

REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS

PUBLICACION TECNICA DEL CUERPO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DIRECTOR

D. MANUEL MALUQUER Y SALVADOR

COLABORADORES

LOS INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

SE PUBLICA LOS JUEVES

Dirección y Administración: Plaza de Oriente, 6, primero derecha.

“SAND-CEMENT,”

Se entiende por *sand-cement* en los Estados Unidos, el producto de la pulverización de una mezcla de cemento y otro material, hasta un grado de finura muy superior al del portland ordinario. Este producto, que tiene propiedades muy notables, se usó, hace algunos años, bastante en América, en sustitución del cemento; pero últimamente el abaratamiento de éste lo había relegado á un lugar muy secundario. Su uso en algunas obras de mucha importancia, construidas por el Reclamation Service, y el estudio detenido, hecho antes de emplearlo, ha venido á darle nueva importancia y mayor crédito, por lo que creemos interesantes los siguientes datos que, aunque incompletos, revelan que estamos en presencia de un aglomerante de primer orden, igual, si no superior, al cemento portland, y que sobre éste tiene la ventaja de una sensible economía.

Desde 1893 existe una patente concedida á la T. L. Smith Company de Copenhague, para un *sand-cement* obtenido moliendo una mezcla de arena silíceá y cemento. Para la explotación de esta patente se establecieron algunas fábricas en los Estados Unidos, y el *sand-cement* se empleó en algunas obras de importancia; pero el cemento portland tiene en América un precio tan reducido, que su competencia hizo que cesara la fabricación del producto que nos ocupa. Pero desde el gran impulso que se ha dado en aquel país á las obras de riego, al crearse el Reclamation Service se han construido algunas obras de gran importancia en comarcas apartadas de los ferrocarriles, presentándose el problema de grandes transportes de cemento por caminos de malas condiciones y gran longitud, que encarecían este material hasta cifras muy elevadas para América, pero que ocurren con mucha frecuencia en las obras de nuestro país. Presentando el *sand-cement* la posibilidad de reducir los transportes, su empleo era muy conveniente si se trataba de un producto de confianza. Esto es lo que el Reclamation Service se propuso averiguar, comenzando en 1904 una serie de experimentos y pruebas que se continuaron hasta 1910, es decir, durante seis años, tiempo más que suficiente para adquirir un buen conocimiento de lo que el *sand-cement* es, y de lo que puede esperarse de su empleo.

Con motivo de las importantes obras emprendidas en el Pirineo por la Compañía Riegos y Fuerza del Ebro, S. A., se han reproducido las circunstancias que determinaron al Reclamation Service á considerar el empleo de *sand-cement*, y hemos tenido

oportunidad de estudiar los resultados obtenidos en los ensayos hechos por el Reclamation Service, que han servido de base para que la Compañía citada haya comenzado una serie de pruebas, con objeto de ir reuniendo datos y experimentos que aclaren puntos aún dudosos acerca de las propiedades del *sand-cement* y las causas de su fraguado y endurecimiento.

A continuación anotamos los resultados obtenidos en los ensayos hechos por el Reclamation Service con probetas de mortero normal de *sand-cement* y arena, siendo cada resultado el promedio del ensayo de cinco probetas, y los resultados del ensayo de probetas de mortero normal, hecho con el cemento que sirvió para la fabricación del *sand-cement*, ensayado en las mismas condiciones. El material añadido al cemento era arena de río ó granito machacado mezclado en partes iguales con cemento portland.

Comparación de los resultados obtenidos con cemento portland y «sand cement»; resistencia á la tracción; kilogramos por centímetro cuadrado.

CLASE DEL CEMENTO	RESISTENCIA Á LOS							
	7 d.	28 d.	3 m.	6 m.	1 a.	2 a.	3 a.	5 a.
<i>Sand-cement</i>	15,40	23,40	27,90	29,75	32,10	29,75	31,50	31,20
Cemento portland.....	18,70	28,10	29,90	33,90	32,30	34,90	30,10	28,40

Resultados medios obtenidos con doce marcas de cemento; mortero normal; resistencia á la tracción; kilogramos por centímetro cuadrado.

