

ingenieros Rodolfo Meza y Gregorio Farías para la realización de este trabajo, como de los estudiantes de Ingeniería Civil: Enrique F. Galindo, Francisco Rangel y Ricardo Valdes, y demás personal técnico del Instituto de Ingeniería Civil.

REFERENCIAS.

- 1.- Williamson G. R.- "Response of Fibrous-Reinforced Concrete to Explosive Loading", Technical Report No. 2-48, U. S. Army Engineers Ohio River Division Laboratories, Cincinnati, 1966, 77 pp.
- 2.- Monfore G. E.- "A Review of Fiber Reinforcement of Portland Cement Paste Mortar, and Concrete", Journal PCA Research and Development Laboratories V. 10 No. 3, Sept. 1968, pp. 43-49.
- 3.- New Reinforcing Materials in Concrete S. P. Shah. ACI Journal, Mayo 1974.
- 4.- Majumdar, A. J. and Ryder, J. F.- "Reinforcement of Cements and Gypsum Plaster by Glass Fibers", BRS (U.K.) Current Papers, Dec. 1970.
- 5.- Majumdar, A. J.- "Glass Fiber Reinforced Cement and Gypsum Products", BRS (U.K.) Current Papers. Apr. 1971.
- 6.- Romualdi, James P. and Batson, Gordon B. "Mechanics of Crack Arrest in Concrete" Proceedings ASCE V 89, Em 3, Junio 1963, pp. 147-168.
- 7.- Romualdi, James P. and Mandel, James A.- "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement", ACI Journal, Proceedings, V. 61 No. 6, Junio 1964, pp. 657-671.
- 8.- Shah, Surendra P., and Rangan B. Vijaya, "Fiber Reinforced Concrete Properties", ACI Journal Proceedings, V. 68 No. 2, Feb. 1971, pp. 126-135.
- 9.- Junji Takagi, "Some Properties of Glass Fiber Reinforced Concrete" Publication ACI SP-44, pp. 93-111.
- 10.- Kelly, A.- "Strong Solids" Clarendon Press, Oxford, 1966.
- 11.- Shah, S. P.- "New Reinforcing Materials in Concrete", ACI Journal, V. 71 No. 5, Mayo 1974, pp. 257-262.
- 12.- Shah, Surendra P.- "Micromechanics of Concrete and Fiber Reinforced Concrete", Proceedings, Civil Engineering Materials Conference (Southampton 1969) John Wiley and Son, Inc. New York 1969.
- 13.- Haynes H. H.- "Investigation of Fiber Reinforcement Methods for Thin Sheet Concrete", Technical Report No. 979, Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, Calif, 1968, pp. 47.
- 14.- Blood, G. W.- "Properties of Fiber Reinforced Concrete" M. S. Thesis, The University of Calgary, Alberta, Julio 1970.
- 15.- Nielsen, L.E. and Chen, P.E.- "Young's Modulus of Composites Filled with Randomly Oriented Fibers" Journal of Materials, V. 3, No. 2, Junio 1968, pp. 352-358.

PROGRESOS EN LAS INVESTIGACIONES SOBRE POLIMEROS PARA CONCRETO.

Glenn William DePuy*

RESUMEN.

Están siendo desarrollados por la industria de la construcción tres tipos básicos de polímeros para el concreto: concreto impregnado con polímeros (PIC), concreto con polímeros (PC), y concreto con cemento con polímero (PCC). Trabajos recientes sobre el PIC incluyen el desarrollo de un sistema de losa para puentes hechos con PIC prefabricado y pretensado, y un tratamiento de impregnación superficial para la protección de puentes de concreto existentes.

Trabajos recientes sobre el PC incluyen el desarrollo de un proceso de fabricación costeable y el de un material que tiene propiedades comparables con el PIC. Las investigaciones sobre el PCC han sido muy limitadas.

* Supervisor de la Investigación relacionada con la Tecnología del Proceso y Desarrollo de Polímeros para Concreto en el "Bureau of Reclamation Engineering and Research Center" de Denver, Colorado.

INTRODUCCION.

