

MUROS ACUMULADORES DE CALOR (MAC): EFECTO DE LA PIGMENTACIÓN INTEGRAL DE LA MASA TÉRMICA

C. Discoli¹, G. Viegas¹, G. San Juan¹

Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC). Grupo asociado INENCO.
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU), Universidad Nacional de La Plata (UNLP)
Calle 47 N°162, La Plata, C.P. 1900 – Prov. de Buenos Aires
Tel. 0221-4236587/90 int. 250.e-mail: discoli@rocketmail.com, gachiviegas@yahoo.com.ar,
gustavosanjuan60@hotmail.com

Recibido 04/09/15, Aceptado 08/10/15

RESUMEN: Se presentan los resultados del ensayo de muros acumuladores de calor (MAC) para climatización invernal. Los mismos están conformados con hormigón macizo y hormigón mixto (hormigón más agua). Los muros son modulares, constituidos por piezas premoldeadas de 1,2 x 0,24 x 0,35 m. Se comparan las prestaciones térmicas de ambos tipos de muros a partir de la pigmentación integral de las piezas modulares componentes de los MAC. Se realizan ensayos en “boxes” en laboratorio a “cielo abierto”, a los efectos de evaluar las temperaturas alcanzadas en la masa de acumulación. A partir de los mismos y dado que no existen valores termo-físicos para aplicaciones de pigmentos, se planteó la necesidad de evaluar la capacidad térmica de los hormigones pigmentados en el laboratorio del INTI Construcciones. Se utilizó un equipo de guarda caliente y ensayos de absorción. Los resultados muestran que las temperaturas alcanzadas en piezas de MAC con pigmentación integral alcanzan mayores temperaturas que aquellas sin pigmentar; además los ensayos de laboratorio muestran que la conductividad térmica es menor al incorporar distintas proporciones de pigmentación en la masa térmica, mientras que la absorción solar aumenta.

Palabras clave: energía solar térmica, hormigón macizo y mixto, pigmentación integral negro de humo y ferrite negro.

INTRODUCCIÓN

Los muros acumuladores de calor (MAC) son sistemas conformados con paramentos construidos con materiales que acumulan la energía del sol bajo el efecto de masa térmica, para luego entregarla a un ambiente determinado. Los antecedentes se remontan al siglo XIX con los preceptos enunciados por Edward Morse (US Patent 246626, 1881), los que fueron continuados y desarrollados en la década de 1960 por Felix Trombe y Jacques Michel en las casas pasivas de la localidad francesa de Font-Romeu-Odeillo-Via, localizada en los Pirineos orientales, conocidos desde entonces como muros “Trombe-Michel”. Décadas más tarde en Estados Unidos, se desarrollaron algunas aplicaciones que permitieron establecer criterios básicos de funcionamiento y uso de dichos sistemas en base a modelos simplificados de los complejos fenómenos físicos y térmicos involucrados, permitiendo la aplicación cotidiana en edificios (Balcomb, et al 1980), (Balcomb, et al 1998), (Torcellini, et al 2004). En 1997 investigadores franceses relacionados con J. Michel desarrollaron avances a los diseños originales incorporando al muro “Trombe-Michel” tradicional, una aislación interna para evitar las pérdidas nocturnas y ganancias diurnas indeseables (Zalewski et al, 1997).

¹ Investigador CONICET-UNLP.

Existen múltiples diseños y alternativas de muros acumuladores que dependen de la disponibilidad del recurso solar, de la demanda energética, de los sistemas constructivos disponibles, y de la diversidad climática relacionada con la amplitud térmica del sitio y su grado de heliofanía. Los antecedentes muestran diversidad en cuanto a los sistemas de transferencia térmica, en la materialización y morfología, en las capacidades de acumulación de calor, en la respuesta al retardo y de amortiguamiento de la onda térmica. Las diferencias dependen de las capacidades termo-físicas de los materiales utilizados, del estado de la materia y de cambio de fase de la misma, de su calor específico, y de su grado de absorción superficial. Dicha diversidad también incluye alternativas en cuanto a la capacidad de carga y descarga de la onda térmica, intrínseca del material y si es controlada o no. Asimismo, en todos los casos se observa un tratamiento superficial en la masa de acumulación con el objeto de mejorar la absorción del área colectora de cada MAC a partir de incorporar pinturas o tratamientos selectivos. En cuanto a la masa térmica de acumulación de estos muros, las mismas pueden variar en su materialización, utilizando elementos sólidos, con cambio de fase, líquidos, o configuraciones mixtas coexistiendo los diferentes estados. Dentro de los materiales sólidos se observan aplicaciones con diferentes tipos de piedra, con ladrillo de tierra cocida, con hormigón. En los de cambio de fase, podemos mencionar materiales como sales o parafina. En relación a este aspecto se registran variados desarrollos internacionales en el estudio de materiales de cambio de fase utilizados como masa térmica, en forma unitaria o integrados en la masa (Cabeza et al, 2007; Zhang et al., 2011; Pomianowski et al, 2013), y contados ejemplos que analizan otro tipo de materiales como las sales hidratadas y sus beneficios sobre el hormigón y la parafina (Khalifa y Abbas, 2009). Dentro de los materiales líquidos, si bien su utilización ha sido menos frecuente, podemos mencionar el agua, por ser económica y poseer una alta capacidad de acumulación de calor ($C_e: 4,18\text{J/kg}$). (IAS-FIPE-IIPAC (2009).

En Argentina, dada la diversidad climática y de recurso solar ($0,5$ a $7,5 \text{ kWh/m}^2$, Grossi Gallegos y Righini, 2007), se desarrollaron diferentes sistemas tecnológicos implementando muros acumuladores de calor. Dicha diversidad la podemos agrupar a partir de sus sistemas de transferencia y sus masas de acumulación diferenciándose en: a. muros con retardo de la onda térmica; b. muros de entrega de calor continua; c. muros con acumulación en material sólido; d. muros con acumulación en fluido; e. muros con acumulaciones mixtas (Alanis et al, 1978 a; Guerrero et al, 1979; Urriol Gaspar, 1980; Guerrero et al, 1984; Alanis et al, 1978b). La figura 1 muestra los esquemas simplificados de las diferentes alternativas de muros acumuladores de calor. (Guerrero et al, 1979; Discoli et al; 2010).

