

Partially Composite Concrete Sandwich Wall Panels

What is “percent composite”?

by Marc Maguire and Fray F. Pozo-Lora

Insulated concrete wall panels (ICWPs) are produced with a thermal insulation layer between two layers of concrete (Fig. 1). The concrete layers are interconnected by metallic, polymer, or fiber-reinforced polymer (FRP) wythe connectors passing through the insulation. Well-detailed ICWPs can offer a blend of thermal, aesthetic, and structural efficiencies that no other wall systems can provide:

- Continuous edge-to-edge insulation with minimal thermal bridging¹;
- A wide selection of aesthetic options, including colored concrete, custom surfaces cast on form liners, and surfaces with embedded thin brick; and
- Resistance to gravity loads, wind loads, and seismic effects.

These features make ICWPs attractive cladding options for many building types, including schools, hospitals, homes, and data centers. Thus, ICWPs provide a growing market opportunity for the precast and tilt-up concrete industries.

Many ICWPs are noncomposite—the interior concrete layer is designed to resist all gravity and lateral loads, and the exterior concrete layer is designed to protect the insulation from the environment and provide an aesthetically appealing finish. However, the precast and tilt-up concrete sectors have witnessed an increasing trend for ICWPs to be designed as partially composite sandwich wall panels, in which enough shear resistance is provided within the insulation layer to allow bending effects to be resisted by a combination of flexural and axial forces in the two concrete layers. This results in a structurally efficient panel, but it requires that the wythe connectors passing through the insulation must resist high shear forces. Such wythe connectors are proprietary components that are not covered within the ACI 318 Code,² so connector-system manufacturers provide design engineers with recommended design procedures.

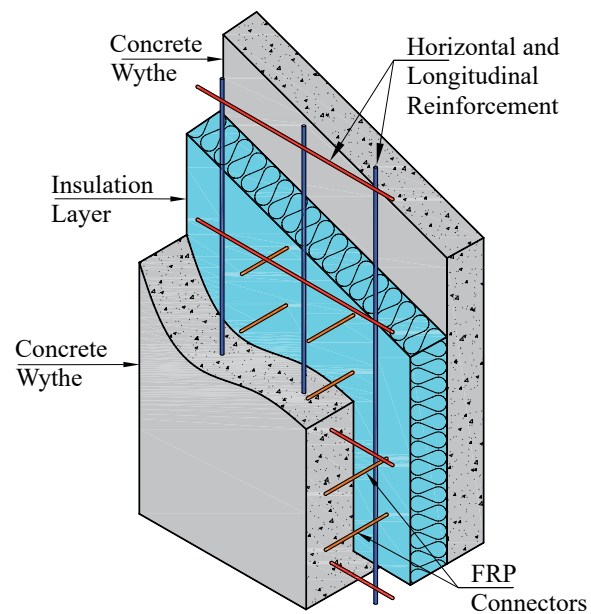


Fig. 1: General configuration of an ICWP, showing two concrete layers (wythes), an interior insulation layer, and wythe connectors

In 1997 and 2011, the PCI Precast Insulated Wall Panel Committee published a state-of-the-art report that outlines current practices for design and detailing as well as stressing, bracing, and erection of ICWPs.^{3,4} However, the report does not provide a design methodology applicable to all wythe connection systems.

Thus, while partially composite ICWP structures have reached unprecedented heights,⁵ many engineers report being unfamiliar with certain aspects of design. This article seeks to provide guidance on one of the most common questions asked

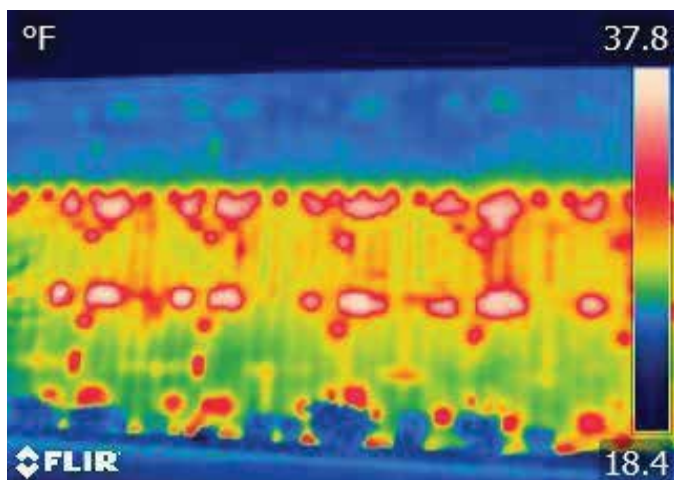


Fig. 2: A thermogram can provide evidence of thermal bridging in an ICWP. The white zones (encircled by red) are almost 20°F (11°C) warmer than the blue zones, indicating that heat from the building interior is being rapidly transmitted to the cooler exterior of the building

by these engineers: What does it mean for a panel to be partially composite? In other words, what is “percent composite”?

Form and Function

According to Collins,⁶ ICWPs were constructed in the United States as early as 1906. Some were produced by placing a 2 in. (50 mm) concrete layer, a 2 in. sand layer, and a 2 in. concrete layer on a tilting bed. The two concrete layers were tied with wires or reinforcement, so they remained spaced apart as the sand was washed away with water as the panel was tilted. The resulting air gap created the insulating layer. It is not known if the connectors between the wythes resulted in any composite action.

Collins⁶ further noted that ICWPs produced in the 1950s included steel wythe connectors resembling bar joists. As such, they clearly provided sufficient shear stiffness and strength to ensure highly composite action. While carbon steel connectors were used ubiquitously in the United States until the early 2000s, their use has since declined in favor of FRP connectors because FRPs produced with glass, carbon, or basalt fibers have lower thermal conductivities than steel connectors. Until the early 2000s, wythe connectors used in Europe were almost exclusively stainless steel. Not only is stainless steel corrosion-resistant, it has about half the thermal conductivity of carbon steel. However, because FRP wythe connectors have even lower thermal conductivity, they have become common in Europe as well.

Figure 2 shows evidence of thermal bridging caused by penetrations of the insulation in an ICWP. In addition to reducing the overall thermal resistance (R-value) of a wall panel, thermal bridges can result in condensation spots. A wall using FRP connectors will have a negligible drop in the effective R-value, and, if properly detailed, condensation will

be minimized.¹ As energy codes become more stringent and include formal provisions limiting thermal bridging, ICWPs with continuous insulation penetrated by only FRP wythe connectors can be expected to continue to gain in popularity.

Design of ICWPs

Noncomposite ICWPs are commonly designed under the assumption that all applied forces are resisted by the interior, structural wythe. Thus, the wythe connectors are generally designed to transfer self-weight and lateral loads from the exterior wythe to the interior wythe (the wythe connectors will not transfer the weight of the exterior wythe if it bears on supports). The connectors in noncomposite ICWPs have insufficient stiffness to create composite action in the panel, so bending forces applied to the panel do not result in axial forces in the concrete wythes.

Partially composite ICWPs incorporate wythe connectors that have sufficient stiffness to create some degree of composite action in the panel, so bending forces applied to the panel result in axial forces in the concrete wythes. The literature shows that analysis of partially composite ICWPs is more complex than that of solid walls or noncomposite ICWPs.⁷⁻⁹ Connector manufacturers typically provide design assistance to the specialty engineer working for the panel producer and the engineer in charge of the project (commonly known as the engineer of record [EOR]).

