

durante 24 horas, de 7.2% para la losa original a únicamente un 0.3%, una reducción similar a las obtenidas con impregnaciones por medio de presión atmosférica (17, 18).

La losa II (agua) resultó con la profundidad teóricamente pronosticada de 11 cm (4.5 pulg), la cual se manifestó por un color gris uniforme que hacía contraste con las regiones color blancas no impregnadas. La profundidad de penetración pronosticada para impregnación sería únicamente de 3.8 cm (1.5 pulg).

Con las losas IV y V (alquitrán), las profundidades de impregnación fueron mayores que las pronosticadas aunque la viscosidad del alquitrán (15 cp ó 1.6 Pa. s.) es mayor que la del metilo metacrilato (0.7 cp ó 0.07 Pa. s.) o del agua (1 cp. ó 0.1 Pa. s.) y los ciclos de carga fueron diferentes. Esta profundidad de impregnación mayor puede ser debido al secado más riguroso de estas losas.

Con la losa VI (aceite de linaza hervido), la profundidad de impregnación fue menos dado a su alta viscosidad (36 cp ó 3.6 Pa. s.) pero mucho mayor que las penetraciones poco profundas normalmente obtenidas con la aplicación superficial del aceite de linaza.

Estos experimentos demuestran que el método con el tapete de presión puede dar impregnaciones profundas con una variedad de líquidos impregnantes. La aplicación de este método en el campo deberá ser más eficiente que el arreglo de laboratorio simulado. El ciclo de carga podría ser similar a ese en la figura 8B en la cual el tiempo del ciclo es largo, como ocurre con un rodillo moviéndose lentamente. Teóricamente deberá ser posible impregnar el ancho de un solo carril sobre un puente utilizando un tapete grande para cubrir el área requerida y una aplanadora también de 15-20 toneladas para aplicar presión. Algunos diseños propuestos de equipo a escala-práctica se describen en otros trabajos (30, 32).

#### A2.6.- Impregnación del Concreto con Azufre (32).

La impregnación del concreto de cemento Portland con un 8% de azufre da resistencias a la compresión tan elevadas como 1547 kg/cm<sup>2</sup> (170 mPa) (32, 53, 54), valores que son más altos que aquéllos de muchas muestras de concreto impregnado con polímeros. El concreto impregnado con azufre también muestra buena resistencia contra el congelamiento y deshielo, menor permeabilidad de agua, y una resistencia excelente a los ácidos y sales. Y además, el costo del azufre es sólo un 3.33% del costo del metilo metacrilato. Por lo tanto, el concreto impregnado con azufre puede encontrarse adecuado para losas de puentes siempre y cuando el azufre no cause la corrosión del acero de refuerzo a causa de sus reacciones con el agua y el oxígeno. Además, la impregnación de polímeros en el concreto comprende cuatro pasos -secado del concreto, enfriado a temperatura ambiente, impregnación con el monómero y la polimerización in situ- los cuales son costosos y toman mucho tiempo. Por ejemplo, secar el concreto a 120°C (250°F) requiere un tiempo desmedidamente largo por ello costoso, secarlo a 315°C (600°F) reduce el tiempo considerablemente, pero utilizar elevadas temperaturas a gran escala, puede causar grietas en el puente. La impregnación con azufre permite el uso de un proceso más sencillo que evade estas dificultades.

Dos ventajas del azufre como impregnante son: su relación de viscosidad/temperatura y su relativamente baja presión de vapor y flamabilidad. El azufre se funde en un rango de 113-120°C (235-248°F) para formar un líquido de baja viscosi-

dad, v.g., 12.5 cp (125 Pa. s.) a los 120°C (248°F), disminuyendo a 6.6 cp (0.66 Pa. s.) a los 160°C (320°F) (a temperaturas más la viscosidad aumenta drásticamente debido a polimerización lo cual es indeseable en esta aplicación). La baja viscosidad mejora la rapidez de penetración. Segundo, la alta presión de vapor y flamabilidad de los monómeros como el metilo metacrilato requiere que se enfríe el puente a temperatura ambiente antes de la impregnación. De esta manera, la energía utilizada para secar el puente con elevadas temperaturas, se pierde durante el enfriado -energía que se podría utilizar para fundir el azufre para su más fácil penetración en el puente-. Y aun se podría economizar más energía si el secado e impregnación con azufre se pudieran efectuar simultáneamente.

