

te en cuanto a las resistencias a la compresión, tensión y flexión, la permeabilidad al agua, resistencia a la abrasión, resistencia al derrapamiento, resistencia al congelamiento y deshielo y resistencia a las sales descongelantes (28-30). Esta combinación resulta en un compuesto que es resistente pero quebradizo; los especímenes de ensaye para determinar la resistencia a la compresión a menudo se fracturan explosivamente. Por otra parte, utilizando acrilato de butilo como el impregnante, se obtiene un compuesto dúctil que es sólo ligeramente más fuerte que el concreto sin modificación. En cambio, utilizando mezclas de acrilato de butilo y metilo metacrilato, se obtienen resistencias casi tan elevadas como son las de metacrilato de polimetilo pero con mayor ductilidad (26, 28, 30, 31). Estos resultados muestran que las propiedades del concreto impregnado con polímero se pueden adaptar en cuanto a los requisitos de su aplicación. Claro está que para algunos tipos de especímenes o naturalezas de cargas, los co-polímeros dan el mejor comportamiento mecánico (33). (Para más detalles, ver la sección B).

Se efectuaron otros experimentos para determinar el efecto que tiene la contaminación del concreto debido a sales descongelantes y depósitos sobre la carretera (grasa, aceite, caucho) en cuanto al secado, impregnación y polimerización. Los experimentos de laboratorio indican que la presencia de sales descongelantes en el concreto pueden incrementar ligeramente el tiempo requerido para el secado completo como también la rapidez de impregnación, y la carga final del polímero (28, 30, 41). Las sales descongelantes no disminuyen la rapidez de polimerización, pero el cloruro de calcio, aceite de linaza, aceite de motor, grasa de auto móvil y concreto asfáltico, sí retardan la rapidez de polimerización, pero no evitan la polimerización completa. La presencia de sales descongelantes tienden a disminuir ligeramente la resistencia final (aunque la resistencia es aún mayor que aquélla de un espécimen de control no-impregnado), pero no tuvo efecto sobre la resistencia al congelamiento y deshielo. Pareció ser que la fase del polímero inmovilizó la sal tan efectivamente que la corrosión del acero de refuerzo se detuvo considerablemente (figura 3).

A.2.- Aplicaciones de Campo y Resultados.

Se efectuaron cuatro pruebas de campo (29, 30, 31, 39): (1) dos pruebas en el puente de la pista de pruebas de PSU; una impregnación de 0.13 -m (1.4 -pie) utilizando un secado con antorcha de gas propano, impregnación por medio de cámara de presión y polimerización a vapor, y la otra, una impregnación de 0.17 -m (1.8 -pie) utilizando un secado a base de infrarrojo por medio de gas, impregnación a presión atmosférica y polimerización con agua caliente; (2) una impregnación a escala comercial de 6.7 -m² (72 -pies²) en el puente de la pista de prueba de la Universidad del Estado de Pennsylvania (PSU) utilizando secado a base de infrarrojo por medio de gas, impregnación por medio de cámara de presión y polimerización con agua caliente; (3) una impregnación a escala comercial de 3.3 -m² (36 -pies²) en el carril de tráfico hacia el norte del puente de la Ruta Pennsylvania #378 sobre la Unión Boulevard en Bethlehem en marzo de 1975, utilizando secado a base de infrarrojo por medio de gas, impregnación por medio de cámara de presión y polimerización con agua caliente.

Las cuatro pruebas de campo lograron la finalidad que era la de impregnación hasta 10 cm (4 pulg) de penetración en un puente estructuralmente sano, pero contaminado con sales.



