

Disponible en www.hormigonyacero.com

Hormigón y Acero 2019; 70(288):7-19
<https://doi.org/10.33586/hya.2019.004>

Hormigón infraligero: Listo para la práctica*

*Infra-Lightweight Concrete: Ready for practice***

Mike Schlaich^{***,a}, Alex Hückler^b

^a Prof. Dr. Institute of Civil Engineering, Chair of Conceptual and Structural Design, Technische Universität Berlin

^b Prof. Asistente Institute of Civil Engineering, Chair of Conceptual and Structural Design, Technische Universität Berlin

Recibido el 18 de mayo de 2018; aceptado el 4 de febrero de 2019

* Traducción realizada por Abraham Sánchez Corriols y Juan Pablo Osman Letelier del artículo original publicado en la revista alemana "Beton- und Stahlbeton": Schlaich, M. and Hückler, A. (2017), *Infraleichtbeton: Reif für die Praxis*. *Beton- und Stahlbetonbau*, 112: 772–783. doi:10.1002/best.201700046

** Translated by Abraham Sánchez Corriols and Juan Pablo Osman Letelier from the original article published in the German journal "Beton- und Stahlbeton": Schlaich, M. and Hückler, A. (2017), *Infraleichtbeton: Reif für die Praxis*. *Beton- und Stahlbetonbau*, 112: 772–783. doi:10.1002/best.201700046

RESUMEN

Hormigón infraligero: después de diez años de investigación en la *Technische Universität Berlin* (TU Berlin) y tras la construcción de una vivienda piloto hace diez años como prueba de la eficacia de este innovador material, el hormigón infraligero está listo para la práctica. Los riesgos implicados que toda innovación lleva consigo son ahora previsibles. Para aquellos que quieran usar este hormigón estructural de alto rendimiento o investigarlo más a fondo, encontrarán en este artículo un resumen de lo más importante acerca de este material, el cual permite estructuras de hormigón visto que prácticamente no necesitan ninguna medida adicional de aislamiento térmico. Los resultados alcanzados hasta ahora por los autores y la investigación en curso son presentados en detalle. El diseño estructural apropiado con este material y su potencial de forma serán también discutidos, así como los requisitos necesarios para su aprobación, ya que su uso no está cubierto por los Eurocódigos. Finalmente, se presentan algunos edificios de hormigón infraligero construidos hasta ahora y otros que están siendo actualmente planificados.

© 2019 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L.L. Todos los derechos reservados.

PALABRAS CLAVE: hormigón infraligero; diseño estructural; detalles estructurales; aprobación en casos singulares; aplicaciones

ABSTRACT

After ten years of research at the *Technische Universität Berlin* (TU Berlin) and a first house, which has proved itself successful for ten years, *Infra-Lightweight Concrete* is now ready for practice. The risks associated with any innovation are now manageable. For those who want to use or further explore this high-performance concrete as a load-bearing thermal insulation material, this paper first summarizes the most important things about such very light concretes which allow for fair-faced structures without any additional heat insulation measures. The further results of our recent and ongoing research are presented in detail. The material-compatible development of structural details and the design potential of such new concretes are discussed as well as the project-specific approval still required in practice in each individual case. At the end, the paper presents the small number of buildings that have been built until now and are currently being planned.

© 2019 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L.L. All rights reserved.

KEYWORDS: *Infra-Lightweight Concrete*; structural design; structural details; approval in the individual case; application

1. INTRODUCCIÓN - LO MÁS IMPORTANTE A SABER SOBRE HORMIGÓN INFRALIGERO

El hormigón infraligero (ILC) de seguro no promete una revolución en la construcción como la originada por el hormigón

armado alrededor del año 1900 o posteriormente por el hormigón pretensado a mediados del siglo pasado. Sin embargo, es tan ligero y con esto a su vez un excelente aislante térmico, que puede ser usado para la construcción de estructuras de hormigón visto que cumplan con los requisitos actuales de ahorro de energía sin la necesidad de aislamiento adicional. Dichos edificios con muros exteriores, hechos prácticamente de un solo

*** Autor para correspondencia.
 Correo electrónico: mike.schlaich@tu-berlin.de



Fig. 1. Casa construida con hormigón infraligero en Berlín-Pankow (2007).

material mineral ("aislamiento térmico portante") simplifican los detalles estructurales de forma considerable y permiten de este modo un diseño más libre. Este material poroso ofrece una buena climatización de las viviendas. Además es reutilizable, ya que no está adherido de forma permanentemente con otros materiales. La vivienda con muros exteriores de ILC (Fig. 1) construida en Berlín en 2007 [1] muestra además que este material ligero puede resistir sin problemas las diferentes condiciones climáticas.

El hormigón infraligero alcanza actualmente resistencias medias a la compresión de hasta $f_{cm} = 13$ MPa [2], que según los criterios de conformidad corresponde a un LC8/9 permitiendo su uso en edificios de varios pisos. El hormigón infraligero ofrece las ventajas del hormigón estructural, tales como superficies con formas libres en fachadas y hace posible elementos estructurales como por ejemplo vigas perimetrales o dinteles para grandes luces sometidas a flexión. En el marco de un proyecto actual en la TU Berlín (ver sección 2.2.1). Se está ensayando en muros de prueba una mezcla mejorada con una resistencia media a la compresión de una probeta cúbica de hasta 18 MPa con una densidad aparente seca cerca de los 800 kg/m^3 (Fig. 3). Al mismo tiempo, dependiendo de la resistencia, la conductividad térmica puede estar entre $\lambda_w = 0,14$ y $0,19 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, cumpliendo así con la *Energieeinsparverordnung* (EnEV) [3] (Normativa de ahorro de energía) para un edificio con un espesor de muro de aproximadamente 50 a 60 cm. Futuras exigencias más estrictas podrían ser tratadas con la activación del muro.

En lo que respecta a los costes, es difícil establecer una afirmación clara. En Berlín, el hormigón infraligero como "hormigón según sus propiedades" (por ejemplo, especificación de la resistencia a la compresión) es aproximadamente 3 veces más caro que el hormigón normal. Un poco por encima está el precio de un "hormigón según su composición" siendo alrededor de 4 a 5 veces más caro. Esto se debe, por un lado, al elevado precio de las materias primas. Por otro, el material aún

no se encuentra (todavía) lo suficientemente consolidado en el sector de la construcción. Por esta razón, las plantas de hormigón deben recargar sus depósitos según las materias primas requeridas. En un cálculo de los costos en el ciclo de vida útil, ingl.: *Life-Cycle-Costing* (LCC) [4], un muro de hormigón visto hecho de hormigón infraligero es comparable con una fachada estructural de hormigón convencional como un sistema de aislamiento térmico exterior (SATE), especialmente cuando junto al aislamiento térmico también se considera la alta durabilidad del muro monolítico de hormigón. En comparación con sistemas más complejos, como por ejemplo muros de dos capas con aislamiento interior o revestimientos de piedra, el muro de hormigón infraligero es con seguridad más barato.

Una desventaja que cualquier uso del hormigón conlleva es la "huella de carbono" del cemento. La piedra caliza se "desacidifica" a través del calentamiento en la producción de cemento Portland, convirtiéndose en dióxido de calcio activo hidráulicamente y dióxido de carbono. A este contenido de CO_2 asociado a la materia prima se le agrega una parte relacionada con la energía, ya que se consume energía térmica y eléctrica durante el proceso de cocción. En la actualidad (VDZ-Umweltbericht 2015, Tabla 5-2 [5]), por cada tonelada de cemento, se generan unas 0.4 t de CO_2 debido a las materias primas y alrededor de 0.16 t de CO_2 relacionadas con la energía. El mayor consumo de cemento lo tuvo China en 2014, con 2454 millones de toneladas por año (2.º EE. UU., 3.º Europa), mientras que Alemania ocupó el sexto lugar con 27 millones de toneladas con el mayor consumo en Europa. En general, la producción de cemento representa el 7% de las emisiones globales de CO_2 . En el caso del ILC800, con un contenido de cemento de 333 kg/m^3 (Tabla 1), 132 kg de CO_2 están relacionados con la materia prima y 53 kg de CO_2 , con la energía.

Los estudios iniciales por medio de un análisis de ciclo de vida, también conocido como balance ecológico o en inglés *Life Cycle Assessment* (LCA) [4] para la sostenibilidad han dado como resultado que el CO_2 equivalente a una pared exterior

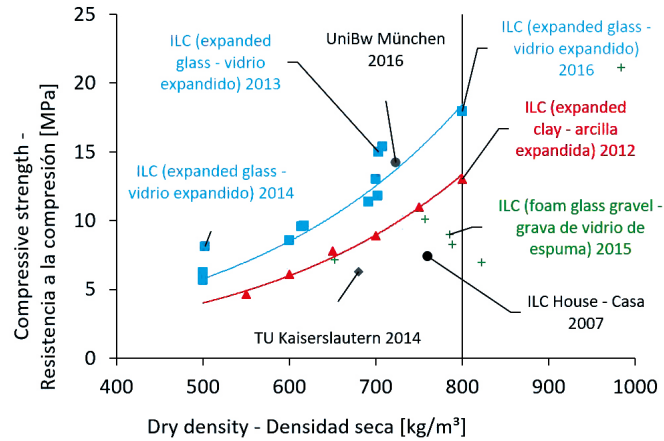


Fig. 2. Resultados de la investigación de la composición de varias mezclas de ILC.

de ILC durante un ciclo de vida es similar al de una pared de hormigón con SATE. Los análisis de ciclo de vida también muestran que, dependiendo de los parámetros seleccionados y de la consideración del *End-of-Life*, se pueden obtener resultados muy diferentes.

