

Ing. Luis Monge M.

El Cemento Portland

Resumen histórico y tecnológico

Programa de la futura industria chilena

(Charla 1.º Agosto-1944 al Centro de Estudiantes de Ingeniería.
Universidad Católica.—Santiago)

La iniciativa de la presente charla corresponde al Centro de Estudiantes de Ingeniería de la Universidad Católica, al que está dedicada. Por este motivo tendrá cierto carácter didáctico que eventualmente distraerá su fin esencialmente industrial y económico.

I.—Calcio-Cales-Cementos.

A.—El Calcio.

El calcio desempeña una función importante e insustituible en nuestro cuerpo, en los alimentos, en los suelos agrícolas, en las construcciones, en la práctica de numerosas y variadas industrias, etc. Con toda razón Rhau ha dicho que «el calcio es el fundamento químico principal de toda cultura».

Desde la más remota antigüedad el hombre ha apreciado el valor del calcio. Así como los niños instintivamente comen tierra y estucos cuando les falta cal, así también los pueblos primitivos aplicaron la cal en los suelos agrícolas para mantenerles su fertilidad. Conocemos esta práctica en los galos, bretones, germanos y otras razas bárbaras de la primitiva Europa según consta de la «Historia Natural» de Plinio, fallecido en el Siglo 1.º de nuestra Era, quien dice que esas razas aplicaban cal a los suelos agrícolas desde «tiempo inmemorial».

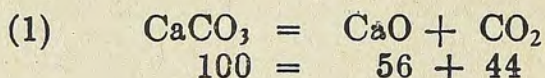
En las construcciones, el hombre empleó también la cal como adhesivo desde épocas remotas. Las civilizaciones chinas, caldeas, babilónicas, egipcias, griegas y romanas nos han dejado testimonio de su habilidad en el empleo de la cal en sus monumentos, habitaciones, pirámides, pavimentos, etc.

En la economía animal y vegetal, el calcio desempeña numerosas y variadas funciones de importancia, como son las de constituyente esencial de los tejidos orgánicos y de varias funciones fisiológicas directas e indirectas; es elemento químico primordial del crecimiento y de la resistencia física de animales y plantas; permite el aprovechamiento de otros elementos en la economía orgánica, neutraliza los ácidos y ejerce otras funciones, incluso las de dar el perfume a las flores y el sabor a las frutas.

Entre las múltiples funciones benéficas que el calcio ejerce en los cuerpos orgánicos, la naturaleza misma se encarga de destacar como la función por excelencia la de constituir los órganos de resistencia del complicado edificio orgánico; en efecto, el carbonato y el fosfato de calcio son los elementos típicos de solidez en los huesos de los vertebrados, en las conchas de los moluscos, en el tronco, ramas, tallos y nervaduras de las plantas. El hombre ha aplicado en sus construcciones esta misma cualidad de los derivados del carbonato de calcio.

B.—Las cales

El carbonato de calcio, CaCO_3 , es una sustancia bastante difundida en la naturaleza, principalmente en formaciones sedimentarias de origen marino. Es la materia prima única de la cal viva y la que en mayor proporción constituye la del cemento Portland y la del carburo de calcio. Cualquier tipo de carbonato de calcio que esté sometido a una temperatura no menor de 856°C . durante un tiempo suficiente para que se le incorporen 425,2 calorías métricas por kilogramo, se transforma en óxido de calcio o cal viva según la ecuación (1):



El tiempo de permanencia en el horno de un trozo de carbonato de calcio para que se verifique su completa calcinación («a muerte») en forma económica está dado por la suma de los tres valores siguientes en un horno vertical:

$$\begin{array}{l} \text{Tiempo de precalentamiento caliza} \\ \text{(enfriamiento de los gases)} \end{array} \quad (2) \quad Z_1 = \frac{9.924.d (1 + 2d)}{u - 581}$$

$$\text{Tiempo de calcinación} \quad (3) \quad Z_2 = \frac{23.475.d (1 + 2d)}{u - 856}$$

$$\begin{array}{l} \text{Tiempo de enfriamiento cal viva} \\ \text{(calentamiento del aire)} \end{array} \quad (4) \quad Z_3 = 18,38.d (1,06 + 8d).$$

Siendo d la menor dimensión del trozo expresado en metros, u temperatura media de los gases en la zona de Calcinación, en grados centígrados y $Z_1 - Z_2 - Z_3$ los tiempos respectivos expresados en horas. Para la buena calcinación las temperaturas u no deben bajar en la práctica de 950°C ni exceder de 1.200°C .

En la naturaleza casi siempre las rocas calizas contienen impurezas y en la industria la calcinación es incompleta. Designando por x la ley en CaCO_3 de una caliza y por y el grado de calcinación (ambos porcentajes en números enteros), de 1,000 Kgs. de caliza se obtendrán P Kgs. de cal viva con una ley L de óxido de calcio libre según las relaciones:

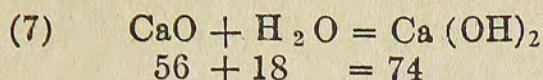
$$(5) \quad P = 1000 - 0,044 \cdot x \cdot y$$

$$(6) \quad L = \frac{5,6 \cdot x \cdot y}{1000 - 0,044 \cdot x \cdot y}$$

La cal viva es de apariencia terrosa y de estructura porosa y frágil. Cuando el carbonato es cristalizado la cal viva resulta pulverizada al calcinarse. La densidad aparente varía entre 1.15 y 2.09.

Si a la cal viva se le agregá agua a la temperatura ambiente en la propor-

ción exacta de 32.14% del peso, se transforma en hidróxido de calcio o cal hidratada o apagada con desprendimiento de calor, según la ecuación:



La cantidad teórica de cal apagada P^1 en (Kgs.) que resulta de 1000 Kgs. de caliza con ley x de carbonato de calcio y un grado y de calcinación, hidratada con la proporción de agua estrictamente necesaria y suficiente será:

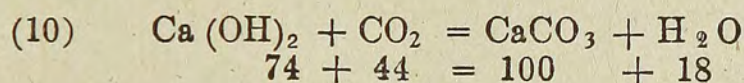
$$(8) \quad P^1 = 1000 - 0,026 \cdot x \cdot y.$$

y su ley en CaO libre:

$$(9) \quad L_1 = \frac{5 \cdot 6 \cdot x \cdot y}{1000 - 0,026 \cdot x \cdot y}.$$

En estas proporciones exactas de hidratación, la cal apagada es un polvo finísimo, seco, compuesto de partículas cuyo diámetro medio es de 6 micrones y cuya densidad aparente es de 0.85.

Para usarse en construcciones se apaga la cal con exceso de agua y después de aplicada, húmeda, la exposición al aire la carbonata según la ecuación:



El carbonato de calcio resultante de este procedimiento se endurece lenta y progresivamente y constituye un adhesivo tan tenaz que antiguas construcciones de cal y piedra o ladrillo sólo pueden demolerse usando explosivos.