A. 1 mm

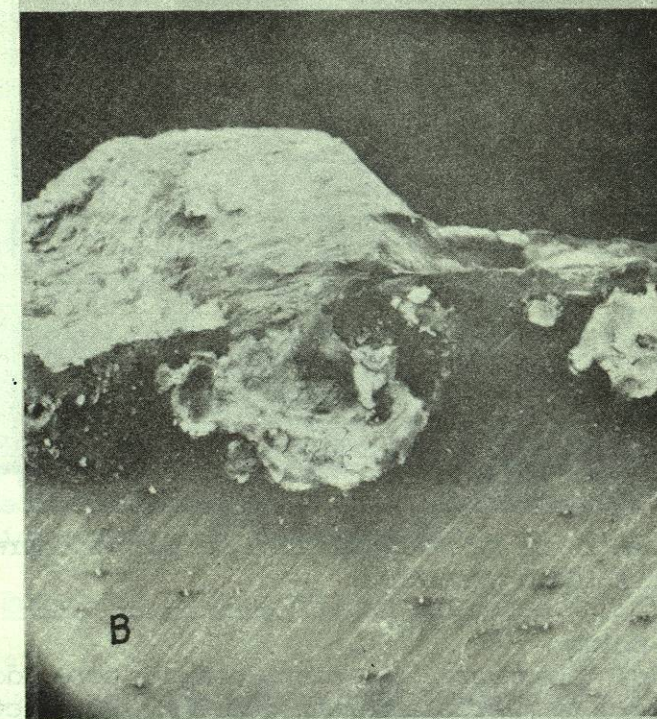


Fig. 3.- Microfotografías con el Microscopio Electrónico de Barrido de las secciones cerca del extremo para varillas de acero de refuerzo en losas de concreto contaminadas con sal después de los ensayos de congelamiento y deshielo:

- (A) Núcleo impregnado con polímero
- (B) Núcleo no impregnado

A.2.1.- Pista de Prueba de la PSU (marzo de 1974).

Se efectuaron dos impregnaciones en el puente de la pista de pruebas de la PSU, una utilizando un secado con antorcha de gas propano, impregnación por medio de cámara de presión, y polimerización a vapor, y la otra, utilizando un secado a base de infrarrojo por medio de gas, impregnación a presión atmosférica y polimerización con agua caliente.

En una prueba, se secó el puente durante 10 horas utilizando un secado con antorcha de gas propano hasta obtener una temperatura de 121°C (250°F) a una profundidad de 10-20 cm (4-5 pulg) y siendo la temperatura en la superficie de 317°C (700°F). Se dejó enfriar el puente durante 8 horas; entonces se taladraron agujeros para la instalación de una cámara circular para impregnación a presión con diámetro de 41 -cm (16 -pulg). Se impregnó la losa durante 8 horas con una mezcla de 90:10 de metilo metacrilato-trimetilopropano trimetacrilato conteniendo 0.5% de iniciador azobisisobutyronitril a una presión de 1.05 - 1.4 kg/cm² (103-137 kpa). El monómero se polimerizó in situ durante 10 horas a través de la cámara de presión, vapor a presión de 0.7-0.9 kg/cm² (68-89 kPa) proporcionado por una caldera. Los corazones tomados de una región impregnada con polímero mostraron una impregnación densa hasta una profundidad de 12 cm (5 pulg) e impregnación completa hasta una profundidad de 19 cm (7.5 pulg) en algunas áreas (ver figura 4).

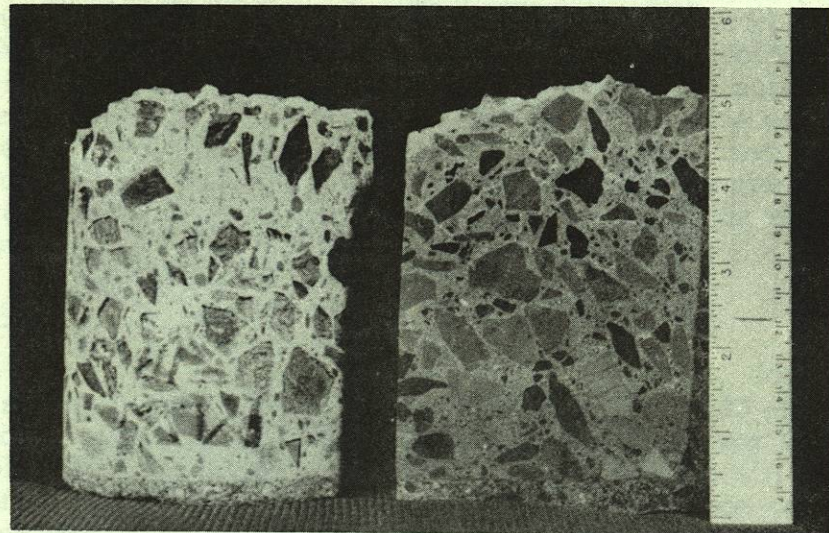


Fig. 4.- Núcleo de 10 cm (4 pulg) de losa de puente impregnada con polímero (Procedimiento utilizando presión):