Most connector manufacturers provide the design engineer with the section properties for a partially composite panel, and engineers use these properties the same as they would use section properties for design of a solid panel. For instance, the manufacturer might provide a partially composite section modulus S_{PC} for calculating elastic stresses, a partially composite moment of inertia I_{PC} for calculating deflections, or a partially composite nominal moment $M_{n,PC}$ for calculating flexural strength. While these parameters would be based on tests and/or detailed analyses, S_{PC} and I_{PC} would reflect the panel behavior under service loads and $M_{n,PC}$ would be used at the strength limit state. It is important for the engineer to recognize that when using partially composite properties, the percentages of composite action for cracking and deflections are rarely the same and are often vastly different from the percentage of composite action for moment capacity.

Most partially composite sandwich wall panels are designed within the elastic range, including incorporation of $P\Delta$ effects per ACI 318-14, Commentary Section R6.7.1,² under factored loads. While there is growing interest within the plant-cast and site-cast precast concrete sectors to enable routine design based on cracked sections, no design standards are currently available. Additional checks must be made to ensure that the connectors will not exhibit excessive deformations or fail under factored loads. However, it is not possible to discuss the full design process for an ICWP in this article. Rather, this article is intended to help engineers understand the percent composite action approach that is common to contemporary design.

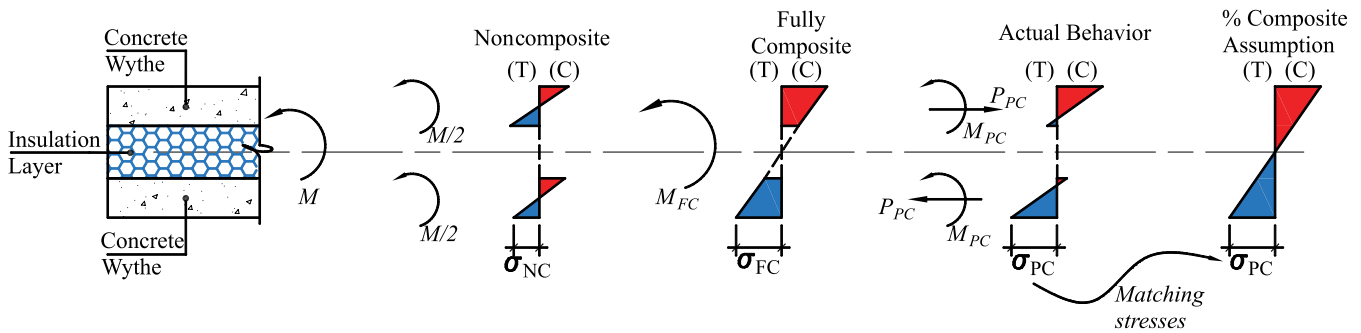


Fig. 3: Stress distributions through panel depth for noncomposite, fully composite, and partially composite panels. Partially composite panel behavior is commonly approximated using the percent composite approach. More detailed models and tests show that the actual behavior is more complex

What is percent composite?

Most engineers designing partially composite sandwich wall panels are familiar with the concept of determining stresses, deflection, and strength of a partially composite panel by assigning section properties as a percentage of commonly calculated parameters. Although it is not strictly correct, this concept allows more rapid calculations than the complex techniques present in the literature. Several design software packages, like LECwall (www.loscheng.com/lecwall.html) and Erickson Wall (www.erikssonsoftware.com), allow inputs for percent composite action.

In the remainder of this article, the percent composite action is defined as an interpolation between noncomposite and fully composite behavior. Others might define percent composite as a percentage of a fully composite property (for example, gross moment of inertia), so it is important to communicate with the connector manufacturer and software developer to determine what is meant by percent composite.

For a solid wall, the section modulus S is typically computed using the moment of inertia I and distance from the neutral axis and the outer fiber c , but one cannot use this relationship for S_{PC} and I_{PC} to compute partially composite effects. While an I_{PC} can be established for computing deflections and an S_{PC} can be established for computing stresses, I_{PC} and S_{PC} are not directly related, so both are generally provided. Also, the percentages for S_{PC} are typically different from the percentages for I_{PC} , and the percentage for I_{PC} is usually smaller than the percentage for S_{PC} (both are typically below 50%). Interestingly, the percent composite for $M_{n,PC}$ is typically 70% or greater. In many cases, it reaches 100%.

For calculating stresses, percent composite is meant to be used along with the Euler-Bernoulli beam theory calculation:

$$\sigma = \frac{M}{S_{PC}} \quad (1)$$

where σ is the stress caused by the moment M . For calculation of deflections, familiar elastic relationships are used—like the following for a uniformly loaded beam:

$$\delta = \frac{5wl^4}{384EI_{PC}} \quad (2)$$

where δ is the deflection caused by a uniformly distributed load w applied to a panel of length l with elastic modulus E . While these equations may imply that a partially composite wall panel behaves like a solid (Euler-Bernoulli) beam, this is not the case.

Figure 3 illustrates elastic stress distributions for noncomposite, fully composite, and partially composite ICWPs subjected to bending. The wythe connectors in a noncomposite ICWP have insignificant stiffness. Because no shear is transferred between the concrete layers, each layer resists the applied load by bending about its centroidal axis. In contrast, the wythe connectors in a fully composite ICWP have enough stiffness to force plane sections to remain plane. Thus, the fully composite ICWP has a continuous and linear stress distribution that can be analyzed using beam theory. The wythe connectors in a partially composite ICWP can transfer shear between the concrete layers—each layer will exhibit a linear stress distribution that is a function of bending within the wythe and an axial load that is a function of the shear transfer across the insulation. The percent composite assumption effectively turns the partially composite behavior into a solid panel analogy. If the percentage is correctly determined, only the maximum tensile and compressive stress will be predicted.

Clearly, the percent composite approach is an analogy. While it is intended to increase ease of design using familiar concepts, it does not truly describe the partially composite phenomenon. For instance, one cannot calculate concrete stresses at the insulation interface using a percent composite model unless specifically supplied an appropriate section property. Further, estimation of percent composite for panels with asymmetric wythes or loading may require a more complex analysis, although the engineer may conservatively assume weaker properties or smaller dimensions. The following section outlines how percent composite is calculated and provides resources for the practicing engineer to compute percent composite.

How is percent composite computed?

The literature on sandwich panels and ICWPs shows that the analysis of ICWPs can be achieved in many ways. An early approach for ICWP analysis was developed by Holmberg and Plem,¹⁰ but it is largely considered too complicated for design. Other approaches, including proprietary approaches, exist for specific connector types. Several contemporary research programs have developed generalized approaches⁷⁻⁹ as well that can handle the specific ICWP configuration, but they are often limited to simple situations.

The computation method used to determine how the percent composite properties are accomplished varies between connector manufacturers. The most common and easiest to understand is a matrix analysis approach, wherein the panel is modeled as a series of beam elements using gross wythe properties and connector elements (Fig. 4). The element choice for the connectors can vary. Some connector

manufacturers use truss elements to discretely model the diagonals with the gross properties of the connectors; other manufacturers use calibrated shear truss beam elements (that is, they model the ICWP as a Vierendeel truss); whereas still others use a shear spring element that can mimic the response of the specific wythe connector based on test data. It is anticipated that the shear spring element or something similar will begin to become the standard as several ongoing research efforts are underway that use this approach.