Las relaciones (1) a (10) se encuentran explicadas en detalle en un folleto titulado «La Cal Viva» que publicó la Sociedad Nacional de Minería en 1940.

El proceso hasta aquí descrito fué aplicado desde remota antigüedad, en forma empírica naturalmente, tanto para abonar los suelos (cal viva o apagada) como para adhesivo de bloques en las construcciones (cal apagada y carbonatada), o para estucar los muros.

Citaré algunos casos precisos sobre el empleo de la cal en monumentos antiguos. Los análisis químicos del mortero empleado en la pirámide de Cheops demuestran que los egipcios tenían perfecto conocimiento práctico sobre la fabricación y la aplicación de la cal. Plinio y Vitrubio citan el empleo corriente de la cal en la arquitectura griega y romana. En Italia, fueron los etruscos los que primeros emplearon la cal. Una rama de los etruscos, los tirreños enseñaron su uso a los griegos (Homero, Hesiodo, Heródoto, Tucídides). A su vez, los romanos aprendieron el uso de la cal de los griegos y de los etruscos, y lo perfeccionaron mezclando la cal con puzzolana, una ceniza volcánica muy abundante en las vecindades del Vesubio. Molida esta mezcla posee cierta hidraulicidad que no tiene la cal sola.

En la Edad Media, los autores que se ocuparon del arte de la construcción, como Albertu, Palladio, Bullet y Plondel, no avanzaron gran cosa en cuanto a esta rama de la química. Hoy día, la cal representa un índice del progreso industrial, pues está ligada a numerosas industrias esenciales. Es ilustrativo el cuadro I, para demostrar sus actuales usos.

CUADRO I

Usos de la cal (viva o apagada) producida en EE. UU. durante 1940.
(Toneladas cortas)

Agricultura.....	364.823	Toneladas
Edificación.....	1,010.435	»
Industrias:		
Metalurgia.....	999.215	»
Papel.....	566.818	»
Purificación aguas.....	266.088	»
Vidrio.....	168.044	»
Curtiembres.....	72.417	»
Azúcar.....	19.089	»
Carburo de calcio y cianámidas.....	88.011	»
Insecticidas y desinfectantes.....	54.630	»
Pinturas.....	28.083	»
Refinerías de petróleo.....	29.344	»
Fábricas de gas, ladrillos refractarios, fábricas de álcalis, alimentos, lubri- cantes, goma, sal, jabones, tejidos, barnices, tabacos, alcantarillados y basuras y muchas otras.....	1,219.932	»
Total, EE. UU. 1940:	4,886.929	Toneladas

C.—Los cementos naturales precursores del Portland

La primera tentativa sería de investigar la causa que permitía a ciertas cales endurecer bajo agua, fué la de John Smeaton, padre de la ingeniería inglesa, en 1756.

Teniendo a su cargo la construcción del primer faro de Eddystone, Smeaton ejecutó numerosas experiencias con mortero de diversas cales, persiguiendo el objetivo de buscar una cal que endureciera bajo agua. Con estas experiencias Smeaton descubrió que esta propiedad no correspondía a las cales de mayor pureza; por el contrario, la calcinación de calizas muy arcillosas o impuras, produce una cal que se endurecía bajo agua, mientras las cales puras no se endurecían en estas condiciones. Con este material construyó Smeaton el faro de Eddystone que 123 años más tarde hubo que demoler a fuerza de dinamita para construir otro más moderno.

Las conclusiones de Smeaton sólo se publicaron 35 años más tarde, en 1791. Aunque Smeaton no llevó sus experiencias al punto de fabricar un verdadero cemento, sus observaciones respecto a la influencia de la arcilla en la caliza constituyen el primer paso de la evolución que culminó más tarde con el descubrimiento del cemento Portland.

Simultáneamente con los trabajos de Smeaton, los investigadores franceses Guyton de Morveau y Bergmann estudiaron las causas de la hidraulicidad de ciertas cales, atribuyéndola erradamente a la presencia casual de óxido de manganeso. Smeaton sostenía que dicha causa residía en el óxido de fierro. Treinta

años más tarde, el francés De Saussure demostró que el manganeso no tenía papel alguno en esta cuestión coincidiendo con Smeaton.

El próximo paso lo dió Parker en Inglaterra, quien en 1796 patentó un producto que contemplaba el empleo de ciertas concreciones de calcáreo con arcilla, muy comunes en algunas formaciones costaneras de Inglaterra, las que «debían calcinarse a *mayores temperaturas*, que las corrientes para elaborar la cal», pulverizándolo después. Al aplicar agua a este producto, *no se apagaba como la cal viva sino que se endurecía, no sólo al aire sino también bajo agua*. Este cemento natural, que aunque no había sido conocido en Roma fué denominado impropriamente «cemento romano» por Parker, entró en uso general en Europa y en América durante gran parte del siglo XIX.

En 1813, Colets Descotils llegó a la conclusión de que la presencia de sílice en la caliza era la condición química necesaria para obtener cales hidráulicas. En esa época, Vicat practicó investigaciones sintéticas llevadas a cabo en forma científica, llegando a la conclusión de que la sílice, la alúmina y el óxido de fierro, o sea, los elementos constituyentes de la arcilla, son los que dan a la cal sus cualidades hidráulicas. En 1817 hizo demostraciones definitivamente concluyentes en París con cales de Cleys y de Champigny y con arcillas de Vauvres.

Posteriores experimentos de St. Leger, Pasley, Ansted y Way en Inglaterra, John y Fuchs en Alemania, Rancourt de Charleville en Rusia, y otros, confirmaron las doctrinas de Vicat sobre las causas que influyen los diferentes caracteres de las cales.

En 1822 el inglés Frost patentó y produjo una cal hidráulica pulverizada que denominó «Cemento inglés».

En Estados Unidos, a principios del siglo pasado los ingenieros norteamericanos Benjamín Wright y Canvaks White dirigían la construcción del canal Eris a base de mortero de cal. Uno de los proveedores de cal, T. Clarke, empezó a explotar con este objeto unas calizas del Condado de Madison, cuya calidad parecía satisfactoria. Sin embargo, las primeras entregas de cal, «fracasaron» porque la cal viva en trozos se resistía obstinadamente a apagarse cuando se le agregaba agua. Afortunadamente White había estudiado especialmente en Inglaterra las cales y cementos y ya el cemento romano natural de Parker había pasado del período experimental y gradualmente iba reemplazando a la cal en las construcciones. En estas circunstancias, White examinó con suma atención las calizas y la cal de Madison y llegó a la conclusión de que la obstinada mala cal de Clarke no era otra cosa sino un cemento natural o romano de alta calidad al que sólo faltaba pulverizarlo. La experiencia demostró que estaba en la razón y gracias a esta feliz circunstancia, el «fracaso» de la cal de Madison dió lugar a usar por primera vez el cemento natural o romano en América. Esto sucedió en 1818.