- (A) Tallada con ácido
- (B) Sección pulida (observar: Las partículas de agregado de caliza han sido disueltas, pero la matriz cementante no ha sido afectada)

En la segunda prueba, se secó el puente durante 10 horas utilizando un secado infrarrojo a base de gas hasta obtener una temperatura de 100°C (230°F) a una profundidad de 10 cm (4 pulg). El puente se dejó enfriar a una temperatura superficial de 357°C (675°F) durante 8 horas; después se selló sobre el puente una cámara de "inundación" de 67 x 46 cm (30 x 18 pulg) utilizando hule Silastic. La mezcla 91:0 de metilo metacrilato trimetilopropano trimetacrilato conteniendo

0.5% de iniciador azobisisobutyronitril se dejó en la cámara (la cual estaba cubierta para evitar pérdidas por evaporación) durante 106 horas. Después se retiró el monómero excesivo y se circuló agua a 95°C (203°F) por la cámara durante 10 horas para polimerizar el monómero. Los corazones tomados de la región impregnada con polímero mostraron una impregnación densa hasta una profundidad de 11 cm. (4.5 -- pulg).

Estas primeras dos impregnaciones en el campo demostraron que técnicamente es posible una impregnación a una profundidad de 10 cm (4 pulg) en el concreto estructuralmente sano, pero contaminado por sal.

A.2.2.- Puesto de la Pista de Prueba de la PSU (agosto de 1974).

Se impregnaron dos áreas contiguas de 0.9 x 3.7 -m (3 x 12 pies) sobre el puente de la pista de pruebas de la PSU utilizando un secado de infrarrojo a base de gas, impregnación por medio de cámara de presión y polimerización con agua caliente. El área total de 2 x 3.7 -m (6 x 12 pies) fue secada en tres etapas utilizando calentadores de infrarrojo a base de gas. Cada etapa requirió cerca de 4 horas para alcanzar la temperatura de 110°C (230°F) a 10 -m (4 pulg) de profundidad. Se dejó enfriar el puente como cerca de 12 horas; después se taladraron agujeros para la instalación de la cámara de presión para la impregnación. La primera impregnación se inició a una presión de 1.05 kg/cm² (35 kPa) a causa de fugas en el sello de la cámara, presión a la cual se continuó durante 7.5 horas. La segunda sección se impregnó durante 3 horas a una presión de 1.05 kg/cm² (103 kPa), seguida por 4 horas de impregnación a presión atmosférica y 5 horas a una presión de 0.35 kg/cm² (35 kPa). Ambas secciones se polimerizaron durante 12 horas por medio de la circulación de agua entre 77 y 82°C (107-180°F) dentro de la cámara de presión.

Los corazones tomados de la región impregnada con polímero mostraron una impregnación densa hasta una profundidad de 8.9-10 cm (3.4-4.0 pulg) y menos densidad extendiéndose a 2.5 cm (1 pulg) o más abajo del nivel anterior. La concentración del ion cloruro en estos corazones variaba entre 0.40-0.82 kg/m³ (0.67 y 1.38 lb/yd³) a la profundidad de 1.27 cm (0.5 pulg) y de 0.01-0.02 kg/m³ (0.02 a 0.04 lb/yd³) a la profundidad de 5 -cm (2 pulg).

Estas impregnaciones de campo confirmaron los resultados de las impregnaciones de campo anteriores y demostraron que dos áreas continuas se pueden impregnar en secuencia. Las pruebas de evaluación mostraron que no había efecto significativo de la impregnación sobre la resistencia al derrapamiento, según medida con el probador Británico portátil de derrapamiento.

A.2.3.- Puesto de la Ruta PennDOT 378 en Bethlehem (marzo de 1975).