En el "sistema alemán de evaluación para la construcción sostenible de edificios" [6], los enfoques de evaluación no parecen ser aplicables para el ILC. Es cuestionable, por ejemplo, cómo el humo de sílice, que a menudo se agrega al ILC, puede usarse razonablemente en el balance de energía, ya que es un material de desecho de la industria del silicio. ¿Qué periodo contable es razonable en el caso de una construcción duradera como la con ILC? ¿Cuál es la vida útil de servicio de un muro de ILC? ¿Cuáles son los intervalos de tiempo realistas para reemplazar una fachada de SATE? ¿Cuáles son los costos de mantenimiento de un muro de ILC?

Como en todas las otras áreas mencionadas aquí, existe una necesidad de investigación y desarrollo. También para que el hormigón infraligero encuentre una manera de entrar en la estandarización, los fundamentos de este material deben seguir siendo investigados. Sin embargo, en la actualidad se ha avanzado tanto, que los muros exteriores de ILC (producidos *in situ* o como piezas prefabricadas) pueden considerarse como una alternativa a los sistemas de muros convencionales. Los resultados obtenidos hasta ahora en la TU Berlin, así como los proyectos de investigación actuales y los planeados para el futuro se presentarán brevemente en la próxima sección.

2. ESTADO ACTUAL DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 Aspectos generales

De acuerdo con el Eurocódigo EC2 [7], la densidad aparente seca del hormigón ligero está entre 800 y 2000 kg/m³. Mientras que los hormigones porosos y espumados muy ligeros han sido utilizados para mampostería durante décadas (la cual debe ser enlucida/protegida después del ensamblaje), el hormigón ligero estructural con una densidad aparente seca menor a 800 kg/m³ prácticamente no ha sido utilizado para elementos estructurales prefabricados de grandes superficies.

Basado en los límites de pesos del EC2 llamamos a un hormigón tan ligero hormigón infraligero [1], ya que su densidad aparente es inferior (lat. infra) a la densidad aparente normal del hormigón ligero.

El hormigón infraligero se logra al reemplazar el árido de roca pesada habitual por uno muy liviano, como arcilla expandida, vidrio expandido, grava de espuma de vidrio, piedra pómez o toba. Mediante el uso de agentes inclusores de aire, la densidad aparente seca se puede reducir aún más a través de una entrada de aire adicional en la matriz de cemento. También se obtienen efectos similares con estabilizadores y una mayor relación agua/cemento (a/c), a través de lo cual el exceso de agua se une primero, dejando poros de aire después del secado. A pesar del contenido de poros de aire del ILC de más del 20%, la matriz porosa está cerrada. La porosidad incluso permite una buena resistencia en ciclos de hielo-deshielo (véase sección 3.2.2). Por lo tanto, hay muchas formas de alcanzar el objetivo. En la Tabla 1 se muestran las composiciones de ILC (densidades aparentes secas $\rho_{tr} < 800 \text{ kg/m}^3$). Aquellos con áridos ligeros (engl.: *lightweight aggregates*, LWA) de arcilla expandida, fueron utilizados en 2007 [1] para la vivienda ya mostrada (en ese momento asesorado por el Prof. HILLEMMEIER de la TU Berlin, y por el Prof. THIENEL de la UniBw München), así como su mejora en varias mezclas de ILC con densidades aparentes secas de entre 600 y 800 kg/m³ [8]. Esto condujo a un estudio exhaustivo sobre el comportamiento a flexión de diferentes configuraciones de vigas dando como resultado el poder ahora dimensionar las vigas de ILC [2].

Para un edificio experimental construido [9] en 2014 en la TU Kaiserslautern, se utilizó hormigón infraligero con una densidad aparente seca de $< 700 \text{ kg/m}^3$ con áridos ligeros de vidrio expandido. La mezcla y los resultados del monitoreo de la construcción se publicaron en 2016 en *Beton- und Stahlbetonbau* por SCHULZE Y BREIT [10]. CALLSEN Y THIENEL [11] desarrollaron una composición basada en una mezcla de arcilla expandida y vidrio expandido para los muros exteriores de una vivienda familiar. La Fig. 2 muestra la eficiencia (resistencia a la compresión *versus* densidad aparente seca) de las composiciones desarrolladas en la TU Berlin en función de los áridos ligeros, así como los resultados obtenidos en Múnich y Kaiserslautern.

En el transcurso de varios proyectos de investigación [12], que condujeron a dos tesis doctorales y un gran número de

trabajos de fin de carrera en el Departamento de diseño Conceptual y Estructural de la TU Berlin, nos hemos acercado al nuevo material. Los resultados, las propiedades de este hormigón y el comportamiento del hormigón infraligero armado se agrupan según estos temas en la sección 3.

2.2 Proyectos actuales de investigación en la TU Berlin

2.2.1 Elementos de hormigón infraligero multifuncional (MultiLC)

En el curso del proyecto de investigación financiado por el Ministerio Federal de Educación e Investigación (BMBF) "MultiLC – Componentes multifuncionales de hormigón ligero con propiedades no homogéneas" [13], elementos exteriores que son agentes de calentamiento, enfriamiento, difusión y a su vez descomponen sustancias contaminantes, se están desarrollando actualmente en cooperación con varios socios de la industria (Heidelberg Cement, Sika Alemania, Transsolar, schlaich bergermann partner). El proyecto está dirigido a una solución general para una construcción eficiente en cuanto a recursos, respetuosa con el medio ambiente, funcional, estética, reciclable y sostenible.

Parte del proyecto consiste en la investigación de los elementos compuestos de ILC800 (cáscara) y ILC600 (núcleo). Después de ensayos preliminares exitosos de pequeño y mediano tamaño (vigas y muros a escala 1:2) de carga y de deformación, se produjeron prototipos 1:1 con secciones transversales en capas (Fig. 3) en la planta de prefabricados (Heidelberger Betonelemente Laußnitz) y fueron analizados en lo referente al ahorro de energía en la TU Berlin. La producción mediante el proceso "húmedo sobre húmedo" permitió que se consiguiera una unión suficiente entre capas, de modo que no se produjera delaminación debido a la contracción o la tensión externa aplicada en las pruebas preliminares. En función del efecto de los ciclos de temperatura entre -20°C y $+50^{\circ}\text{C}$ en base a el muro de prueba mostrado en la Fig. 3, además de la durabilidad, se determina experimentalmente un valor U "efectivo", que resulta de la activación del muro. El agua fluye a través de las esteras del tubo capilar bajo la superficie del elemento con temperaturas de flujo de 5°C , 10°C y 15°C . El valor U "efectivo" esperado es entonces entre $U_{\text{eff}, 15^{\circ}\text{C}} = 0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ y $U_{\text{eff}, 5^{\circ}\text{C}} = 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ en lugar del valor U estático de $U_{\text{bem}} = 0,38 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Ya para $U = 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, se ha alcanzado el valor de referencia de EnEV para muros exteriores. Las aguas grises y/o las aguas subterráneas se pueden usar como fuente de calor en el edificio real, teniendo en cuenta que la temperatura de flujo depende de la profundidad debajo el nivel del suelo y la región. A una profundidad de 20 m, por ejemplo, la temperatura del agua subterránea en Berlín se sitúa en torno a los 12°C , y en el campo apenas por debajo de los 9°C [14]. El consumo energético de la bomba para la activación del aislamiento térmico es menor de $0,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$.

2.2.2 Muro barra

En el caso de "muros barra" (Fig. 4), la transferencia vertical de la carga es principalmente transferida por núcleos esbeltos, hechos de hormigón de alta resistencia o de la misma armadura. Con este novedoso método de construcción, el ILC estabiliza el núcleo de carga contra el pandeo perpendicular al eje del elemento estructural. Esto da como resultado un diseño que tiene en cuenta las ventajas y desventajas de los materiales

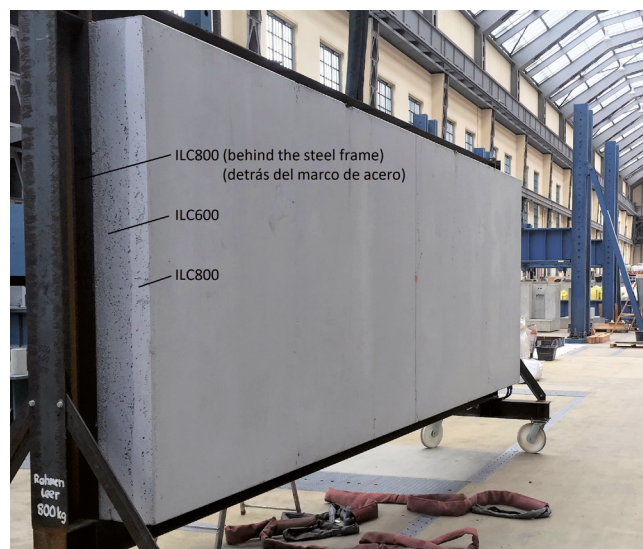


Fig. 3. Muro de ensayo (2 m x 6 m) de hormigón en capas, ILC800 (cáscara) y ILC600 (núcleo) en la nave de ensayos de la TU Berlin.