White patentó su cemento y el Estado de Nueva York compró sus derechos en \$ 10.000 para dejarlos de libre uso. Sólo en el distrito de Rosendale, N. Y., en 1843 había 16 empresas productoras con 60 hornos cuya capacidad en total era de 100.000 Tons. anuales. La industria del cemento natural creció en EE. UU. hasta fines del siglo XIX, alcanzando un máximo próximo a 2.000.000 de Tons. en 1899. A partir de esa época esta industria decreció debido al fuerte incremento que tomaba el cemento Portland que desplazó definitivamente al cemento natural, al cemento romano, a las cales hidráulicas, etc.

Todavía se producen cementos naturales en EE. UU. para usos menores y en pequeñas cantidades. En 1940 la producción de cementos naturales de varios tipos fué de 431.000 Tons. contra 21.650.000 Tons. de cementos Portland.

Las principales diferencias entre los cementos naturales y la cal viva, son las siguientes:

En la elaboración:

1. Se necesitan calizas arcillosas que contengan sílice, alúmina y óxido de fierro además del carbonato de calcio para fabricar cementos naturales.
2. Se calcinan a mayor temperatura que la cal.
3. Deben pulverizarse antes de emplearse.

En la composición química:

4. En la cal viva, la sílice, la alúmina y el óxido de fierro no se combinan con la cal y constituyen impurezas. En el cemento natural esos cuerpos son esenciales y se combinan formando silicatos, aluminatos y ferritos de calcio.

En las cualidades:

5. El cemento natural no se apaga con adición de agua sino que se endurece rápidamente (fragua).
6. El cemento natural tiene propiedades hidráulicas, o sea, se endurece bajo agua, propiedad que no tienen las cales vivas.

Las cales hidráulicas usan materias primas muy parecidas a las de los cementos naturales. Difieren de éstos en que su contenido de cal libre es tan alto, que el producto se apaga en vez de fraguar cuando recibe agua.

D.—El cemento Portland

El 21 de Octubre de 1824, Joseph Aspdin, de Leeds, Inglaterra, registró la patente inglesa N.º 5022, para un cemento que él denominó «Cemento Portland» debido a que una vez fraguado este material se parecía a la caliza oolítica de Portland, piedra de construcción muy conocida en Inglaterra. Esta fecha es histórica en la evolución de los materiales de construcción.

El cemento Portland es el producto resultante de la calcinación y fusión incipiente de una mezcla artificial finamente molida de carbonato de calcio, sílice, alúmina y óxido de fierro, en proporciones fijas, uniformes y homogéneas. La mezcla se calienta a alta temperatura (1.500°C) en hornos de diseño especial. En esta operación la cal se combina con la sílice, la alúmina y el sesquióxido de fierro formando una masa semifundida constituida por numerosos silicatos, aluminatos y ferritos cuya composición exacta todavía no es bien conocida. Esta masa que se denomina «clinker» se enfría y se pulveriza, mezclándola con pequeña proporción de un «retardador» que puede ser yeso crudo u otras sustancias. Este producto se denomina cemento Portland; mezclado con agua se endurece o fragua, al aire y bajo agua.

Las principales diferencias entre un cemento Portland y un cemento natural, son las siguientes:

1. Los cementos naturales usan como materia prima rocas tal como vienen de las canteras o de las minas. El Portland proviene de mezclas artificiales de materias primas finamente molidas, dosificadas y mezcladas con sumo cuidado. De aquí la uniformidad y efectiva homogeneidad de los Portland.
2. Los cementos naturales se elaboran a temperaturas menores que los Portland. El material no alcanza a calentarse a temperaturas que se acerquen a las requeridas para la formación del clinker.
3. Los cementos naturales, tienen menores resistencias que los Portland y son muy variables.
4. Los cementos naturales, después de molidos, tienen colores entre amarillo y pardo; los Portland tienen color azulejo a gris. El peso específico de los primeros es inferior.
5. Los cementos Portland constituyen un producto de proporciones fijas con una tolerancia estrecha en sus porcentajes de cal, sílice, alúmina y óxido de

fierro. Los cementos naturales tienen un margen de variación amplio en su composición. Se deduce que con el cemento Portland, el constructor dispone de un elemento standardizado más resistente, indeformable y adhesivo, y el calculista está garantido al aceptar determinadas fatigas de trabajo por la uniformidad del producto.

La patente sobre cemento Portland de Aspdin, otorgada en 1824, no tuvo inmediato éxito: la industria manufacturera creció con suma lentitud, pues los cementos naturales, en especial el cemento romano de Parker (1796) estaba en voga y costaba más barato. Ambos cementos, Portland y romano, se usaban exclusivamente como adhesivos de blocks (ladrillos o piedras); el uso del cemento en masas, en forma de concretos fué empleado mucho más tarde. En 1838, el célebre ingeniero inglés Sir I. K. Brunel, cambió el cemento romano que él empleaba en sus construcciones, por el cemento Portland de Aspdin. En esa época construyó el primer túnel bajo el Támesis, empleando cemento Portland en su albañilería, pagando más alto precio por el nuevo producto.

La primera fabricación de cemento Portland como industria regular en el mundo fué la de J. B. White & Sons de Swanscombe (Kent, Inglaterra) donde el técnico I. C. Frosten (1845) cambió la línea de producción que era de «cemento inglés de Frost» por la de «cemento Portland de Aspdin». La fábrica de Swanscombe es hasta hoy una de las mayores de Europa con una capacidad de 400.000 toneladas al año.

El cemento Portland White rápidamente se difundió y tuvo demanda en todo el mundo. Luego Francia y Alemania montaron sus primeras fábricas, respectivamente en Boulogne y en Stettin.

En 1850 en Inglaterra había cuatro fábricas de cemento Portland, las de Swanscombe, Northfleet, Wakefield y Gatoshead. El desarrollo de la industria en un principio estuvo entrabado por la irregularidad de la calidad y de la producción, y por la competencia del cemento Romano. En la década 1850-1860 se empezó a mejorar la elaboración del Portland y con ello a ser gradualmente más aceptado que el cemento Romano por los ingenieros.

A pesar del rápido incremento que tomó la industria del cemento Portland en Inglaterra, Alemania y Francia desde 1850, tardó bastante en iniciarse esta industria en EE. UU. país que durante más de 20 años fué tributario del cemento Portland europeo.

