

## Nuevos estudios sobre la constitución del concreto

POR

LEONARDO LIRA

(Conferencia dada en el Instituto el 4 de Septiembre de 1917)

Parecerá extraño que pueda ser materia que merezca figurar en las tareas del Instituto la del estudio de la constitución del concreto.

En efecto pocos materiales de construcción hay hoy día más empleados que éste. de más fácil fabricación, sobre el cual se hayan hecho estudios más completos y del cual tenga la generalidad de los profesionales ideas más concretas y más apoyadas en la práctica de la construcción.

No serán muchos los que hayan visto fabricar el fierro, algunos más habrán presenciado la preparación de las maderas pero ¿quién no ha visto fabricar o ha dirigido la fabricación de un poco de concreto?

Sin embargo no dejan de ser anticuadas y algo erradas las nociones corrientes sobre este material y es por esto que ántes de entrar a la materia misma de esta conferencia que es la exposición de los nuevos estudios hechos por medio del microscopio sobre la constitución del concreto, es por esto digo que me veo obligado a exponer primero en forma muy suscita cuál es el estado actual de los conocimientos científicos sobre el concreto.

El concreto es una piedra artificial cuyos componentes son cinco: trozos de piedra, arena, cemento, agua y huecos de aire. Los huecos son un defecto de la fabricación y el cemento con el agua constituyen la sustancia aglomerante, el sedimento que ha de unir la piedra y la arena. Estas últimas constituyen los trozos de piedra de dimensiones adecuadas que han de formar la piedra artificial de la dimensión y forma que se desee. No hay en consecuencia una diferencia específica entre la piedra y la arena como elementos constitutivos del concreto. La diferencia es solo de grado: para llenar los huecos que van dejando los trozos de piedra grandes es necesario acudir a piedras cada vez más pequeñas y así tendremos en un concreto desde el trozo de 0.20 m. aceptable para concreto en grandes masas hasta la arena que pasa por un cedazo con dos mayas por milímetro. Aún el mismo cemento constituye en las mezclas ricas un elemento llenador de huecos. Si se pudiese obtener que los trozos de piedra grandes se arreglaran de modo

a no dejar sino los huecos para dar cabida a una delgada capa de aglomerante, las piedras chicas y la arena serian innecesarias. El uso de éstas se debe en consecuencia al hecho físico de que aún esferas de igual tamaño solo logran arreglarse por sí mismas hasta dejar un hueco mínimo de  $44^{\circ}$  „, pudiendo obtenerse con un arreglo artificial matemático un hueco de  $26^{\circ}$  „. Como el concreto más resistente es el más denso, la arena constituye un defecto por el número considerable de sus huecos. En cada volumen de arena que reemplacemos por una piedra ahorraremos como término medio un  $45^{\circ}$  „ de huecos.

De lo anterior se desprende que no habrá sino una cierta clase de arena que convenga a una piedra dada, y que la proporción de una y otra dependerá de lo que la experiencia diga en cuanto a los tamaños que deban tener los granos para el mejor arreglo físico de mayor compenetración. Mis colegas saben que la ley de estas proporciones y tamaños fué descubierta por Feret.

De lo anterior se deduce quedos concretos 1 : 2 : 4 hechos con materiales de idéntica buena clase pero de distinta composición granulométrica, pueden resultar con dosis de cemento por  $m^3$  totalmente diferentes, diferentes hasta en un 25%. Como la resistencia de un concreto depende en primer lugar la de la dosis de cemento por  $m^3$  de concreto resultante, se deduce que especificar en una construcción que el concreto será 1 : 2 : 4 no deja de ser una indicación vaga que no garantiza la cualidad esencial del material que es su resistencia.

Finalmente cabe observar que aún cuando los concretos más densos son los más resistentes, no se obtendrá el concreto más resistente con los ingredientes que se compenentren más, porque por otra parte tales materiales por este mismo hecho de dejar pocos huecos dan un mayor rendimiento, es decir un mayor volumen de concreto ya que el cemento excede en tales casos el hueco, resultando entonces por una parte mayor resistencia por mayor densidad pero menor resistencia por menor dosis de cemento.