Por esta razón, nosotros propusimos (30) combinar los tres pasos que son el secado, enfriado e impregnación, en uno solo, y eliminar el paso de la polimerización: el puente está cubierto de azufre fundido que penetra dentro de los poros, eliminando el agua e impregnando el concreto con azufre. El azufre fundido está a una temperatura mayor que el punto de ebullición de manera que actúa como un medio transportador de calor para extraer el agua y permitir penetración. Por supuesto que el substrato de concreto deberá mantenerse a una temperatura suficientemente alta para evitar la solidificación del azufre en los poros antes de que se complete la impregnación. Cuando se calienta una losa de concreto desde la superficie superior, el agua emigra de la superficie caliente a la fresca que está por debajo evaporándose cerca de la región caliente y condensándose en la más fresca. El azufre fundido penetra dentro del concreto por medio de capilaridad, evaporándose el agua que se encuentra cerca del frente de azufre fundido conforme va avanzando. Por lo tanto, el tiempo requerido para la impregnación con azufre debería ser más o menos el tiempo requerido para el secado del concreto.

Se efectuaron impregnaciones con azufre utilizando cilindros de concreto de 8 x 15 cm (3 x 6 pulg) y losas de 0.61 x 0.61 x 0.15-m (2.0 x 2.0 x 0.5 -pie). Los cilindros se prepararon de una mezcla convencional, sin aire incluido 1.00: 2.00: 3.42: 4.16 de agua-cemento Portland tipo I -arena gruesa- agregado de caliza (2.5 ó 3 cm máximo) promediando una resistencia a la compresión a los 28 días de 140.6 kg/cm<sup>2</sup> (28 mPa). El contenido de aire incluido fue del 3% con un revenimiento de 11 cm (4.5 pulg). Se colocaron los cilindros en el cuarto de curado (90-100% humedad relativa). En el primer experimento, se sumergió un cilindro hasta a la mitad en un baño de azufre fundido 116-127°C (240-260°F) durante 45 horas y después se dejó enfriar. El azufre se había impregnado en el cilindro hasta una distancia de 2.5 cm (1 pulg) por encima del nivel de azufre como se indica por el contraste entre la región impregnada de color gris oscuro y la región no impregnada color blanco. Sin embargo, la impregnación estaba completa únicamente en la cáscara exterior de 1.2 cm (0.5 pulg) del cilindro, ya que el paso de la fractura fue por entre las partículas del agregado en la región de la orilla, pero por entre la superficie de contacto del agregado y pasta de cemento en el núcleo central. La cáscara exterior del cilindro no fue afectada por el ácido pero el corazón sí fue algo afectado.

Otros cilindros fueron impregnados por medio de inmersión en un baño de azufre fundido, mantenido a 121-138°C (250-280°F) por medio de gas propano. Los contenidos de azufre fueron del 6-10% después de 45 horas de inmersión y 11% después de 60 horas. La absorción de agua en 24 horas se redujo en un 50% en los seis especímenes de 45 horas y en un 97% en los seis especímenes de 60 horas. Tanto la resistencia a la compresión como a la tensión aumentaron conforme aumentaron los contenidos de azufre llegando hasta un máximo de 3 veces la resistencia de especí-



menes de control de impregnados (figura 9); valores similares a aquéllos observados en concreto impregnado con polimetilo metacrilato. Los especímenes de 60 horas fallaron explosivamente durante pruebas de compresión como también igual fallaron los especímenes resistentes pero quebradizos impregnados con polimetilo metacrilato (3, 10, 14, 15). La fractura procedía a través de, no alrededor de, las partículas de agregado y demostraron mejor resistencia al ácido clorhídrico al 15%.

Las losas de concreto se prepararon como se describió anteriormente. La losa I se sumergió parcialmente en un baño de azufre fundido a 121-139°C (250-280°F) durante 45 horas mientras un área circular de la superficie de 41 cm (16 pulg) en diámetro fue puesta al vacío utilizando la cámara de vacío descrita previamente (18).