Los materiales polímeros para concreto están atrayendo gran interés como materiales de construcción nuevos con durabilidad y propiedades estructurales mejoradas. Los estudios sobre el desarrollo y las aplicaciones potenciales de los polímeros para concreto se iniciaron sobre una base limitada, pero mundial, en la década de los 50's, y a mediados de los 60's, el interés se extendió grandemente con el desarrollo del concreto impregnado con polímeros, el cual tenía una durabilidad y propiedades estructurales significativamente mejores que comparadas con el concreto convencional.

El Bureau of Reclamation (USBR) inició en 1967 una investigación sobre los materiales polímeros para concreto en un programa en conjunto con el Brookhaven National Laboratory (BNL) bajo el patrocinio de la U. S. Atomic Energy Commission (AEC), la Office of Saline Water, y la USBR. Se publicaron una serie de reportes acerca de este trabajo (1, 2, 3, 4, 5). Fueron investigados tres materiales básicos:

Concreto impregnado con polímero (PIC) -Concreto a base de cemento Portland endurecido impregnado con un monómero el cual posteriormente se polimeriza.

Concreto de polímero (PC) -Un material formado por la combinación de un agregado con un monómero o sistema de resina, el cual posteriormente se polimeriza y sirve como el cementante (a veces llamado concreto de resina).

Concreto de cemento con polímero (PCC) -Un material premezclado, al cual se le añade el monómero o sistema de resina durante el mezclado convencional del concreto, y que se polimeriza durante el endurecimiento (a veces llamado concreto modificado con polímero).

Los estudios iniciales, USBR-BNL, mostraron resistencias asombrosamente altas, baja permeabilidad y una buena durabilidad para el PIC. Por lo tanto las investigaciones posteriores se dirigieron principalmente hacia el desarrollo del PIC. Los estudios más recientes con el PIC incluyen el concreto impregnado parcial o superficialmente el cual parece tener buen potencial en aplicaciones que requieren de la durabilidad o la impermeabilidad del concreto. Se han conducido estudios sobre el PC sobre una base más limitada, pero que han llegado al desarrollo de un material que tiene propiedades comparables con el PIC, y el cual podrá tener aplicaciones potenciales más extensas que el PIC. Han sido muy limitados los estudios sobre el PCC, y que por lo pronto no han producido resultados comparables con aquéllos obtenidos con el PIC y el PC.

Un número de organizaciones han mostrado su interés en el PIC, y han patrocinado programas en conjunto con la USBR para el desarrollo del PIC relacionado a sus necesidades específicas. Estos incluyen:

Tuberías de PIC -American Concrete Pipe Association, AEC, BNL y USBR.

Recubrimiento y soporte para túneles con PIC-U.S. Department of Transportation a través de la Federal Railroad Administration y la Federal Highway Administration (FHWA), U. S. Bureau of Mines y la USBR.

Sistema de losas presforzadas para puente con PIC-FHWA, Instituto del Concreto Presforzado y la USBR.

INVESTIGACIONES EN POLIMEROS

Impregnación superficial de losas de concreto para puente-FHWA.

Sobre una base mundial, el mayor interés ha sido sobre el desarrollo del PC. En los Estados Unidos, un número de organizaciones han llevado a cabo estudios sobre los materiales polímeros para concreto, incluyendo: la U.S. Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, California, estudios sobre el uso del PIC para aplicaciones submarinas; la U. S. Army Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, Illinois sobre el PC con polyester; Washington State University sobre PCC, con substancias epóxicas y alcohol furfuryl; la H. B. Zachry Company, San Antonio Texas, sobre polímeros para el PC como material de pavimentación; LeHigh University, Bethlehem, sobre el PIC; el American Cement Technical Center, Riverside, California sobre morteros de PIC reforzados con fibra; la Pennsylvania State University, College Park, Pennsylvania sobre el PIC. Debido al interés creciente, se formó en 1971 el Comité 548 del Instituto Americano del Concreto, Polímeros en el Concreto, el cual patrocinó un simposio sobre polímeros en el concreto (6).