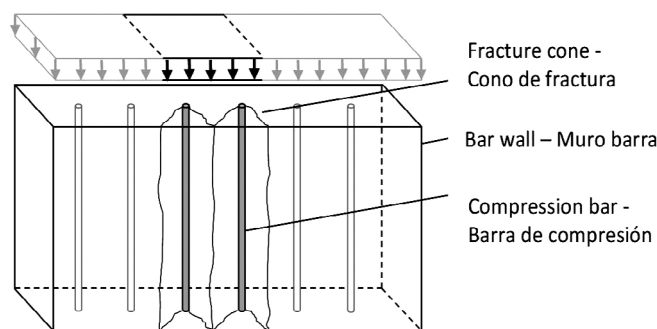


Fig. 4. Muro barra con núcleo de carga de UHPC y cono de rotura de ILC [15].

considerados y los utiliza de forma óptima.

El objetivo es desarrollar un concepto de construcción para los elementos verticales con el fin de hacer una contribución a la eficiencia energética en la construcción. Con este método de construcción monolítico, el ILC continuará cumpliendo su función de aislamiento térmico y protección contra la intemperie, pero limitada a solo estar involucrada en la transferencia de carga vertical. En particular, para estructuras que se encuentran sobre el límite para edificios de gran altura (altura de rescate de más de 23 metros), los muros barra pueden transferir las altas cargas verticales en los pisos inferiores.

2.2.3 Prefabricación de componentes de ILC (ILVO)

Debido a la urgente demanda actual en Alemania de construcción de viviendas, la construcción prefabricada ofrece una serie de ventajas para la nueva construcción residencial como un método de construcción económico, eficiente y bajo en emisiones. Con piezas prefabricadas de gran tamaño, que tienen su superficie por ambos lados listas para su uso, se pueden construir edificios duraderos y sostenibles en combinación con sistemas de forjados prefabricados existentes, como por ejemplo, construcciones compuestas de madera y hormigón o de paneles de madera.

Las condiciones para la construcción prefabricada con ILC aún no se han explorado completamente y son el tema de un

proyecto de investigación de dos años financiado por la Fundación Federal Alemana para el Medio Ambiente (*Deutsche Bundesstiftung Umwelt*, DBU). El proyecto, que comenzará en primavera de 2018, tiene como objetivo transferir los conocimientos adquiridos hasta el momento por la TU Berlin en la construcción de viviendas de varios pisos con la cooperativa de viviendas HOWOGE en Berlín. Los arquitectos e ingenieros están trabajando en estrecha colaboración con la cooperativa de viviendas, el fabricante de elementos prefabricadas Tinglev y la empresa de ingeniería Transsolar para desarrollar estos elementos listos para su uso en un nuevo proyecto de construcción residencial.

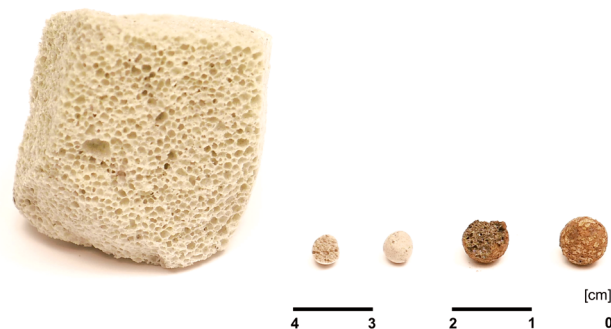


Fig. 5. Áridos ligeros: grava de espuma de vidrio, arcilla expandida, vidrio expandido.

3. TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN INFRALIGERO

3.1 Composición y producción

La producción de hormigón infraligero, como es habitual en el hormigón normal y el hormigón ligero, no está fijada en lo que respecta a materias primas o a una mezcla única. Las mezclas desarrolladas en la TU Berlin (Tabla 1) están compuestas de

cemento, agua, áridos ligeros, humo de sílice, superplastificante y estabilizador. Todavía no se puede establecer si la utilización de arcilla expandida, el granulado de vidrio expandido (Fig. 5) u otro árido ligero puede conducir a mejores resultados. Nuestro equipo en la TU Berlin tiene hasta ahora más experiencia con mezclas de arcilla expandida. Sin embargo, las mezclas de vidrio expandido prometen mayores resistencias.

TABLA 1
Comparación de la composición y propiedades de los materiales de diferentes ILCs.

	TU Berlin					TU Kaiserslautern	UniBw München
	2007 [1] cf. ILC800	2012 [8] cf. ILC800	ILC800	ILC750 2016 [17] ¹⁾	ILC700	2016 [10] cf. ILC700	2016 [11] cf. ILC750
	Composición [kg/m ³]						
Cemento	330	322	333	295	260	370	350
Agua	165	157	185	175	164	136	149
Humo de sílice							
- UniBw Múnich, proporción de cenizas volantes	-	57	66	68	70	-	118 (Distribución desconocida)
Áridos ligeros		Arcilla expandida (seca)				vidrio expandido	vidrio expandido 1/2, 2/4 y Arcilla expandida (seca)2/6
	0/2-200 1/4-25 2/8-170	0/4-135 1/4-78 2/8-190	0/2-73 1/4-97 2/6-147	0/2-59 1/4-103 2/6-160	0/2-46 1/4-108 2/6-173	0,25/0,5-74 1/2-74 4/8-62	215 (Distribución desconocida)
Agentes aireantes	2,0	-	-	-	-	-	
Plastificante	-	4,8	3,52	3,36	3,19	5,8	
Estabilizador	-	0,46	0,63	0,53	0,45	0,5	
Impermeabilizante	-	-	-	-	-	1,3	
Retracción	-	-	-	-	-	9,2	
Agentes espumantes	-	-	-	-	-	7,4	Mezcla de aditivos fluidificantes, plastificantes, aireantes y retardantes
	Propiedades determinadas experimentalmente						
Den. aparente fresca/seca $\rho_{p/tr}$ [kg/m ³]	1000/760	1050/780	1075/809	1009/766	947/711	720 740/650-700	749/723
Resistencia cúbica, $f_{icm,150}$ [MPa]	7,0	13,0	13,4	11,4	9,6	6,3	14,2
Resist. a tracción, f_{icm} [MPa]	0,66	1,02	0,87	0,76	0,65	0,48	0,71
Módulo de elasticidad E_{icm} [MPa]	4000	5500	3900	3500	3100	3500	5273
Conductividad térmica, $\lambda_{tr,10}$ [W/(mK)]	0,181	0,193	0,193	0,178	0,166	0,15	0,185
Condiciones de almacenamiento	Baño de agua		4 días en encofrado, seguido de 20°C y 35% humedad rel.			22°C y 55% humedad rel.	ca. 95% humedad rel.

¹⁾ ILC600 and ILC650 ver [2]

²⁾ Calculado de acuerdo al ensayo de flexión [26] $f_{icm} = 0,9 f_{icm,0,40} / 1,7$

Cuando se utiliza un mezclador, las palas deben estar forradas de plástico para evitar una trituration de los áridos ligeros. De lo contrario, el contenido de árido fino es mayor al aumentar el tiempo de mezclado, lo que influye negativamente en las propiedades del hormigón. Además, al igual que con el hormigón ligero, debe tenerse en cuenta la absorción de agua del árido ligero [16]. Dependiendo del material y del tamaño del grano, los áridos ligeros absorben diferentes cantidades de agua, que ya no están disponibles en la mezcla de hormigón durante el proceso de hidratación y, por lo tanto, deben agregarse adicionalmente. Como regla general, esta proporción de agua de succión se agrega al agua de la relación a/c y el tiempo de mezcla se incrementa hasta que se produce la consistencia deseada después de la absorción de agua por los áridos ligeros. La determinación de la cantidad de absorción de agua es a menudo difícil, ya que los áridos ligeros no siempre pueden suministrarse con el mismo contenido de humedad intrínseca, lo que conduce a variaciones indeseables en las propiedades del hormigón. Si los áridos ligeros están saturados, el exceso de agua conlleva un aumento del contenido de humedad del hormigón endurecido, lo que puede conducir a una mayor conductividad térmica y a una reducción de la resistencia a las heladas. El agua absorbida dentro de los áridos lleva un "curado interno" [16], es decir, agua disponible durante más tiempo para facilitar la hidratación. Los poros más bien cerrados de vidrio expandido exigen una menor proporción de agua de succión, por lo cual se debe humectar menos previamente, esperándose así un menor curado interno. De acuerdo con el estado del arte actual, no se recomienda bombear arcilla expandida o mezclas de vidrio expandido porque la presión de la bomba fuerza el agua hacia el árido ligero, lo que endurece la mezcla y puede obstruir las tuberías. Además, los poros de aire son expulsados de la pasta de cemento, lo que conduce a un aumento de la densidad.