La primera tentativa norte-americana (1872) se llevó a cabo en Kalamazoo, Mich. planta que fracasó comercialmente. En 1875 se construyó la primera planta comercial de EE. UU. en Wampum, Pennsylvania, fábrica que fué la base de la Crescent Portland Cement Co. En la misma época se construyeron varias fábricas en el distrito de Hudson River, N. Y. Independientemente, surgió al mismo tiempo la industria del distrito Lehigh de Pennsylvania, a base de poderosas formaciones ordovicianas de calizas arcillosas de color gris muy oscuro, que cruzan los condados de Berks, Lehigh y Northampton. A principios del presente siglo en esa zona relativamente pequeña funcionaban 21 fábricas de cemento Portland, las que producían la tercera parte de la producción en EE. UU.

Es interesante conocer a través de la estadística el desarrollo de la industria del cemento Portland en EE. UU.

CUADRO II

Producción de cemento Portland en EE. UU.

1870-79.....	14,000 Tons. (en 10 años)		
1880.....	7,000	»	en el año
1885.....	25,000	»	»
1890.....	55,000	»	»
1895.....	165,000	»	»
1900.....	1.414,000	»	»
1905.....	5.874,000	»	»
1910.....	12.758,000	»	»
1915.....	15.750,000	»	»
1920.....	16.820,000	»	»
1925.....	26.330,000	»	»
1930.....	26.800,000	»	»
1935.....	13.400,000	»	»
1940.....	21.650,000	»	»
1942.....	31.000,000	»	»

La técnica de la elaboración del cemento Portland ha cambiado radicalmente. En la época primitiva de Aspdin (1824) hasta 1885-90, casi todas las plantas usaban materias primas blandas que eran molidas y mezcladas en húmedo y en seguida se briqueteaba la pasta, se secaba como ladrillos y se cocía en hornos verticales que se cargaban y se descargaban a mano; el clinker resultante se molía en molinos horizontales de piedra. En Europa, la mano de obra era barata y el combustible era caro y abundaban las margas calcáreas, cretas y arcillas blandas. Si bien el método de elaboración del Portland era rústico, en Europa resultaba lógico y económico.

En EE. UU. estos factores industriales eran absolutamente opuestos en aquella época: combustible barato, mano de obra cara y calizas duras, especialmente las del Valle de Lehigh, Pa. Esto fué la causa principal de que durante mucho tiempo EE. UU. importara cemento europeo mientras veía fracasar comercialmente su propia industria de Portland, pues los métodos de elaboración del Portland, lógicos en Europa eran antieconómicos en EE. UU.

Esta situación colocó a los industriales americanos en la alternativa de cambiar totalmente la técnica mecánica de la elaboración del Portland o de seguir siendo compradores de Portland europeo. Dos hechos trascendentales en la historia del cemento y de la metalurgia cambiaron totalmente esta situación: la invención del horno rotativo Ransome y la evolución moderna del chancado y la molienda mecánica. Estos acontecimientos permitieron a EE. UU. colocarse en condiciones óptimas como productor de Portland, no sólo para satisfacer su consumo doméstico desde la última década del siglo pasado, sino transformándolo en exportador, con el desarrollo espectacular que muestra el Cuadro II.

El horno rotativo Ransome, patentado en Inglaterra en 1885 y en EE. UU. en 1886, fué la base de los actuales. Por primera vez se empleó con éxito en la industria del cemento en South Rondout, N. Y., en 1889 usando petróleo. Por primera vez las materias primas molidas y mezcladas se introdujeron secas y pulverizadas al horno, sin formar previamente una pasta húmeda. Desde ese mo-

mento existieron dos procedimientos de elaboración de Portland: el húmedo y el seco. Más adelante volveré sobre este punto.

Paralelamente, la técnica del chancado y molienda evolucionó radicalmente dejando atrás el anticuado molino de piedra. La chancadora giratoria y de martillos, los molinos de bolas y tubulares, y, en los últimos años los de barrido de aire y otros han revolucionado la molienda de la materia prima y del clinker.

En 1895, gracias a las mejoras mencionadas, las fábricas norteamericanas que no estaban próximas a campos petrolíferos o de gas natural, introdujeron el uso del carbón pulverizado.

En 1889, Thomas A. Edison construyó la fábrica de cemento Portland de Stewartsville, N. J., que en 1942, fué adquirida y reacondicionada por capitales chilenos para la Compañía Juan Soldado en La Serena. Este equipo fué completado con Hornos rotativos reacondicionados de la fábrica de potasa de Piscataway, N. J., según informaciones.

En 1906, se organizó la Sociedad Fábrica de Cemento de «El Melón», primera fábrica en Chile y, hasta hoy, la única en producción. Fué equipada y montada por F. L. Smidth y Co. de Copenhagen. La planta primitiva constaba de dos hornos rotativos de 26 ms. La capacidad inicial fué de 40.800 Tons. anuales.

Sucesivos ensanches han aumentado su capacidad a 365.000 Tons. efectivas al año. En 1945 su capacidad aumentará a cerca de 500.000 Toneladas en el año.

Durante los últimos 40 años, y en especial, desde 1930 la técnica del cemento Portland ha evolucionado sustancialmente: se han introducido multitud de mejoras que se traducen por una parte en reducción de costos aumentando la producción por hombre-día, por Kilowatt-hora y por unidad de calor; por otra parte en mejoras en la calidad del cemento, según explicaré más adelante; en asegurar la homogeneidad gracias al perfeccionamiento del control; en mejorar las condiciones higiénicas de los operarios, etc. Este conjunto de mejoras, que han conservado los principios expuestos más atrás sobre la elaboración de cemento Portland, consistan principalmente en los organismos de arranque, molienda, transporte, clasificación, recuperación de calor en los gases y en el clinker, aumento de la longitud de los hornos, recuperación de polvo, aparatos de control; perfeccionamiento de la técnica, mejoras químicas, mayor fineza de molienda, etc.

En ciertas zonas en que el combustible es muy abundante y barato ha resultado económico generar toda o parte de la fuerza motriz necesaria para fábricas de cemento con una planta de fuerza a vapor generado en calderos calentados con calores perdidos del horno. La primera planta que se instaló fué en la Cayuga Lake Cement Co. Entre 1915 y 1921 el empleo de calores perdidos tuvo aceptación en las plantas secas de EE. UU. También la fábrica húmeda de la Petoskey Portland Cement Co. y otras pocas generan su fuerza en esta forma. El aumento de precio del combustible y la mayor fineza de molienda que se exige a los cementos modernos con mayor consumo de fuerza, ha restringido mucho el uso de esta fuente de energía. La tendencia actual es la de aprovechar al máximo la energía térmica del combustible en la calcinación y clinkerificación, para lo cual se aumenta el largo de los hornos y se les dota de recuperadores de calor, con lo cual se logra reducir la temperatura de escape de los gases a 150-200° C. en vez de 650-700° C. En otras palabras, para disponer de calores perdidos hay que quemar más combustible en los hornos actuales. Tengo casos a la vista de hornos modernos económicos que queman 200-220 Kgs. de carbón de 7000 calorías por Tda. de clinker, mientras otro horno con calderos a calores perdidos quema 420 Kgs. Además, los calderos calentados en esta for-

ma están expuestos a múltiples inconvenientes de diverso orden, que no detallaré en obsequio a la brevedad.