Los corazones tomados de esta losa mostraron una penetración uniforme hasta una profundidad de 1.9 cm (0.75 pulg), como un 50% del valor pronosticado por la ecuación 1. Esta diferencia puede ser debido al "humedecimiento" ineficaz del concreto por el azufre o a que el concreto en masa causaba la condensación del agua evaporada; el uso de la cámara de vacío no fue de beneficio en este caso.

La losa II se preparó similarmente excepto que fue curada con vapor a baja presión durante 24 horas para aumentar su porosidad; su contenido de aire fue de 8%. Esta losa fue impregnada de la misma manera que la losa I excepto que no se utilizó la cámara de vacío; en su lugar, se cubrió la superficie con un pliego de asbesto. Los corazones tomados de esta losa mostraron una impregnación completa hasta una profundidad de 2.5 cm (1 pulg), y una impregnación parcial hasta unos 1.2 cm (0.5 pulg) más. La fractura en estos especímenes procedió a través de, y no alrededor de las partículas del agregado en las regiones completamente impregnadas.

Así, la impregnación de concreto con azufre produce incrementos en la resistencia, permeabilidad y resistencia a los ácidos comparables a aquellos obtenidos con el metilo metacrilato. Anteriormente se había notado el incremento en la resistencia (31) pero no la menor permeabilidad al agua y mejor resistencia a los ácidos.

