

CONCRETO

LATINOAMÉRICA

VOLUMEN III | NÚMERO 2 | FEBRERO 2022



CONCRETO LATINOAMÉRICA

Volumen III - Número
Febrero de 2022

El presente número de la Revista Digital Concreto Latinoamérica es un esfuerzo de los Capítulos o Secciones del American Concrete Institute (ACI) en Latinoamérica, para poner al alcance de sus miembros y afiliados los contenidos que el ACI International publica en su revista Concrete International en inglés.

CONTENIDO

Pág.

4

Diseño basado en desplazamiento de anclajes en hormigón.

Traducción y revisión técnica a cargo del Capítulo: Ecuador Centro y Sur

13

Esperar en cada proyecto que los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión sean inferiores a la resistencia especificada

Traducción y revisión técnica a cargo del Capítulo: México Noreste

17

Transportador automático de personas de LAX

Traducción y revisión técnica a cargo del Capítulo: Guatemala

COMITÉ EDITORIAL:

Presidente del Comité Editorial:

Ing. Alejandro Miguel Narro Aguirre
Presidente de la Sección Noreste de México del ACI.(2020-2022)

Editor en Jefe:

Ing. José Lozano y Ruy Sánchez

Editor Asociado:

M.C. Lucio Guillermo López Yépez

Editor Técnico:

Dr. Alejandro Durán Herrera

Traducción:

Anabel Merejildo

Comité de Noticias y Eventos Concreto Latinoamérica

Ing. Jesús Fernando García Arvisu
Ing. Jesús Arturo Angel Mellado

Comité de Artículos Originales

Ing. Xiomara Sapón Roldán
Ing. Thyssen Won Chang

Revisión Editorial:

Lic. Iliana M. Garza Gutiérrez

Administración y Logística:

Lic. Ana Durán Herrera

Dirección Creativa:

MDG. Rosa Otilia Armendariz Solís
LDI. Luis Yerel Romo Valdez

Diseño Gráfico:

LDI. Monserrat Treviño Garza
Alejandro Martínez Sánchez

"Agradecemos el apoyo a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León por la colaboración en el diseño editorial".

Diseño Editorial: Comunicación e Imagen Institucional FIC-UANL

Cualquier asunto relacionado con la publicación contactarse a :

Correo: concretolatam@gmail.com

Tel: +52 81 2146 4907

Los contenidos de los artículos corresponden a la traducción del inglés al español realizada por los Capítulos del ACI en Latinoamérica, y fueron originalmente publicados en la revista Concrete International correspondiente al mes de Febrero del 2022. El Instituto no se hace responsable por las declaraciones u opiniones expresadas en sus publicaciones. Las publicaciones del instituto no pueden ni pretenden suplantar el entrenamiento técnico individual, responsabilidad o juicio del usuario o de quien provee y presenta la información. Con el propósito de difundir el conocimiento técnico del concreto, se autoriza la difusión de la presente edición a los Capítulos del ACI de habla hispana entre su membresía y grupos de interés, sin embargo, será necesaria la autorización del American Concrete Institute para reproducir total o parcialmente los contenidos de este número salvo que se hagan para uso personal o académico y sin fines comerciales. Todos los materiales originales en inglés, y contenidos en este número de Concreto Latinoamérica en español, están protegidos por las leyes de Derechos de autor y propiedad industrial, tanto nacionales como internacionales.

Representantes de los Capítulos ACI de Latinoamérica:

Argentina
Colombia

Costa Rica
Ecuador Centro y Sur
Guatemala

México Noreste
México Noroeste
México Centro y Sur
México Sureste
Panamá
Perú
Puerto Rico

Dr. Raúl Bertero
Dra. Nancy Torres Castellanos
Dr. Fabían Lamus Báez
Ing. Minor Murillo Chacón
Ing. MSc. Santiago Vélez Guayasamín
Ing. Luis Alvarez Valencia
Ing. Xiomara Sapón Roldán
Ing. Alejandro M. Narro Aguirre
Ing. Jesús Fernando García Arvizu
Arq. Arturo Rodríguez Jalili
Mtro. Joseph Eli Mandujano Zavala
Ing. Jorge L. Quiróz
Ing. Luciano López Vinatea
Ing. Anabel N. Merejildo



Edificio del Centro Educativo de postgrado "Roy y Diana Vagelos", en el Centro Médico Irving de la Universidad de Columbia en Nueva York, NY USA. El uso combinado de varillas de acero grado 80, losas aligeradas y doble banda de pos-tensado, permite el uso de losas planas en la construcción de edificios de oficinas clase A, como una solución económica y ambientalmente amigable. Para mayor información sobre el alto desempeño de los sistemas de losa plana usadas en ésta edificación, vea el artículo "Losas sin vigas de concreto de alta resistencia" publicado en el número (Vol III Número 1) de enero de 2022 de Concreto Latinoamérica, página 17.