	RESISTENCIA Á LOS							
	7 d.	28 d.	3 m.	6 m.	1 a.	2 a.	3 a.	5 a.
Media de las muestras...	18,20	26,20	31,50	31,60	30,40	28,90	26,60	28,00

El resultado de estos ensayos es sorprendente, pues no sólo se advierte en ellos que la resistencia del *sand-cement* es sensiblemente la misma que la del cemento portland, sino que se observa en los morteros de *sand-cement* una disminución de la resistencia mucho menor que la presentada por el cemento portland.

En efecto, la diferencia entre el resultado de las pruebas que dieron mayor resistencia y los resultados obtenidos á los cinco años, es para el *sand-cement* de 0,90 por centímetro cuadrado, y para el portland que en él entra de 6,50 kilogramos, corrigiéndose mucho la propensión del cemento á bajar de resistencia con el tiempo. Para la media de las doce marcas ensayadas la disminución de resistencia fué de 3,6 kilogramos.

La resistencia del *sand-cement* aumenta con más lentitud que la del cemento portland, pero con el transcurso del tiempo, no sólo llega á igualarla y aun á superarla, sino que se conserva mejor que en el cemento portland.

En vista de estos resultados se decidió el empleo del *sand-cement* en las presas de Arrowrock y de Elephans Butte. La primera es la presa más alta del mundo, pues alcanza una altura máxima de 110 metros. Su longitud en la coronación es de 323 metros y cubica 397.500 metros cúbicos.

Su planta es curva, con un radio de 200 metros en la coronación. Aun admitiendo que la forma de la presa alivie á embalse lleno la carga en la base del paramento de aguas abajo, lo cual es dudoso, las presiones en el paramento de aguas arriba que no están afectadas por esta causa, llegan con el embalse vacío á 25 kilogramos por centímetro cuadrado, presión que es probablemente superada en el paramento aguas abajo á embalse lleno.

Decidido el empleo del *sand-cement* en esta obra se hicieron durante un año ensayos con el que podía fabricarse con la roca granítica, que en gran volumen había de ser excavada en el aliviadero de superficie. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Ensayos de «sand-cement» fabricado con materiales procedentes del vertedero de la presa de Arrowrock; mortero normal; resistencia á la tracción; kilogramos por centímetro cuadrado.

Por 100 de arena.	RESISTENCIA Á LOS				
	Siete días.	Veintiocho días.	Tres meses.	Seis meses.	Un año.
0	24,01	31,00	32,40	32,80	28,70
30	26,30	29,30	32,80	35,10	27,70
40	25,90	32,90	35,40	»	»
50	23,20	29,50	32,30	31,80	28,80
60	20,60	25,90	28,10	»	»
70	11,00	16,60	28,70	22,50	23,50

Resistencias á la compresión; mortero normal; cubos de 5 cm. de lado; kilogramos por centímetro cuadrado.

Por 100 de arena.	RESISTENCIA Á LOS				
	Siete días.	Veintiocho días.	Tres meses.	Seis meses.	Un año.
0	75,7	138,4	261,3	263	»
30	116,0	172,5	223,0	390	327
50	103,4	124,0	191,8	219	261
70	32,2	65,9	85,4	88,3	109,5

En vista de estos resultados, se fijó la proporción de 45 por 100 en peso de granito y 55 por 100 de cemento, proporción que, determinando ya una importante economía, es también, probablemente, la que da una mayor resistencia en las pruebas. Sin duda se tomó esta proporción en vista de los esfuerzos tan considerables que en la presa habían de desarrollarse; pero para obras de menor importancia aun podría, quizás, disminuirse algo la

cantidad de cemento. El peso de cemento portland, por metro cúbico de fábrica de hormigón, no llega en esta presa á 100 kilogramos por metro cúbico, siendo las proporciones de la mezcla, una parte de *sand-cement*, 2 ³/₄ de arena, 5 ¹/₄ grava y 2 ¹/₂ gravas gruesas hasta de 12 centímetros de diámetro.