Estas consideraciones generales no excluyen la posibilidad de que en determinados casos resulte justificada la generación de fuerza con calores perdidos. Así por ejemplo, en Chile la fábrica Juan Soldado en actual construcción generará su fuerza en esta forma, según informes. Seguramente ha habido factores locales que han justificado esta decisión.

El 24-October-1933, Mr. Charles J. Breerwood después de investigaciones llevadas a cabo con las calizas pobres de Valley Forge, Penn., patentó la aplicación al carbonato de calcio del procedimiento de concentración por flotación que era empleado principalmente para concentrar sulfuros metálicos. Posteriormente Mr. Breerwood ha registrado numerosas variantes y perfeccionamientos de su primitiva patente; conozco 16 de éstas. Para este objeto organizó la Separation Process Co. de Catasauqua, Penn., la que controla los derechos de la patente Breerwood en EE. UU., Canadá y Méjico; en el resto del mundo controla estos derechos la firma F. L. Smidth & Co., de Copenhagen. La patente en Chile registrada por esta última firma tiene N.º 430 de 17-October-1938.

El procedimiento de flotación permite aprovechar calizas de baja ley en la elaboración de cemento; su aplicabilidad está regida por condiciones económicas que varían en cada caso. Las principales fábricas que han adoptado este sistema para purificar sus calizas son: en forma eventual la Permanente Cement Co. (Palo Alto, Calif.) y en forma estable las fábricas de Valley Forge, Pennsylvania, National Portland Cement de Brodhead, Pa., la Fábrica San Martín en Paraná de la Cía. Argentina de Cemento Portland, subsidiaria de la Lone Star Cement Corp. En Chile se empleará la flotación en la fábrica de Juan Soldado a fin de subir la ley en carbonato de calcio de las calizas.

Con respecto a la preparación de materias primas, hemos dicho que la primitiva industria sólo podía hacerlo en húmedo para formar pastas que una vez secas en terrones o briquetas pudieran ser tratadas en hornos verticales. La introducción del horno rotativo Ransome en 1885 permitió el procedimiento seco en el cual las materias primas molidas y mezcladas son introducidas al horno en forma de polvo seco.

Algunos fabricantes opinan que la era del procedimiento seco está pasando rápidamente; varias fábricas secas se han transformado en húmedas. Una fábrica húmeda moderna consume un poco más combustible que una fábrica moderna seca; pero en cambio se obtiene mejor control en las mezclas, se mejora la calidad del producto, se consume menos fuerza en la molienda, se facilita el transporte, se disminuye la pérdida de polvo y se obtienen otras ventajas con el procedimiento húmedo. Hay ciertos casos en que los factores locales imponen la elección de uno u otro método sin lugar a dudas. Pero en la mayoría de los casos en que pueda elegirse uno u otro, se observa una marcada tendencia a favor del procedimiento húmedo, no sólo con materias primas blandas sino también con las duras. A título de ejemplo, a continuación se copia la estadística de la firma F. L. Smidth y Co. que han montado numerosas fábricas de cemento en el mundo, y que goza de un merecido prestigio universal.

CUADRO III

Hornos rotativos montados en fábricas de cemento Portland por F. L. Smidth & Co. desde 1898 hasta 1938

Año	Procedimiento húmedo	Procedimiento seco
1898-1909.....	79 hornos 66%	40 hornos 34%
1910-1919	111 » 93%	8 » 7%
1920-1929.....	137 » 86%	22 » 14%
1930-1938.....	124 » 88%	17 » 12%
Totales.....	451 hornos 84%	87 hornos 16%

Es interesante observar la evolución en la calidad del cemento Portland a través de su historia de 100 años. La mejora en la resistencia de los cementos ha sido un objeto perseguido siempre por los investigadores, ya que a mayores resistencias del cemento corresponden menores dosis por metro cúbico de concreto o menores secciones en las estructuras, reduciendo con ello el peso propio.

A fin de apreciar la importancia económica que tiene la resistencia de un cemento en la dosificación de un concreto para obtener un concreto de resistencia dada, bastará considerar el Gráfico I, construido para tres clases de cemento Portland, a saber: cemento corriente (400 Kgs/cm² a 28 días), cemento de 1.ª Clase (500Kgs/cm²) y Super-cemento (600 Kgs/cm²). Estas curvas corresponden a la fórmula empírica del ingeniero civil chileno Sr. Belisario Maldonado, deducida de varios miles de experiencias. (Anales del Instituto de Ingenieros de Chile, marzo 1943; Revista Chilena de Ingeniería, N.º 3).

$$R = 1,333 A - 0,001168 A^2 + 0.5 S$$

Siendo R = Resistencia a ¹ a compresión del concreto en Kgs./cm².

A = Dosis de cemento en Kgs/m³ de concreto.

S = Calidad del cemento en Kgs/cm²,
terro normal 1 : 3.

Esta fórmula interpreta con mucha fidelidad los resultados de la experiencia para dosis entre 140 Kgs/m³. y 340 Kgs/m³.