¡Únete Hoy!
Conoce tu capítulo
local ACI

300+ Capítulos profesionales
y estudiantiles
www.concrete.org/chapters



American Concrete Institute
Always advancing

Diseño basado en desplazamiento de anclajes en hormigón.

El futuro de la tecnología de fijación

A medida que la industria de la construcción avanza cada vez más hacia la digitalización, la tecnología de anclaje debe mantenerse al día. En el diseño estructural, se están incorporando enfoques basados en el desplazamiento para una mejor y más realista evaluación del comportamiento estructural. Desde la perspectiva del anclaje, existe la necesidad de enfoques basados en el desplazamiento para el diseño que puedan considerar un comportamiento realista del anclaje teniendo en cuenta parámetros relevantes como la rigidez del anclaje, la geometría de la placa base, el patrón de anclaje y otros factores^{1,2}. Este artículo es una discusión del concepto general de modelos de resortes lineales y no lineales adecuados para el cálculo de fuerzas de anclaje.

Los modelos de resorte lineal pueden proporcionar una distribución realista de la fuerza de anclaje y, por lo tanto, permitir una verificación de la rigidez de la placa base. Los modelos de resortes no lineales incluyen todos los parámetros relevantes y proporcionan curvas de carga-desplazamiento completas como resultado, lo que permite considerar las interacciones estructurales y no estructurales.

Tradicionalmente, los anclajes se diseñan utilizando enfoques basados en fuerzas y métodos semi-empíricos, como el método de diseño de capacidad del concreto (CCD por sus siglas en inglés).^{3,4} En este enfoque, la resistencia del anclaje se calcula frente a varios modos de falla posibles y la resistencia

mínima gobierna el diseño. Así, en efecto, el enfoque de diseño sigue un concepto de diseño basado en la capacidad. Sin embargo, debido a la naturaleza semi-empírica del problema, se realizan varias simplificaciones en los cálculos de diseño y el alcance del diseño se limita a los límites de la base de datos de prueba.

Un requisito básico para el diseño de anclajes por los métodos actuales es el requisito de una placa base rígida cuyas deformaciones sean pequeñas en comparación con los desplazamientos del anclaje. Este requisito significa esencialmente que, bajo tensión concéntrica, todos los anclajes dentro de un grupo se desplazan por igual y, por lo tanto, se cargan por igual, asumiendo la misma rigidez para todos los anclajes de un grupo. Bajo carga de tensión excéntrica o carga de momento, se puede considerar que la placa base tiene una rotación de cuerpo rígido, y el desplazamiento (o fuerza) en los anclajes individuales del grupo se puede calcular asumiendo una distribución lineal de deformaciones o desplazamientos (Figura. 1 (a)).

De acuerdo con las normas vigentes,⁵⁻⁷ la placa base puede considerarse rígida (suficientemente rígida) siempre que permanezca linealmente elástica bajo las acciones de diseño y su deformación sea despreciable en comparación con el desplazamiento axial de los anclajes. Aunque el primer requisito se puede determinar cuantitativamente a través de cálculos basados en la fuerza, el segundo requisito requiere el cálculo de las deformaciones

de la placa base y los desplazamientos del anclaje. Debido a que los desplazamientos de los anclajes están inversamente relacionados con la rigidez del anclaje, una placa base dada puede considerarse suficientemente rígida cuando se une con anclajes de baja rigidez, pero insuficientemente rígida cuando se une con otro tipo de anclajes con una rigidez relativamente alta. Debido a que los métodos actuales para el diseño de anclajes se basan en la fuerza, no se calculan las deformaciones de la placa base ni los desplazamientos del anclaje.

Por lo tanto, el criterio de que las deformaciones de la placa base sean despreciables con respecto a los desplazamientos del anclaje no puede verificarse cuantitativamente. En consecuencia, en la práctica estándar, la placa base a menudo se considera rígida solo asegurándose de que permanezca elástica lineal. Esto es principalmente incorrecto porque la rigidez de una placa es independiente de su límite elástico.