La instalación hecha en Arrowrock, para fábrica de *sand-cement*, tiene una capacidad de 1.000 barriles diarios, y consta de machacadora, molino de arena, secador de arena, molino de bolas, mezcladora y molinos de refino, con los elevadores y transportadores necesarios para el manejo mecánico de todos los materiales en curso de fabricación. El coste total de la fábrica fué de 46.000 dólares, repartido en los conceptos siguientes:

	Dólares.
Excavación.....	1.500
Cimentaciones.....	3.750
Edificio.....	2.150
Maquinaria, incluso transporte.....	23.000
Montaje.....	7.850
Instalaciones eléctricas.....	1.750

El cemento se ensaya antes de su empleo, según ordinariamente se acostumbra. El *sand-cement* se ensaya para determinar su finura de molido, proporción de la mezcla, tiempo de fraguado y resistencia á la tracción en probetas de mortero normal, y se comprueba también su constancia de volumen en caliente. Las proporciones de la mezcla y finura se ensayan en muestras tomadas cada hora, y á veces con más frecuencia en caso de ser necesaria una corrección, y las demás pruebas se hacen cada veinticuatro horas sobre una muestra media de todas las tomadas durante el día. La finura de molido exigida es mucho más grande que la del cemento portland, pues el residuo en un tamiz de 6.200 mallas, que es el empleado en América en sustitución del de 4.900 que nosotros empleamos, es solamente del 10 por 100, cuando las buenas marcas de cemento dejan en este tamiz un residuo de 20 por 100.

No se ha usado ninguna partida de *sand-cement* antes de comprobada su resistencia á la tracción á los siete días, que debe ser mayor de 14 kilogramos por centímetro cuadrado. Esta prescripción no ha exigido se rechazara, en ningún caso, el *sand-cement*.

El coste de un barril de *sand-cement* en Arrowrock con 45 por 100 de granito, es el siguiente, calculada la depreciación de la planta de modo que quede amortizada al completarse 500.000 barriles.

	Dólares.
Granito puesto en la machacadora.....	0,02
Cemento portland, incluso transporte y descarga.....	1,35
Almacenado de cemento.....	0,08
Mano de obra.....	0,10
Energía eléctrica para fuerza y alumbrado.....	0,16
Amortización, reparaciones, etc.....	0,14
TOTAL.....	1,85

Siendo el coste del barril de cemento en Arrowrock de 2,36 dólares, la economía realizada es de 0,51 dólares por barril, y por tonelada, $\frac{0,51 \times 1.000}{170} = 3$ dólares, resultando rebajado el coste de la tonelada de aglomerante desde 13,88 dólares á 10,88.

La presa de Elephans Butte, en que también se está empleando el *sand-cement*, tiene 81 metros de altura, 360 metros de longitud en la coronación y cubica 375.000 metros cúbicos. Su planta es recta, y las presiones en la base, aunque no tan grandes como en la presa de Arrowrock, se aproximan á 20 kilogramos por centímetro cuadrado. Los materiales disponibles en las proximidades de la presa son basaltos, tobas y areniscas, que se probaron para ver si eran á propósito para la fabricación del *sand-cement* con el resultado siguiente:

Ensayos del «sand-cement» fabricado con materiales aprovechables en Elephans Butte; mortero normal; resistencia á la tracción; kilogramos por centímetro cuadrado.