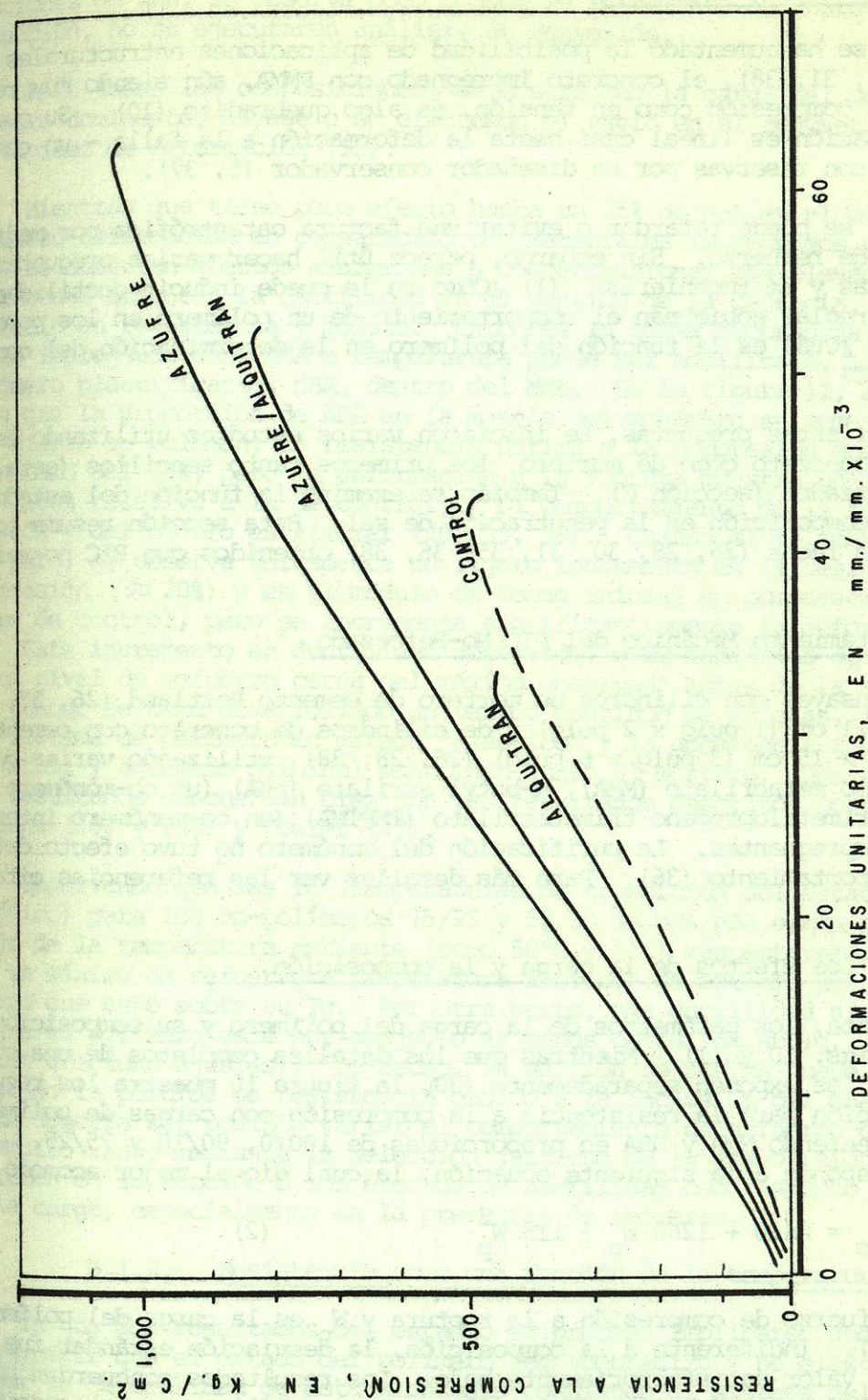


Fig. 9.- Datos de esfuerzo-deformación para concretos impregnados con azufre, alquitrán y una mezcla.



B.- COMPORTAMIENTO MECANICO DEL PIC.

Mientras que se ha aumentado la posibilidad de aplicaciones estructurales para el PIC (3, 7-10, 31, 38), el concreto impregnado con PMMA, aún siendo muy resistente, tanto en compresión como en tensión, es algo quebradizo (10). Su curva de esfuerzo-deformación es lineal casi hasta la deformación a la falla - un comportamiento visto con reservas por un diseñador conservador (5, 37).

Para prevenir se puede retardar o evitar una factura catastrófica por medio del uso del acero de refuerzo. Sin embargo, parece útil hacer varias preguntas relacionadas básicas y de ingeniería: (1) ¿Cómo se le puede inducir ductilidad al PIC?; (2) ¿Qué reglas gobiernan el comportamiento de un polímero en los poros del concreto?; (3) ¿Cuál es la función del polímero en la determinación del comportamiento del PIC?

Para contestar estas preguntas, se iniciaron varios estudios utilizando especímenes, tanto de concreto como de mortero, los primeros tanto sencillos (esta sección) como reforzados (sección C). También se examinó la función del estado del polímero y su composición en la penetración de sal. Esta sección resume los resultados hasta la fecha (26, 28, 30, 31, 35, 36, 38) obtenidos con PIC no-reforzado.

B.1.- Comportamiento Mecánico del PIC No-Reforzado.

Se hicieron ensayos con cilindros de mortero de cemento Portland (26, 33, 36) de 2.5 cm. x 5.1 cm (1 pulg x 2 pulg) y de cilindros de concreto con cemento Portland de 7.6 cm x 15 cm (3 pulg x 6 pulg) (26, 28, 38), utilizando varias combinaciones de metilo metacrilato (MMA), n-butyl acrilato (nBA) (un co-monomero plastificante) y trimetilopropano trimetacrilato (TMPTMA) (un co-monomero interviniente) como impregnantes. La purificación del monómero no tuvo efecto detectable sobre el comportamiento (36). Para más detalles ver las referencias citadas.

B.1.1.- Los efectos de la carga y la composición.

Como se esperaba, los parámetros de la carga del polímero y su composición son importantes (Figs. 10 y 11). Mientras que los detalles completos de una correlación ingenieril se exponen separadamente (30), la figura 10 muestra los resultados de la correlación para la resistencia a la compresión con cargas de polímero para sistemas conteniendo MMA y NBA en proporciones de 100/0, 90/10 y 75/25. La línea sólida corresponde a la siguiente ecuación, la cual dio el mejor acomodo.