La consecuencia de considerar una placa base como rígida cuando no lo es se muestra en la figura. 1(b) para un grupo de anclaje sometido a una carga de tensión y momento. En este caso, la deformación de la placa base se desvía de la linealidad, lo que da como resultado fuerzas en los anclajes significativamente diferentes a las calculadas asumiendo un perfil lineal como se muestra en la figura. 1(a). Además, a medida que la placa base se presiona contra la superficie de concreto, se desarrollan fuerzas de palanca (compresión) debajo de la placa que deben estar en equilibrio con las fuerzas de tensión en los anclajes y las fuerzas o momentos externos. Para una placa base flexible, la fuerza de compresión resultante es mayor en comparación con la placa base rígida. Por lo tanto, para mantener el equilibrio, las fuerzas de tensión en los anclajes deben ser mayores para la placa de base flexible.

De hecho, cuanto mayor sea el grado de desviación del perfil de desplazamiento lineal de la placa base, mayor será la desviación de las fuerzas de tensión entre los anclajes del grupo de las fuerzas calculadas suponiendo

una placa base rígida. Este desajuste podría conducir a una severa reducción en el grado de seguridad de los anclajes. Por lo tanto, considerar las deformaciones realistas de la placa base y los desplazamientos de los anclajes es esencial para el cálculo y la evaluación confiables de los anclajes.

La rigidez de la placa base es una cuestión de su rigidez relativa con respecto a la rigidez del anclaje en lugar de su valor absoluto. Por lo tanto, la rigidez de los anclajes juega un papel importante a la hora de decidir el comportamiento de los anclajes. Sharma demostró que para que todo lo demás permanezca exactamente igual, el desempeño de los anclajes con diferentes tipos de anclaje y su influencia en el comportamiento estructural pueden ser significativamente diferentes.^{8,9} Por lo tanto, es esencial considerar el comportamiento de desplazamiento de los anclajes, el patrón de anclaje, y la geometría de la placa base de forma adecuada para un diseño seguro y fiable de los anclajes. Los métodos actuales basados en fuerzas son inadecuados para considerar estas influencias en el cálculo y evaluación de los grupos de anclaje. Tenga se en cuenta que en los métodos de diseño actuales, para anclajes bajo cargas de tensión y momento, las fuerzas del anclaje se calculan asumiendo una distribución de deformación lineal, suponiendo que la placa base es rígida y considerando la rigidez del anclaje como la rigidez axial del eje de acero (EA/h_{ef} , donde E es el módulo de elasticidad de un anclaje, A es el área de la sección transversal de un anclaje y h_{ef} es la profundidad de empotramiento efectiva de un anclaje), independientemente del tipo de anclaje.

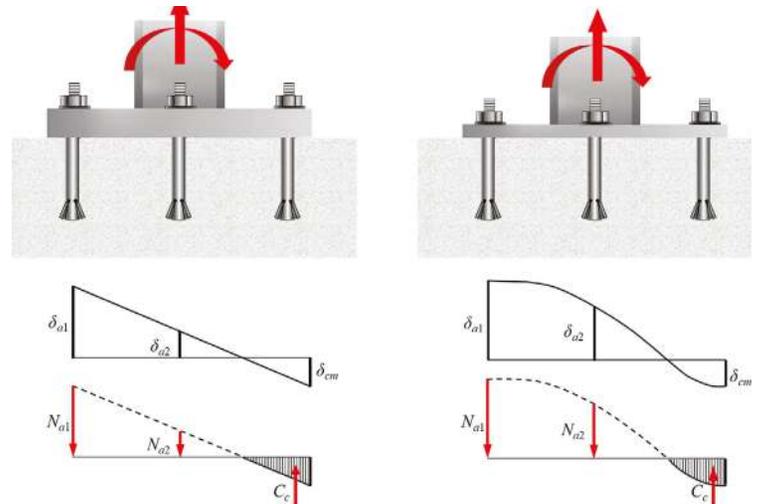


Figura. 1: Implicaciones de la rigidez de la placa base en la distribución de fuerzas entre los anclajes dentro de un grupo bajo tensión y carga de momento: (a) placa base rígida; y (b) placas base flexibles.

Enfoque basado en el desplazamiento para el cálculo de anclajes

Concepto general

Un enfoque basado en el desplazamiento requiere una consideración directa de la rigidez y las deformaciones de la placa base y la rigidez del anclaje en el cálculo de los anclajes. La rigidez y las deformaciones de la placa base pueden tenerse en cuenta mediante el modelado de la placa base y el perfil de conexión con una capa o elementos finitos sólidos con un lecho adecuado en la superficie de concreto modelada a través de resortes de compresión solamente. La rigidez del anclaje se puede modelar a través de resortes de solo tensión que están asociados con características de desplazamiento de carga lineales (rigidez constante) o no lineales (rigidez variable). Este tipo de modelado generalmente se denomina modelo de resorte para el cálculo de los anclajes.^{1,2,10} La figura 2 proporciona un esquema de un modelo de resorte para un grupo de anclaje con tres filas de anclaje sujetas a una fuerza de tensión concéntrica.