NATURALEZA de la roca.	Por 100 de roca.	RESISTENCIA Á LOS				
		Siete días.	Veinti- ocho días.	Ochenta y cuatro días.	Seis meses.	Un año.
Basalto.....	35	16,10	25,60	27,00	33,70	34,40
Idem.....	40	12,60	23,20	27,80	29,90	32,30
Idem.....	45	13,70	22,10	27,80	31,30	33,30
Idem.....	50	13,00	21,10	27,10	29,90	29,20
Idem.....	55	10,50	19,70	23,90	26,70	27,10
Idem.....	60	9,10	15,10	26,70	27,40	28,10
Idem.....	70	6,90	16,90	20,00	23,20	24,60
Idem.....	80	4,20	11,60	13,70	16,50	23,30
Toba.....	50	15,80	26,70	36,20	37,20	41,10
Idem.....	60	9,80	17,90	32,30	36,70	34,80
Arenisca.....	40	15,80	26,70	28,50	31,30	31,70
Idem.....	50	16,80	21,80	25,30	26,70	27,10
Idem.....	60	8,80	17,20	20,40	23,90	24,60
Cemento portland	0	17,20	32,30	35,80	27,80	21,10
Idem.....	0	16,50	24,90	27,10	27,10	27,40

La fábrica, que era análoga á la de Arrowrock, costó 48.000 dólares. La energía se obtiene á vapor, á 1 ³/₄ centavo caballo-hora. El coste de un barril de *sand-cement* viene á ser el siguiente:

	Dólares.
0,5 barril de <i>portland cement</i> , á 2,50.....	1,250
Arenisca.....	0,035
Amortización.....	0,092
Mano de obra.....	0,068
Varios.....	0,055
Energía.....	0,184
Coste de un barril de <i>sand-cement</i>	1,600
Economía por barril.....	0,816

El coste del aglomerante, que siendo cemento resultaría á 14,70 dólares tonelada, se rebaja á 9,88, con una economía de 4,82 dólares en tonelada.

El *sand-cement* presenta en su uso algunas diferencias con el cemento portland. A la vista, el hormigón no se diferencia del hecho con cemento portland, pero si se emplea en grandes cantidades y con una consistencia fluida, se observa que el exceso de agua tiende á separarse de la masa, y esta agua es más clara y parece que arrastra menos cemento que la desprendida de una masa de hormigón en el que sólo se haya empleado cemento portland.

El fraguado del *sand-cement* es algo más lento que el del cemento portland, y un exceso de agua le afecta mucho, retrasando el fraguado y el endurecimiento. Parece natural que como consecuencia de esta lentitud la contracción debida á la pérdida

de la temperatura de fraguado sea menor que en los hormigones hechos con cemento portland solamente.

Algunos sostienen que el *sand-cement* es más impermeable en los hormigones que el cemento ordinario. Esto no ha sido probado todavía, pero sí es cierto que es tan impermeable como pueda ser el cemento portland, siendo posible que la finura de su molido le dé, desde este punto de vista, alguna propiedad especial.

En cambio parece seguro que resista mejor que el cemento portland la acción de las aguas alcalinas y seleníticas, puesto que sabemos que entre dos hormigones de la misma impermeabilidad, el que esté hecho con un aglomerante pobre en alúmina tiene más probabilidades de resistir la acción de los álcalis y el yeso.

El efecto producido en el cemento por su mezcla con arena y la pulverización subsiguiente no se ha estudiado todavía de un modo que no dé lugar á dudas, lo cual no es extraño si se considera que estamos todavía lejos de conocer con detalle y exactitud las reacciones que determinan el fraguado y el endurecimiento del cemento.

Dos son las hipótesis formadas para explicar la alta resistencia del *sand-cement*, una la atribuye á reacciones químicas, la otra al efecto puramente mecánico de la pulverización.

Algunas rocas, principalmente las de origen ígneo, contienen más ó menos sílice, en la forma que se conoce en química con el nombre de sílice soluble ó coloidal. Esta sílice actúa como un ácido débil y puede neutralizar bases. El cemento portland es una mezcla compleja de varios silicatos y aluminatos de cal, con pequeñas cantidades de elementos secundarios. Durante el fraguado el cemento experimenta una descomposición, reaccionando con agua para formar compuestos más estables y al mismo tiempo poniendo en libertad cal hidratada. La cal hidratada en solución sobresaturada, cristaliza, y estos cristales juegan un papel importante en el fraguado y endurecimiento.