El hormigón infraligero no debe compactarse de manera clásica con los vibradores internos, ya que de lo contrario el aire es expulsado de la pasta de cemento, lo que resulta en una densidad aparente demasiado alta e incluso puede causar una segregación. Opcionalmente, las medidas de compactación (como vibradores externos, golpes) pueden ser útiles por razones ópticas, por ejemplo, para evitar un nivel irregular de la superficie del hormigón.

3.2 Propiedades

3.2.1 Propiedades del hormigón fresco

Las propiedades del ILC descritas a continuación se refieren a las mezclas investigadas del ILC600, ILC650, ILC700, ILC750 y ILC800 de [17], que se enumeran parcialmente en la Tab. 1. En la tecnología del hormigón ligero, la densidad aparente y la resistencia son las propiedades más importantes. La densidad aparente del hormigón fresco es una característica importante de control de calidad durante la producción, ya que se puede utilizar para estimar la densidad aparente seca. La densidad aparente fresca del ILC es de aproximadamente 190 a 230 kg/m³ (ILC600 a ILC800) por encima de la densidad aparente seca. Dado que la compactación con vibradores internos puede afectar adversamente a las propiedades (densidad y resistencia), el ILC descrito aquí se concibió como un hormigón prácticamente autocompactante. Se puede suponer una consistencia auto-

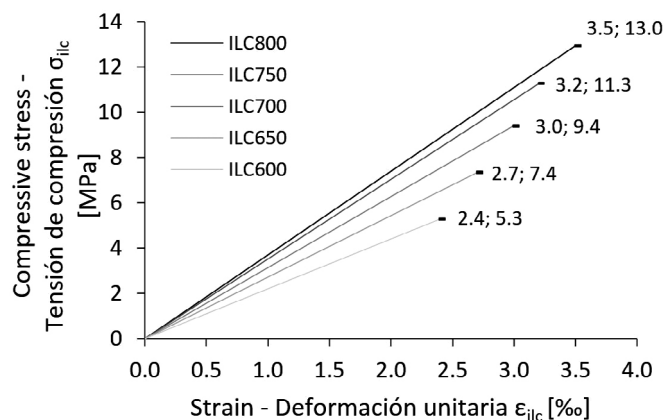


Fig. 6. Relación ideal tensión-deformación del ILC bajo compresión.

compactante del ILC si se produce un flujo de asentamiento de más de 600 mm.

3.2.2 Hormigón endurecido

El ILC se comporta en el nivel de visión mesoscópica (es decir, en el rango milimétrico) donde, en términos simplificados, se puede considerar como un sistema binario no homogéneo de matriz y árido, como el LC [2]. El comportamiento estructural del hormigón infraligero o ligero bajo compresión está dominado por la matriz y no por el árido, como ocurre en el hormigón normal. Las microfisuras se desarrollan solo poco antes de que se alcance la resistencia de la probeta, por lo que el ILC se comporta de forma casi lineal. Un fenómeno que aún no se ha investigado es que la deformación unitaria de ruptura media aumenta con el incremento de la resistencia a la compresión media (ε_{ilcm} = 2.4 ‰ hasta 3.5 ‰ para f_{ilcm} = 6 MPa hasta 13 MPa). Debido a su relación tensión-deformación elástica-lineal, se puede considerar un módulo de elasticidad constante (E_{ilcm} = 2300 hasta 3900 MPa) hasta la carga de rotura (Fig. 6).

Según la norma [18], el almacenamiento de la probeta tiene lugar en un baño de agua o, de acuerdo con el Anexo Nacional Alemán al Eurocódigo [19], durante 6 días con una humedad relativa del 95% y después en atmósfera estándar a 20 °C y 65% de humedad relativa. En la práctica, sin embargo, las probetas de hormigón ligero usualmente se almacenan después del desencofrado hasta el ensayo con un 95% de humedad relativa.

Las propiedades de hormigón endurecido desde el ILC600 al ILC800 [17] se determinaron en probetas de ensayo idénticas a las correspondientes vigas de ensayo, con un tiempo de estancia de aproximadamente 4 días en el encofrado, y luego se almacenaron hasta alcanzar la edad de 28 días bajo condición climática "seca" de 20 °C y 35% de humedad relativa. Se encontró que el contenido de humedad, dependiendo del tipo de almacenamiento de las probetas de ensayo, tiene un efecto significativo sobre el comportamiento estructural y la deformación (resistencia y módulo de elasticidad). Una serie de experimentos con diferentes condiciones de almacenamiento dio como resultado un aumento medio del módulo de elasticidad en un 32% y de la resistencia a la compresión del cilindro en un 15% cuando todas las probetas de ILC se almacenaron en agua.

Respecto al comportamiento a largo plazo del ILC con y sin carga, es decir, fluencia y contracción, se encuentran a disposición diferentes resultados. No hay una norma alemana que regula la prueba de hormigón en fluencia y retracción. Existen normas para probar "productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón", en la Parte 4 (DIN EN 12617-4 [20]) la contracción y la fluencia de probetas con dimensiones de 40 mm · 40 mm · 160 mm son determinadas. En 2007, las mediciones en la TU Berlin sobre tales probetas mostraron un acortamiento de 0.9 mm/m por contracción y 5.0 mm/m por fluencia (incluyendo la parte elástica y de contracción) con una tensión de compresión de $0.5 \cdot f_{ck}$ [11]. Sin embargo, es cuestionable si los resultados en tales probetas pequeñas son transferibles a dimensiones de elementos reales.

En la TU Kaiserslautern, se realizaron mediciones de contracción en tres vigas que miden 150 mm · 150 mm · 700 mm como parte de las investigaciones en un edificio experimental de ILC (finalizado en 2014). Se produjeron después de 180 días acortamientos de 0.7 mm/m sin reductor de contracción (véase la Fig. Tab 1), y sin este el acortamiento resultante se encuentra comprendido entre 1.4 mm/m a 1.6 mm/m [10].

Tanto en el informe *DAfStb-Heft 422* [21] del "Comité Alemán para el Hormigón Armado" como en las recomendaciones de RILEM [22] se proponen cilindros preferiblemente con un diámetro de 150 mm y una altura de 600 mm para determinar los valores de fluencia y la retracción. En base a esto, se realizaron mediciones de fluencia y retracción para emitir una "aprobación en casos singulares" (*Zustimmung im Einzelfall, ZiE*, ver capítulo 6) para una vivienda unifamiliar en el pueblo de Aiterbach (finalizada en 2015). Las muestras de ensayo seleccionadas fueron cilindros estándar con un diámetro de 150 mm y una altura de 300 mm. Las probetas se controlaron durante 428 días. Tras 180 días, se registró 0.8 mm/m de retracción y 1.8 mm/m de fluencia (incluyendo elasticidad y retracción) [11].

3.3 Durabilidad

3.3.1 Cobertura de hormigón

En el hormigón, la armadura de acero está protegido contra la corrosión por un ambiente alcalino (valor de pH entre 12.5 y 13.5), lo que se denomina pasivación. El agua y el dióxido de carbono causan una carbonatación en el hormigón, que disuelve la pasivación y progresa a diferentes velocidades dependiendo del tipo de hormigón y las condiciones ambientales (clase de exposición). La profundidad de carbonatación se calcula utilizando la raíz cuadrada del tiempo [23].

$$y = k \sqrt{t} \quad (1)$$

con: y Profundidad de carbonatación [mm]
 k Coeficiente de carbonatación [mm/año^{0.5}]
 t Edad del hormigón [año]

El coeficiente de carbonatación k describe el progreso de carbonatación de un hormigón y es $k = 3 \text{ mm} / \text{a}^{0.5}$ para un hormigón normal [23]. Es decir, después de 100 años, la carbonatación ha progresado 30 mm. Las mediciones en la TU Berlin mostraron para ILC $20 < k < 30 \text{ mm} / \text{a}^{0.5}$, ¡lo que conduce a una profundidad de carbonatación de 200 a 300 mm para

una misma edad del hormigón! Con una hidrofobización de la superficie basada en silano, k se reduce de 15 a 20 mm/a^{0.5}. Por lo tanto, no se evita el riesgo de corrosión de la armadura, pero la superficie está protegida contra la intemperie y se evitan las grietas superficiales reticulares. En la vivienda unifamiliar de 2007 (Fig. 1), también se utilizó una hidrofobización de este tipo. Desde entonces, la superficie de hormigón se ha mantenido en buenas condiciones. La armadura utilizada aquí fue fibra de vidrio (FRP) en los muros exteriores de ILC. Más rentable que el FRP y más cercano a las propiedades mecánicas de una armadura "negra" (y también flexible) es la armadura de acero galvanizado. Este se está utilizando actualmente en un proyecto en Berlín-Lichtenberg, el *Betonoase* (Fig. 12), para el revestimiento del edificio realizada en ILC. La variante más cara sería la armadura de acero inoxidable. Para la armadura no corrosiva la adherencia entre armadura y hormigón es decisiva para determinar la cobertura de hormigón. De acuerdo con el EC2 [7], para hormigón ligero, la cobertura mínima para asegurar la adherencia con la armadura debe aumentarse en 5 mm debido a la resistencia a tracción reducida del hormigón. Esto también se aplica al ILC. Los valores mínimos de protección contra la corrosión se aplican por igual al hormigón normal y ligero, aunque se ha demostrado que, al menos para un hormigón ligero con 800 kg/m³, la velocidad de carbonatación y con ello el riesgo de corrosión son muy altos. Un efecto positivo de la rápida carbonatación del ILC es que un elemento completamente carbonatado evita al medio ambiente aproximadamente 55 kg de CO₂/m³ durante su vida útil (ejemplo de cálculo en un hormigón con un contenido de cemento de 360 kg/m³ [23]). Esto corresponde a aproximadamente 1/3 del CO₂ resultante de la desacidificación (ver Sección 1).