Using one of the analytical approaches mentioned previously, one can estimate stresses and deflections of an ICWP assembly. The percent composite will be a function of these values and the associated parameters for a fully composite section and a noncomposite section. Figure 5 illustrates the steps for calculation of percent composite for estimating midspan deflection and elastic stresses from a model. Alternatively, a company may have interpolated such information from test results. Often, the connector supplier performs

computations for the blue-boxed portion of Fig. 5 and provides the engineer the partially composite properties or percent composite for use in the red-boxed section of Fig. 5.

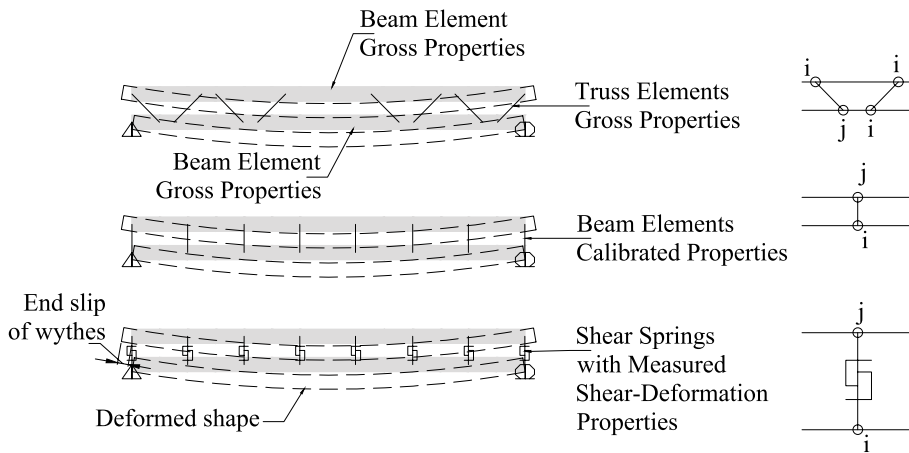


Fig. 4: Possible configurations of matrix analysis models, showing connectors modeled as truss elements, bending elements (web members in a Vierendeel truss), and shear springs

How does percent composite vary?

A single connector type installed at a prescribed spacing (for example, one connector per 8 ft² [0.75 m²] of insulation area) is unlikely to maintain the same level of composite action in panels with different geometries. Obviously, more connectors, stiffer/

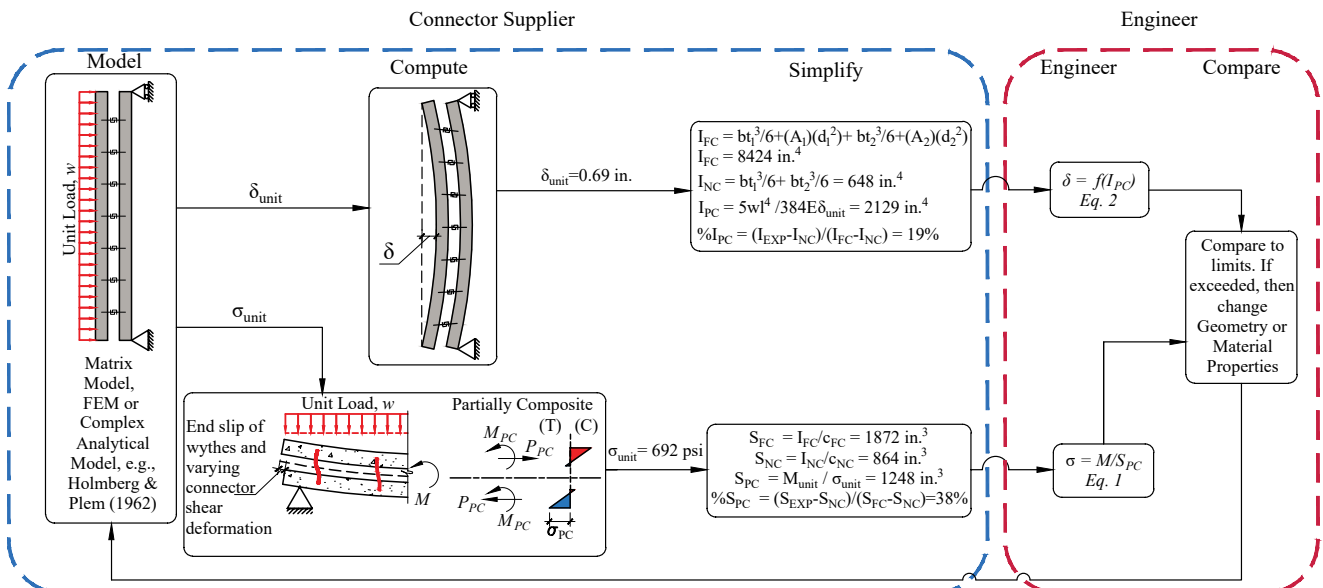
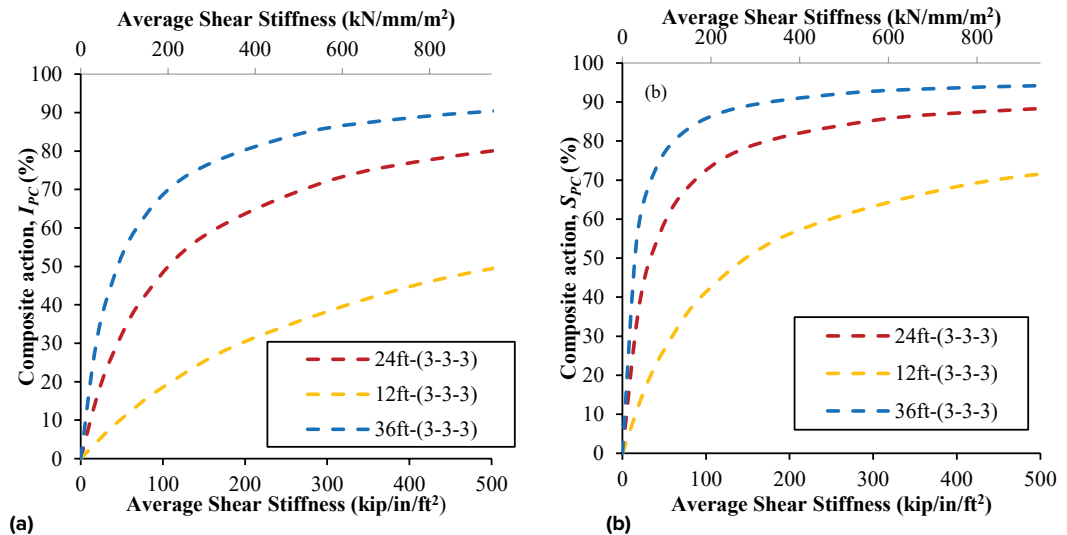


Fig. 5: General example of how percent composite is calculated from a complex analysis method

Fig. 6: Percent composite action:
(a) percent I_{PC} versus average shear stiffness;
and (b) percent S_{PC} versus average shear stiffness for 12, 24, and 36 ft long panels. A 3-3-3 panel has two 3 in. thick concrete layers and a central 3 in. thick insulation layer (Note: 1 ft = 0.3 m)



stronger connectors, or strategically placed connectors will boost composite action. Panel length is also an important factor, as it affects the deformation of the connectors under a given loading. Figure 6 demonstrates how the percent composite action will increase as the average connector stiffness and panel length increase. Furthermore, the plot shows that longer panels can exhibit higher percent composite action for the same average connector stiffness. This is because longer panels generate more interwythe deformation and force transfer for a given load. This plot was constructed for an ICWP with two 3 in. (75 mm) concrete wythes and one 3 in. insulation layer and spans of 12, 24, and 36 ft (3.7, 7.3, and 11 m) based on beam-spring models as used by some connector suppliers and outlined in Al-Rubaye et al.⁷ Typical shear stiffnesses provided by manufacturers tend to be less than 150 kip/in. per ft² insulation area around the connector (189 kN/mm per m² insulation area around the connector).