En marzo de 1975, se cerró el carril de tráfico hacia el Norte en el puente de la Ruta Pennsylvania 378 (Bethlehem Spur Route) sobre el Boulevard Unión, y se impregnó un área de 0.9 x 3.7 -m (3 x 12 pies) utilizando secado de infrarrojo a base de gas, impregnación por medio de cámara de presión y polimerización con agua caliente. El puente estaba estructuralmente sano, pero el agregado de escoria en la superficie estaba desgastado y poroso; la losa estaba contaminada con una elevada concentración de sales para deshielar (concentraciones del ion cloruro hasta de 285 g/m³ (4.8 lb/yd³)).

Después del secado, el puente se dejó enfriar durante 8 horas; se taladraron

agujeros para la instalación de la cámara de presión e impregnación (igual que aquella utilizada para la prueba de campo de agosto de 1974 en el puente de la pista de pruebas de la PSU). Se evacuó la cámara de presión durante 30 minutos a una presión de 68.6 cm columna de mercurio (91 kPa) y después presurizada con la mezcla 91:9 de metilo metacrilato-trimetilopropano trimetacrilato conteniendo 0.5% de iniciador azobisisobutironitril durante 75 minutos a una presión de 0.35 kg/cm² (34 kPa), 7.25 horas a una presión de 0.14 kg/cm² (14 kPa), 1 hora a una presión de 0.21 kg/cm² (21 kPa) y 30 minutos a una presión de 0.56 kg/cm² (55 kPa). Las disminuciones periódicas en la presión fueron necesarias a causa de fugas del monómero a través del puente. El lugar preciso de las fugas se ocultaba a causa de las cimbras permanentes de acero del puente. La polimerización se efectuó por medio de circulación de agua a temperatura de 74-77°C (165 - 170°F) durante 12 horas dentro de la cámara de presión. Se cubrió la cámara con aislante de fibra de vidrio y una capa plástica para que no hubiera olor de monómero en los alrededores.

Se tomaron siete muestras de corazones de las áreas impregnadas con polímero y de aquellas sin impregnar, y se efectuaron ensayos de laboratorio para determinar la profundidad de impregnación y las propiedades de las regiones impregnadas con polímero mostraron impregnación densa hasta una profundidad de al menos 8 cm (3 pulg) y menos densidad extendiéndose hasta 10 cm (4 pulg) en la mayoría de las regiones. La resistencia a la tensión por compresión diametral de uno de los corazones de la región impregnada con polímero fue de 42.6 kg/cm² (4.18 MN/m²).

Esta última impregnación de campo sobre el puente PennDOT confirmó la posibilidad de impregnación con polímero de un puente estructuralmente sano, pero contaminado, hasta una profundidad de 10 cm (4 pulg).

A.2.4.- El Secado del Concreto a Elevadas Temperaturas.

La impregnación del concreto con el polímero requiere de tres pasos:

- (1).- Un secado completo del concreto para extraer toda el agua evaporable;
- (2).- Una impregnación con el monómero para llenar completamente todos los vacíos en el concreto;
- (3).- Polimerización del monómero in situ.

El primer paso -el secado completo del concreto- es el más importante si ha de lograrse una profundidad significativa (16, 19, 28, 29, 30, 39, 47). El monómero penetrará únicamente en aquellos poros de los cuales se ha extraído toda el agua. Debido al tamaño tan pequeño de su sistema de poros capilares, las losas de concreto generalmente contienen de un 70-90% del contenido de agua en la saturación. Por lo tanto, resulta difícil secar por completo el concreto debido a su alto contenido de agua y su tamaño de poros tan pequeño.

Pocos trabajos se han hecho sobre el secado de grandes masas de concreto, y en estos pocos trabajos utilizó condiciones de secado de laboratorio de baja temperatura no adecuadas para aplicaciones en el campo (16, 28, 51, 52). Un secado natural o un secado artificial con poca energía se llevaría de 3-30 meses para reducir el contenido de agua al nivel necesario para la impregnación con el monómero (28). Para reducir al mínimo el tiempo total requerido para la impregnación, es conveniente efectuar el secado a temperaturas mayores de 100°C (212°F) para obtener una rápida pérdida de agua (47).