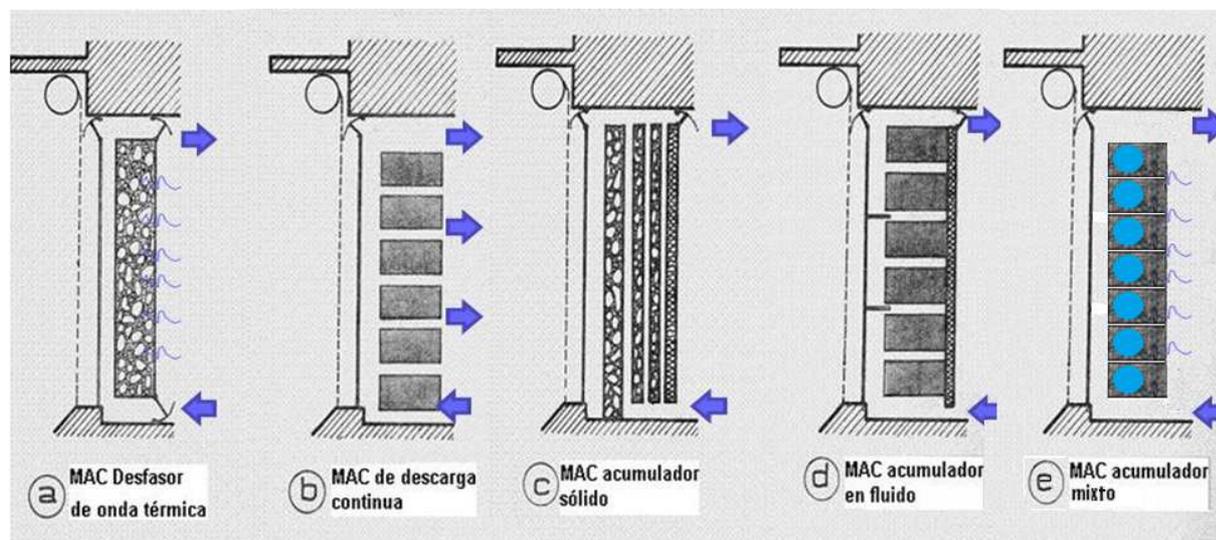


Figura 1: Tipos de Muros acumuladores de calor (MAC).

Si bien existen aplicaciones complementarias de MAC como amortiguadores térmicos, las funciones principales y más difundidas han sido, captar la energía radiante para transformarla en térmica, acumular y climatizar. La diversidad de regiones y climas de la Argentina permitieron diferentes desarrollos tecnológicos adaptados a los requerimientos específicos de cada región en viviendas localizadas en climas templados y fríos de la Argentina.

Los MAC utilizando materiales sólidos como piedra, ladrillo, hormigón, etc., permiten acumular la energía de origen radiante y transformarla en térmica en la masa sólida, y desfasar la carga térmica entre el período diurno y el nocturno, reiniciando el ciclo en el día siguiente (Lesino et al 1978), (Lesino et al 1981). Se han aplicado en regiones climáticas extremas de Argentina con recurso solar alto (NOA, Zonas IV, V, VI, Norma IRAM 11603, con radiación solar global horizontal total anual de 8000 MJ/m²), en climas secos y fríos con gran amplitud térmica y alta heliofanía relativa.

Los MAC líquidos utilizan solamente materiales fluidos (por ejemplo agua), encriptados en celdas estancas. Cuentan con un calor específico mayor y un proceso de transferencia radiativo, convectivo y conductivo con mayor dinámica. Se han utilizado en regiones con recurso solar medio (CENTRO, Zona IIIb, Norma IRAM 11603 con radiación solar global horizontal total anual entre 4500 y 5500 MJ/m²) y temperaturas templadas con altos niveles de humedad, en general costeras, donde la amplitud térmica es menor y la heliofanía es variable por la alta nubosidad.

Recientemente se comenzó a trabajar con MAC resueltos con materiales mixtos (Hormigón y agua). Estos se desarrollaron e instrumentaron a partir de una masa sólida cuyas propiedades intrínsecas le dan inercia térmica y retardo, en la cual se inserta una vaina plástica rellena con material fluido con alto calor específico (en este caso agua), cercana a la cara asoleada a los efectos de acumular mayor cantidad de energía en dicho volumen (Discoli et al 2011). De esta manera se maximiza la capacidad de carga a través de una mayor capacidad calorífica dada por el agua y se conserva la capacidad de inercia térmica y retardo suministrada por el hormigón. Se han aplicado en regiones mediterráneas con recurso solar medio (CENTRO, Zona IIIa y IVb y IVc, Norma IRAM 11603, con radiación solar global horizontal total anual entre 4500 y 5500 MJ/m²), con temperaturas templadas-frías, bajos niveles de humedad, con amplitudes térmicas intermedias y heliofanías medias y altas (baja nubosidad).

Las figuras 2, 3 y 4 muestran ejemplos de aplicación de los diferentes MAC descriptos. La figura 2 muestra la casa de Abra Pampa en la prov. de Jujuy con MAC sólidos resueltos en piedra; la figura 3 muestra la casa de La Plata en la prov. de Buenos Aires con muros MAC con descarga controlada resueltos con acumulación en celdas de agua; y la figura 4 muestra la casa de Tapalqué, en la misma provincia- con MAC mixtos resueltos en piezas de hormigón con celdas plásticas encriptando agua.