Panel openings for fenestration are also critical as they displace both concrete and wythe connectors. Further, some manufacturers will increase the number of connectors near the ends of the panel to increase the composite action.

Challenges

While the percent composite approach is simple for the engineer, arriving at percentages that are usable in design is a somewhat challenging task that is generally undertaken by the connector manufacturer.

Other design issues that are often undertaken with the aid of the connector manufacturer include estimating thermal bowing and axial load effects. Because the wythe connector industry is still highly proprietary, many of the connector manufacturers have considerable structural performance information that is yet considered proprietary. While contemporary partially composite ICWPs have not been around long, they do create durable and efficient structures that have been performing as expected throughout the United States and elsewhere. The industry recognizes that the percent

composite analogy is convenient for design but ultimately will move away from it to more robust, nonproprietary methods developed by standards organizations.

Conclusions

Design of ICWPs resides outside of the current building code provisions, but such structures have been and are being designed and built. The behavior of an ICWP is largely a function of the wythe connector stiffness and strength, so it is critical that a designer works with the connector supplier to arrive at a safe and economical solution.

The percent composite analogy is adequate in many respects and has served the industry well, even as the industry moves toward more robust analysis techniques. This analogy enables designers of partially composite ICWPs to largely follow the design process for a solid wall. However, the engineer must be aware of the limitations of this approach and the various factors that affect percent composite value. To learn more about ICWPs and obtaining percent composite information, readers should review the literature cited in this article.

References

1. Sorensen, T.J.; Thomas, R.J.; Dorafshan, S.; and Maguire, M., "Thermal Bridging in Concrete Sandwich Walls," *Concrete International*, V. 40, No. 10, Oct. 2018, pp. 45-49.
2. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 519 pp.
3. PCI Committee on Precast Sandwich Wall Panels, "State-of-the-Art of Precast/Prestressed Sandwich Wall Panels," *PCI Journal*, V. 42, No. 2, Mar.-Apr. 1997, pp. 93-134.
4. PCI Committee on Precast Sandwich Wall Panels, "State of the Art of Precast/Prestressed Concrete Sandwich Wall Panels," second edition, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL, 2011, 63 pp.
5. Rubenstone, J., "E-Commerce Logistics Test Limits of Tilt-Up Construction," *Engineering News-Record*, Jan. 19, 2019, www.enr.com/articles/46198-e-commerce-logistics-test-limits-of-tilt-up-construction.

6. Collins, F.T., "Precast Concrete Sandwich Panels for Tilt-Up Construction," *ACI Journal Proceedings*, V. 51, No. 10, Oct. 1954, pp. 149-164.

7. Al-Rubaye, S.; Sorensen, T.; Thomas, R.J.; and Maguire, M., "Generalized Beam-Spring Model for Predicting Elastic Behavior of Partially Composite Concrete Sandwich Wall Panels," *Engineering Structures*, V. 198, Nov. 2019, Article 109533.

8. Gombeda, M.J.; Trasborg, P.; Naito, C.J.; and Quiel, S.E., "Simplified Model for Partially-Composite Precast Concrete Insulated

Wall Panels Subjected to Lateral Loading," *Engineering Structures*, V. 138, May 2017, pp. 367-380.

9. Tomlinson, D., and Fam, A., "Axial Load-Bending Moment-Interaction Diagram of Partially Composite Precast Concrete Sandwich Panels," *ACI Structural Journal*, V. 115, No. 6, Nov. 2018, pp. 1515-1528.

10. Holmberg, Å., and Plem, E., "Behaviour of Load-Bearing Sandwich-Type Structures," *Bygghforskningen*, Issue 49, Sweden, 1965, 96 pp.

Selected for reader interest by the editors.



Marc Maguire is an Assistant Professor in the Durham School of Architectural Engineering and Construction at the University of Nebraska–Lincoln, Lincoln, NE. His recent research has been on concrete sandwich wall panels as well as fiber-reinforced concrete, rapid-setting concrete, and bridge design. He is a member of the PCI Precast Insulated

Wall Panels Committee. He received his BS and MS from the University of Nebraska–Lincoln and his PhD from Virginia Tech, Blacksburg, VA.



Fray F. Pozo-Lora is a Graduate Research Assistant and PhD Student in the Durham School of Architectural Engineering and Construction at the University of Nebraska–Lincoln. His research is focused on precast concrete structures and temperature loads on sandwich panels. He received his BS from the Universidad Autonoma de Santo Domingo, Santo Domingo, Dominican

Republic, and his MS from Utah State University, Logan, UT.



JOIN TODAY!
ACI CHAPTERS

300+ Professional and Student Chapters

www.concrete.org/chapters



Paredes de paneles tipo emparedado, parcialmente compuestos de concreto

¿Qué es el “porcentaje compuesto”?

por Marc Maguire and Fray F. Pozo-Lora

Las paredes de paneles de concreto con aislamiento (ICWP por sus siglas en inglés) se producen con una capa de aislamiento térmico entre dos capas de concreto (Fig. 1). Las capas de concreto están interconectadas por conectores de metal, polímero o polímero reforzado con fibra (FRP) que pasan a través del aislamiento. Los ICWPs bien detallados pueden ofrecer una combinación de eficiencia térmica, estética y estructural que ningún otro sistema de pared puede proporcionar:

- Aislamiento continuo de borde a borde con un mínimo de puentes térmicos¹;
- Una selección amplia de opciones estéticas, que incluyen concreto de color, superficies personalizadas moldeadas y superficies con ladrillo delgado incrustado; y
- Resistencia a cargas gravitacionales, cargas de viento y efectos sísmicos.

Estas características hacen que los ICWPs sean opciones atractivas para fachadas de muchos tipos de edificios, incluyendo escuelas, hospitales, hogares y centros de datos. Por lo tanto, los ICWPs brindan una oportunidad de mercado creciente para las industrias del concreto prefabricado y construcción con muros levantados (tilt-up).

Muchos ICWPs no son compuestos – la capa de concreto interior está diseñada para resistir todas las cargas gravitacionales y laterales, y la capa de concreto exterior está diseñada para proteger el aislamiento del medio ambiente y proporcionar un acabado estéticamente atractivo. Sin embargo, los sectores de concreto prefabricado y tilt-up han sido testigos de una tendencia creciente para que los ICWPs se diseñen como paredes de paneles tipo emparedado, parcialmente compuestos, en los que se proporciona suficiente resistencia de cortante dentro de la capa de aislamiento, para permitir que los efectos de flexión sean resistidos por una combinación de flexión y fuerzas axiales en las dos capas de concreto. Esto da como resultado un panel

estructuralmente eficiente, pero requiere que los conectores que pasan a través del aislamiento resistan fuerzas de cortante elevadas. Estos conectores son componentes patentados que no están cubiertos por el Código ACI 318,2 por lo que los fabricantes de sistemas de conectores proporcionan a los ingenieros de diseño los procedimientos de diseño recomendados.