Actualmente, el mayor interés parece que se enfoca sobre las aplicaciones en carreteras. La FHWA es uno de los principales patrocinadores de investigaciones sobre materiales polímeros para concreto y tiene un número de programas con varias organizaciones estatales de carreteras, universidades y otras organizaciones en los Estados Unidos. Estos programas son principalmente para la protección de pavimentos de concreto contra las sales utilizadas para el deshielo, el deterioro debido al congelamiento y deshielo, y para reparaciones en el concreto deteriorado. Los principales proyectos sobre las aplicaciones en carreteras incluyen:

Impregnación superficial de losas de concreto para puente, particularmente estructuras antiguas y contaminadas con cloruro, realizadas en conjunto con la LeHigh University y la Pennsylvania State University bajo el patrocinio de la National Cooperative Highway Research Program.

Tratamientos de impregnación superficial de losas para puente de carretera, realizado por la University of Texas, bajo el patrocinio de la Texas Highway Department y la FHWA.

Materiales polímeros para concreto para su aplicación en carreteras, especialmente en la reparación de puentes de concreto deteriorado, realizado por la Brookhaven National Laboratory, bajo el patrocinio de la FHWA.

CONCRETO IMPREGNADO CON POLIMERO.

PIC completamente impregnado.

El concreto impregnado con polímero (PIC) se prepara de un concreto convencional a base de cemento Portland endurecido mediante un proceso que tiene tres pasos básicos: 1) el secado del concreto para eliminar la humedad, 2) impregnación con un monómero líquido y 3) polimerización del monómero.

El polímero llena los huecos y grietas en el concreto y produce un gran incremento en la resistencia y durabilidad, y una reducción significativa de la permeabilidad. El mejoramiento de las propiedades está relacionado con la cantidad de polímero aplicado al espécimen de concreto. Un concreto impregnado de po

límico (PIC) de muy buena calidad puede prepararse de un concreto de relativamente baja calidad; sin embargo el concreto de menor calidad generalmente es más poroso y requiere de más monómero para la impregnación completa. El contenido de polímero en un concreto impregnado con polímero (PIC) hecho de un concreto normal de buena calidad fluctúa entre 4.5 y 7 por ciento en peso. Para el PIC hecho con concreto más poroso, la cantidad de polímero aplicado puede rebasar el 20 por ciento.

Los sistemas de monómeros para PIC son líquidos de baja viscosidad seleccionados en base a su buena penetrabilidad y características de polimerización bajo costo y propiedades del polímero. Se han obtenido buenos resultados utilizando MMA (metil metacrilato), MMA-TMPTMA (trimetilol-propano trimetacrilato), politer estireno y estireno - TMPTMA.

La polimerización se inicia por métodos térmico-catalíticos. Se utilizan catalizadores azonitrílicos ya que sus componentes tienen un radical libre con el cual se inicia la polimerización, produce resultados buenos uniformes generalmente tienen buena estabilidad química y bajo condiciones apropiadas de seguridad se puede almacenar y reusar el monómero catalizado.

Las propiedades mecánicas y físicas típicas del PIC preparado de concreto convencional en nuestros primeros estudios son mostradas en las tablas 1 y 2. Los ensayos muestran que el PIC es generalmente de 4 a 5 veces más resistente que el concreto convencional, y que la absorción de humedad y la permeabilidad se reducen significativamente. La resistencia a la compresión del PIC es generalmente de 1265.6 a 1546.8 kg/cm² (18000 a 22000 lb/pulg²).

TABLA 1

PROPIEDADES MECANICAS DEL CONCRETO IMPREGNADO CON POLIMERO

Propiedad	Concreto impregnado con polímero	Concreto sin impregnar
Resistencia a la compresión		
kg/cm ²	1279.6	372.6
lb/pulg ²	18200	5300
Módulo de elasticidad		
10 ⁶ kg/cm ²	0.44	0.25
10 ⁶ lb/pulg ²	6.2	3.5
Resistencia a la tensión		
kg/cm ²	105.5	29.5
lb/pulg ²	1500	420
Módulo de ruptura.		
kg/cm ²	161.7	52.0
lb/pulg ²	2300	740

Especímenes de concreto impregnados con metil metacrilato. Polymerización por el método térmico catalítico.