La cal hidratada es una base bastante enérgica y parece probable que si existe en el cemento una sustancia, capaz de reaccionar con ella para formar un compuesto insoluble, se produzca la reacción correspondiente. Esta sustancia puede ser la sílice coloidal, contenida en las rocas, y de aquí que el polvo silíceo añadido contribuya al endurecimiento del cemento.

El análisis revela la presencia de la sílice soluble en las rocas ígneas, también existe en algunas areniscas, en las que en ciertos casos la materia que une los granos de cuarzo es sílice precipitada.

Parece también que la alúmina de estas rocas reacciona con la cal, pero este hecho es mucho más inseguro que la acción de la sílice.

Los óxidos alcalinos también se encuentran en las rocas ígneas, pueden también entrar en la reacción producida.

A continuación anotamos 10 análisis de materiales que han dado buen resultado para la fabricación de *sand-cement*. En ellos puede verse que la cantidad de sílice no guarda relación ninguna con la composición de la roca, siendo probable que dependa más bien de su modo de formación. La corriente de lava de donde se ha tomado la muestra núm. 2, muestra claramente la acción del vapor de agua durante su salida, mientras que la muestra número 1 procede de una corriente que llegó á la superficie con menos agitación. El análisis núm. 10 se refiere á una muestra de cuarzo puro después de una prolongada pulverización, llevada hasta que todo el material pasó por un tamiz de 6.200 mallas por centímetro cuadrado.

Análisis químicos, de rocas que han resultado aprovechables, para la fabricación de «sand-cement».

	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	H ₂ CO ₃	SiO ₂ soluble.
1	44,72	14,30	19,26	8,30	7,48	2,30	2,00	»	1,64	12,57 (basalto).
2	48,08	16,06	15,39	7,78	6,64	1,60	3,20	»	1,89	19,00 (idem).
3	74,88	1,14	13,60	0,90	0,37	3,89	3,35	»	0,88	2,11 (granito).
4	74,64	1,14	13,42	0,80	0,39	3,86	3,38	»	1,66	2,37 (idem).
5	75,66	2,12	11,76	2,30	1,78	»	»	»	5,42	14,60 (toba).
6	72,32	2,01	13,85	1,20	0,39	»	»	0,31	3,78	4,01 (idem).
7	50,96	6,57	18,37	10,20	0,45	3,92	»	»	7,26	12,98 (basalto).
8	80,52	2,00	10,02	0,80	0,71	3,85	»	»	2,10	7,18 (arenisca).
9	82,40	1,40	10,00	0,80	0,61	1,31	0,86	»	1,90	6,42 (idem).
10	99,60	0,31	»	»	»	»	»	»	»	1,64 (cuarzo).

Que la sílice soluble reacciona con la cal para la formación de un compuesto hidráulico, no puede negarse, puesto que á ninguna otra causa puede atribuirse el fraguado y endurecimiento de las puzolanas, finamente molidas y amasadas con cal ordinaria.

La sílice de las puzolanas está en gran parte en estado coloidal por haberse formado bajo la acción de una gran presión y del vapor de agua, condiciones que se pueden restablecer artificialmente, y de un modo industrial se hace en la fabricación de lo que los alemanes llaman *kalk-sand-bricks*.

La preparación de este material depende de este hecho, y el proceso de la fabricación consiste en mezclar arena sílica con una pequeña cantidad de cal y moldear la mezcla en forma de ladrillos, que se someten á la acción del vapor de agua á presión. Los granos de arena se convierten en su superficie en sílice soluble, que se une con la cal para formar un compuesto que cementa la masa, dando á los ladrillos una gran resistencia á la compresión.

Todos los materiales aptos para la fabricación del *sand-cement* muestran alguna tendencia á fraguar dentro del agua cuando se mezclan en polvo fino con un peso igual de cal y se fabrican probetas de mortero normal, la presencia de los óxidos de sodio y potasio favorece la reacción, y en algunos casos se ha comprobado que es necesaria para que haya fraguado. Este es el procedimiento que debe seguirse para averiguar si una roca es aprovechable para la fabricación del *sand-cement*.