3.3.2 Resistencia a los ciclos hielo-deshielo

Para un análisis más detallado de la resistencia a los ciclos hielo-deshielo del hormigón infraligero, se llevaron a cabo ensayos con las mezclas ILC800 e ILC600 de acuerdo con DIN CEN/TS 1290-9: 2006 [24] como parte de un proyecto de investigación ("INBIG – Hormigón infraligero en viviendas de varios pisos" [4]). La composición del ILC800 según la Tab. 1 también cumple los requisitos de las clases de exposición XF1 y XF3 directamente a la intemperie, es decir, sin recubrimiento superficial (hidrofobización). El ILC600 no se puede usar XF3 sin tratamiento de la superficie; no es posible realizar una evaluación para XF1 debido a la falta de un requisito.

3.3.3 Protección frente a incendio

En la "norma alemana de protección contra incendios" [25] están enlistados los materiales de construcción no combustibles (material de construcción clase A1). Estos incluyen principalmente hormigones de acuerdo con el EC2 [7]. Aunque el ILC no se incluye debido a su menor densidad aparente seca y resistencia, la descripción general se aplica "a los materiales de construcción que contienen no más del 1% (fracción másica) de constituyentes orgánicos distribuidos homogéneamente" [25]. Por lo tanto, se clasifica como no combustible.

Los elementos estructurales de ILC se pueden dimensionar de acuerdo con el EC2-1-2 [26]. La cobertura mínima de hormigón garantiza que la armadura esté protegida contra altas temperaturas. Como el ILC tiene mejores propiedades de aislamiento térmico, se mantiene del lado de la seguridad.

No obstante, el peligro de desprendimiento del hormigón aún debe ser investigado incluso cuando este riesgo está más bien asociado al hormigón de alta resistencia.

4. BASES DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO

4.1 Método

El hormigón infraligero se utiliza principalmente para los muros exteriores de los edificios y dichos muros por lo general transfieren, además de su propio peso, las cargas de los forjados y del tejado también. Si tales cargas se distribuyen uniformemente en toda la longitud de la sección del muro aplicada de forma céntrica, se trata entonces de regiones B (B de BERNOULLI), y la pared puede dimensionarse a compresión pura. La armadura solo es necesaria para evitar grietas por retracción. Sin embargo, casi siempre ocurren discontinuidades geométricas o estáticas, como ventanas, huecos o la transferencia de cargas concentradas o excéntricas y, como en el caso del hormigón normal, tales regiones D se dimensionan mejor de acuerdo con el método de bielas y tirantes. En el área de tracción (tirantes), se inserta una armadura adicional en la pared de hormigón infraligero.

Incluso dinteles delgados, balcones u otros elementos de voladizo se pueden hacer de hormigón infraligero, siempre que las luces no sean demasiado grandes. Estas áreas de flexión se pueden dimensionar según el método presentado a continuación.

Los métodos de cálculo para flexión, así como el comportamiento de la adherencia, la fisuración y las deformaciones se basan en los resultados de un proyecto de investigación de la DFG (Fundación Alemana de Investigación Científica, Proy. SCHL 1901 / 7-1), que se publicaron en detalle en [2] y [17]. A continuación, solo se resumen las peculiaridades del ILC en relación con los métodos de cálculo comunes. Los métodos de cálculo ya se han aplicado con éxito para la aprobación en casos singulares.

4.2 Adherencia

Las propiedades de adherencia entre el hormigón y la armadura afectan a los diversos métodos de cálculo:

- Una adherencia completa entre el hormigón y la armadura es una de las suposiciones básicas en la teoría de vigas para la determinación de la resistencia frente al momento flector.
- El tipo de fallo (por deslizamiento de la barra o por fisuración del recubrimiento) afecta la relación de tensión-deslizamiento de la adherencia y su resistencia y, por lo tanto, la cobertura de hormigón requerida.
- La relación de tensión-deslizamiento de la tensión de adherencia influye en el grado de rigidización por tracción (coeficiente de adherencia β_t) y, en consecuencia, entra indirectamente en el cálculo del ancho de la fisura y deformación para el diseño.
- La longitud de la adherencia y de solape de la armadura en el elemento estructural se pueden calcular a partir de la resistencia de la adherencia (tensión de adherencia máxima) o su valor de diseño.

En principio, se distingue entre dos tipos de fallos de la adherencia: el fallo por deslizamiento (fallo por cizallamiento del hormigón entre corrugas debido a la baja resistencia a compresión) y el fallo por fisuración del recubrimiento (grietas longitudinales debidas a la tensión de tracción circunferencial por escaso recubrimiento o baja resistencia a tracción). Dado que para hormigones ligeros la relación entre la resistencia a la tracción y la compresión se reduce con el coeficiente η_1 de acuerdo con el EC2, sección 11.1.2 (1) [7], en comparación con el hormigón normal, es más probable que se produzca un fallo por fisuración del recubrimiento [27]. Básicamente, el valor de diseño de la tensión de adherencia f_{bd} se determina según la ecuación (8.2) EC2, sección 8.4.2 (2) [7] como una función de la resistencia a la tracción. Esto es relativamente más pequeño para el hormigón ligero en comparación con el hormigón normal, lo que resulta en mayores longitudes de adherencia. Además, el recubrimiento requerido de hormigón debe aumentarse en +5 mm para hormigón ligero (ver 3.3.1).

Los ensayos con probetas de ILC de acuerdo con RILEM [28] conducen a un fallo por deslizamiento y, por lo tanto, confirmaron la relación entre la resistencia de la adherencia y la resistencia a la compresión del hormigón. Los cálculos de acuerdo con el *fib Model Code 1990/Bulletin 8* [29] para hormigones ligeros y condiciones de adherencia "estándar" que solo consideran la resistencia a compresión, proporcionaron una buena concordancia con los resultados de los ensayos [17]. Sin embargo, desde un punto de vista conservador para el ILC para el cálculo de la tensión de adherencia, se recomienda la ecuación anteriormente mencionada (8.2) del EC2, Sección 8.4.2 (2) [7], ya que también es posible un fallo por fisuración del recubrimiento para elementos del ILC con poco recubrimiento de hormigón.

4.3 Deformaciones

Los componentes de hormigón armado se acortan o alargan de acuerdo con la tensión de compresión o tracción y las grietas suelen producirse con tensiones de tracción perpendiculares a la dirección de la carga. En este estado agrietado, aunque el comportamiento estructural y las deformaciones de la armadura, el hormigón entre las grietas absorbe parte de las cargas (*tension stiffening*). El grado de arrastre entre las grietas se puede expresar en términos del factor de imperfección β_i (que corresponde a k_i para el cálculo de la abertura de la fisura). Para el ILC se determinó un valor de $\beta_i = 0.8$ para una carga de breve duración (se utilizará 0.6 después de EC2 [7]). El ILC, por lo tanto, contribuye en mayor grado entre grietas, lo que lleva a menores deformaciones. Por lo tanto, un método de cálculo simplificado de acuerdo con la ecuación (7.18) EC2, sección 7.4.3 (3) [7], proporciona resultados conservadores para los componentes que son predominantemente solicitados a flexión. Las deformaciones se pueden estimar calculando las deformaciones para los estados I y II e interpolando con la ayuda de un coeficiente de distribución ζ , para el cual existen diferentes modelos [30]. Un modelo de deformación que proporciona resultados realistas fue documentado en detalle por el segundo autor [17].

4.4 Abertura de fisura

El cálculo de la abertura de fisura según EC2 [7] mediante la ecuación (7.8), Sección 7.3.4 (1) se basa en simplificaciones y

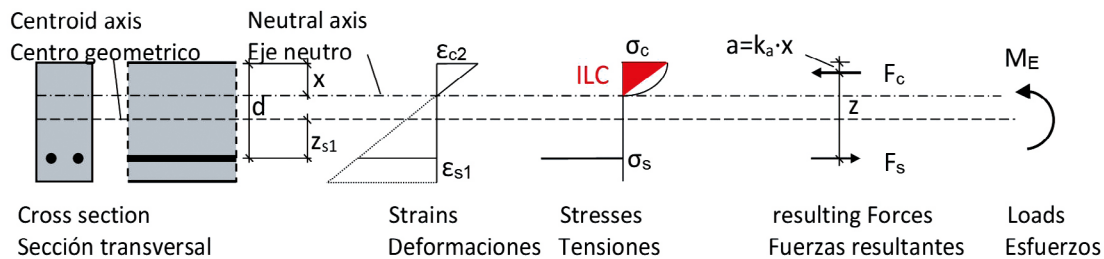


Fig. 7. Deformaciones unitarias, Tensiones, y esfuerzos internos en una sección agrietada de una viga a flexión de ILC.