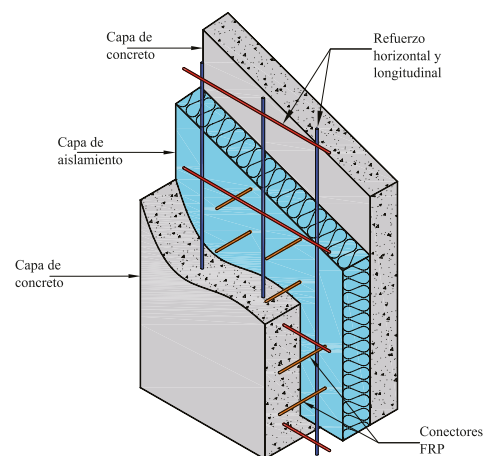


Fig. 1: Configuración general de un ICWP, que muestra dos capas de concreto (wythes), una capa de aislamiento interior y conectores entre capas.

En 1997 y 2011, el Comité de Paredes de Paneles Aislados Prefabricados de PCI publicó un informe de vanguardia que describe las prácticas actuales para el diseño y el detallado, así como para el refuerzo, arriostamiento y montaje de los ICWPs.^{3,4} Sin embargo, el informe no proporciona una metodología de diseño aplicable a todos los sistemas de conexión.

Por lo tanto, aunque las estructuras de los ICWPs parcialmente compuestos han alcanzado logros sin precedentes,⁵ muchos ingenieros informan que no están familiarizados con ciertos aspectos del diseño. Este artículo busca brindar orientación sobre una de las preguntas más comunes que hacen estos ingenieros: ¿Qué significa que un panel sea parcialmente compuesto? En otras palabras, ¿qué es el "porcentaje compuesto"?

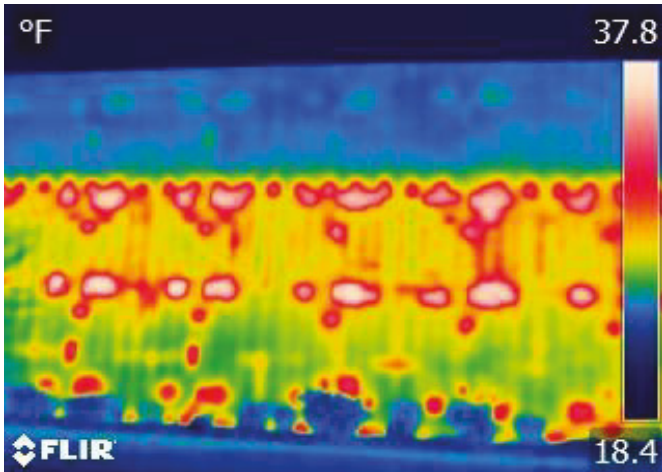


Fig. 2: Un termograma puede proporcionar evidencia de puentes térmicos en un ICWP. Las zonas blancas (rodeadas de rojo) son casi 20°F (11°C) más cálidas que las zonas azules, lo que indica que el calor del interior del edificio se está transmitiendo rápidamente al exterior más frío del edificio.

Forma y función

Según Collins⁶, se construyeron ICWPs en los Estados Unidos ya en 1906. Algunos se fabricaron colocando una capa de concreto de 2 pulgadas (50 mm), una capa de arena de 2 pulgadas y una capa de concreto de 2 pulgadas en una cama. Las dos capas de concreto fueron atadas con alambres o refuerzo, por lo que permanecieron espaciadas mientras la arena era lavada con agua mientras se inclinaba el panel. El espacio de aire resultante creaba la capa aislante. Se desconoce si los conectores entre las capas dieron como resultado una acción compuesta.

Collins⁶ señaló además que los ICWPs fabricados en la década de 1950, incluían conectores de acero que se asemejan a vigas de barra. Como tales, claramente proporcionaron suficiente fuerza y resistencia de cortante para garantizar una apreciable acción compuesta. Si bien los conectores de acero al carbono fueron usados de manera ubicua en los Estados Unidos, hasta principios de los años 2000, su uso ha disminuido a favor de los conectores de FRP (por sus siglas en inglés); debido a que son producidos con fibras de vidrio, carbono o basalto tienen conductividades térmicas más bajas que los conectores de acero. Hasta principios de la década de 2000, los conectores de capas utilizados en Europa eran casi exclusivamente de acero inoxidable. El acero inoxidable no solo es resistente a la corrosión, sino que tiene aproximadamente la mitad de la conductividad térmica del acero al carbono. Sin embargo, debido a que los conectores FRP de capas tienen una conductividad térmica aún menor, también se han vuelto comunes en Europa.

La Figura 2 muestra evidencia de puentes térmicos causados por penetraciones del aislamiento en un ICWP. Además de reducir la resistencia térmica general (valor R) de un panel de pared, los puentes térmicos pueden provocar puntos de condensación. Una pared que usa conectores de FRP tendrá una caída insignificante en el valor R efectivo y, si se detalla adecuadamente, la condensación se minimizará¹. A medida que los códigos de energía se vuelven más estrictos e incluyen disposiciones formales que limitan los puentes térmicos, los ICWPs con aislamiento continuo; penetrados solo por conectores FRP de capa, continuarán ganando popularidad.

Diseño de ICWPs

Los ICWPs no compuestos se diseñan comúnmente bajo el supuesto de que todas las fuerzas aplicadas son resistidas por la capa estructural interior. Por lo tanto, los conectores de capa generalmente están diseñados para transferir el peso propio y as cargas laterales desde la capa exterior a la capa interior (los conectores de capa no transferirán el peso de la capa exterior si se apoya en soportes). Los conectores, en los ICWPs no compuestos, tienen una rigidez insuficiente para crear una acción compuesta en el panel, por lo que las fuerzas de flexión aplicadas al panel, no resultan en fuerzas axiales en las capas de concreto.

Los ICWPs parcialmente compuestos incorporan conectores de capa que tienen suficiente rigidez para crear cierto grado de acción compuesta en el panel, por lo que las fuerzas de flexión aplicadas al panel, dan como resultado fuerzas axiales en las capas de concreto. La literatura muestra que el análisis de ICWPs parcialmente compuestos es más complejo que el de paredes sólidas o ICWPs no compuestos.⁷⁻⁹ Los fabricantes de conectores generalmente brindan asistencia en el diseño; al ingeniero especializado que trabaja para el productor de paneles y al ingeniero a cargo del proyecto (comúnmente conocido como ingeniero de registro [EOR por sus siglas en inglés]).

La mayoría de los fabricantes de conectores proporcionan al ingeniero de diseño, las propiedades de sección para un panel parcialmente compuesto, y ellos utilizan estas propiedades de la misma forma que usarían las propiedades de sección para el diseño de un panel sólido. Por ejemplo, el fabricante podría proporcionar un módulo de sección parcialmente compuesto SPC para calcular los esfuerzos elásticos, un momento de inercia parcialmente compuesto IPC para calcular las deflexiones o un momento nominal parcialmente compuesto Mn, PC para calcular la resistencia a la flexión.

Mientras que estos parámetros se basarían en pruebas y/o análisis detallados, el SPC y el IPC reflejarían el comportamiento del panel bajo las cargas de servicio y el Mn, PC se utilizaría en el estado de límite de resistencia. Es importante que el ingeniero reconozca que cuando se utilizan propiedades parcialmente compuestas, los porcentajes de acción compuesta para agrietamiento y deflexiones, rara vez son los mismos y, a menudo, son muy diferentes del porcentaje de acción compuesta para capacidad de momento.

La mayoría de las paredes de paneles tipo emparedado parcialmente compuestos, están diseñados dentro del rango elástico, incluida la incorporación de efectos $P\Delta$ según el ACI 318-14, sección de comentarios R6.7.1,² bajo cargas mayoradas.