El flujo del PIC bajo carga sostenida es generalmente 5 a 10 veces menor que el del concreto sin impregnar. Las curvas de esfuerzo-deformación para el PIC muestran una relación casi lineal de un 70 a 90 por ciento de la resistencia última.

TABLA 2

PROPIEDADES FISICAS DEL CONCRETO IMPREGNADO CON POLIMERO

Propiedades	Concreto impregnado con polímero	Concreto sin impregnar
Absorción de agua %	0.34	6.40
W. perm. 10 ⁴ m/año	0.43	1.6
10 ⁴ pies/año	1.4	5.3
Conductividad térmica		
k cal/m hr °C	1.882	1.982
BTU/pie hr °F	1.265	1.332
Coefficiente de expansión.		
10 ⁻⁶ cm/cm/°C	9.45	7.24
10 ⁻⁶ pulg/pulg/°F	5.25	4.62
Calor específico.		
J/g/°C (23°C)	0.921	1.009
BTU/pie-hr (73°F)	0.220	0.241
Peso específico.	2.386	2.317

Especímenes de concreto impregnados con metil metacrilato. Polymerización por el método térmico catalítico.

La durabilidad mejorada del PIC es debido a la reducción de la permeabilidad y a la barrera física presentada por el polímero. Los polímeros son resistentes a los ataques químicos y tienden a sellar el interior del concreto contra los agentes nocivos. El PIC muestra substancialmente mucha más resistencia que el concreto no impregnado al congelamiento y deshielo, al ácido clorhídrico, ataque de los sulfatos, y un mejoramiento moderado en la resistencia al ácido sulfúrico - (tabla 3) (5, 7).

Producción del PIC.

La USBR tiene dos unidades interconectadas para producir PIC. Una unidad consiste en un cilindro de impregnación/polimerización vertical de acero inoxidable con dimensiones interiores de 1.20 m de diámetro x 1.80 m de largo ---- (4 pies de diámetro y 6 pies de largo) un mezclador de monómero y tanque de transferencia, y además un equipo de accesorios. La otra unidad está localizada al aire libre (Fig 1) y consiste en un cilindro de impregnación/polimerización con dimensiones de 1.80 m de diámetro x 5.80 m de largo (6 pies de diámetro por 19 pies de largo) en posición horizontal, un cargador de especímenes de acero inoxidable, y un tanque para la transferencia del monómero con capacidad de 2300 lt (600 galones). El cargador de especímenes se utiliza para reducir la cantidad de monómero requerido para llenar los especímenes y por la conveniencia en el suministro de especímenes al recipiente. Ambas unidades utilizan: aire comprimido para forzar el impregnado, el vacío y aire comprimido para transferir el monómero, y el vapor para calentar.

Los pasos para producir PIC completamente impregnado son (las condiciones de producción pueden variar dependiendo del sistema de monómero, cataliza-

dor y tamaño y forma del espécimen):

- 10.- Se seca el concreto a una temperatura de 150°C por espacio de 24 horas para eliminar la humedad libre o a una temperatura inferior pero durante más tiempo.
- 20.- Permitir que el concreto se enfríe a la temperatura ambiente.
- 30.- Colocar el concreto en el cilindro de impregnación y aplicar el vacío por espacio de media hora.
- 40.- Introducir el monómero catalizado bajo el vacío hasta que el espécimen este completamente lleno después impregnar bajo aire comprimido a una presión de 1.7 a 3.5 kg/cm² (25 a 50 lb/pulg²) durante 2 horas.
- 50.- Drenar el exceso de monómero e inmediatamente llenar el cilindro con agua caliente. Con el sumergido en agua se minimiza la pérdida del monómero por evaporación.
- 60.- Aplicar calor (el vapor es lo más común) y polimerizar completamente. La polimerización se realiza generalmente a 70°C durante unas 4 horas.