Naturalmente en las líneas anteriores no he hecho sino esbozar en sus líneas generales estos conocimientos que expuestos en detalle darían materia para un libro. Basta a mi propósito el exponerlos en tal forma para que si todavía se redactan especificaciones en forma incorrecta, se corrijan y para que no se caiga en el error de creer como lo he visto más de una vez que la mejor mezcla de piedra y arena la puede dar el material natural sacado del fondo de una quebrada o río

Podemos decir entonces que hasta hace unos 4 años parecia agotado el conocimiento sobre este material de construcción. Bastaba elegir los materiales con ciertas cualidades, mezclarlas en determinadas proporciones, prescribir ciertas condiciones para la fabricación y sujetar la colocación en obra a determinadas reglas para obtener el mejor concreto conocido y posible.

A principios de 1912 en el colegio de Sibley de la Universidad de Cornell se tuvo la idea de investigar la constitución íntima del concreto por medio del microscopio, ampliando a este material el mismo sistema de estudios empleado con

éxito en tantos otros ramos de la ciencia. Era de esperar que esta nueva forma de exámen condujese a algunos resultados de interés ya que ella iba a permitir ver al concreto tal como es.

Parece excusado advertir que en lo que sigue no hago sino servir de traductor de artículos aparecidos en algunas revistas de ingeniería.

En primer lugar al examinar al microscopio una muestra de piedra arenisca por ejemplo, y una muestra de concreto, lo que salta a la vista es la diferente compenetración de los elementos constituyentes. En la piedra natural los granitos o pecazos de piedras elementales, se han acercado hasta dejar entre ellos sólo un pequeño espacio que reduce a un minimum el espesor de la capa cementadora o conglomerante, en tanto que en el concreto por cuidadosa que haya sido su fabricación, por enérgico que haya sido el apisonamiento la separación de las piedrecillas es enorme y se notan numerosos y grandes huecos de aire. Esta distribución de las piedras y estos huecos de aire están demostrando por una parte lo erróneas que deben resultar las mezclas que se basan en determinaciones volumétricas de los huecos de los ingredientes, y por otra parte están explicando la razón de por qué para obtener concretos que resisten 140 kilogramos por  $\text{cm}^2$  es necesario usar como ingrediente piedra que resista 700 kilogramos por  $\text{cm}^2$ .

En efecto, la vista microscópica del concreto demuestra que en muchos casos las piedras están formando verdaderos puentes sobre vacíos llenos sólo de aire quedando apoyadas en el resto del material sólido sólo en puntos determinados en donde vienen a ejercerse y transmitirse todas las fuerzas que solicitan la piedra, fuerzas que en el caso de una compenetración total se habrían transmitido por medio de una superficie de apoyo extendida sobre la total superficie de la piedra. Se comprende que si se pudiese obtenerse una buena compenetración de los elementos constitutivos del concreto, de modo que desapareciesen los huecos y se obtuvieren superficies de apoyo completas, se podría por una parte aumentar considerablemente las casas de trabajo del concreto o reducir por la otra las condiciones exigidas para la calidad de la piedra que lo debe formar. Se prevé aquí la posibilidad de introducir una economía considerable si fuese posible el mejorar el sistema de fabricación del concreto actualmente en uso.

Por otra parte la constatación de la existencia de estos huecos viene a explicar algunas causas de ruptura que no habian quedado suficientemente excluidas. En efecto puede decirse que el concreto tal como se le fabrica hoy, es una especie de esponja en que 1,8 del volumen está formado por los huecos repartidos más o menos uniformemente en toda la masa en forma de cavidades capilares. ¿Qué sucederá cuando esta masa se ponga en contacto con el agua como pasa en los estanques, tranques, etc. y en toda fundación sobre suelo sometido a filtraciones y subpresiones? Que el agua será absorbida por capilaridad, formará con las partículas de cemento soluciones sobresaturadas que cristalizarán aumentando de volumen y provocando el desarrollo de fuerzas expansivas considerables capaces de provocar rupturas internas.