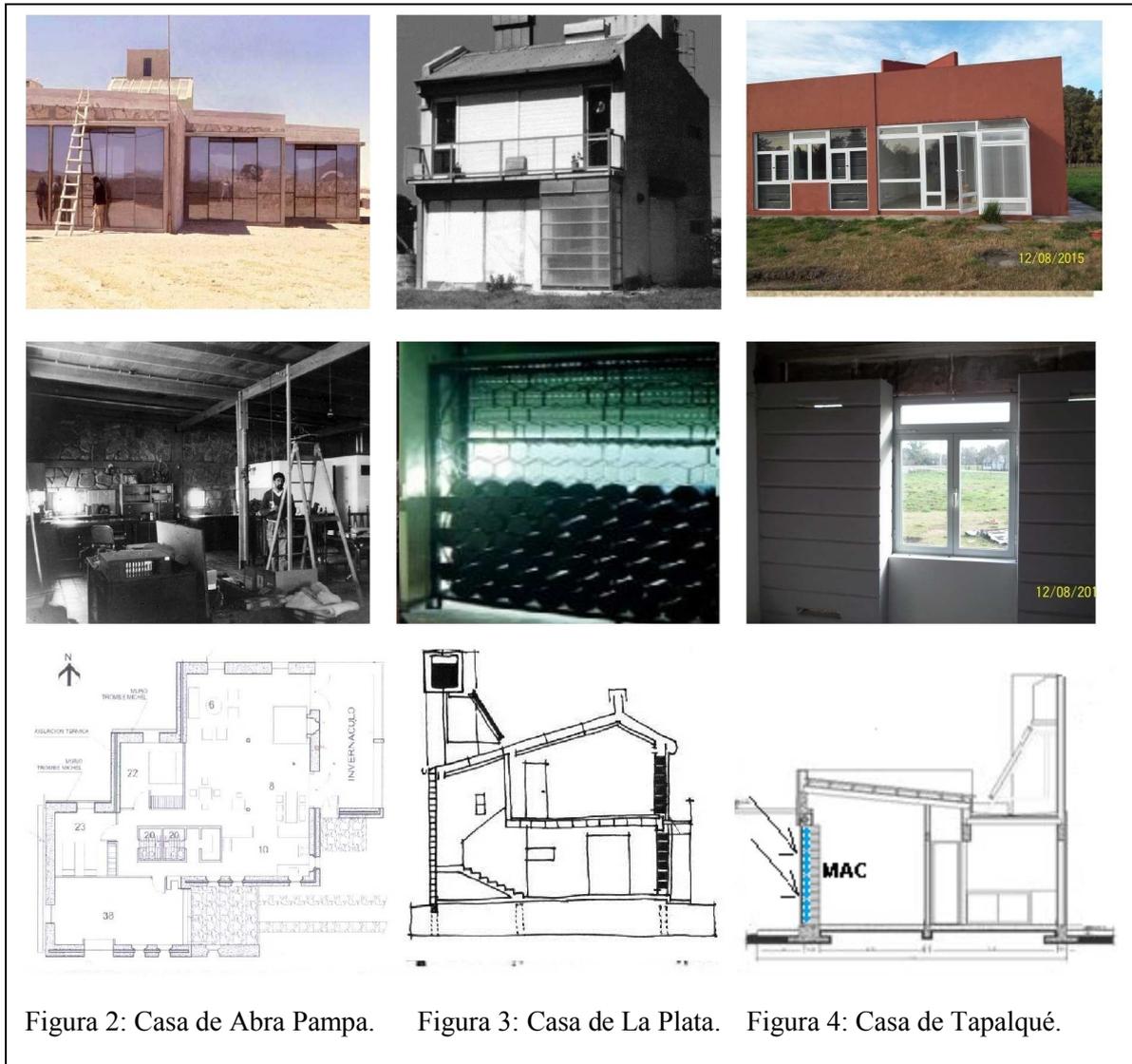


Figura 2: Casa de Abra Pampa.

Figura 3: Casa de La Plata.

Figura 4: Casa de Tapalqué.

En función de los antecedentes descriptos y de las experiencias realizadas recientemente con los MAC mixtos (ver figura 4), se iniciaron simultáneamente ensayos incluyendo hormigón pigmentado en las piezas que lo constituyen. Hasta el momento en todos los casos precedentes a esta tecnología sólo se utilizaban tratamientos superficiales mejorando la absorción en la cara expuesta a la irradiación solar. En estos ensayos se implementaron cambios en cuanto al agregado de pigmentos modificando la coloración en toda la masa de hormigón, ennegreciendo el interior del material a nivel granular.

MAC PIGMENTADOS

El hormigón natural utilizado para la construcción de los MAC mixtos es una combinación de aglomerantes, agregados áridos, aditivos y agua. El aglomerante básico es el cemento hidráulico tipo “Portland”; los agregados denominados áridos en la mezcla pueden ser partículas o fragmentos finos (arenas) y gruesos (grava, gravilla, piedra partida). Los aditivos, que generalmente rondan en un bajo porcentaje de la masa total del hormigón, pueden incluir aceleradores o retardadores del fragüe, fluidificantes, impermeabilizantes, colorantes, entre otros.

En cuanto a las coloraciones del hormigón, existen diversos pigmentos inorgánicos que pueden incorporarse a la mezcla con los materiales secos antes del agregado del agua. Existen múltiples tonos (grises a negros, azul, rojo brillante a rojo oscuro, café, marfil, crema o color piel y verde) y se obtienen de distintos óxidos de hierro o de cromo, negro mineral o “de humo”, tierra “de sombra” en bruto o calcinada, azul ultramarino o de ftalocianina, entre otros. Estos pigmentos se adhieren al

cemento para formar parte permanente de la mezcla con lo cual se produce una coloración integral que asegura permanencia en el coloreado. Son económicos en su fabricación y en mantenimiento posterior (ya que no requieren re-pintado) y resisten a las inclemencias climáticas. La figura 5 muestra la diversidad de pigmentos.