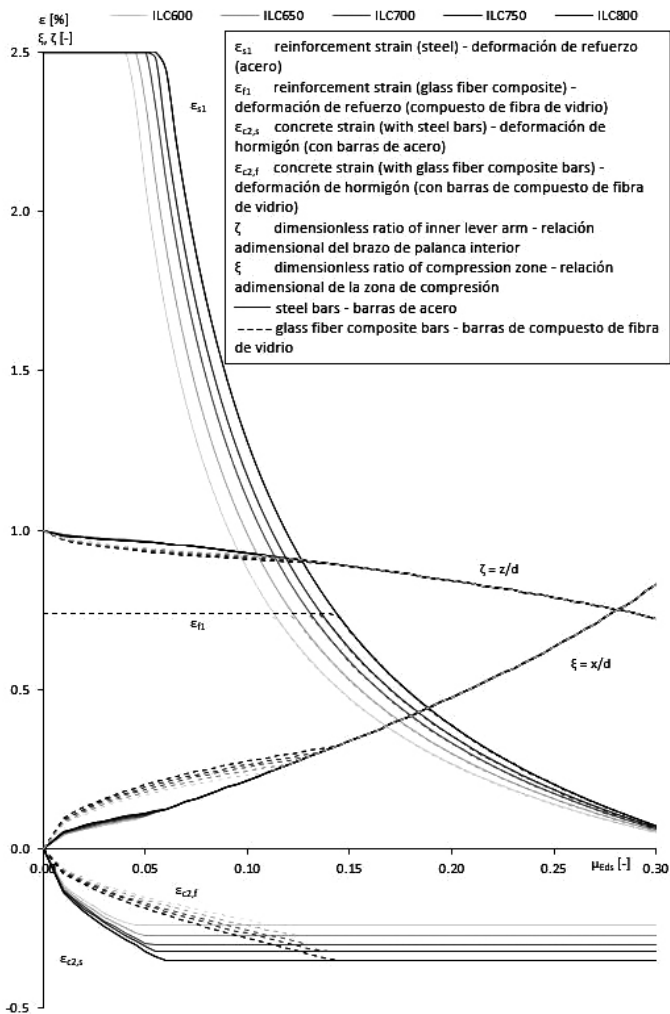


Fig. 8. Diagrama de cálculo para ILC [2].

suposiciones empíricas y depende, además de los parámetros del refuerzo, de la resistencia a la tracción efectiva del hormigón, el módulo de elasticidad del hormigón y la contribución del hormigón entre grietas. Al igual que con el cálculo de la deformación (ver Sección 4.3), la contribución del hormigón entre las grietas para hormigones estandarizados según EC2 [7] se tiene en cuenta para la carga a corto plazo con $k_t = 0.6$

(corresponde al coeficiente de adherencia β_t). En términos de comportamiento a largo plazo, esto se reduce a $kt = 0.4$ debido a las pérdidas de la fluencia compuesta (equivalente al 70% de la resistencia de la adherencia) (ver notas explicativas de EC2 [31]).

Cálculos de abertura de fisura para armaduras de acero (o barras de GRP según el fabricante SCHÖCK [32]), teniendo en cuenta las propiedades específicas del ILC según Tab. 1 y un coeficiente de imperfección $\beta_t = 0.8$ bajo una carga a corto plazo, pudieron ser confirmados con los resultados de ensayos en probetas de ILC.

4.5 Flexión

Un dimensionamiento según EC2 [7] en el estado límite último de vigas en flexión (región B) se logra mediante la limitación de las deformaciones unitarias, es decir, el límite elástico del hormigón y del refuerzo. La determinación de la armadura requerida tiene lugar a través del equilibrio interno de fuerzas que resulta de las curvas correspondientes de tensión-deformación de los materiales (Fig. 7). Esta forma de verificación también es aplicable al ILC después de los siguientes ajustes. Debido al comportamiento del material elástico lineal y frágil bajo esfuerzo de compresión (Fig. 6), se debe suponer una distribución triangular en la zona de compresión de flexión de un elemento de ILC en lugar de una distribución parabólica-rectangular de las tensiones de compresión. La posición de la fuerza de compresión del hormigón F_c es por lo tanto $a = 1/3 \cdot x$ y el coeficiente $\alpha_R = 0.5 \cdot \epsilon_{c2}/\epsilon_{cu}$ (Fig. 7). Los resultados experimentales llevados a cabo en vigas confirmaron esta teoría. El diagrama de cálculo (Fig. 8) proporciona para el momento flector relacionado.

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b d^2 f_{cd}} = \alpha_R \xi (1 - k_a \xi) \quad (2)$$

Con la relación adimensional $\zeta = z / d$, y $\xi = x / d$. Luego de reorganizar la Eq. 2 queda:

$$0 = \left[1 - k_a - \frac{M_{Eds}}{\alpha_R} \right] \epsilon_{c2}^2 + \epsilon_{s1} \left[2 \frac{\mu_{Eds}}{\alpha_R} - 1 \right] \epsilon_{c2}^2 + \epsilon_{s1}^2 \frac{\mu_{Eds}}{\alpha_R} \quad (3)$$

La solución de la Eq. (3) provee el diagrama de cálculo (Fig. 8) para determinar la armadura requerida sin necesidad de iterar.

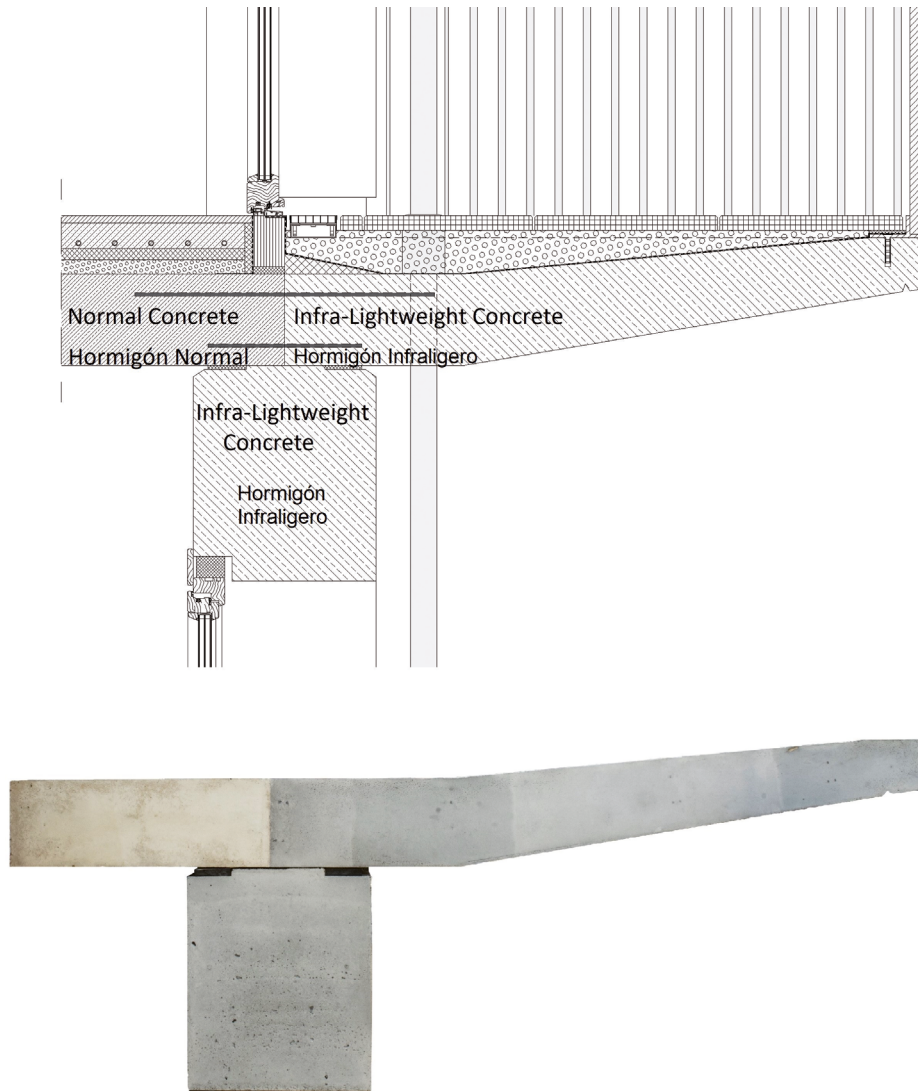


Fig. 9. Conexión losa-muro-balcón (dibujo y foto) sin separación térmica [4].

Finalmente, la cantidad de armadura requerida es determinable con:

$$A_{s1,l} = \frac{1}{\sigma_{s1,l}} \left[\frac{M_{Eds}}{z = \zeta d} \right] \quad (3)$$

donde $\sigma_{s1,l}$ es la tensión en la armadura. El diagrama de cálculo para el dimensionamiento de elementos en flexión de ILC es aplicable a armaduras de acero (índice s) y también de fibra de vidrio (índice f) [2].