Como en el caso de todos los productos químicos, los monómeros y catalizadores presentan un riesgo potencial si son almacenados y manejados en forma poco apropiada. El que los use debe estar bien familiarizado con las propiedades y sus procedimientos adecuados de manejo. Muchos monómeros tienen olores desagradables y tienen grados variables de inflamabilidad y toxicidad. El monómero MMA está clasificado como un líquido inflamable con riesgo moderado de explosión y es considerado como poco tóxico (8). Las precauciones recomendadas para manejar MMA incluyen la eliminación de fuentes de ignición, conectar eléctricamente a tierra el equipo, ventilación adecuada y control de vapores, ropa protectora para el personal, lavabos y drenes de emergencia, y provisiones adecuadas para manejar el monómero tirado accidentalmente. La información del manejo, almacenamiento y propiedades de los materiales está generalmente disponible en la literatura publicada de los productores, distribuidores y compañías de seguros (9, 10, 11). Muchos de los estudios de la USBR sobre el PIC han sido con el sistema de monómeros MMA y MMA-TMPTMA utilizando catalizadores azonitrílicos. Los catalizadores azonitrílicos son iniciadores eficientes de la polimerización y son más estables que los catalizadores de peróxido. El manejo del monómero catalizado requiere cuidado para evitar que ocurra una polimerización en masa. El monómero debe guardarse a una temperatura segura y mantenerse la efectividad del inhibidor. Nuestra experiencia ha mostrado que el monómero catalizado con *t*-butylazo isobutyronitrilo es estable para períodos más largos de tiempo a temperatura ambiente siempre que se mantenga el contenido de inhibidor y del oxígeno. Los componentes *t*-butylazo son descritos como no-sujetos a inducir la descomposición (12). La habilidad para almacenar el monómero catalizado nos permite reusar el monómero para impregnaciones repetidas.

En una operación a gran escala, puede ser necesario desechar cantidades de monómero utilizado. El deshecho del monómero deberá hacerse de acuerdo a reglas estrictas de seguridad y ambientales. Si el monómero no puede ser un producto negociable, las únicas alternativas disponibles son la de incineración con dispositivos apropiados o la conversión a un polímero para deshecharse en estado sólido.

APLICACIONES DEL PIC COMPLETAMENTE IMPREGNADO.

Sistema de losa presforzada para puente con PIC.

El sistema de losa presforzada para puente con PIC está diseñado para utilizar las propiedades estructurales de paneles presforzados, el potencial de un sistema precolado para la construcción rápida y la protección del acero de refuerzo contra las sales del deshielo proporcionada por el polímero (13). El concepto prevee el precolado de paneles dimensionados con el ancho de la losa, un rápido montaje y la colocación de paneles en su sitio, y la conexión de los paneles mediante un post-tensado.

Paneles de concreto presforzado, cuyas dimensiones son de 4.88 m de largo x 1.22 m de ancho x 0.15 m de espesor (16 pies de largo x 4 pies de ancho y 6 pulg de espesor) fueron impregnados y polimerizados (figura 2). Cuatro paneles, con peso de aproximadamente 2250 kg (5000 libras) cada uno, fueron tratados al mismo tiempo. Ensayes de carga estática y ciclos de fatiga fueron hechos en paneles sencillos y en juegos de tres unidos mediante un post-tensado. Con los ensayes se determinó la deflexión, distribución de esfuerzos, carga a la primera grieta, carga última, y la transmisión de carga a través de las juntas de los paneles. Los resultados del ensaye para el juego de tres paneles se muestran en la figura 3. Los paneles resistieron más del doble de la carga última de diseño en el ensaye sencillo. En los ensayes sobre el juego de tres paneles, éstos mostraron muy buena transmisión de carga a los adyacentes y resistieron cerca de cuatro veces la carga última de diseño (14).

Sistema PIC de soporte y recubrimiento de túneles (y resistencia al fuego).

Con el desarrollo de métodos mecanizados para hacer túneles se ha incrementado la necesidad de sistemas de rápido recubrimiento de túneles. Segmentos de concreto precolado para recubrimiento y soporte en túneles han sido utilizados en Europa por más de 30 años, pero no han sido utilizados en alguna extensión significativa de los Estados Unidos. Un programa experimental fue realizado para determinar la costeabilidad de soporte y recubrimiento de túneles con PIC (15).