	Grisés de Humo	Oxido negro de hierro Negro Mineral Negro de humo
	Azul	Azul ultramarino Azul de ftalocianina
	Rojo brillante a rojo oscuro	Oxido rojo de hierro
	Café	Oxido café de hierro Tierra de sombra en bruto o calcinada
	Marfil, crema o color piel	Oxido amarillo de hierro
	Verde	Oxido de cromo Verde de ftalocianina

Figura 5: Pigmentos como aditivos al hormigón

En general el uso de los pigmentos en hormigones tiene como objetivo aplicarse en piezas que cumplan funciones de señalización, tengan buena terminación y amplia durabilidad (usos viales, rampas, etc.). Todas estas aplicaciones responden a necesidades, estructurales/portantes (Corinaldesi, 2012), funcionales y estéticas. No se han observado aplicaciones en las que intervengan procesos térmicos y específicamente en muros acumuladores de calor.

A partir de lo expuesto, este trabajo tiene por objetivo explorar las capacidades de la pigmentación integral de la masa térmica de hormigón utilizando pigmentos. En este caso en particular y dadas las características de los MAC, la coloración debe alcanzar la mayor absorción posible. Se utilizó el pigmento “negro de humo” al 2% para construir algunas de las piezas que constituyen el MAC, completando con piezas de hormigón natural a los efectos de realizar un análisis comparado. La figura 6 muestra un “box” con piezas pigmentadas y sin pigmentar, y a su lado una probeta del hormigón pigmentado a los efectos de ser ensayado en el INTI.



Figura 6: Pieza del MAC pigmentadas, sin pigmentar (hormigón natural) y colorante negro de humo.

Ensamblados los MAC en los boxes del laboratorio a cielo abierto se realizaron los ensayos de carga térmica respectivos durante el periodo invernal del 2011/2013.

ETAPA DE ENSAYOS DE LOS SISTEMAS

Se establecieron inicialmente en una primera etapa ensayos comparados en laboratorio a cielo abierto con dos MAC, en boxes dispuestos en paralelo, con su superficie de captación, perpendicular al norte solar. Un MAC responde a la tecnología tradicional con acumulación de calor en masa sólida (sólo hormigón); y un segundo MAC con tecnología mixta (hormigón + agua). Ambos cuentan con piezas pigmentadas y sin pigmentar a los efectos de realizar un análisis comparado de sus parámetros térmicos. Los resultados determinaron la necesidad de conocer los parámetros termo-físicos del hormigón pigmentado para el uso con fines térmicos. A partir de ello se realizó la segunda etapa, que consistió en ensayar probetas pigmentadas en los laboratorios del INTI a requerimiento de nuestro Instituto (IIPAC-FAU-UNLP) a los efectos de conocer valores de conductividad térmica y absorción de los hormigones pigmentados en diferentes tipos de dosaje y composición (2% y 10% de pigmentos

“negro de humo” y negro ferrite). Dichos parámetros no cuentan con antecedentes dado que los hormigones pigmentados no han tenido fines asociados a acumulación térmica.

Ensayos en laboratorio a “cielo abierto”

Para realizar un análisis comparado entre las diferentes versiones de MAC, sólidos; mixtos; sin pigmentar y pigmentados, se construyeron piezas industrializadas con el objeto implementar estudios simultáneos. Para ello se montaron BOXES de ensayo a cielo abierto, respetando las dimensiones de las piezas de acumulación acordes a la modulación de las viviendas (módulo de 0,60m) en las que se implementaron dichos sistemas (San Juan et al 2010). A partir de las condicionantes de diseño, se construyeron piezas de 1,20 m de ancho por 0,24 m de altura y 0,35 m de espesor, según especificaciones de la patente “**Muro climatizador Acumulador de Calor Mixto con vainas líquidas estancas**, IMPI 20110100010, Oficina de Vinculación Tecnológica de CONICET. Las piezas se montaron sobre una plataforma de hormigón. Los BOXES se construyeron con poliestireno expandido de 22 kg/m³, espesor de pared: 5 cm.

Para la construcción de cada componente se trabajó con hormigón H30 con piedra partida 6,20 natural; y pigmento de color negro (nombre comercial *Meramoe*), con una proporción del 2% de carbón “negro de humo” amorfo, exento de materiales extraños (Composición: negro de humo, 100%, N° CAS: 1333-86-4).

Para el ensayo comparado, sólo se pigmentaron algunas piezas de ambas tecnologías (MAC sólido y MAC mixto), conformando así un muro de acumulación con partes pigmentados y sin pigmentar. Y en ambos casos se pintó la superficie expuesta con esmalte sintético negro mate a los efectos de homogeneizar las absorciones. De esta manera se pudo evaluar en simultaneo los comportamientos de cada una de ellas. Durante las coladas de hormigón se insertaron termocúplas de Cu-K en el interior de cada una de las piezas a ensayar. Los sensores se instalaron en la sección transversal en el punto medio e intermedio de las piezas; y en las caras anterior y posterior, sólo a nivel superficial. La figura 7 ilustra la localización de las termocúplas en las piezas, las vainas que contienen el agua en la pieza mixta, y las piezas ya terminadas de hormigón pigmentado y hormigón natural sin pigmentar. Las piezas se montan conformando los muros acumuladores dentro de cada BOX. En ambos casos se observan dos perforaciones verticales destinadas a vincular con hormigón las piezas del muro y unificar durante el montaje la masa de acumulación con la viga de fundación, evitando riesgos de estabilidad. La unión entre piezas se realiza con ligantes comerciales estándares.