Pruebas preliminares utilizando losas de 15 cm (6 pulg) de espesor, secadas a 121°C (250°F) (29) mostraron que se llevaría de 40-45 horas para secar una losa a partir de sus dos superficies o una losa de 7.5 cm (3 pulg) a partir de una sola superficie. Entonces, para obtener impregnaciones de 10 cm (4 pulg) en el campo, con el concreto secado únicamente a partir de una superficie, requeriría un tiempo prohibitivamente largo si la temperatura fuera de sólo 121°C (250°F) (sin embargo, temperaturas de secado como de 120-150°C (250-200°F) serían satisfactorias para impregnaciones superficiales como de sólo 5.0 cm (2 pulg) o menos (8, 9, 47). Debido a ello, se probaron los dos métodos de secado con elevadas temperaturas: (1) Un ensamblaje con antorchas de gas propano; (2) una secadora de infrarrojo a base de gas propano (2). La variación del contenido de agua con el tiempo y temperatura de secado fue medida en siete losas de concreto y una losa de puente utilizando ambos métodos de secado.

Las losas de concreto de 0.61 x 0.61 x 15 -m (2 x 2 x 0.5 -pulg) se prepararon utilizando una revoltura convencional de concreto sin aire incluido con proporciones 1.00: 1.92: 6.10: 6.75 de agua, cemento Portland tipo I, arena gruesa, agregado de caliza con tamaños máximos de 7.5 cm (1 pulg), con un factor cemento de 287 kg/m³ (485 lb/yd³) y un promedio de resistencia a la compresión a los 28 días de 334.0 kg/cm² (32800 kN/m²). La medida del contenido de aire fue de 3% con un revenimiento de 6.4-7.6 cm (2.5-3.0 pulg). Se les dio a las losas un acabado normal de enrasado y se curaron en el cuarto de curado (humedad relativa de 90-100%) por lo menos durante 28 días antes de usarse. Todas las losas contenían un refuerzo de acero nominal a 10 -cm (4 pulg) de profundidad para simular la estructura del puente.

La losa de 1.8 x 1.8 x 0.2 -m (6 x 6 x 0.67 -pies) se preparó con dos capas de varillas del No. 11 según la Especificación PennDOT A-A. Los pares termoeléctricos se colocaron en la losa a profundidades de 6.0 -cm (2.5 pulg) y 10 -cm (4 pulg). Esta losa era del mismo tipo que el utilizado en el estudio sobre calentamiento con infrarrojo de Blankenhorn y su grupo (39).

La figura 5 muestra el arreglo utilizado para secar las primeras tres losas de 0.61 x 0.61 x 0.15 -m (2 x 2 x 0.5 pies). La secadora comprendía de una, dos o tres antorchas alimentadas con gas propano por medio de un tubo. El ensamblaje se montó sobre un bastidor conectado a una unidad guiada motorizada, la cual movía el ensamblaje a la velocidad requerida y la regresaba automáticamente cuando éste llegaba al extremo de la losa o el área de calentamiento. De esta manera, se calentó la losa con uniformidad, sin acumulación de calor excesivo en ningún área. A las antorchas se les ajustó una boquilla especial para reducir el calor en las puntas y amplificar la llama. Una sola antorcha tenía la capacidad de elevar la temperatura de la superficie del concreto hasta casi 540°C (1000°F) en pocas horas, dependiendo en la presión de abastecimiento del gas. Se montó la losa sobre una báscula con precisión de 0.11 kg (0.25 lbs) esta precisión fue satisfactoria porque una losa normalmente perdía como 8.2 kg (18 lb) de agua durante el secado.

Un arreglo similar en lo general se utilizó para el secado de las últimas tres losas de 0.61 x 0.61 x 0.15 -m (2 x 2 x 0.5 pies). Se utilizaron dos antorchas y se construyó un cofre para cubrir la losa, reducir las pérdidas de calor y distribuir el calor más efectivamente. Los pares termoeléctricos chromel-alumel protegidos con una capa de cerámica se conectaron a un voltímetro digital por medio de una caja de canales múltiples. Se tomaron lecturas en serie de estos pa-