Segmentos de concreto precolados fueron impregnados, polimerizados y armados para formar un túnel de 2.4 m (8 pies) de diámetro x 2.4 m (8 pies) de largo (figura 4). Los ensayes determinaron la capacidad de transmisión de carga, deflexiones, módulo de ruptura y efectos de los materiales de relleno. Los resultados del ensaye indicaron:

- 1.- El sistema PIC es viable y, comparado con un sistema de concreto convencional, puede proporcionar incrementos en la capacidad de carga o una capacidad igual con una sección más delgada.
- 2.- Con un concreto pobre, el sistema PIC alcanzó 1.6 veces más carga que en el sistema de concreto convencional con un espesor igual.
- 3.- Con un sistema PIC de un espesor de 5.1 cm (2 pulg) con un relleno de arena, se logró la misma carga que en el sistema convencional de concreto de igual espesor con un relleno de 8.9 cm (3.5 pulg) de concreto.
- 4.- Las juntas entre los segmentos pueden diseñarse para un comportamiento satisfactorio; el PIC proporciona una resistencia superior en las juntas.
- 5.- Las ventajas económicas de un sistema PIC pueden determinarse sólo sobre una aplicación específica; sin embargo, un análisis preliminar muestra ventajas para PIC en túneles largos, con diámetro de 6.1 m (20 pies) o mayor.

El programa también incluye estudios sobre los efectos del fuego y las altas temperaturas, las características del quemado de la superficie y la transmisión del calor. El PIC generalmente retiene su resistencia hasta los 177°C. Los ensayes indican que el concreto impregnado con MMA pierde su resistencia a los 260°C pero recupera su resistencia al enfriarse. Los ensayes llevados a cabo de acuer-

do con la designación de la ASTM: E 84-70, "Método Normal de Ensaye para las Características del Quemado de Superficies de Materiales para Construcción", mostraron una inflamabilidad muy baja para PIC, muy poco a nada de humo, y ninguna indicación que los gases de combustión presentarían un serio peligro a la salud. El estudio de la transmisión del calor indicó que el estado inestable de los gradientes de temperatura debido al fuego dentro del recubrimiento en el túnel baja rápidamente debido a la gran absorción de temperatura del material que lo circunda; en el caso extremo de fuego en un túnel, la temperatura más alta calculada para el recubrimiento fue de 349°C.

Tuberías de PIC.

Las investigaciones sobre tuberías de PIC han incluido la impregnación y ensaye de tubos de concreto de 30.5, 61 y 91.5 cm (12, 24 y 36 pulg) de diámetro interno. La sección más grande ensayada fue de 1.80 m (6 pies) de largo y 0.9 m (3 pies) de diámetro interno con un espesor de pared de 10 cm (4 pulg). Las secciones de tubería fueron construidas en dos formas:

- 1.- Método de cabezal obturador.
- 2.- Método de rolado en suspensión.

Se incluyó en ambos métodos la tubería con malla metálica de refuerzo y tubería sin refuerzo. Los tubos fueron impregnados en el USBR y en el BNL. En general, los resultados del ensaye de 3 apoyos indican que la tubería impregnada con polímero duplicó la resistencia de la tubería no reforzada y que casi equivale a la de la tubería reforzada; sin embargo, la impregnación con polímero de tubo reforzado con acero sólo incrementó la resistencia en un 36%. En los ensayos con presión hidrostática, la tubería con PIC es como el doble de resistente que tubo no reforzado, y de un 36 a un 142% más resistente que el tubo reforzado.

Están en progreso ensayos de campo y de laboratorio sobre tubos de drenaje y alcantarillas. Tubos de drenaje tratados y no tratados están bajo ensayo de campo en el Westlands Experimental Drainage Plat en California. El cual tiene suelo de alta concentración de sulfatos y agua de escurrimiento para determinar el comportamiento del PIC.

CONCRETO PARCIALMENTE IMPREGNADO.

Método de impregnación parcial.

El concreto parcialmente impregnado parece ser aceptable para muchas aplicaciones en las cuales se requiere un concreto durable pero que no necesita gran resistencia excepcional del concreto completamente impregnado. El proceso de impregnación parcial impregna al concreto hasta una profundidad limitada bajo la superficie (16, 17 y 18). El proceso es relativamente sencillo y no requiere equipo de vacío ni de la presión de impregnación en el proceso de impregnación. El proceso consiste básicamente en secar el concreto, impregnarlo con monómero bajo condiciones atmosféricas y la polimerización se puede llevar a cabo con agua caliente. El método es aceptable para un sistema de producción continua en una planta y para la impregnación superficial de estructuras de concreto en el campo.