La determinación del valor de diseño de la resistencia a la compresión del hormigón infraligero f_{cd} se determinará para cada proyecto en el marco de ZiE (ver capítulo 6) y, como en la norma [7], en función del coeficiente de resistencia a la compresión característico f_{ck} , del factor de largo plazo α_{cc} , y del coeficiente de seguridad del material γ_c . El hormigón ligero tiene un bajo factor de largo plazo en comparación con el hormigón normal y se tiene en cuenta en el EC2 [7] con una reducción de 0.75 o 0.80 en vez de 0.85 como lo es para el hormigón normal. Los primeros ensayos en ILC confirmaron esta reducción. El factor de seguridad para el material γ_c , el cual incluye

coeficientes de variación de las incertidumbres del modelo, de la geometría y de la resistencia del material, es idéntico tanto como para el hormigón normal como para el hormigón ligero. Para el ILC los coeficientes de variación esperados de la resistencia del material no son significativamente superiores. La resistencia a la compresión característica f_{ck} debe ser calculada [17] para cada proyecto dentro de una ZiE y puede determinarse a través de la resistencia a la compresión media f_{cm} y su dispersión.

5. DISEÑO ESTRUCTURAL

El hormigón infraligero, utilizado de acuerdo con sus propiedades, simplifica el diseño estructural de muchas áreas de la estructura. Los arquitectos están abriendo nuevos caminos en la utilización del hormigón visto. Junto con la profesora REGINE LEIBINGER, del departamento de Construcción y Diseño Conceptual de la TU Berlín, se desarrolló el proyecto de investigación INBIG. También en la universidad es importante un diseño conjunto entre ingenieros y arquitectos [4]. Se investi-



Fig. 10. Edificio experimental de hormigón infraligero (2014) [10].

garon distintos tipos de edificios, tales como edificios en vacíos urbanos entre edificios, bloques lineales y edificios con núcleo de comunicación central, y se desarrollaron detalles de ventanas, forjados y balcones adaptados al material en cuestión. En base a esto se construyeron diferentes prototipos. La Figura 9.1 muestra un ejemplo de una losa de hormigón convencional que está conectada directamente al balcón de ILC. Los estudios en materia de ahorro de energía [4] mostraron que no se requiere de aislamiento térmico.

Los estudios sobre la fijación de marcos de puertas y ventanas, piezas adicionales y estantes con tacos en paredes de ILC revelaron un comportamiento típico del hormigón ligero, caracterizado por un cono de rotura más grande en comparación con el hormigón normal. En una serie de pruebas, se extrajeron anclajes de inyección y de eje largo con longitudes de anclaje de 100 mm y 140 mm, respectivamente, de una muestra de pared de ILC. Las cargas de uso permitidas, en comparación con los bloques de hormigón celular con la misma resistencia, se superaron en más de un 20%.

6. APROBACIÓN EN CASOS SINGULARES

En Alemania, en el caso de los edificios hechos de hormigón infraligero, de momento es necesario solicitar una aprobación para casos singulares (*Zustimmung im Einzelfall*, *ZiE*). El proceso está regulado por el “reglamento alemán sobre la construcción de modelos” [33]. La verificación puede realizarse con la aprobación de la máxima autoridad de supervisión de construcción, en el caso de productos de construcción para los cuales no hay un código de construcción técnica y ninguna regla técnica generalmente aceptada o que se desvía sustancialmente de un código de construcción técnico. No es necesario el consentimiento de la máxima autoridad de supervisión de la construcción si no se esperan peligros.

Como ejemplo para el Estado Federal de Berlín, se describe el contenido de la hoja informativa sobre la *ZiE* [34]:

- Como regla general, el solicitante es una parte involucrada en la construcción, ya sea el cliente, el proyectista, el fabricante o la empresa constructora.
- La solicitud informal, incluidos los documentos de solicitud requeridos, debe enviarse a la máxima autoridad de supervisión de construcción del respectivo país (en este caso, la Inspección Superior de Edificios del Estado Federal de Berlín).
- Una solicitud para un *ZiE* solo se puede hacer para el uso o la aplicación de un producto de construcción no regulado en particular o un tipo específico de construcción no regulada en un proyecto de construcción específico. De lo contrario, se deben enviar las aplicaciones por separado.
- Los documentos de solicitud requeridos incluyen una descripción del tema de la aplicación, documentación de construcción e información sobre el tipo y tamaño de la carga.
- En general, la solicitud debe ir acompañada de documentos relacionados con el diseño estructural, informes de ensayos, informes de expertos y *ZiE* de proyectos existentes.
- La tarifa es de entre 500 y 15.000 euros, dependiendo del alcance y la dificultad del proceso, la importancia del tema de la solicitud y la situación económica del solicitante y los beneficios para las partes involucradas. Las instituciones tales como las autoridades públicas, corporaciones públicas, iglesias, organizaciones benéficas y similares están exentas del pago de la tarifa de gestión.

Es aconsejable iniciar el procedimiento en una etapa temprana de la planificación por medio de una solicitud sin formato específico, de modo que puedan presentarse y enviarse los documentos necesarios a tiempo. En particular, evaluaciones técnicas y análisis experimentales requieren de más tiempo. Los cuerpos de inspección y tasadores se contratan por un partici-



Fig. 11. Vivienda de hormigón infraligero en Aiterbach (2016) [37].



Fig. 12. Instalaciones recreativas Betonoase de hormigón infraligero (2017).

pante (generalmente por el solicitante), quien por su cuenta tiene que asumir los costes. La ZiE no reemplaza la inspección técnica necesaria en Alemania.

7. CONSTRUCCIONES DE HORMIGÓN INFRALIGERO

Sobre todo en Suiza, los edificios realizados en hormigón ligero visto se han construido durante algún tiempo sin ningún aislamiento térmico. El libro de FILIPAJ ofrece una buena visión general [35]. Como un trabajo estándar para hormigón ligero, que también muestra numerosos ejemplos de aplicación, se

puede citar la publicación de FAUST [27] o como un equivalente en inglés CLARKE [36]. Sin embargo, en hormigón ligero, los requisitos de la EnEV [3] no se pueden cumplir, y esto requiere el uso de hormigón infraligero. Los pocos ejemplos que se han construido hasta el momento y dos edificios que se están planificando o están en construcción son presentados a continuación.

En *Berlín-Pankow* en 2007, se realizó el primer edificio (Fig. 1) de hormigón infraligero [1]. Para este propósito, se han desarrollado detalles de diseño que cumplen con los requisitos estructurales y de ahorro de energía. Los muros exteriores de la vivienda familiar están hechos de hormigón infraligero, mientras que el núcleo, losas y muros interiores están hechos



Fig. 13. Diseño licitado por Barkow Leibinger architects junto a schlaich bergemann partner y Transsolar (planeado el 2018).

de hormigón normal. El hormigón infraligero utilizado alcanzó una resistencia media a compresión de $f_{icm} = 7.8 \text{ MPa}$ y una densidad aparente seca de $\rho_r = 760 \text{ kg/m}^3$. A partir de la conductividad térmica $\lambda_{10,rr} = 0.181 \text{ W/(m K)}$ con un espesor de muro de 50 cm, se calcula un valor U de $0.34 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$, con el que se cumple entonces la *EnEV* 2006.

La construcción de un edificio experimental hecho de hormigón infraligero en el campus de la TU Kaiserslautern sirvió como prototipo (Fig. 10) para demostrar la reproducibilidad de los resultados de la investigación y para recopilar datos a largo plazo para futuras investigaciones [10]. El objetivo del proyecto era desarrollar un hormigón ligero autocompactante altamente aislante del calor, que consiste en componentes reciclados como vidrio expandido y un cemento ecológicamente optimizado en el sentido de "construcción sostenible". Con valores de conductividad térmica medidos de aproximadamente $\lambda = 0.15 \text{ W / (K} \cdot \text{m)}$, se obtuvo un coeficiente de transferencia de calor de $U = 0.28 \text{ W / (K} \cdot \text{m}^2)$ para espesores de pared de 50 cm [10].

El cliente y arquitecto THALMEIR [37] realizó en 2015 en Aiterbach una casa de hormigón infraligero (Fig. 11) con apoyo del Prof. THIENEL y *Heidelberger Beton GmbH* en lo que respecta a la tecnología del hormigón estructural. Los muros exteriores de 50 cm de espesor del edificio están hechos de hormigón infraligero con una conductividad térmica de $\lambda_{10,rr} < 0.185 \text{ W/(m K)}$ y alcanzan una resistencia de clase LC8/9. Se logró una densidad aparente seca de 723 kg/m^3 mediante un árido ligero de mezcla de vidrio expandido (Liaver) y arcilla expandida (Liapor) [11].

La instalación recreativa juvenil *Betonoase* es un proyecto de construcción actual en Berlín con muros exteriores hechos de hormigón infraligero (Fig. 12). En 2016, el diseño de los arquitectos *Gruber+Popp BDA* se impuso frente a cinco competidores. En el transcurso de la *ZiE*, se presentó un concepto de diseño de ILC no estándar para la emisión de la *ZiE* y se realizaron los correspondientes ensayos de elementos. Los elementos solicitados a flexión (dinteles y marquesinas) se calcularon sobre la base de los resultados de la investigación de 2016 [17]. Los ensayos de muestras llevadas a cabo en la TU Berlín confirmaron los cálculos y dieron lugar a la emisión de la *ZiE*. La finalización del *Betonoase* está programada para finales de 2017.