Y esto no son suposiciones, elucubraciones más o menos posibles sino hechos constatados por el análisis microscópico que ha revelado la existencia de estas cristalizaciones y la formación de planos de ruptura interna en la vecindad de las cavernas primitiva a donde tuvo acceso el agua por capilaridad. Este mismo análisis ha demostrado la propagación de estos planos de ruptura con la ayuda del agua: una primera ruptura forma un nuevo camino capilar en donde avanza nuevamente el agua para formar allí otra solución saturada, nuevos cristales, propagación del plano de cizalle y así en seguida hasta llegar a comprometer la total sección resistente de una estructura cualquiera. En el concreto armado las fuerzas que provocan estas rupturas provienen de la acción de las soluciones sobresaturadas sobre el fierro, de las armaduras sección que produce el  $Fe_2 O_3 H_2 O$  que aumenta considerablemente de volúmen.

Pero el descubrimiento fundamental que ha venido a revelar el análisis microscópico del concreto ha sido el bajísimo porcentaje de cemento realmente fraguado en el interior de la masa. En los concretos mejor preparados este porcentaje no pasa del 25 " de modo que el 75 " de este elemento que es el más caro de los ingredientes queda perdido y formando puntos débiles del material. Necesito afirmar que en estas cifras no hay ninguna exageración, que ellas más bien son reducidas y que están conformes con las numerosas experiencias realizadas por el Bureau de Standards de Pittsburgh. Si el cemento es el elemento principal en la resistencia de los concretos y el que ha de constituir el ligamento entre los demas ingredientes puede afirmarse entonces que nuestros actuales métodos de fábrica del concreto son detestables y que se impone el estudio de una reforma para llegar a resultados más satisfactorios.

\* \* \*

¿Cómo explicarse este fenómeno? Digamos primeramente que él ha venido a explicar un hecho ya observado por muchos constructores: la posibilidad de hacer fraguar de nuevo los concretos viejos moliéndolos suficientemente.

Estudiando ahora más a fondo las causas de este fraguado tan deficiente del cemento se ha llegado a establecer que la causa principal reside en la viscosidad del agua. En efecto puede observarse que el agua merced a su cohesión y viscosidad, cuando se la divide en partículas pequeñas tiende a formar granitos más o menos esféricos en que se vé claramente la existencia como de una especie de película superficial de una suficiente resistencia para vencer la acción de la gravedad que tiende a achatar la esfera y a aplanarla completamente. Ahora bien si a una reunion de granos de arena se agrega una pequeña cantidad de este líquido viscoso resulta que los granos son atraídos en forma más íntima que lo que puede hacerlo una acción mecánica. La película del agua los adhiere los unos a los otros y es difícil separarlos. Naturalmente todo lo que estoy diciendo no son suposiciones teóricas sino hechos observados con ayuda del microscopio. La expe-

riencia enseña también que si se continúa agregando mayor cantidad de agua llega un momento en que la fuerza de la gravedad rompe la película superficial a causa de haberse elevado demasiado sobre el plano de apoyo el centro de gravedad del esferoide y en ese momento el agua en lugar de servir como elemento que liga los granos y los atrae sirve como fuerza que tiende a separarlos y esparcirlos rechazándolos los unos de los otros. Se comprende que estas acciones son también más intensas cuanto más pequeños son los granos del elemento sólido. Lo que sucede con los granitos de la arena fina y del cemento es que el agua los reúne formando grupos que quedan encerrados por la tensión de la película que impide la entrada del líquido a los huecos dejados entre ellos y si alguna fuerza exterior no viene a deshacer esta agrupación tendremos en el concreto en una parte un grupo de granos de arena sin ser cementados, en otra un grupo de granos de cemento sin fraguar y en una tercera un hueco de piedras sin llenar en donde deberían haber ido los dos primeros a constituir la continuidad y la ligazón total del macizo. La observación de estos fenómenos debido a la viscosidad viene a explicar lo pernicioso del exceso de agua en la fabricación del concreto: tal exceso constituye una fuerza que arroja las partículas de cemento y arena fina y separa las piedras dando como resultado la formación de un concreto menos denso.