El concepto de modelar los anclajes a través de resortes solo de tensión y el asiento a través de resortes solo de compresión se origina en la suposición bien aceptada en la tecnología de anclajes de que, para un anclaje bajo fuerzas de tensión, los anclajes absorben la fuerza de tensión mientras que la fuerza de compresión se transfiere directamente por la placa base al concreto.

Dicho modelo permite la forma deformada de la placa base, los desplazamientos y las fuerzas del anclaje, así como la acción de palanca de la placa base (si la hay) para ser considerada de manera realista. La figura 3 explica el funcionamiento del modelo de resorte para un grupo donde la acción de palanca está presente en los bordes exteriores de la placa base.

Rigidez del anclaje modelada usando resortes lineales (elásticos)

En su forma más básica, el modelo de resorte para anclajes usa los anclajes modelados como resortes de solo tensión con un valor de rigidez constante, independientemente del nivel de fuerza asumido por los anclajes (Figura. 4). Debido a que la distribución

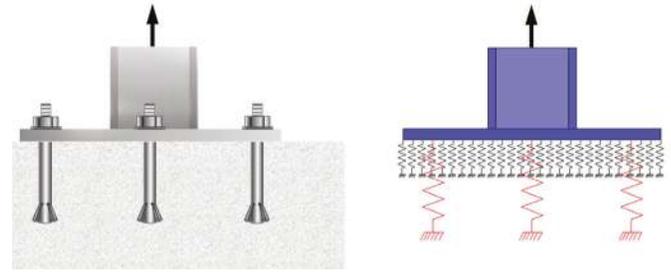


Figura. 2: El concepto general del modelo de resorte para anclajes. 1 La placa de base y el perfil conectado se modelan utilizando elementos de cubierta o sólidos, que se muestran en azul; el concreto se modela utilizando resortes de compresión únicamente, que se muestran en negro; y los anclajes se modelan utilizando resortes de solo tensión, que se muestran en rojo.

de fuerzas de anclaje de un grupo depende directamente de la rigidez relativa de la placa base y el anclaje, el método es adecuado para calcular la distribución realista de fuerzas entre los anclajes de un grupo, siempre que todos los anclajes permanezcan dentro del rango elástico. En principio, se considera que los anclajes de un grupo tienen valores de rigidez idénticos porque los códigos de diseño exigen que se utilicen anclajes del mismo tipo y tamaño en un grupo.

Para una determinada configuración de carga y anclaje, el grado de desviación de la distribución real de la fuerza de anclaje de una distribución de fuerza lineal correspondiente (tal como se supone de acuerdo con los métodos de diseño actuales) depende de la rigidez de la placa base y los anclajes. La rigidez de la placa base depende del grosor y la geometría de la placa base, el perfil adjunto y los refuerzos (si los hay), la aplicación de carga y la configuración del anclaje. La distribución de fuerzas tiene un comportamiento de distribución lineal a medida que aumenta la rigidez de la placa base en relación con la rigidez de los anclajes. Esto se explica con la ayuda de la Figura. 5. La desviación de la linealidad se puede juzgar tomando la relación de la diferencia de fuerzas absorbidas por el anclaje central y los anclajes exteriores a la fuerza total aplicada. Para una placa de base rígida, esta relación debe ser igual a 0 (misma fuerza absorbida por todos los anclajes). La placa de base relativamente delgada de la figura. 5(a) es elástica y no provoca una acción de palanca.

La relación descrita es igual a 0.4, lo que sugiere una desviación relativamente grande de la linealidad. Las placas más gruesas y, por lo tanto, más rígidas de las figuras 5(b) y 5(c) tienen relaciones de 0.1 y (prácticamente) 0, respectivamente.

Tenga en cuenta que el modelo de resorte lineal se basa en la suposición de una rigidez constante de los anclajes, independientemente del nivel de carga aplicado. El método no considera la resistencia o el comportamiento de desplazamiento de los anclajes más allá del límite elástico lineal. Por lo tanto, el método es principalmente aplicable para el cálculo de la desviación de las fuerzas de anclaje de la distribución de fuerzas lineales, que podría usarse para juzgar la rigidez de la placa base.