Impregnación superficial en losas de concreto para puente.

El proceso de impregnación superficial para la protección de losas de concreto en puentes recientemente construidos contra el daño causado por la sal y el deshielo es un método práctico para impregnar con polímero losas de concreto en puentes hasta una profundidad de cuando menos 2.5 cm (1 pulg). La técnica de impregnación superficial bajo investigación en la USBR es una modificación de la técnica de impregnación parcial y utiliza adaptaciones del método bajo investigación en la Universidad de Texas en Austin (19). El sistema de monómero utilizado es el MMA-TMPTMA con catalizador azabis-dimethylvaleronitrilo. El método es relativamente simple y utiliza equipo que puede ser fácilmente ensamblado por un contratista.

La losa de concreto para el puente se seca bajo un encerramiento portátil que sopla aire caliente sobre la superficie. La temperatura del aire bajo el encerramiento se mantiene en cerca de 120°C durante 3 días o hasta que el concreto esté lo suficientemente seco hasta una profundidad de 8 a 10 cm (3 a 4 pulg). Se retira el encerramiento y se deja enfriar la losa de concreto. Se riega arena sobre la losa del puente hasta un espesor de 0.5 cm (1/4 pulg), se aplica un monómero para que sature completamente la arena, y se deja que penetre en el concreto durante la noche. La arena sirve para contener el monómero. Se coloca una membrana de polietileno sobre la arena saturada con monómero para evitar la evaporación del monómero. El monómero se aplica varias veces con el fin de mantener una cantidad suficiente de monómero para la penetración. Entonces se coloca el encerramiento sobre la arena saturada con monómero y sobre la barrera el polietileno contra la evaporación. Se sopla aire caliente a unos 66°C dentro del encerramiento para iniciar la polimerización. Los resultados de los ensayos iniciales indican que este método es capaz de producir una capa de polímero de 5 cm (2 pulg) de espesor en el concreto.

Se demostró el método de impregnación superficial sobre un puente recién construido en el área de Denver durante el mes de octubre de 1974 (Figs. 5 y 6). La losa completa del puente de 18.6 m de largo x 8.5 m de ancho (61 x 28 pies) fue tratada a la vez. Los núcleos obtenidos de la losa del puente mostraron una penetración del polímero hasta un poco más de 2.5 cm (1 pulg) (Fig. 7).

CONCRETO DE POLIMERO.

El concreto de polímero utiliza un polímero como cementante y algunas veces se le conoce como concreto cementado con resina. El material tiene una durabilidad y propiedades estructurales excelentes, casi igualando a las del PIC, y básicamente es adecuado para aplicaciones de precolado y colado en el lugar. El PC ha sido investigado ampliamente por todo el mundo y varios productos de PC ya han sido introducidos al mercado. Los productos y aplicaciones potenciales incluyen tubos, cordones, recubrimientos para túnel, paneles, pavimentos y varios materiales para resanar y reparar. La mayor parte del trabajo de investigación del PC ha sido con sustancias epóxicas, poliéster y resinas furan, y más recientemente con monómeros MMA y estireno.

El trabajo de investigación sobre el PC en la USBR ha sido con sistemas de monómero utilizando como catalizador el peróxido de benzoyl. El PC se hace utilizando agregado para concreto con granulometría convencional, mezclado en una revolvedora convencional para concreto, colado en moldes, vibrado y polimerizado a temperatura ambiente. El proporcionamiento de la mezcla, las propiedades físicas

cas y mecánicas están dadas en las tablas 4, 5 y 6. Los especímenes de PC contienen de un 6 a un 8% en peso de polímero y tienen propiedades generalmente comparables con las del PIC. La resistencia a la compresión varía de alrededor de 984.3 kg/cm² a los 88°C (14000 lb/pulg²) hasta 1743.7 kg/cm² (24800 lb/pulg²) a los 26°C.