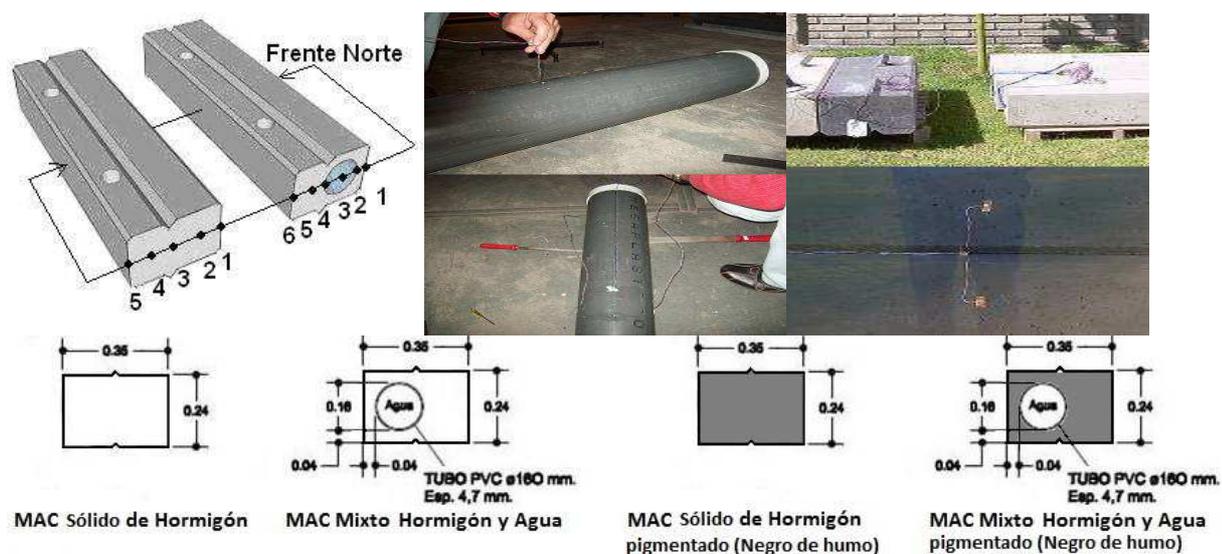


Figura 7: Localización de termocúplas en las piezas macizas y mixtas, inserto de vainas plásticas con agua, y piezas terminadas pigmentadas y sin pigmentar.

Cada tecnología (MAC *sólido y mixto*) cuenta con diferentes capacidades térmicas. Para los MAC *sólidos*, cada pieza cuenta con una capacidad de carga de calor nominal de $281 \text{ kJ/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (770 kg/m^2 de hormigón); y para los MAC *mixtos*, una capacidad de carga de calor de $334,3 \text{ kJ/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (80 kg de agua y 594 kg de H° por m^2 . Total: 674 kg/m^2). Se observa que con las mixtas se logra una mayor capacidad térmica con menor peso y masa de acumulación. El inserto de agua está desplazado sobre la cara norte a los efectos de aproximar la mayor capacidad de acumulación de calor del agua a la incidencia de la irradiación solar. Esta disposición agiliza el proceso de carga incidiendo sobre el agua con mayor calor específico, aumentando los niveles de temperatura, y dejando en su parte posterior la mayor cantidad de hormigón macizo, con el objeto de mantener el desfase de la onda térmica entre el ciclo diurno y nocturno (entre 4 y 6 hs de desfase).

La figura 8 muestra el montaje de los MAC (MAC *sólido y mixto*), las piezas pigmentadas y sin pigmentar, y un frente ya homogeneizado con esmalte sintético negro.



Figura 8: Montaje de los BOX con la instalación completa de los MAC (Sólido y mixto pigmentado y sin pigmentar) y sensores.

Se instaló un adquisidor de datos Omega om-cp, de 8 canales con termocuplas tipo T, apoyado por micro-adquisidores de datos tipo Hobo de 4 canales, completando un total de 24 canales; y un piranómetro Eppley tipo PSP para medir la radiación solar sobre el plano de colección de los MAC (vertical a 90°). Para comparar específicamente el comportamiento de las masas de acumulación de cada MAC se analizan los resultados de un ciclo diario para un día bueno de junio (Heliofanía relativa mayor al 70%).

Resultados de los ensayos a cielo abierto

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los MAC con ambas tecnologías (sólo hormigón; y hormigón + agua), y los niveles térmicos alcanzados en las piezas pigmentadas (negro de humo) y sin pigmentar (hormigón natural). En la figura 9 se visualiza para un mismo día los niveles térmicos comparados para cada tecnología con y sin pigmentación, de las caras Norte y Sur.

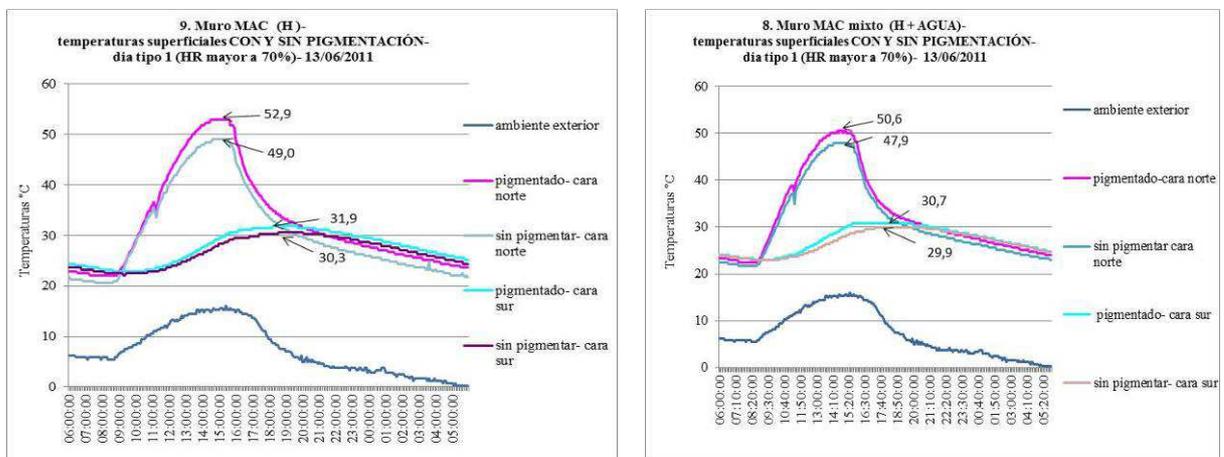


Figura 9: Comparación de ambas tecnologías (sólo hormigón H y hormigón + agua H+H2O) con y sin pigmentación (negro de humo).