$$\sigma_{BC} = 6410 + 1268 W_p + 115 W_p^2 \quad (2)$$

donde  $\sigma_{BC}$  es el esfuerzo de compresión a la ruptura y  $W_p$  es la carga del polímero (por ciento en peso). Indiferente a la composición, la desviación estándar fue del 8 por ciento -- un valor satisfactoriamente bajo. Los resultados concuerdan bien con aquéllos reportados por Manning y Hope (42), quienes utilizaron una ecuación exponencial. Sin embargo, el uso de un 50% o más de nBA si induce cambios significantes. Para el caso del 50% se mantiene la siguiente ecuación:

$$\sigma_{BC} = 6320 + 928 W_p + 37 W_p^2 \quad (3)$$

donde los símbolos tienen el mismo significado que antes. A más elevadas concentraciones de nBA, se observa poco o nada de incremento en resistencia (ver a continuación, no se ejecutaron análisis de regresión).

Para todas las composiciones, se mostró que la carga del polímero fue el parámetro dominante, háyase o no efectuado el vacío en el concreto e indiferente a la rapidez de deformación (35).

Mientras que tiene poco efecto hasta en 25% de nBA en el comportamiento de esfuerzo-deformación en comparación con materiales impregnados con PMMA (figura 11), se observan efectos alarmantes a concentraciones más elevadas, las cuales claramente aumentan la ductilidad en el sentido de la cedencia, si bien con un sacrificio en resistencia y módulo. Entonces la forma quebradiza de falla del concreto impregnado con PMMA a temperatura puede ser modificada, incorporándole un monómero plastificante, nBA, dentro del MMA. De la figura 11, es claro que a medida que la proporción de nBA en la mezcla del monómero se aumenta de 0 a 50 por ciento en volumen, la resistencia última a la compresión muestra una disminución como del 25%, pero la deformación a la ruptura muestra un incremento como del 30% (100% relativo a la de control). El comportamiento de la resistencia a la tensión y del módulo es similar (26, 35, 38). Cuando el polímero impregnado es nBA puro, se observa únicamente un ligero incremento en la resistencia última a la compresión ( $\approx 20\%$ ) y en el módulo de Young inicial en comparación con los especímenes de control, pero se incrementa significativamente la deformación a la ruptura. Este incremento en ductilidad observado, o su habilidad de fluir y deformarse un nivel de esfuerzo cerca del máximo observado antes de la falla, indica que aún cuando se haya desarrollado un patrón continuo de grietas, la extensibilidad del sistema de polímero en estado "elástico" y la adherencia incrementada entre la matriz y agregado original mantienen junto al mortero. Una vez más, todos estos resultados concuerdan bien con los resultados descritos posteriormente por Kukacka (10) y Paul y Fowler (47).

Observando que las  $T_g$  (temperaturas de transición del estado quebradizo a uno elástico) para los co-polímeros 75/25 y 50/50 de MMA/nBA están por arriba y por abajo de la temperatura ambiente (como 50°C y 5°C) respectivamente, está claro que un máximo de refuerzo a temperatura ambiente se obtiene únicamente con un polímero que esté sobre su  $T_g$ . Por otra parte, una ductilidad significativa requiere que el polímero esté por abajo, o al menos cerca, de su  $T_g$ . (Por supuesto, se pueden efectuar ajustes). De hecho, la adición de TMPTMA puede compensar en cierto grado la pérdida de resistencia debido a la inclusión del nBA (28). Por lo tanto debería ser posible variar el comportamiento de esfuerzo-deformación sobre un amplio rango mediante la selección juiciosa de la composición del monómero. Se discuten en la sección C los efectos de ductilidad con respecto a la naturaleza de la carga, especialmente en la presencia de refuerzo.

B.1.2.- Resistencia como una función de la temperatura.

Ya que los resultados del estudio en proceso implicaron que el refuerzo puede requerir que el estado del polímero sea quebradizo y no elástico, se decidió probar la generalidad de esta hipótesis cambiando el sistema del polímero por arriba y por abajo de su  $T_g$ . Desde luego, tal comportamiento es intrínsecamente importante en la selección y diseño de sistemas y estructuras de PIC. Si hay pérdida de refuerzo a una temperatura de servicio normal o en un incendio, el diseñador deseará saber esto de antemano.