No todos los Ingenieros están conformes con la anterior teoría para explicar el efecto que produce en el *sand-cement* la presencia del polvo fino de una roca, ya afirman que la resistencia del *sand-cement* se explica simplemente por el hecho de que la pulverización del cemento en presencia de otro material determina en aquél un grado de finura que al permitirle una hidratación más completa proporciona para una cantidad más pequeña de éste una masa igual de material activo y apto para hidratarse durante el fraguado.

Explican también el efecto indudablemente más enérgico de las rocas que contienen sílice por la dureza de ésta, que hace al polvo de sílice actuar como elemento pulverizador del cemento.

El efecto de la mayor finura de molido es muy conocido; pero, sin embargo, á continuación damos algunas cifras que muestran su cuantía.

Las pruebas se hicieron con mortero normal y las cifras se refieren á probetas rotas á los veintiocho días.

	Kilogramos por centímetro cuadrado.
Cemento del comercio.....	15,80
Molido por dos horas.....	20,70
Idem por cinco ídem.....	24,60
Idem por catorce ídem.....	26,70

No es, pues, extraño el encontrar aumento de resistencia en cementos pulverizados en presencia de un material más duro. Sin embargo, es de importancia el hecho de que cuanto más sílice soluble tiene una roca tanto más apta es para la fabricación del *sand-cement*, siendo este hecho muy característico en las tobas y cenizas volcánicas que no son materiales excesivamente duros. Nos encontramos, pues, con que ambas teorías son racionales, y no siendo incompatibles, creemos que los dos hechos en que se fundan deben concurrir para dar al *sand-cement* sus propiedades, sin que se pueda decir, en el estado actual de nuestro conocimiento del *sand-cement*, cuál de los dos hechos tiene mayor importancia.

Pero no solamente las experiencias de laboratorio abonan las buenas cualidades del *sand-cement*, sino que, como ya hemos dicho, su resultado en obras de importancia excepcional aseguran sus excelentes propiedades y posibilidad de empleo en grande escala. Un material como éste, que, realizando una considerable economía sobre el cemento portland, presenta sensiblemente su misma resistencia, es de un valor excepcional en ingeniería, y si tenemos en cuenta que su fabricación no exige carbón, como el cemento, sino solamente fuerza, veremos que su empleo está indicadísimo en nuestro país, siendo de desear que su fabricación industrial comience, ya que es difícil encontrar en España una obra de importancia suficientemente grande para que esté justificada la instalación de una planta especial análoga á las instaladas en América en Elephans Butte y Arrework.

Sin embargo, aun con obras de menor importancia puede resultar conveniente en nuestro país el montaje de una planta especial, por el elevado precio que alcanza el cemento, y el precio más elevado aún de los transportes. La Compañía Riegos y Fuerza del Ebro, S. A., está considerando la conveniencia de su empleo en dos presas de embalse, una en el Noguera-Pallaresa y otra en el Segre, que se propone construir cerca de la confluencia de estos ríos, en término municipal de Camarasa. De desear sería que así lo realizara para tener cerca de nosotros una experiencia en grande escala de este material.

Los anteriores datos, recogidos en varias revistas y libros americanos, son, sin duda, incompletos, pero no dejan lugar á duda de que nos encontramos en presencia de un producto cuya importancia ha de llegar á ser grande, y que merece ser cuidadosamente estudiado.

José SOLANA.

CONGRESO DE CIENCIAS DE VALLADOLID

UNA NUEVA FABRICA DE CEMENTO PORTLAND

MEMORIA

PRESENTADA EN LA SECCIÓN DE CIENCIAS APLICADAS

POR

D. ANTONIO LÓPEZ FRANCO

Ingeniero de Caminos (1).

(CONCLUSIÓN)

La zona más débil que resulta en las inmediaciones del paso del cilindro al tronco del cono ha sido reforzada por un zuncho de 80 centímetros de altura, eficaz como armadura simétrica de dos barras de 30 milímetros, atadas cada 30 centímetros con estribos de alambre de 5 milímetros.

(1) Véase el número 2107.