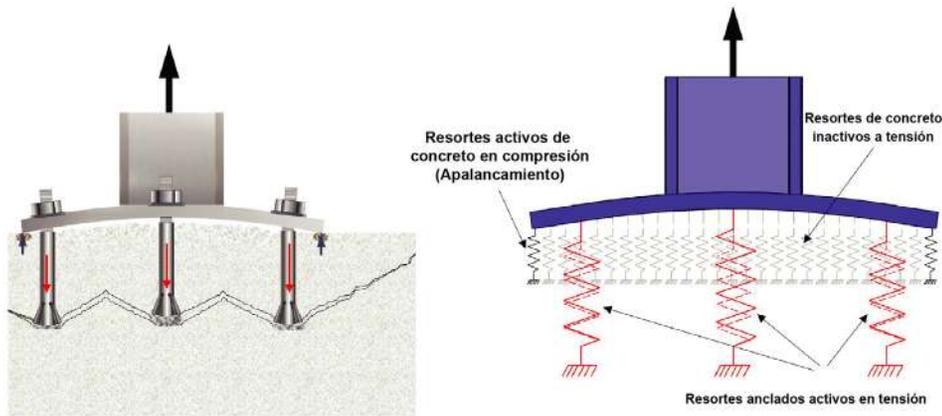


Figura 3: Funcionamiento del modelo de resorte para un grupo de anclaje con acción de palanca de la placa base

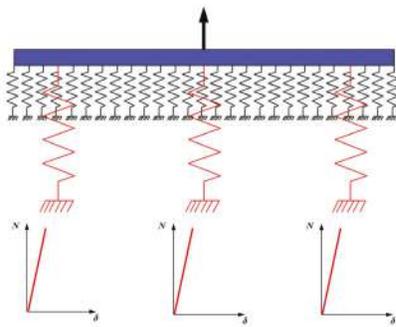


Figura 4: Modelo de resorte para anclajes con rigidez lineal de los anclajes.

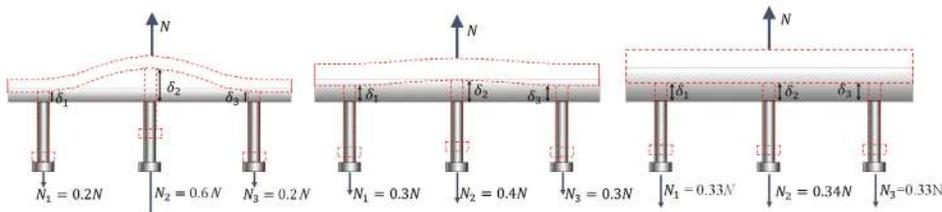


Figura 5: Representación cualitativa de la influencia de la rigidez de la placa base en la distribución de fuerzas entre los anclajes de un grupo: (a) placa de baja rigidez; (b) placa de rigidez media; y (c) placa de alta rigidez

Modelado de la rigidez del anclaje usando resortes no lineales (inelásticos)

Como el comportamiento de los anclajes es esencialmente no lineal, es imperativo que la mejor manera de modelar el comportamiento del anclaje sea asociar características de carga-desplazamiento no lineal a los resortes de anclaje. Es bien sabido que, en estructuras redundantes, una vez que un componente de la estructura se agrieta o cede y su rigidez disminuye, la fuerza y los momentos se redistribuyen entre los otros miembros de la estructura que pueden absorber esas fuerzas/momentos. Solo después de formar un número suficiente de rotulas, la estructura (o una parte de ella) falla o se derrumba. Análogamente, también en un grupo de anclajes con múltiples anclajes, a medida que la rigidez de uno (o algunos) de los anclajes disminuye por agrietamiento, deslizamiento o fluencia por sobrecarga, las fuerzas se redistribuyen a los otros anclajes de un grupo. Este aspecto debe considerarse no solo la distribución de fuerzas sino también la redistribución de fuerzas entre los anclajes de un grupo lo que puede explicarse modelando los anclajes a través de resortes no lineales y realizando un análisis basado en el desplazamiento.

El concepto básico es asociar una respuesta de carga-desplazamiento no lineal (multilineal) de los anclajes como características del resorte. Así, las características del resorte

son la forma idealizada de las curvas de carga-desplazamiento obtenidas de las pruebas de tensión en los anclajes. Las pruebas deben llevarse a cabo en anclajes individuales alejados de cualquier borde y deben dar como resultado el modo de falla para el cual se requieren las características de resorte del anclaje. Para modos de falla, donde la respuesta de los anclajes no está influenciada por anclajes vecinos o un borde cercano (por ejemplo, falla del acero del anclaje¹⁰), las curvas de carga-desplazamiento obtenidas de las pruebas de anclaje único se pueden usar directamente como muelles de anclaje en la forma idealizada.