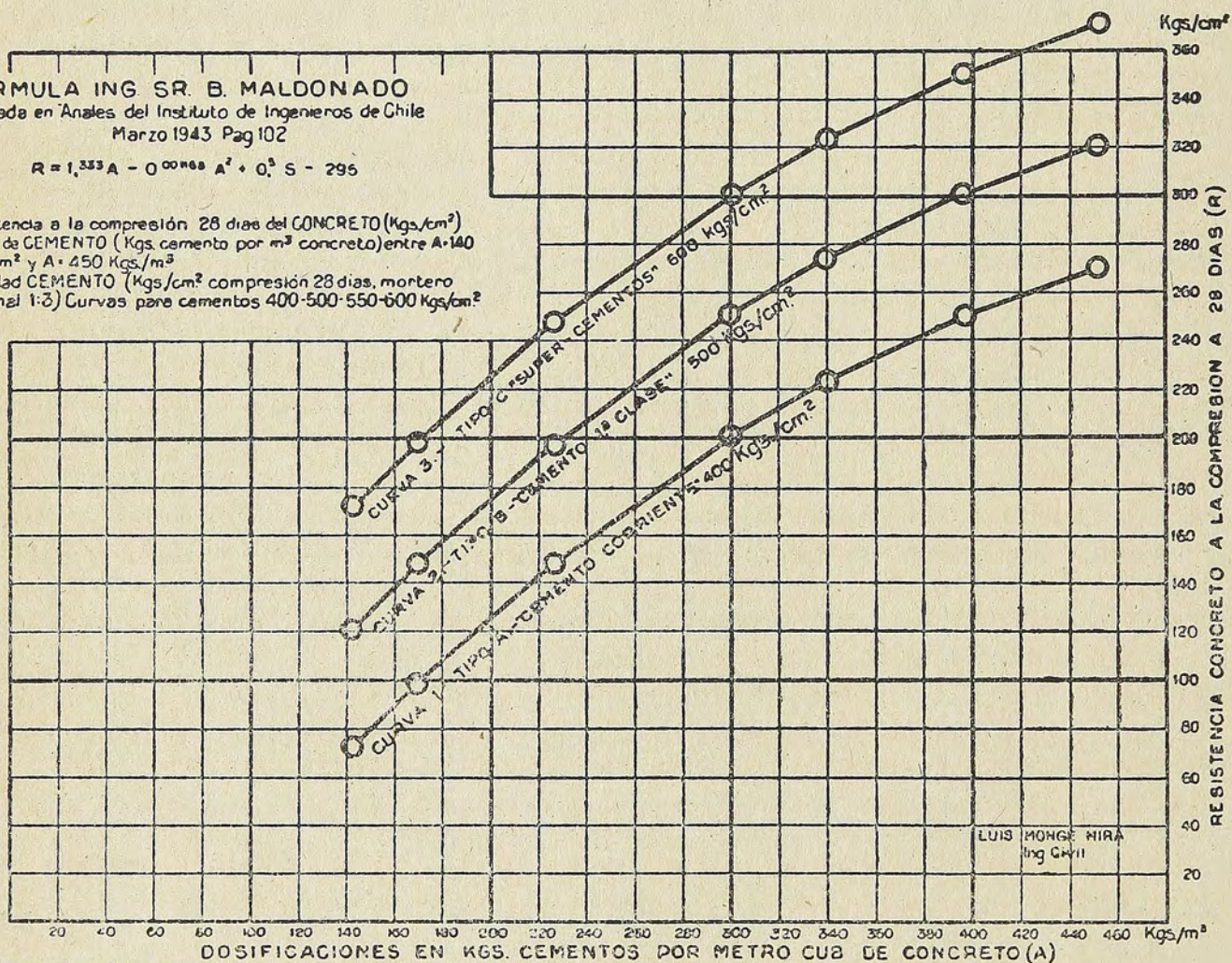
Puede apreciarse la importancia que tiene para el consumidor usar cementos de alta resistencia.

Para formar una idea sobre los progresos alcanzados en calidad por el cemento Portland desde 1862 hasta 1933, en el Gráfico II se anotan los resultados de resistencias a la tracción, (A. C. Davis,—Portland Cement, 1934).

FÓRMULA ING SR. B. MALDONADO
 Publicada en Anales del Instituto de Ingenieros de Chile
 Marzo 1943 Pag 102

$$R = 1,333A - 0,0066A^2 + 0,5S - 295$$

Siendo:
 R=Resistencia a la compresión 28 días del CONCRETO (Kgs/cm²)
 A Dosis de CEMENTO (Kgs cemento por m³ concreto) entre A=140
 Kgs/m³ y A=450 Kgs/m³
 S=Calidad CEMENTO (Kgs/cm² compresión 28 días, mortero
 normal 1:3) Curvas para cementos 400-500-550-600 Kgs/cm²



LUIS MONGE NIRA
 Ing Civil

GRAFICO I RELACIONES ENTRE CALIDAD CEMENTO (S) DOSIFICACION CONCRETO (A)
 Y RESISTENCIA CONCRETO (R) Compresión 28 días.

La composición de la mezcla para fabricar un cemento Portland corriente oscila alrededor del siguiente análisis medio:

SiO ₂	16.%
R ₂ O ₃ (Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃).....	6.5
CaCO ₃	76.5
MgCO ₃	0.5
Alcalis, varios.....	0.5
	100.

Estos compuestos químicos existentes en la materia prima sufren gradualmente transformaciones que sólo en parte son conocidas. Después de la expulsión del anhídrido carbónico, del agua combinada y la materia orgánica de la caliza y de la arcilla,—procesos que pueden darse por terminados a 1.100°C,—la cal viva y los demás componentes de la materia prima se combinan entre 1.100°C y 1.500°C formando diversos silicatos, aluminatos y ferritos, cuyo conjunto constituye el clinker del cemento Portland.

A pesar del trabajo que han desarrollado muchos investigadores, la composición del cemento Portland es una cuestión que no está completamente dilucidada ni bien establecida. Entre otros compuestos, el clinker contiene los siguientes: silicato tricálcico, silicato bicálcico, aluminato tricálcico, ferrito tricálcico, ferro aluminato tetracálcico y otros no bien determinados.

Los investigadores se han preocupado no sólo de aumentar la resistencia definitiva de los cementos sino de anticipar su endurecimiento sin acortar ni anticipar el tiempo de fraguado. Esta cualidad es muy deseada por los constructores ya que les permite reducir los moldes, acelerar la construcción de estructuras altas, evitar riesgos de heladas durante la construcción, acortar las interrupciones en pavimentaciones, etc. Estos cementos de rápido endurecimiento que adquieren suficiente resistencia a las 24 horas («Rapid-Hardening Portland Cement», «High Early Strength Portland Cement»), se fabrican con análogas materias primas a las usadas para Portland corriente, pero su elaboración (molienda y clinkerificación) es más refinada.

Para cristalizar las actuales tendencias con respecto a cementos Portland se reproducen a continuación las 5 categorías de cementos Portland actualmente adoptadas por el «Committee C-1» de la «American Society for Testing Materials».

1. Cementos Portland Standard, que no requieren cualidades especiales.—En EE. UU. durante 1940, 152 fábricas produjeron 21.650,000 Tons.

2. Cementos Portland para uso en concretos sometidos a moderada acción de sulfatos y a condiciones moderadas de heladas y deshielos.

3. Cementos Portland «High Early Strength» o «Rapid Hardening», recién descritos.—En EE. UU. durante 1940, 88 fábricas produjeron 760,000 Tons. de este tipo.

4.—Cementos Portland de bajo y moderado calor de endurecimiento «Low»—and «Moderate-Heat-of-Hardening»).—La construcción de enormes ranques en EE. UU. en los últimos años ha desarrollado la elaboración de cementos Portland que desarrollen poco calor al hidratarse, cualidad muy deseada para el trabajo en grandes masas de concreto. Esto se consigue reduciendo las proporciones de silicato tricálcico y del aluminato tricálcico, y aumentando las del silicato bicálcico y del ferroaluminato tetracálcico. Este cemento (Low-Heat)

desarrolla 27% menos calor que el Portland corriente, pero es lento en adquirir la resistencia. De aquí ha nacido una variedad intermedia entre el «Low-Heat» y el Portland Standard: el «Moderate Heat» que desarrolla un 10% menos de calor que el Standard y que adquiere la resistencia de éste más o menos en igual tiempo. En EE. UU. durante 1940, 14 fábricas produjeron 1.432,000 Tons. de este tipo.