Si se analizan las temperaturas alcanzadas, se observa que en las piezas pigmentadas existe un mayor nivel térmico que en las piezas sin pigmentar en ambas tecnologías. Esto significa que la capacidad de carga de energía final acumulada será mayor en dichas piezas respecto a las sin pigmentar. Sobre la cara norte se observa en ambos MAC una diferencia de temperaturas de 3,7 °C y 2,7 °C entre las piezas pigmentadas y las naturales. El paso del calor por toda la sección muestra que al llegar la onda térmica a la cara sur, con un retardo de 4hs, las diferencias se reducen a 1,6 °C y 0,8 °C entre el MAC de H° y el mixtos respectivamente. Se verifica entonces que la incorporación de pigmentos mejoró la temperatura y la carga final en ambas masas de acumulación. Si bien en ambas tecnologías la temperatura aumenta, también se observa que la masa térmica del MAC de hormigón registra mayor temperatura absoluta respecto a la masa con tecnología mixta.

Estos resultados llevaron a inferir algunas hipótesis al respecto, desconociendo aún algunas características termo-físicas de los hormigones pigmentados. Inicialmente se consultó bibliografía sobre pigmentos y sus aplicaciones sobre diferentes materiales, encontrando aplicaciones en la industria del caucho y la eléctrica. En la misma sólo se menciona que los pigmentos tipo “negro de humo”, tienen buenas propiedades en la transferencia de calor² y una elevada conductividad eléctrica. Particularmente se desconocen sus beneficios térmicos en el caso de hormigones pigmentados, dado que no existe información relativa a la conductividad térmica y absorción en esas condiciones de mezcla. También se realizaron oportunamente consultas a referentes en materiales conductores y materiales cerámicos (Dr. Scian, Director del Centro de Tecnología de Recursos Minerales y Cerámica CETMIT- CIC-CONICET, La Plata), las que advirtieron que este aditivo podría mejorar las propiedades conductivas-radiativas y que esto se ha verificado al trabajar con materiales áridos (semiconductores), pero siempre a altas temperaturas ($T > 700$ °C). En el proceso de transferencia de calor a altas temperaturas, se ha observado que la transferencia radiativa es preponderante respecto a la conductiva debido a su temperatura (la temperatura está afectada por la 4ta potencia); pero en bajas temperaturas, pueden existir bajas probabilidades al respecto, aunque se desconocen dichas propiedades en estados térmicos equivalentes a los registrados en los MAC.

En consecuencia, en una primera instancia se observó la necesidad de evaluar las propiedades termofísicas de los hormigones pigmentados a los efectos de explicar los resultados obtenidos, situación que se planteó como ya hemos mencionado, en los ensayos de laboratorio en el INTI.

Ensayos de laboratorio

Los ensayos fueron realizados por el INTI Construcciones UT habitabilidad³, a partir de un convenio específico interinstitucional (IIPAC-FAU-UNLP; IVBA e INTI). Para el estudio se estableció un protocolo de muestras utilizando mezclas de hormigón (H30) con y sin la adición de pigmentos (negro de humo y ferrite negro). Se prepararon en laboratorio cinco mezclas de hormigón: una sin adiciones, dos con la adición del 2% y 10 % en volumen de “negro de humo” respecto al total de la mezcla o pastón, y dos con la adición del 2% y 10 % en volumen de ferrite negro.

La dosificación de la mezcla de hormigón sin la adición de pigmentos fue efectuada de acuerdo con los lineamientos del método ICPA para el “Diseño Racional de Mezclas de Hormigón”, con ajuste de las proporciones relativas de agregados a las curvas granulométricas límites de la norma IRAM 1627, con especificación de clase resistente H30. Las cuatro mezclas con la adición de pigmentos en distintas proporciones fueron dosificadas manteniendo el mismo contenido unitario de cemento (C.U.C.) que la mezcla de hormigón sin la adición de pigmentos, aunque con ajuste del volumen total de agregados para su reemplazo parcial por los pigmentos en las proporciones indicadas por el fabricante.

²<http://www.ecured.cu/index.php/Carbono>, visitado el 14/08/2015;

<http://www.uam.es/docencia/elementos/spV21/sinmarcos/elementos/c.html>, visitado el 14/08/2015.

³ Ensayos realizados por el INTI Construcciones UT habitabilidad, a cargo del Ing. Vicente Volantino.

Los ensayos previstos se orientaron a determinar la conductividad térmica de las muestras en sus diferentes proporciones, y ensayos de absorptancia en el caso de que no se utilicen pinturas de homogeneización en la cara expuesta a la irradiación solar.

Conductividad térmica

La medición de la conductividad térmica se realizó mediante el método de ensayo de las propiedades de transmisión de calor en régimen estacionario mediante el medidor de caudal térmico siguiendo los lineamientos establecidos en las normas ISO 8302, ASTM C177, e IRAM 11559.

Absortancia solar

Las mediciones de la reflectancia de las probetas en el rango espectral de la radiación solar, se realizaron con un espectrofotómetro de doble haz con esfera integradora, con geometría normal/difusa. Características del ensayo: i. Temperatura de medición: $(23,4 \pm 0,4)$ °C; ii. Humedad relativa ambiente: (46 ± 8) %; iii. Fecha de medición: 11 de enero de 2013. El Instrumental utilizado fue un espectrofotómetro marca SHIMADZU, modelo UV-3101PC, con accesorio de esfera integradora modelo ISR 3100. Un termohigrómetro marca TFA modelo 30.5002.

A partir de los valores de la reflectancia espectral, se determinó la absorptancia solar (α), por medio de la siguiente fórmula:

$$\alpha_e = \frac{\sum_{\lambda=300\text{nm}}^{2500\text{nm}} (1 - \rho_{\lambda}) \cdot S_{\lambda} \cdot \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300\text{nm}}^{2500\text{nm}} S_{\lambda} \cdot \Delta\lambda}$$

dónde:

ρ_{λ} es la reflectancia espectral de la probeta ente 300 nm y 2500 nm.

S_{λ} es la distribución espectral relativa normalizada de la radiación solar global para masa de aire=1,5.

$\Delta\lambda$ es el intervalo entre longitudes de onda consecutivas. En este caso, $\Delta\lambda$ es igual a 5 nm entre 300 nm y 400 nm, 10 nm entre 400 nm y 800 nm, y 50 nm entre 800 nm y 2500 nm.