Si bien existe un interés creciente dentro de los sectores de concreto prefabricado, en planta y en obra, para permitir el diseño de rutina basado en secciones agrietadas, actualmente no hay normas de diseño disponibles. Se debe realizar comprobaciones adicionales para garantizar que los conectores no presenten deformaciones excesivas o fallen bajo cargas mayoradas. Sin embargo, no es posible discutir el proceso de diseño completo de un ICWP en este artículo. Más bien, este artículo pretende ayudar a los ingenieros a comprender el enfoque de acción compuesta porcentual que es común en el diseño contemporáneo.

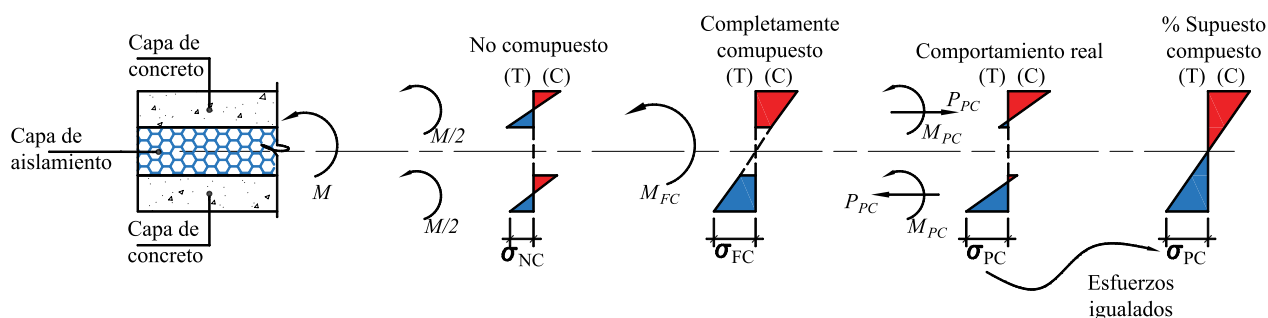


Fig. 3: Distribuciones de esfuerzo a través de la profundidad del panel para paneles no compuestos, completamente compuestos y parcialmente compuestos. El comportamiento del panel parcialmente compuesto se suele aproximar utilizando el enfoque compuesto porcentual. Modelos y pruebas más detalladas muestran que el comportamiento real es más complejo.

¿Qué es el porcentaje compuesto?

La mayoría de los ingenieros que diseñan paredes de paneles tipo emparedado parcialmente compuestos, están familiarizados con el concepto para determinar los esfuerzos, deformaciones y la resistencia de un panel parcialmente compuesto, asignando propiedades de sección como un porcentaje de los parámetros comúnmente calculados. Aunque no es estrictamente correcto, este concepto permite cálculos más rápidos que las complejas técnicas presentes en la literatura.

Varios paquetes de software de diseño, como LECwall (www.loscheng.com/lecwall.html) y Erickson Wall (www.erikssonsoftware.com), permiten entradas para el porcentaje de acción compuesta.

En el resto de este artículo, el porcentaje de acción compuesta se define como una interpolación entre comportamiento no compuesto y completamente compuesto. Otros pueden definir el porcentaje compuesto como un porcentaje de una propiedad totalmente compuesta (por ejemplo, momento de inercia bruto), por lo que es importante comunicarse con el fabricante del conector y el desarrollador de software para determinar qué se entiende por porcentaje compuesto.

Para una pared sólida, el módulo de sección S se calcula típicamente usando el momento de inercia I y la distancia desde el eje neutro a la fibra extrema c , pero no se puede usar esta relación para SPC e IPC para calcular efectos parcialmente compuestos. Si bien, se puede establecer un IPC para calcular las deformaciones y un SPC para calcular los esfuerzos, el IPC y el SPC no están directamente relacionados, por lo que generalmente se proporcionan ambos valores. Además, los porcentajes de SPC suelen ser diferentes de los porcentajes de IPC, y el porcentaje de IPC suele ser menor que el porcentaje de SPC (ambos suelen estar por debajo del 50%).

Curiosamente, el porcentaje compuesto para Mn_{PC} , es típicamente 70% o mayor. En muchos casos llega al 100%.

Para calcular los esfuerzos, el porcentaje compuesto debe utilizarse junto con la teoría de vigas de Euler-Bernoulli:

$$\sigma = \frac{M}{S_{PC}}$$

donde σ es el esfuerzo causado por el momento M . Para el cálculo de deformaciones, se utilizan relaciones elásticas similares, como la siguiente para una viga con carga uniforme

$$\delta = \frac{5wl^4}{384EI_{PC}}$$

Donde δ es la deformación causada por una carga uniformemente distribuida w aplicada a un panel de longitud l con módulo de elasticidad E . Si bien, estas ecuaciones pueden implicar que una pared de paneles parcialmente compuestos se comporte como una viga sólida (Euler-Bernoulli), este no es el caso.

La Figura 3 ilustra las distribuciones de esfuerzos elásticos para un ICWP no compuesto, totalmente compuesto y parcialmente compuesto en flexión. Los conectores de las capas de concreto en un ICWP no compuesto tienen una rigidez insignificante. Dado que no se transfiere cortante entre las capas de concreto, cada capa resiste la carga aplicada por flexión con respecto al eje de su centroide. En contraste, los conectores entre capas de concreto en un ICWP totalmente compuesto tienen suficiente rigidez para forzar a las secciones planas a permanecer planas. Por lo tanto, el ICWP completamente compuesto tiene una distribución de esfuerzos continuos y lineales que se pueden analizar utilizando la teoría de vigas.

Los conectores entre capas de concreto en un ICWP parcialmente compuesto pueden transferir cortante entre las capas de concreto; cada capa exhibirá una distribución de esfuerzos lineal que es función de la flexión dentro de la capa de concreto y una carga axial que es función de la transferencia de cortante a través del aislamiento.

La suposición del porcentaje compuesto convierte efectivamente el comportamiento parcialmente compuesto en una analogía de panel sólido. Si el porcentaje se determina correctamente, solo se predecirán los esfuerzos máximos de tracción y compresión.

Claramente, el enfoque del porcentaje compuesto es una analogía. Si bien está destinado a aumentar la facilidad del diseño utilizando conceptos familiares, no describe realmente el fenómeno parcialmente compuesto.

Por ejemplo, no se pueden calcular los esfuerzos del concreto en la interfaz del aislamiento utilizando un modelo del porcentaje compuesto a menos que se proporcione específicamente una propiedad de sección adecuada. Además, la estimación del porcentaje compuesto para paneles con cargas o capas de concreto asimétricas puede requerir un análisis más complejo, aunque el ingeniero puede asumir conservadoramente propiedades o dimensiones menores.

La siguiente sección describe cómo se calcula el porcentaje compuesto y proporciona recursos para que el ingeniero en ejercicio calcule el porcentaje compuesto.

¿Cómo se calcula el porcentaje compuesto?

La literatura sobre paneles tipo emparedado y los ICWPs muestra que el análisis de los ICWPs se puede lograr de muchas maneras. Holmberg y Plem,¹⁰ desarrollaron un enfoque temprano para el análisis de ICWP, pero es considerado demasiado complicado para el diseño. Existen otros enfoques, incluidos los patentados, para tipos de conectores específicos. Varios programas de investigación contemporáneos también han desarrollado enfoques generalizados⁷⁻⁹ que pueden manejar la configuración específica de ICWP, pero a menudo se limitan a situaciones simples.