5.—**Cementos Portland resistentes a los sulfatos.**—En EE. UU. durante 1940, 11 fábricas produjeron 33,000. Tons. de este tipo.

Además de estos cementos Portland enumeraré algunos otros Portland que se encuentran en pleno uso para distintos objetos:

1.—**Cementos Portland para pozos de petróleo («Oil-Well P. C.»).** Están destinados a cegar e impermeabilizar napas subterráneas en perforaciones.—En ciertos casos hay que inyectar el cemento en perforaciones a grandes honduras forzándolo a llenar las grietas del pozo. Con el empleo de retardadores y aceleradores, el tiempo de fraguado se regula con precisión de modo que el cemento no fragüe antes de llegar al punto de destino, pero que en llegando, fragüe inmediatamente. En EE. UU. durante 1940, 22 fábricas produjeron 122,000. Tons. de este tipo.

2.—**Cementos Portland Puzolánicos.**—Se fabrican añadiendo pumicita, escorias, arcilla calcinada, u otras materias al cemento Portland. Estas sustancias reaccionan con el calcio del cemento, en forma que las puzolanas fijan la cal libre y los cementos Portland así preparados resisten el ataque químico, por ejemplo, del agua de mar.

3.—**Cemento Portland de Alto horno.**—Mezcla de más de 70% de cemento Portland y menos de 30% de escorias de alto horno. Por decreto del Ministerio Prusiano de Obras Públicas, es admitido en todas las construcciones del Estado, incluso en las de hormigón armado, como equivalente del cemento Portland.

4.—**Supercementós.**—Consiguen muy altas resistencias con un clinker muy bien cocido, más bien, algo pasado, molienda muy fina y, finalmente por la adición de ciertas substancias consideradas como secreto de fabricación.

5.—**Cementos aluminosos.**—Los cementos aluminosos («High Alumina Cement» o «Ciment Fondu») difieren en su composición química de los Portland. Contienen menos de 50% de cal, más de 30% de alúmina y más de 20% de sílice, fierro y otros compuestos. Se fabrican con bauxita (alúmina hidratada) y calizas o cal, que se muelen a gran fineza y se funden en un horno. El producto fundido se enfría rápidamente y se reduce a polvo fino. Su color es muy oscuro, casi negro. Fragan en el tiempo normal pero a las 24 horas tienen resistencia parecida a los de tipo «High Early Strength». Difieren de éstos en que después casi no aumentan de resistencia de modo que a la larga se le igualan los Portland corrientes. Son de elaboración más costosa que los Portland corrientes.

Además de los cementos Portland de elaboración especial que adquieren mayor y más rápida resistencia que los Portland corrientes pero que son más costosos y de conservación más delicada, existen hoy día otros compuestos que sin ser cementos Portland, mezclados a éstos les aumentan la resistencia en proporciones apreciables sin desmejorar sus demás condiciones de indeformabilidad adherencia, fraguado, etc., y mejorando otras cualidades.

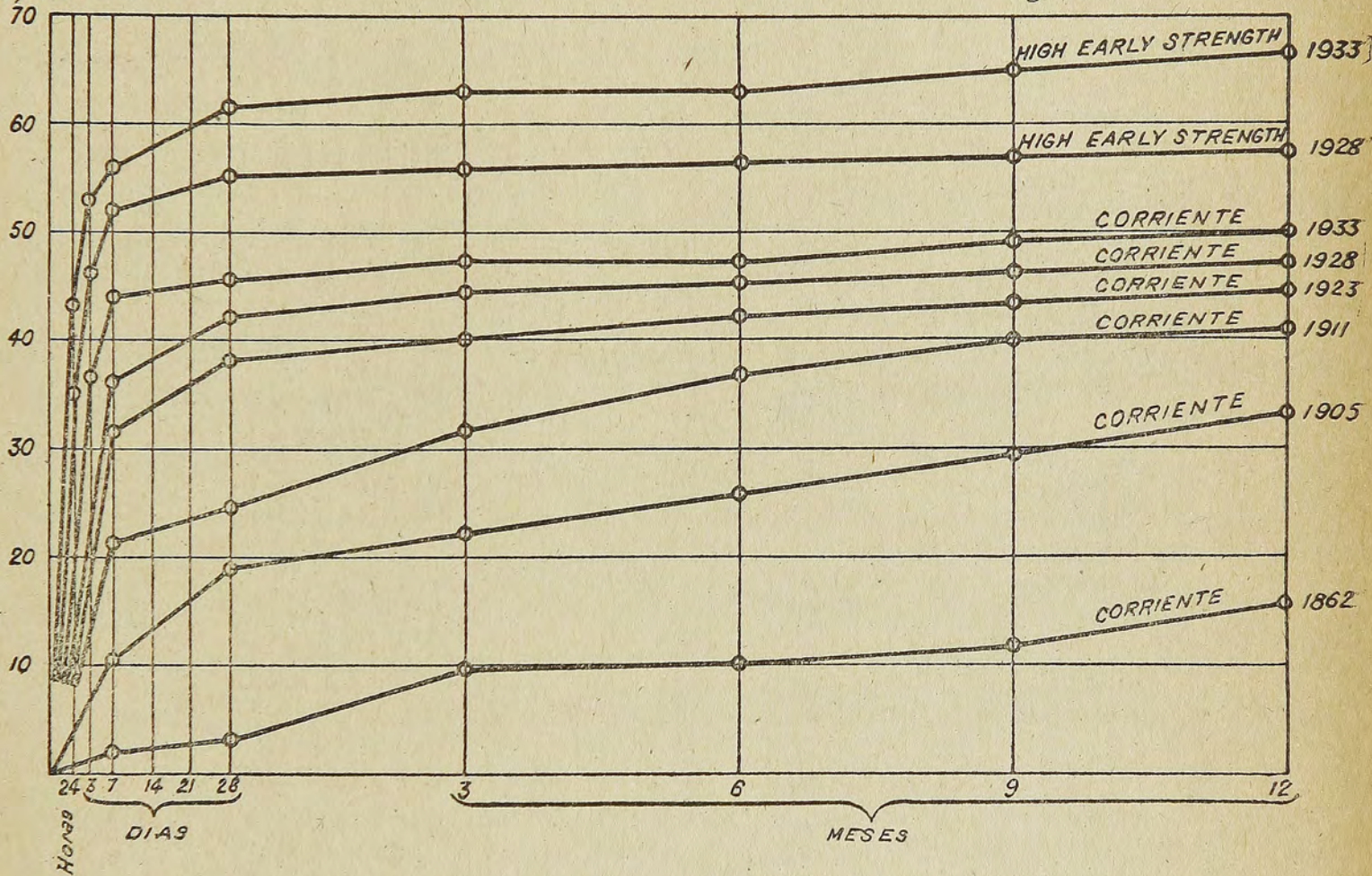
En esta categoría de productos, es especialmente interesante citar los

GRAFICO II.-PROGRESO DE LA CALIDAD DE LOS CEMENTOS PORTLAND 1862-1933

dosis : 1 Cemento 3 Arena

$\frac{100 \text{ kg L}}{\text{ing Civil}}$

TRACCION
KGS/CM²



«agregados Maldonado, fruto de varios años de prolijas investigaciones del Ingeniero chileno Sr. Belisario Maldonado, investigaciones que terminó este especialista en 1943, en el Taller de Resistencia de Materiales de la Universidad Católica, gracias a la hospitalidad de los Srs. D. Carlos Casanueva y D. Miguel Letelier.