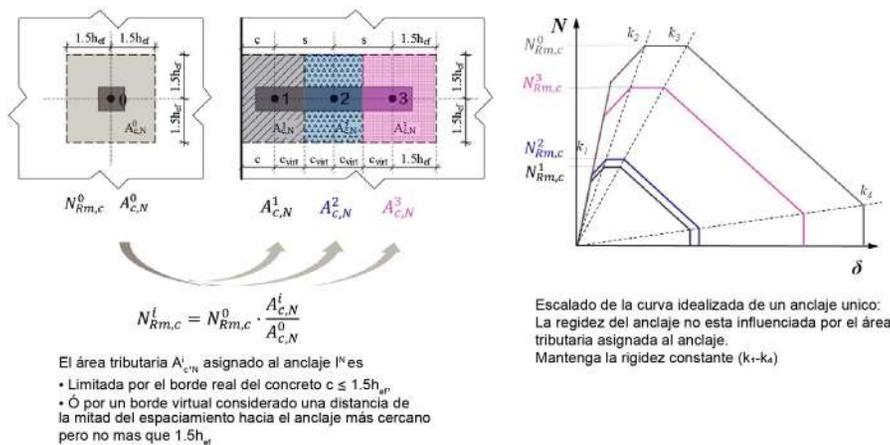


Figura. 6: Enfoque de área tributaria propuesto por Bokor¹ para tener en cuenta los anclajes vecinos y un borde libre en las características del resorte de anclaje utilizadas en el modelo de resorte no lineal.

Para el modo de falla por ruptura del cono de concreto, donde la capacidad de anclaje y el comportamiento están influenciados por los anclajes vecinos o un borde, las características del resorte del anclaje deben modificarse en consecuencia. Bokor desarrolló un modelo de resorte no lineal para anclajes que experimentan un modo de falla por ruptura del concreto.^{1,2} En este modelo, la influencia de los anclajes vecinos y un borde cercano (si lo hay) se tiene en cuenta mediante un enfoque de área tributaria. El concepto del enfoque del área tributaria¹ se explica en la figura. 6.

En el modelo de resorte no lineal para el modo de falla del cono de concreto, la curva de carga-desplazamiento generalmente se idealiza a través de cinco segmentos de línea (formato pentalineal).^{1,2} Los puntos sobresalientes que definen el formato corresponden a las rigideces secantes k_1 a k_4 . El formato de idealización con cinco segmentos ofrece un buen equilibrio entre simplicidad y precisión. Sin embargo, se puede usar una mayor cantidad de segmentos de línea para mejorar la precisión si es necesario. Si los datos de prueba no proporcionan una rama descendente confiable, la curva puede simplificarse con una rama descendente vertical que daría como resultado una redistribución limitada de las fuerzas de anclaje.

Para tener en cuenta el espaciado y la distancia al borde, la curva carga-desplazamiento idealizada del caso de referencia se reduce de tal manera que la rigidez secante de los puntos correspondientes de las curvas permanece sin cambios (Véase la figura. 6). La carga máxima de los anclajes se reduce con respecto a la carga máxima del ancla de referencia en proporción a la relación entre el área tributaria del ancla y el área tributaria de referencia del ancla única. Estos postulados se basan en la evaluación de las pruebas reportadas.¹

Las características del resorte de anclaje así determinadas se asignan a los resortes correspondientes en el modelo de resorte (Véase figura. 3). En este modelo, se supone que los resortes de compresión (concreto) tienen un comportamiento elástico perfectamente plástico.¹ El concepto general del modelo de resorte, como se discutió anteriormente, también es válido para el modelo de resorte no lineal. Se lleva a cabo un análisis estático no lineal en el modelo donde la matriz de rigidez se actualiza en cada paso del análisis para tener en cuenta el cambio en la rigidez de los anclajes del grupo. Debido a la actualización paso a paso de la matriz de rigidez, cualquier redistribución de carga se contabiliza automáticamente. Por lo tanto, a diferencia de los métodos basados en la fuerza, en el modelo de resorte no lineal no hay necesidad de usar factores adicionales (los factores ψ usados prominentemente en el método CCD⁵) para tener en cuenta la excentricidad de la carga, o la interrupción de tensión supuesta en

la vecindad de un borde. Mediante la consideración apropiada de las áreas tributarias, el modelo de resorte no lineal también es aplicable a los anclajes con patrón de anclaje no rectangular o arbitrario.¹

La curva completa carga-desplazamiento para el anclaje se obtiene como resultado del análisis estático no lineal realizado utilizando el modelo de resorte no lineal. Por lo tanto, no solo se puede juzgar la resistencia en términos de carga, sino también el rendimiento total del anclaje. Además, la salida del modelo de resorte no lineal (curva de carga-desplazamiento) se puede utilizar en un modelo estructural para tener en cuenta el rendimiento del anclaje y la interacción entre los miembros o componentes conectados mediante el anclaje.