El método de cálculo utilizado para determinar cómo se logran las propiedades compuestas porcentuales varía entre los fabricantes de conectores. El método más común y fácil de entender es un enfoque de análisis matricial, en el que el panel se modela como una serie de elementos de viga utilizando las propiedades generales de capas y los elementos conectores (Fig. 4). La elección de elementos para los conectores puede variar. Algunos fabricantes de conectores utilizan elementos de armadura para modelar discretamente las diagonales con las propiedades brutas de los conectores; otros fabricantes utilizan elementos calibrados de viga de armadura de cortante (es decir, modelan el ICWP como una armadura Vierendeel); mientras que otros usan un elemento de resorte de cortante que puede imitar la respuesta del conector de capa específico, basado en datos de prueba. Se anticipa que el elemento de resorte de cortante o algo similar, comenzará a convertirse en la norma, ya que se están realizando varios esfuerzos de investigación en curso que utilizan este enfoque.

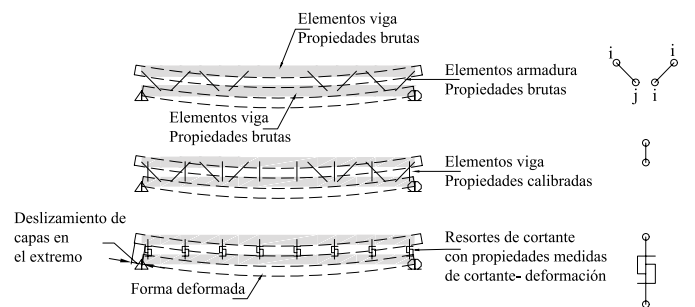


Fig. 4: Posibles configuraciones de modelos de análisis matricial, que muestran conectores modelados como elementos de armadura, elementos de flexión (elementos del alma en una armadura Vierendeel) y resortes de cortante.

Empleando uno de los enfoques analíticos mencionados anteriormente, se pueden estimar los esfuerzos y las deflexiones de un conjunto de ICWPs. El porcentaje compuesto estará en función de estos valores y los parámetros asociados para una sección completamente compuesta y una sección no compuesta.

La Figura 5 ilustra los pasos para el cálculo del porcentaje compuesto para estimar la deflexión en el medio del tramo y los esfuerzos elásticos a partir de un modelo. Alternativamente, una empresa puede haber interpolado tal información de los resultados de ensayos. A menudo, el proveedor del conector realiza cálculos para la parte del recuadro azul de la Fig.5 y proporciona al ingeniero las propiedades parcialmente compuestas o el porcentaje compuesto para su uso en la sección del recuadro rojo de la Fig.5.

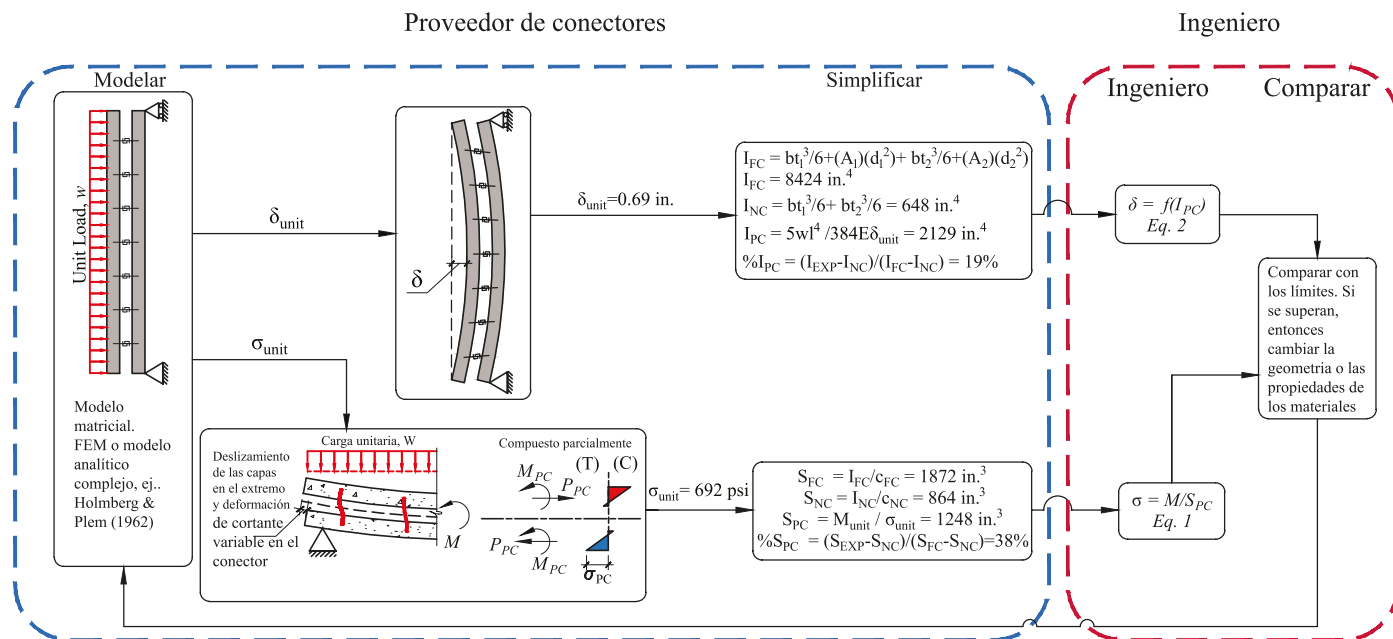


Fig. 5: Ejemplo general de cómo se calcula el porcentaje compuesto a partir de un método de análisis complejo.

¿Cómo varía el porcentaje compuesto?

Es poco probable que un solo tipo de conector instalado a un espaciamiento específico (por ejemplo, un conector por cada 8 ft² [0,75 m²] de área de aislamiento) mantenga el mismo nivel de acción compuesta en paneles con diferentes geometrías. Obviamente, entre más conectores, conectores más rígidos / fuertes o conectores colocados estratégicamente mejorarían, la acción compuesta. La longitud del panel también es un factor importante, ya que afecta la deformación de los conectores bajo una carga determinada. La Figura 6 demuestra como aumentaría el porcentaje de acción compuesta a medida que aumenta la rigidez promedio del conector y la longitud del panel. Además, el gráfico muestra que los paneles más largos pueden exhibir un mayor porcentaje de acción compuesta para la misma rigidez promedio del conector.

Esto se debe a que los paneles más largos generan más deformación y transferencia de fuerza dentro de la capa para una carga determinada. Este gráfico fue construido para un ICWP con dos capas de concreto de 3 in (75 mm), una capa de aislamiento de 3 in y vanos de 12, 24 y 36 ft (3,7, 7,3 y 11 m) basados en modelos de viga-resorte tal como lo utilizan algunos proveedores de conectores y se describe en Al-Rubaye et al.⁷ Las rigideces de cortante típicas proporcionadas por los fabricantes tienden a ser inferiores a 150 kip / in. por ft² de área de aislamiento alrededor del conector (189 kN / mm por m² de área de aislamiento alrededor del conector).