El Sr. Maldonado, después de algunos miles de experiencias, encontró fórmulas que le permiten fabricar a costos relativamente bajos y con materias primas nacionales, ciertos productos que agregados a los cementos Portland en proporciones determinadas, les corrigen sus irregularidades, les aumentan apreciablemente su resistencia a la compresión y aún en mayor proporción a la tracción, les anticipan el endurecimiento, les aumentan su conservabilidad y su resistencia a medios químicamente adversos.

Las investigaciones del Sr. Maldonado son de trascendencia, y constituyen un motivo de legítimo orgullo de la ingeniería chilena. Su espíritu de observación y de investigación y su constancia para llevar adelante los trabajos a través de toda clase de dificultades, son un ejemplo para todos, y en especial para los estudiantes de ingeniería.

Antes de terminar este resumen sobre la industria del cemento Portland, es interesante conocer el enorme desarrollo que ha alcanzado en todo el mundo a la fecha.

El cemento Portland es un artículo esencial al progreso y con razón se le incluye entre las industrias pesadas fundamentales. Ha dejado de ser un producto de exportación; pues cada país trata de satisfacer independientemente sus necesidades domésticas con cemento nacional; y dentro de cada país, la tendencia actual es que cada centro de consumo que justifique una fábrica debe tenerla, porque el cemento es un artículo sedentario que no debe sufrir largos transportes. Por esta razón, EE. UU. cuenta con 170 fábricas, Argentina con 14, etc.

Es bien ilustrativo observar a este respecto el caso del Estado de Texas, que tiene igual superficie que Chile y población parecida; a pesar de que no es de los estados más progresistas de EE. UU., Texas cuenta con 10 fábricas de cemento Portland con una capacidad total de 2.125,000 Toneladas anuales; Chile cuenta con una fábrica de 365,000. Tons/año.

El Cuadro IV resume la capacidad productora instalada de todos los países del mundo en 1940, último año del que tenemos estadística a mano.

CUADRO IV

Capacidad de producción de cemento Portland en 1940 en todos los países del mundo

País		Capacidad anual instalada en 1940	
Norte América:	Canadá.....	2.390.000	
	Cuba.....	250.000	
	Estados Unidos.....		
	Continental.....	43.279.000	
	Puerto Rico.....	66.000	
	Guatemala.....	25.000	
	Méjico.....	529.000	46.539.000
Sud América:	Argentina.....	1.856.000	
	Bolivia.....	25.000	
	Brasil.....	830.000	
	Chile.....	365.000	
	Colombia.....	230.000	
	Ecuador.....	50.000	
	Perú.....	120.000	
	Uruguay.....	300.000	
Venezuela.....	50.000	3.826.000	
Europa:	Albania.....	22.000	
	Alemania.....	17.000.000	
	Austria.....	1.000.000	
	Bélgica.....	4.000.000	
	Bulgaria.....	245.000	
	Checoslovaquia.....	2.300.000	
	Dinamarca.....	938.000	
	España.....	2.600.000	
	Estonia.....	100.000	
	Finlandia.....	640.000	
	Francia.....	10.578.000	
	Gran Bretaña.....	10.000.000	
	Grecia.....	450.000	
	Holanda.....	700.000	
	Hungría.....	876.000	
	Italia.....	6.689.000	
	Latvia.....	170.000	
	Noruega.....	358.000	
	Polonia.....	1.850.000	
	Portugal.....	450.000	
	Rumania.....	1.200.000	
	Suecia.....	1.500.000	
	Suiza.....	1.300.000	
U. R. S. S.....	6.000.000		
Yugoeslavia.....	1.680.000	72.646.000	

CUADRO IV.—Continuación

País		Capacidad anual instalada en 1940	
Asia:	China.....	1.170.000	
	Manchuria.....	1.010.000	
	Corea.....	1.600.000	
	Filipinas.....	336.000	
	Hong Kong.....	115.000	
	Indias Británicas.....	1.465.000	
	Indias Holandesas.....	235.000	
	Indochina.....	300.000	
	Irán.....	125.000	
	Japón.....	13.100.000	
	Levante.....	230.000	
	Palestina.....	220.000	
	Siria.....	90.000	
	Thailand (Siam).....	120.000	
Turquía.....	350.000	20.466.000	
Africa:	Algeria.....	90.000	
	Congo Belga.....	40.000	
	Egipto.....	700.000	
	Marruecos.....	250.000	
	Mozambique.....	30.000	
	Tunisia.....	90.000	
	Unión de Sud Africa.....	1.000.000	2.200.000
Oceanía:	Australia.....	1.323.000	
	Nueva Zelandia.....	350.000	1.673.000
			147.350.000

En las páginas anteriores quedan expuestos los rasgos generales de la evolución que la humanidad ha realizado con respecto a los adhesivos para construcciones, desde el empleo de la cal en los tiempos prehistóricos hasta los más modernos tipos de cemento Portland; las principales características tecnológicas de estos adhesivos; y el desarrollo colosal que ha alcanzado en el mundo la industria del cemento Portland a la fecha.

Es interesante observar que las industrias más útiles no han sido estudiadas con cuidado hasta que los resultados prácticos que son capaces de producir están asegurados; en seguida, las reglas prácticas derivadas de estos resultados se manejan empíricamente por largos períodos, considerándose como innecesarias u ociosas las tentativas para establecer las leyes que las rigen. La raza humana alcanza los conocimientos empíricos con relativa rapidez: los conocimientos científicos demoran mucho más. El caso del cemento Portland no es una excepción.

Finalmente, es curioso observar que el hombre, después de varias decenas de siglos en que ha usado separadamente el más resistente de los metales,—el fierro,— y el genuino elemento no metálico de resistencia,—el calcio,—hace sólo medio siglo que ha llegado a reunirlos en el más útil de los materiales de construcción,—el concreto armado.

(Continuará).