Con el modelo de resorte no lineal, se puede tener en cuenta varios aspectos del comportamiento de los anclajes que, de otro modo, no se considerarían en el modelo actual basado en fuerzas.

Bokor et al.¹¹ ensayaron una gran cantidad de anclajes con varias configuraciones, incluidas las que no están cubiertas por los estándares actuales. Se muestra que, para todos los casos, el modelo de resorte no lineal es capaz de calcular muy bien la respuesta de desplazamiento de carga de los anclajes.^{1,2} En la figura. 7 se muestran algunos ejemplos típicos. Todas las influencias principales, como la rigidez de la placa base, el patrón de anclaje, la geometría de la placa base, la posición de carga, la vecindad de un borde, etc., se pueden considerar muy bien a través del modelo de resorte no lineal. La figura 7(c) muestra la comparación de las cargas de falla de las pruebas con las cargas máximas obtenidas del modelo de resorte no lineal.

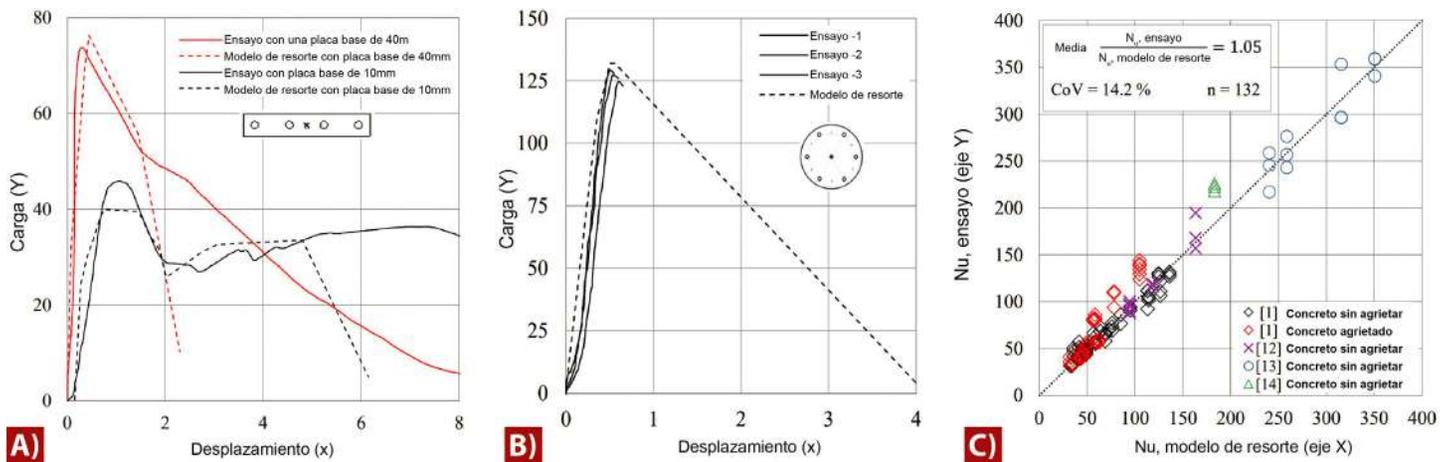


Figura. 7: Casos de ejemplo de anclajes calculados con modelo de resorte no lineal: (a) 1 x 4 grupos de anclaje; (b) anclajes hexagonales; y (c) comparación de cargas de falla

