lo que disminuye la densidad, pues el mortero debe ser, con ligero exceso, el necesario para rellenar los huecos de la grava; las series C_3 , C_4 , C_5 y C_6 tienen el mortero justo, con pequeñas diferencias, y el cemento, que sustituye al polvo fino de arena, sólo influye en la resistencia, y la serie C_7 es escasa en mortero y cemento, quedando, sin duda alguna, huecos de grava sin rellenar (fig. 7.ª).

Resumen sobre capacidad, resistencia y economía

En resumen, de los hormigones ensayados en el laboratorio, el de la serie C_7 , mínimo en porcentaje de cemento, da un coeficiente de seguridad a los siete días que no baja de 14. En este sentido, no había inconveniente alguno en emplear esta dosificación; pero, teniendo en cuenta que el empleo de 0,50 por 100 más de cemento da un aumento, no sólo en la resistencia, sino en la compacidad, y que

el empleo de las mezclas más ricas sólo nos conduce a un aumento innecesario de la resistencia, sin conseguir por ello mayor compacidad, no cabe duda en que la mezcla preferible será la correspondiente a la serie C_7 . En este hormigón coinciden el máximo necesario de resistencia, el de densidad y el mínimo de cemento.

Impermeabilidad

Para conocer los resultados completos de este hormigón, se dispusieron ensayos de permeabilidad sobre cinco bloques de la serie C_7 , uno confeccionado en el laboratorio y cuatro bloques arrancados de la presa. Los ensayos se hicieron en la siguiente forma: en un aparato, cuya fotografía aparece en la figura 8.ª, se dispuso entre los dos platillos un bloque cilíndrico, de 60 cm de diámetro y 20 cm de altura, sujetándolo con tornillos de presión y colocando entre el cilindro y los platillos arandelas de goma, para obtener juntas impermeables. Sobre el platillo superior se ajustó un manómetro y una manga que se acoplaba a un acumulador de presión, consistente

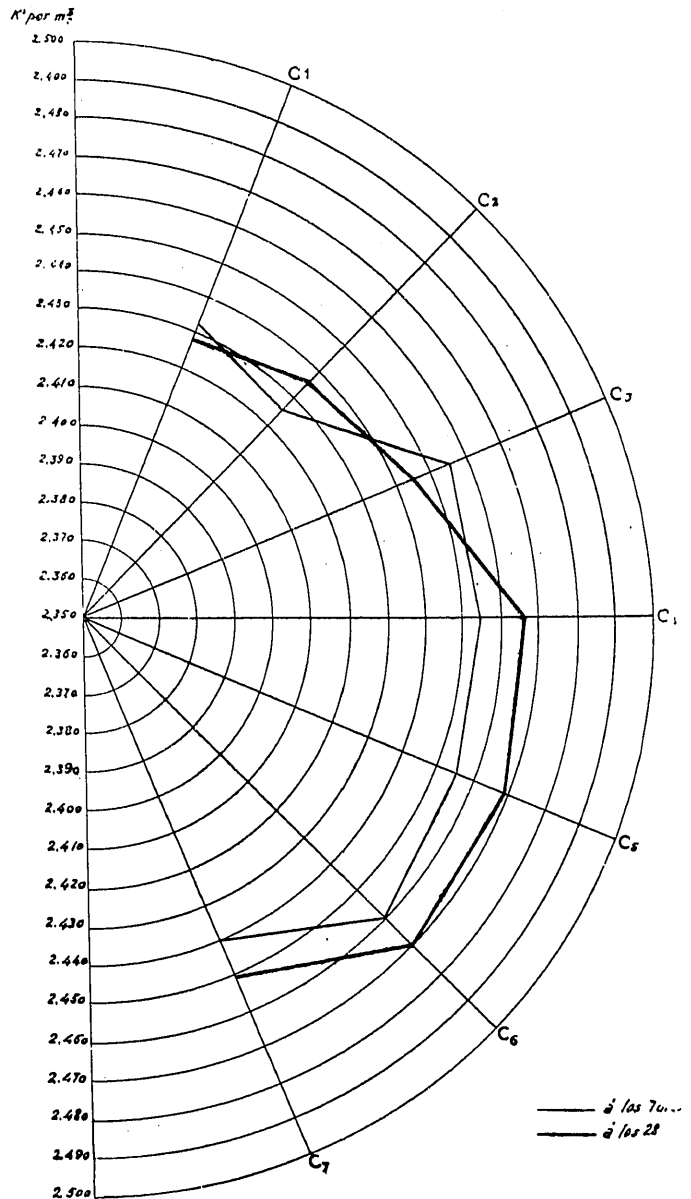


Fig. 7.ª Gráfico de densidades de los hormigones confeccionados en el laboratorio

en un cuerpo de bomba sobre el que se colocan pesos. El platillo inferior lleva un tubo para recoger las filtraciones. La presión del agua se ejerce sobre una superficie circular de 10 cm de diámetro (tama-



Fig. 8.ª Aparato para ensayar la permeabilidad del hormigón

ño de las arandelas). Las mayores dimensiones transversales del bloque determinan la filtración por la parte inferior antes que por los lados. Los cilindros se sometieron a presiones de dos, tres, cuatro y cinco atmósferas.