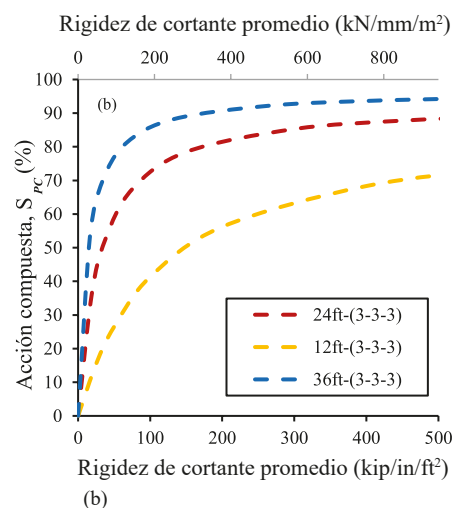
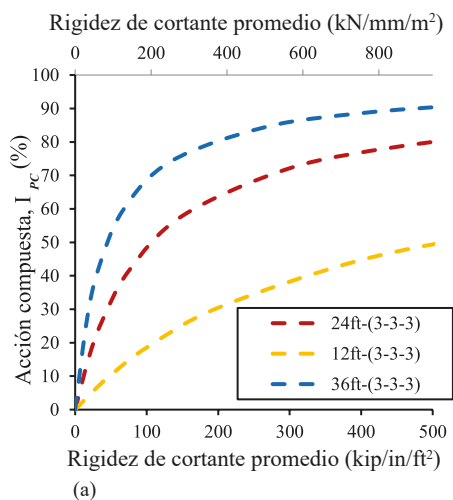


Fig. 6: Porcentaje de acción compuesta:

(a) porcentaje de IPC versus la rigidez de cortante promedio; y (b) porcentaje de SPC versus la rigidez de cortante promedio para paneles de 12, 24 y 36 pies de longitud. Un panel 3-3-3 tiene dos capas de concreto de 3 pulgadas de espesor y una capa central de aislamiento 3 pulgadas de espesor (Nota: 1 pie = 0,3 m)

Las aberturas de los paneles para la fenestración también son críticas, ya que desplazan tanto el concreto como los conectores de capa. Además, algunos fabricantes aumentarán el número de conectores cerca de los extremos del panel para aumentar la acción compuesta.

Retos

Si bien el enfoque compuesto porcentual es simple para el ingeniero, llegar a los porcentajes que se puedan utilizar en el diseño es una tarea algo desafiante que generalmente realiza el fabricante del conector.

Otros problemas de diseño que a menudo se abordan con la ayuda del fabricante del conector incluyen la estimación de los efectos de arqueamiento térmico y carga axial.

Debido a que la industria de los conectores de capa todavía es mayoritariamente patentada, muchos de los fabricantes de conectores tienen una considerable información de desempeño estructural que aún se considera patentada. Si bien los ICWPs contemporáneos parcialmente compuestos no han existido por mucho tiempo, crean estructuras duraderas y eficientes que se han desempeñado como se esperaba en los Estados Unidos y en otros lugares. La industria reconoce que la analogía del porcentaje compuesto es conveniente para el diseño, pero en última instancia se alejará de ella hacia métodos más robustos y no patentados; desarrollados por organizaciones de normas.

Conclusiones

El diseño de los ICWPs está fuera de las disposiciones del código de construcción actual, pero estas estructuras han sido y están siendo diseñadas y construidas. El comportamiento de un ICWP depende en gran medida de la rigidez y resistencia del conector, por lo que es fundamental que un diseñador trabaje con el proveedor del conector para llegar a una solución segura y económica.

La analogía de porcentaje compuesto es adecuada en muchos aspectos y ha servido bien a la industria, incluso cuando la industria avanza hacia técnicas de análisis más robustas. Esta analogía permite a los diseñadores de los ICWPs parcialmente compuestos, seguir en gran medida el proceso de diseño de una pared sólida. Sin embargo, el ingeniero debe conocer las limitaciones de este enfoque y los diversos factores que afectan el valor del porcentaje compuesto. Para obtener más información sobre los ICWPs y obtener información del porcentaje compuesto, los lectores deberían revisar la literatura citada en este artículo.

Referencias

1. Sorensen, T.J.; Thomas, R.J.; Dorafshan, S.; and Maguire, M., "Thermal Bridging in Concrete Sandwich Walls," *Concrete International*, V. 40, No. 10, Oct. 2018, pp. 45-49.
2. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 519 pp.
3. PCI Committee on Precast Sandwich Wall Panels, "State-of-the-Art of Precast/Prestressed Sandwich Wall Panels," *PCI Journal*, V. 42, No. 2, Mar.-Apr. 1997, pp. 93-134.
4. PCI Committee on Precast Sandwich Wall Panels, "State of the Art of Precast/Prestressed Concrete Sandwich Wall Panels," second edition, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL, 2011, 63 pp.

5. Rubenstone, J., "E-Commerce Logistics Test Limits of Tilt-Up Construction," Engineering News-Record, Jan. 19, 2019, www.enr.com/articles/46198-e-commerce-logistics-test-limits-of-tilt-up-construction.
6. Collins, F.T., "Precast Concrete Sandwich Panels for Tilt-Up Construction," ACI Journal Proceedings, V. 51, No. 10, Oct. 1954, pp. 149-164.
7. Al-Rubaye, S.; Sorensen, T.; Thomas, R.J.; and Maguire, M., "Generalized Beam-Spring Model for Predicting Elastic Behavior of Partially Composite Concrete Sandwich Wall Panels," Engineering Structures, V. 198, Nov. 2019, Article 109533.
8. Gombeda, M.J.; Trasborg, P.; Naito, C.J.; and Quiel, S.E., "Simplified Model for Partially-Composite Precast Concrete Insulated Wall Panels Subjected to Lateral Loading," Engineering Structures, V. 138, May 2017, pp. 367-380.
9. Tomlinson, D., and Fam, A., "Axial Load-Bending Moment- Interaction Diagram of Partially Composite Precast Concrete Sandwich Panels," ACI Structural Journal, V. 115, No. 6, Nov. 2018, pp. 1515-1528.
10. Holmberg, Å., and Plem, E., "Behaviour of Load-Bearing Sandwich-Type Structures," Bygghforskningen, Issue 49, Sweden, 1965, 96 pp.

Selected for reader interest by the editors.



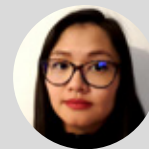
Marc Maguire es un profesor asistente en la Escuela de Ingeniería Arquitectónica y Construcción de Durham en la Universidad de Nebraska – Lincoln, Lincoln, NE. Su investigación reciente se ha centrado en paredes de paneles tipo emparedado de concreto, así como en concreto reforzado con fibras, concreto de fraguado rápido y diseño de puentes. Es miembro del Comité de Paredes de Paneles Aislados Prefabricados del PCI. Recibió su BS y MS de la Universidad de Nebraska – Lincoln y su PhD de Virginia Tech, Blacksburg, VA.



Fray F. Pozo-Lora es un asistente de investigación de posgrado y estudiante de doctorado en la Escuela de Ingeniería Arquitectónica y Construcción de Durham en la Universidad de Nebraska– Lincoln. Su investigación se centra en estructuras prefabricadas de concreto y efectos de temperatura en paneles tipo emparedado. Recibió su BS de la Universidad Autónoma de Santo Domingo, Santo Domingo, República Dominicana, y su MS en la Utah State University, Logan, UT.

Artículo 3.- Correspondió a la Sección Costa Rica.

Título: Paredes de panel tipo emparedado, parcialmente compuestos de concreto



Traductor: Ing. Thyssen Wong



Traductor: Ing. Eduardo Guevara



Revisor técnico y traductor: Ing. Guillermo González Beltrán, Ph.D.