Es un gran paso dado hacia todo perfeccionamiento el conocer los defectos pero la labor quedaría estéril si no se prosiguiesen las investigaciones con el objeto de llegar a encontrar los remedios que constituyen el trabajo constructivo y más directamente útil. Las experiencias de la Universidad de Cornell se han prosseguido para encontrar el *modus operandi* que permita disolver los grupos formados por la tensión de la viscosidad del agua. No tiene objeto el fatigar a los miembros del Instituto con la descripción de los aparatos e ingeniosas disposiciones ideadas para conseguir que el contacto entre el cemento y el agua sea más íntimo y completo. Se ensayó la presión, se ensayó la aspiración del agua por vacío a través del cemento pero ningún medio mecánico dió resultado apreciable. Y al contrario parece que toda acción física tiende más bien a aumentar la viscosidad tal como si las fuerzas exteriores provocaren en el líquido una reacción que diere lugar al nacimiento de tensiones moleculares que tienden a hacer equilibrio a tales sollicitaciones.

Los resultados que se trata de obtener no son para descorazonar a los experimentadores con los primeros fracasos, ni menos aún cuando se trata de investigadores yankees. Baste pensar en la enorme economía que podría realizarse en las construcciones de albañilería, en las fortunas colosales que podría ganar cada año el ingeniero que lograra descubrir el método para reducir a 1/4, a la mitad la cantidad de cemento hoy en uso en las dosis de concreto. Además fuera de la eco-

nomia en cemento se tendría un concreto con menos huecos por consiguiente con menos cristalización internas, en consecuencia sin fuerzas internas de ruptura y finalmente con un coeficiente de dilatación más bajo.

Como los agentes físicos no dieran resultados se acudió a los agentes químicos y en esta vía se ha llegado ya a obtener éxitos apreciables. Entre las sustancias que disminuyen la viscosidad del agua se encuentran el alcohol y el éter. Ninguno de los dos pueden constituir una solución a causa de su precio. Igual efecto produce el alcohol amílico pero su olor constituye un serio inconveniente. Se han ensayado con éxito el jabón de marfil, la NaOH, el KOH y lo que es extraño el gran enemigo de los concretos el  $\text{SO}_4 \text{Na}_2$ . La elección de estas materias ha provenido de la observación y análisis de las tierras más pesadas que han demostrado contener lijeros porcentajes de estas materias indicando con su mayor peso la mayor compenetración de sus elementos constitutivo. Además es sabido que los ocupados en la industria de la fabricación de maceteros emplean estas sustancias para obtener una arcilla más íntimamente mojada lo que viene a ser un objetivo análogo al que se trata de obtener en el concreto.

Con el jabón por ejemplo se ha llegado a obtener con 1 2% de una solución al 10%, a 60 días un aumento en la resistencia normal del mortero de 30%. El agua caliente es también una solución y esto viene a explicar por qué al preparar el concreto con los ingredientes calientes, en los climas fríos se obtienen mejores resultados.

Se han obtenido ya como se vé resultados apreciables y es de esperar que en breve se llegue a soluciones más radicales. El descubrimiento se hará más luego si todos los ingenieros contribuyen al trabajo de buscar la solución y en este sentido me hago un deber en llamar la atención de los miembros del Instituto hacia la enorme importancia de la cuestión, la verdadera revolución que se produciría en el arte de construir si se llegase a la solución completa y la fabulosa economía que ello reportaría al mundo.

A semejanza de lo que ha sucedido con tantos otros de nuestros conocimientos hé aquí que en el estudio del concreto que parecía agotado un nuevo y amplio campo virgen se abre a las investigaciones científicas. Armado el hombre con la formidable herramienta del método experimental con que lo dotara el genio de Bacon, no cesa de investigar, de cambiar el color del cristal con que mira las cosas y los hombres.