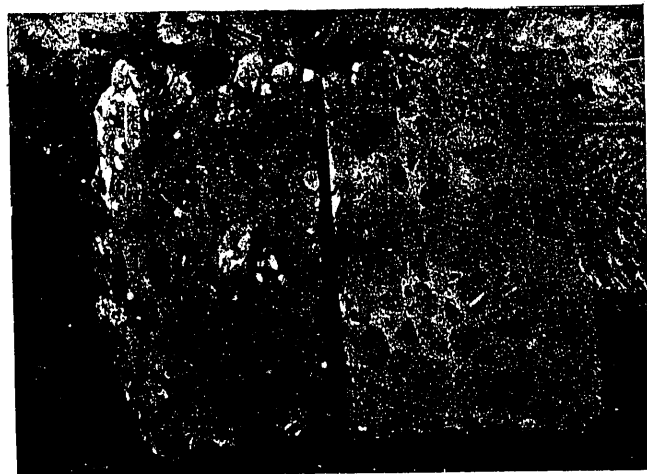


Fig. 9.ª Bloques de hormigón arrancados de la presa

Durante los primeros días, en el bloque confeccionado en el laboratorio no apareció filtración, hasta que se alcanzó la máxima de cuatro atmósferas. Desde que apareció la filtración, se mantuvo constante y pequeña (4 cm^3 en veinticuatro horas), hasta el décimo día, que comenzó a subir, alcanzando su má-

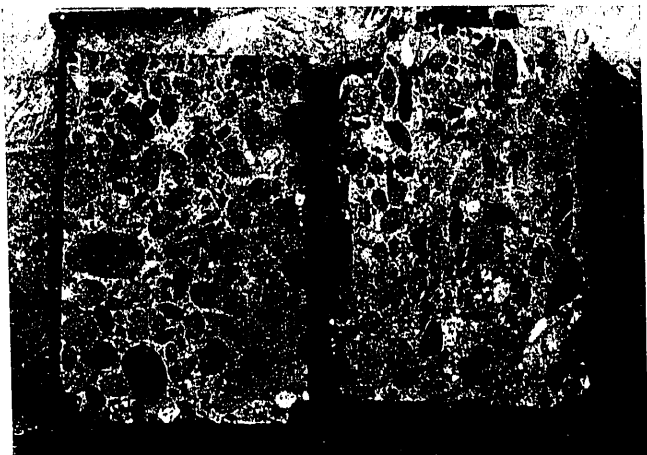
ximo en los días doce, catorce, diez y siete y diez y ocho. Al décimonoveno día, se rebajó la presión a tres atmósferas, que será la carga máxima en la presa, y en seguida se pronunció el descenso, desapareciendo casi en absoluto a los sesenta y un días. Al día sesenta y seis volvimos a elevar la presión a cuatro atmósferas, y, prolongando el ensayo cinco días más, no reapareció la filtración.

La filtración máxima obtenida sobre una superficie de $0,0078 \text{ m}^2$ en veinticuatro horas fué, pues, de 125 cm^3 , o sea $0,0015$ litros por centímetro cuadrado y 15 litros por metro cuadrado; es decir, la presa daría una filtración de $0,01$ litros por minuto y metro cuadrado y de 45 litros por minuto en toda la superficie, supuesta sumergida entera a 40 m de profundidad y con un espesor de 20 cm .

Resultado práctico

Hecho este minucioso estudio, se pudo sustituir, como ya hemos dicho, el perfil primitivo, en que el paramento de aguas abajo formaba con la vertical un ángulo de tangente $a = 0,98$ por otro cuya tangente es $0,87$.

Este cambio de perfil lleva consigo una economía de $6\,140 \text{ m}^3$ de obra, que al precio de $59,82$ pesetas



a que suponemos el metro cúbico de hormigón, produce una economía de $6\,140 \times 59,82 = 367\,294,80$ pesetas.

En la figura 9.ª aparecen dos bloques de hormigón arrancados de la presa y aserrados, que demuestran la perfecta distribución del árido.

José NUÑEZ CASQUETE
Ingeniero de Caminos