La empresa inmobiliaria *Mitte* (wbm GmbH) está planificando la construcción de un edificio con núcleo de comunica-

ción central en la esquina entre *Mollstraße* y *Barnimstraße* en *Berlin-Friedrichshain*. El proyecto surgió del concurso de ideas *urban living* para la densificación de las zonas residenciales del centro de la ciudad. Para el seguimiento y las pruebas de viabilidad, se recomendó la contribución de Barkow Leibinger Architekten con schlaich bergemann partner y Transsolar. El diseño que fue a concurso contempló un edificio residencial de 16 pisos con muros exteriores de hormigón infraligero (Fig. 13), basado en el concepto de muros barra (ver Sección 2.2.2), en el terreno planeado para el concurso en la avenida *Karl-Marx-Allee*. Durante el seguimiento del proyecto, wbm GmbH decidió implementar el proyecto con 12 plantas en la ubicación de *Mollstraße* en *Friedrichshain*.

8.

RESUMEN Y PERSPECTIVA

Más de diez años de experiencia incluyendo varios proyectos de investigación y edificios construidos así como proyectos de otros investigadores muestran que el hormigón infraligero está listo para la práctica para una amplia gama de edificaciones. Los resultados de la investigación y la gran demanda de los constructores y arquitectos, así como el aumento correspondiente en los proyectos de construcción realizados probaron el gran potencial del ILC. Con el fin de dar una visión práctica de los conocimientos adquiridos hasta la fecha a los potenciales usuarios, el *Manual de Hormigón Infraligero* fue publicado [38]. La investigación en curso abordará los pocos temas aún abiertos para ampliar así el rango de aplicaciones de las estructuras de ILC.

Bibliografía

- [1] SCHLAICH, M. ; ZAREEF, M. E.: *Infrleichtbeton*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 103 (2008), Nr. 3, S. 175–182
- [2] HÜCKLER, A. ; SCHLAICH, M.: *Zur Biegung von Infrleichtbetonbauteilen - Werkstoff-, Verbund-, Trag- und Verformungsverhalten*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 112 (2017), Nr. 5, S. 282–292
- [3] BMVBS: *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (in Kraft getr. am 2014)*. In: *Bundesgesetzblatt* (2014)
- [4] LEIBINGER, R. ; SCHLAICH, M. ; LÖSCH, C. ; RIESEBERG, P. ; BALLESTREM, M.: *Infrleichtbeton im Geschosswohnungsbau (INBIG) : Abschlussbericht*. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2017 (Forschungsinitiative Zukunft Bau F 3018)
- [5] VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E.V.: *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie*. Düsseldorf, Dezember 2016
- [6] VEREIN ZUR FÖRDERUNG DER NACHHALTIGKEIT IM WOHNUMGSBAU E.V.: *Bewertungssystem Nachhaltiger Wohnungsbau Mehrfamilienhäuser – Neubau : Kriteriensteckbriefe*. Steckbriefe 3.1.1, 3.1.2, 4.1.1. URL <http://www.nawoh.de/downloads/kriteriensteckbriefe> – Überprüfungsdatum 2016-02-04
- [7] DIN EN 1992-1-1:2011. 2011-01-31. *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010*
- [8] SCHLAICH, M. ; HÜCKLER, A.: *Infrleichtbeton 2.0*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 107 (2012), Nr. 11, S. 757–766
- [9] BREIT, W. ; SCHULZE, J. ; HEESE, C. ; BUND, B.: *Hochwärmedämmende, monolithische Sichtbetonaußenteile aus Architekturleichtbeton*. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2014 (Forschungsinitiative Zukunft Bau 2894)

- [10] SCHULZE, J. ; BREIT, W.: *Experimentalgebäude aus Infraleichtbeton - monolithisch und hochwärmedämmend*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016), Nr. 6, S. 377–384
- [11] CALLSEN, B. ; THIENEL, K.-C.: *Leichter Wohnungsbau : Besondere Aspekte bei der Entwicklung und Ausführung eines hochwärmedämmenden Hochleistungs-Leichtbetons mit sehr niedriger Betonrohddichte*. In: *Beton* (2017), Nr. 4, S. 128–134
- [12] HÜCKLER, A. ; SCHLAICH, M.: *Infraleichtbeton - Forschung an der Technischen Universität Berlin*. In: *Baukammer Berlin - Nachrichten für die im Bauwesen tätigen Ingenieure* (2015), Nr. 1, S. 21–24
- [13] LÖSCH, C. ; RIESEBERG, P. ; SCHLAICH, M. ; LEIBINGER, R. ; BALLESTREM, M.: *Infra-Lightweight Concrete in Multi-Story Residential Buildings*. In: *Economic Forum (Hrsg.): 10th Conference on Advanced Building Skins : 3-4 November 2015, Bern, Switzerland*, S. 932–941
- [14] SENATSWERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG UND WOHNEN: *Umweltatlas Berlin : Grundwassertemperatur 2012 (Ausgabe 2014)*. URL <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/kb214.htm> – Überprüfungsdatum 2017-06-08
- [15] SCHLAICH, M. ; LÖSCH, C. ; HÜCKLER, A.: *Infraleichtbeton - Stand 2015*. In: *Betonbauwerke für die Zukunft 2015*, S. 93–104
- [16] THIENEL, C.: *Erläuterungen zu den Normen DIN EN 206-1, DIN 1045-2, DIN 1045-3, DIN 1045-4 und DIN EN 12620*. 2nd ed. Berlin : Beuth, 2011 (DAfStb-Heft 526)
- [17] HÜCKLER, A.: *Trag- und Verformungsverhalten von biegebeanspruchten Bauteilen aus Infraleichtbeton (ILC)*. Dissertation. 1. Auflage. Göttingen : Sierke Verlag, 2016
- [18] DIN EN 12390-2: 2009. August 2009. *Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen; Deutsche Fassung EN 12390-2:2009*
- [19] DIN EN 1992-1-1/NA. 2013. *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*
- [20] DIN EN 12617-4:2002. August 2002. *Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Teil 4: Bestimmung des Schwindens und Quellens*
- [21] BUNKE, N.: *Prüfung von Beton : Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048*. Berlin : Beuth, 1991 (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton 422)
- [22] RILEM - SUBCOMMITTEE 4: STANDARDIZED TEST METHODS FOR CREEP AND SHRINKAGE: *Measurement of time-dependent strains of concrete*. In: *Materials and Structures* 31 (1998), Nr. 8, S. 507–512
- [23] STARK, J. ; WICHT, B.: *Dauerhaftigkeit von Beton*. 2. Aufl. 2013. Berlin Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013
- [24] DIN CEN/TS 12390-9. 2006. 2006. *Prüfung von Festbeton – Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand – Abwitterung*
- [25] DIN 4102-4. Mai 2016. *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile*
- [26] DIN EN 1992-1-2. Dezember 2010. *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1992-1-2:2004 + AC:2008*
- [27] FAUST, T.: *Leichtbeton im konstruktiven Ingenieurbau*. Berlin : Ernst, 2003
- [28] RILEM: *Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials*. London, 1994
- [29] CEB-FIP: *Lightweight aggregate concrete : Recommended extensions to model code 90, guide ; identification of research needs, technical report ; case studies, state-of-art report*. Bulletin 8. Lausanne : fib, 2000 (Bulletin / fib, International Federation for Structural Concrete 8 : Guidance documents)
- [30] ZILCH, K. ; ZEHETMAIER, G.: *Bemessung im konstruktiven Betonbau : Nach DIN 1045-1 und DIN EN 1992-1-1*. Berlin [u.a.] : Springer, 2006 (Vorlesungen Massivbau)
- [31] AUTORENKOLLEKTIV ; DAFSTB: *Erläuterungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (Eurocode 2)*. Berlin : Beuth, 2012 (DAfStb-Heft v.600)
- [32] SCHÖCK BAUTEILE GMBH: *Schöck ComBAR: Technische Information*. 01.06.2014
- [33] BUND: *Musterbauordnung - MBO - (in Kraft getr. am 1. 11. 2002) (2002-11-01) – Überprüfungsdatum Zuletzt geändert durch den Beschluss vom 2012-09-21*
- [34] SENATSWERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG UND UMWELT: *Merkblatt zur Zustimmung im Einzelfall gemäß § 20 und § 21 der Bauordnung für Berlin*. Berlin, 01.12.2012
- [35] FILIPAJ, P.: *Architektonisches Potenzial von Dämmbeton*. 2., überarb. und erw. Aufl. Zürich : vdf-Hochschulverl, 2010
- [36] CLARKE, J. L.: *Structural lightweight aggregate concrete*. London : Blackie Chapman & Hall, 1993
- [37] THALMAIR, M.: *Massiv und doch leicht : Einfamilienhaus, Aiterbach*. In: *Deutsche BauZeitschrift* (2016), Nr. 8, S. 74–76
- [38] LÖSCH, C. ; RIESEBERG, P.: *Infraleichtbeton : Entwurf, Konstruktion, Bau*. SCHLAICH, Mike (Hrsg.) ; LEIBINGER, Regine (Hrsg.). Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2018