Resultados de laboratorio

Se muestran los resultados del ensayo de la conductividad de las probetas comparando la situación sin aditivo de pigmentos, con pigmentos de negro de humo y con pigmento de ferrite negro, variando la proporción de pigmentos en las mezclas (figura 10).

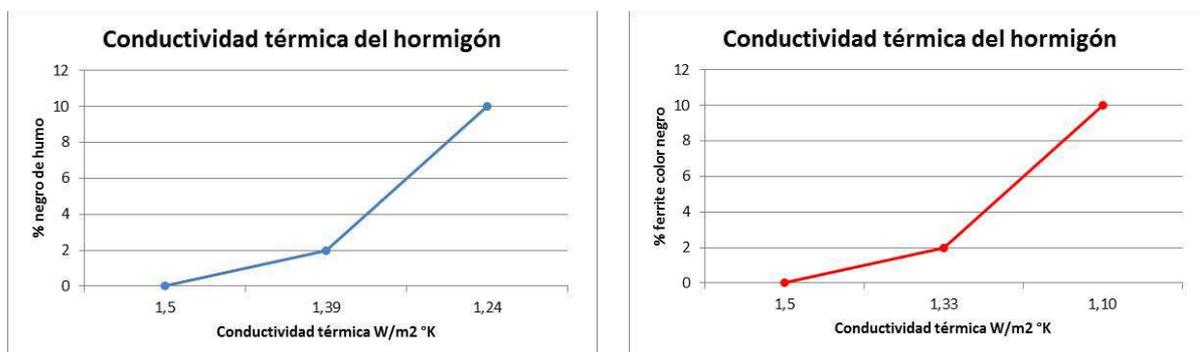


Figura 10: Conductividad térmica de las probetas con diferentes proporciones de negro de humo (azul) y de ferrite color negro (rojo) en la masa térmica del hormigón.

Como se puede observar, la incorporación de pigmentos en la coloración integral de la masa disminuye la conductividad térmica de la misma a mayor proporcionalidad de pigmentos. En el caso de pigmentos “negro de humo”, el valor de conductividad se reduce de $1,5 \text{ W/m}^2 \text{ °K}$ (para H° natural) a $1,39 \text{ W/m}^2 \text{ °K}$ y $1,24 \text{ W/m}^2 \text{ °K}$ (en H° pigmentado al 2% y 10% respectivamente). En el caso de ferrite de color negro, la conductividad térmica se reduce aún más. Esto significa que existiría en

ambos casos una mayor resistencia a la transferencia conductiva del calor respecto al hormigón natural. En consecuencia se puede inferir que ante una fuente calórica determinada y características de absorción definidas, menor conductividad implicaría una mayor temperatura dado su menor difusividad, manifestándose en mayores temperaturas en los diferentes puntos de la masa.

Finalmente se muestran los resultados de la determinación de la absorptancia de los distintos hormigones y su agregado proporcional de pigmentos. La tabla 1 muestra las absorptancias obtenidas con el hormigón natural y con los pigmentos “negro de humo” y ferrítico negro en función de los diferentes % en volumen.

Probeta	Absortancia
Hormigón sin la adición de pigmentos	72,5
Hormigón con la adición del 2% en volumen de negro de humo	94,0
Hormigón con la adición del 10% en volumen de negro de humo	95,6
Hormigón con la adición del 2% en volumen de ferrite negro	91,8
Hormigón con la adición del 10% en volumen de ferrite negro	92,5

Tabla 1: Absortancia solar de las piezas incorporando distintas proporciones de “negro de humo” y ferrite negro en la masa térmica.

Los resultados muestran que la pigmentación con negro de humo aumenta considerablemente la absorptancia del hormigón, superando a la pigmentación con ferrite.

Teniendo en cuenta los ensayos a cielo abierto y los de laboratorio, y si se analizan los registros de temperaturas, por ejemplo de la cara norte en ambas tecnologías (MAC sólido y Mixto), se puede deducir que: i. En las piezas sólidas el efecto de la conductividad es continuo en toda su masa, dificultando así la transferencia en todos sus puntos; ii. Mientras que en las piezas mixtas, la presencia de agua en la porción norte de la pieza de acumulación, mejoraría la transferencia de calor en el sector comprometido por la misma, logrando una mayor transferencia, la que se expresada con niveles térmicos algo inferiores.

CONCLUSIONES

Los ensayos preliminares de ambas tecnologías con piezas pigmentadas y sin pigmentar advierten una temperatura superior respecto a las tecnologías tradicionales con área de exposición pintada. Esta situación llevó a la necesidad de investigar respecto a los parámetros termo-físicos (conductividad y absorptancia) de los hormigones pigmentados. Las consultas realizadas determinaron un área de vacancia en dichos parámetros dado que los hormigones con coloraciones han sido implementados para otros usos (señalética, estética, etc.), y no para aplicaciones térmicas. En consecuencia se requirió implementar una serie de ensayos con el INTI a los efectos de determinar el rango de dichos parámetros y explicar los resultados obtenidos en laboratorio a cielo abierto.

Los ensayos en laboratorio, orientados a ajustar los resultados empíricos obtenidos a cielo abierto, demostraron una reducción en la conductividad térmica de la masa de acumulación en los hormigones pigmentados. En consecuencia se infiere que existiría en ambos casos una mayor resistencia a la transferencia conductiva del calor respecto al hormigón natural. En consecuencia ante una fuente calórica determinada y características de absorción definidas, una menor conductividad, implica menor difusividad térmica, la que se expresaría en temperaturas más elevadas en los puntos analizados. Los registros de temperaturas, por ejemplo de la cara norte en ambas tecnologías (MAC sólido y mixto) muestran las mayores temperaturas alcanzadas respecto a las de las piezas sin pigmentar.

En cuanto a las absorptancias, también se observan niveles importantes, evitando así la necesidad de pintar las superficies expuestas.