Los ensayos de flujo llevados a cabo actualmente indican que la deformación por flujo es comparable a aquélla del concreto convencional. Al estar expuestos al ácido sulfúrico al 5% durante 9 meses, los especímenes no mostraron pérdida de peso y presentaron una resistencia a la compresión de 1,265.6 kg/cm² (18000 lb/pulg²).

TABLA 4

PROPORCIONAMIENTO PARA EL CONCRETO DE POLIMERO.

AGREGADOS	
Tamaño	% en peso
3/8 a 1/4 pulgada	29.9
No. 4 a 3/8 pulgada	20.0
No. 8 a No. 4	5.5
No. 16 a No. 8	5.5
No. 30 a No. 16	9.1
No. 50 a No. 30	8.8
No. 100 a No. 50	5.8
Finos	15.4
	<u>100.0</u>

SISTEMA DEL MONOMERO

Metil metacrilato (MMA)	95%
Trimetilpropano trimetacrilato (TMPTMA)	3%
Agente de acoplamiento	0.5%
Peróxido benzoico	1%
Dimetil analino	0.5%
	<u>100 %</u>

TABLA 5

PROPIEDADES MECANICAS DEL CONCRETO DE POLIMERO.

PROPIEDADES	RESULTADOS
Resistencia a la compresión	
kg/cm ²	1378
lb/pulg ²	19600
Módulo de elasticidad	
10 ⁶ kg/cm ²	0.41
10 ⁶ lb/pulg ²	5.9
Resistencia a la tensión por compresión diametral.	
kg/cm ²	112.5
lb/pulg ²	1600
Módulo de ruptura.	
kg/cm ²	218.0
lb/pulg ²	3100

TABLA 6

PROPIEDADES FISICAS TÍPICAS DEL CONCRETO DE POLIMERO.

PROPIEDADES	RESULTADO
Absorción de agua %	0.6%
Permeabilidad	
10 ⁴ m/año	0.02
10 ⁴ pies/año	0.06
Coefficiente de expansión.	
10 ⁻⁶ cm/cm/°C (-20°C a 21°C)	9.54
(21°C a 60°C)	13.60
10 ⁻⁶ pulg/pulg/°F (-4° a 70°F)	5.30
(70° a 140°F)	7.53

En un estudio posterior, se investigó el PC para su aplicación como concreto lanzado (20). Este trabajo fue patrocinado en conjunto por la U. S. Bureau of Mines, FHWA, la Federal Railroad Administration y la USBR. Una pistola de campo convencional para lanzar concreto fue modificada para ser utilizada con concreto de polímero. La aplicación del concreto lanzado de polímero es potencialmente peligroso y debe utilizarse sólo en áreas bien ventiladas. Las precauciones de seguridad incluyen: ropa protectora, ventilas, la eliminación de chispas y fuentes de ignición, y la tierra eléctrica del equipo. El concreto lanzado de polímero -- que fue aplicado a una superficie casi vertical (Fig. 8) y curado, alcanzó la resistencia completa en 10 a 15 minutos después de ser aplicado. El rebote del agregado se consideró en un 15 al 30%. Especímenes cúbicos tomados después de la aplicación tuvieron una resistencia a la compresión de cerca de 703.1 kg/cm² (10000 lb/pulg²).

REFERENCIAS.

- 1.- Concrete-Polymer Materials First Topical Report, USBR General Reporte No. 41 y BNL 50134 (T-509), diciembre de 1968.
- 2.- Concrete-Polymer Materials Second Topical Report, USBR REC-OCE-70-1 y BNL 50275 (T-560), diciembre de 1969.
- 3.- Concrete-Polymer Materials Third Topical Report, USBR REC-ERC-71-6 y BNL 50275 (T-602), enero de 1971.
- 4.- Concrete-Polymer Materials Fourth Topical Report, USBR REC-ERC-72-10 y BNL 50328, enero de 1972.
- 5.- Concrete-Polymer Materials, Fifth Topical Report, USBR REC-ERC-73-12 y BNL 50390, diciembre de 1973.
- 6.- Polymers in Concrete, American Concrete Institute Publication SP-40, Detroit, 1973.