En consecuencia se puede concluir que la incorporación de pigmentos en los hormigones en la masa térmica presenta mejoras térmicas significativas respecto a los hormigones sin pigmentar. Este aditivo, es sencillo de implementar con lo cual puede mejorar la performance de los muros acumuladores de calor sin un costo elevado. Las diferencias de temperaturas alcanzadas pueden influir sustantivamente en la capacidad de acumulación de los MAC, dependiendo de las masas involucradas. Dicha implementación se presenta como una innovación significativa en el diseño de MAC, debido a que se aporta conocimiento respecto a parámetros termo-físicos de los materiales y particularmente en las mejoras relacionadas con la implementación de estos materiales en aplicaciones térmicas y de acumulación de energía.

AGRADECIMIENTOS

Al INTI, Dto. de construcciones y al Ing. Vicente Volantino por dar la posibilidad de realizar los ensayos de conductividad y absorción. Al ing. Zaslaski y la arquitecta Florencia Zaslaski, por colaborar en la construcción de las piezas y el armado de los boxes de medición.

REFERENCIAS

- Alanis, Saravia, Lesino (1978a). Material de alto calor específico para muro Trombe-Michel. Actas de 4ta. Reunión de trabajo de ASADES, La Plata. Pp 241-248.
- Alanis, Saravia, Lesino. 1978b. Propiedades térmicas y ensayo de materiales para acumulación. Actas de 5ta. Reunión de trabajo de ASADES, Córdoba. 67-99.
- Balcomb, J.D., Barker, G., Hancock, C.E. 1998. An Exemplary Building Case Study of the Grand Canyon South Rim Residence. NREL/TP-550-24767, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. Colorado, USA.
- Balcomb, D.; Hedstrom, J.C. 1980. Determining Heat Fluxes from Temperature Measurements in Massive Walls." The 5th National Passive Solar Conference. Amherst, MA, October, 19-26.
- Cabeza Luisa F., Castellón Cecilia, Nogués Miquel, Medrano Marc, Leppers Ron, Zubillaga Oihana, 2007. Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. *Energy and Buildings* 39, 113–119.
- Corinaldesi Valeria, Monosi Saveria, Ruello Maria Letizia (2012), Influence of inorganic pigments' addition on the performance of coloured SCC. *Construction and Building Materials* 30. Pp. 289–293.
- Discoli, San Juan (2010). Muro climatizador Acumulador de Calor Mixto con vainas líquidas estancas. IMPI 20110100010, Oficina de patentes de CONICET.
- Discoli C., Viegas G., San Juan G. (2011). VIVIENDAS BIOCLIMATICAS EN TAPALQUE. Sistema de climatización por muros acumuladores de calor (MAC): Resultados preliminares. *Revista AVERMA*.
- Guerrero, Rosenfeld, Ravella, Cueto (1979). Muro colector acumulador para el programa CESAD. Actas de 5ta. Reunión de trabajo de ASADES, Córdoba. Pp. 491-499.
- Guerrero, Discoli, Rosenfeld, Ravella, Ferreyro. 1984, Prototipo experimental de La Plata: Primera campaña de ensayos de habitabilidad y comportamiento energético. Actas de 9na. Reunión de trabajo de ASADES, San Juan. 113-120.
- Grossi Gallegos y Righini (2007). Atlas de energía solar de la República Argentina.
- IAS-FIPE-IIPAC (2009). La casa solar de La Plata. Editorial Paidea. La Plata Argentina.
- Khalifa Abdul Jabbar N., Abbas Ehsan F. 2009. A comparative performance study of some thermal storage materials used for solar space heating. *Energy and Buildings* 41, 407–415.
- Lesino, Ovejero, Saravia (1978). Anteproyecto y análisis térmico de una vivienda con uso de energía solar para la Puna. 4ta. Reunión de trabajo de Energía solar, ASADES. La Plata, Argentina. Pp.269-305.
- Lesino, Requena, Saravia, Fontanilla, Echazú (1981). Edificios solares en la Puna: Estado de avance de su construcción y modelización. 7ma. Reunión de trabajo de Energía solar, ASADES. Argentina. Pp.138-153.
- Pomianowska Michal, Heiselberga Per, Zhang Yinping. (2013). Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings. *Energy and Buildings* 67, 56–69.

- San Juan, Discoli, Viegas, Ferreyro, Rodriguez (2010). Proyecto de viviendas bioclimáticas de interés social. Tapalqué, provincia de Buenos Aires. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 14, 2010. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184. Pp 5.81 a 5.88.
- Torcellini, P.; Long, N.; Pless, S.; Judkoff, R. (2004). Evaluation of the Low-Energy Design and Energy Performance of the Zion National Park Visitor Center. NREL Report No. TP-550-34607. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. Colorado, USA.
- Zalewski L., Chantant M., Lassue S., Duthoit B. (1997). Experimental thermal study of a solar wall of composite type. Energy and Buildings 25, 7-18.
- Zhang Chengbin, Chen Yongping, Wu Liangyu, Shi Mingheng. (2011). Thermal response of brick wall filled with phase change materials (PCM) under fluctuating outdoor temperatures. Energy and Buildings 43, 3514–3520.

ABSTRACT

The work exposes the results of Heat Storage Walls (HSW) testing for winter air conditioning. They are made with solid concrete and mixed concrete (concrete plus water). The walls are modular and they are made for precast pieces of 1.2 meters x 0.24 meters x 0.35 meters. The thermal performance of both types of wall is compared from comprehensive pigmentation components of HSW modular pieces. Assays are made in open-air laboratory “boxes” for the purposes of evaluating the reached temperatures in the mass storage. From the same, and since there are no thermo-physical values for pigment applications, the evaluation of thermal capacity of pigmented concrete in the INTI Laboratory was considered. A guarded hot plate system and absorbance’s assays was used. The results shows that the temperatures reached in HSW pieces with comprehensive pigmentation are higher than those non-pigmented; in addition, laboratory tests shows that thermal conductivity is smaller by incorporating different proportions of pigment in the thermal mass, while solar absorptance increases.

Keywords: Thermal solar energy, solid and mixed concrete, carbon and oxide black comprehensive pigmentation.