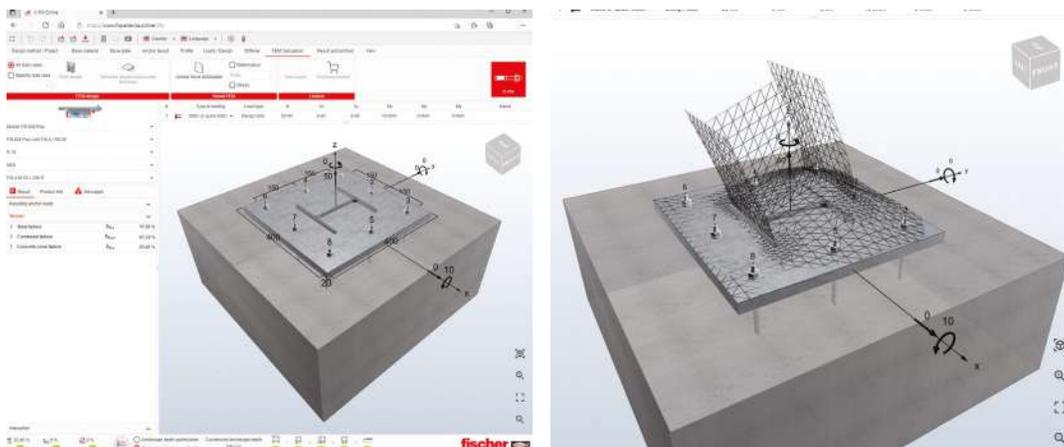


Figura. 8: Capturas de pantalla de ejemplo del software C-FIX para calcular los anclajes con modelo de resorte

Implementación de software

Los modelos de recursos descritos en este documento son herramientas poderosas para la evaluación y el diseño de anclajes. Debido a un sistema redundante con varios elementos finitos y recursos que pueden estar en el rango no lineal, se requiere de un procedimiento iterativo para resolver las ecuaciones de equilibrio y las condiciones de compatibilidad. Además, el modelo de resorte no requiere una actualización lineal paso a paso de la matriz de rigidez para tener en cuenta la redistribución de las fuerzas de anclaje. Por lo tanto, los modelos de recurso se utilizan mejor con la ayuda de un programa de software.

Para el beneficio de sus clientes, la compañía Fischer está trabajando en la implementación de los modelos de resorts en su software en línea fácil de usar, FiXperience C-FIX, como un módulo adicional llamado "diseño FEM".¹² Los conceptos discutidos anteriormente se siguen e implementan en el software a través de las correspondientes formulaciones matemáticas. Un modelo de recurso lineal está implementado y disponible para los usuarios (<https://www.fixperience.online/cfix>), mientras que la implementación de un modelo de recurso no lineal está en marcha y estará disponible pronto.

En la figura. 8 se muestran algunas capturas de pantalla de un caso de ejemplo de una conexión de base de columna típica calculada utilizando el módulo de diseño FEM de C-FIX. El programa en el estado actual es capaz de calcular la distribución realista de las fuerzas de anclaje y sus desplazamientos, así como el perfil de desplazamiento y los contornos de tensión de la placa base y el accesorio. Una característica adicional del programa permite un cálculo directo del espesor mínimo de la placa base requerida para lograr una desviación de fuerzas inferiores al 5, 10 o 15 % de las fuerzas calculadas asumiendo una distribución de fuerza lineal. Debido a una sólida interfaz gráfica de usuario, el tiempo requerido para modelar un anclaje en C-FIX es aproximadamente el 10 % del tiempo que se necesitaría para crear un modelo correspondiente en cualquier código de elementos finitos de propósito general. El propósito del software no es reemplazar el pensamiento de ingeniería vigoroso, sino apoyar a los ingenieros con métodos que ahorrarían mucho tiempo avanzado y ayudarían a lograr un diseño confiable y eficiente de los anclajes.

Referencias

1. Bokor, B., "Nonlinear Spring Modeling Approach for the Evaluation of Anchor Groups," PhD dissertation, Institute of Construction Materials, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany, 2021, 384 pp.
2. Bokor, B.; Sharma, A.; and Hofmann, J., "Spring Modelling Approach for Evaluation and Design of Tension Loaded Anchor Groups in case of Concrete Cone Failure," *Engineering Structures*, V. 197, Oct. 2019.
3. Fuchs, W.; Eligehausen, R.; and Breen, J.E., "Concrete Capacity Design (CCD) Approach for Fastening to Concrete," *ACI Structural Journal*, V. 92, No. 1, Jan.-Feb. 1995, pp. 73-94.
4. Eligehausen, R.; Mallée, R.; and Silva, J.F., *Anchorage in Concrete Construction*, Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 2006, 391 pp.
5. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 623 pp.
6. EN 1992-4:2018, "Eurocode 2 - Design of Concrete Structures - Part 4: Design of Fastenings for Use in Concrete," European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, Sept. 2018, 13 pp.
7. Fédération Internationale du Béton, *Design of Anchorages in Concrete: Part I-V*, fib Bulletin 58, Lausanne, Switzerland, July 2011, 280 pp.
8. Sharma, A., "Seismic Behavior and Retrofitting of RC Frame Structures with Emphasis on Beam-Column Joints – Experiments and Numerical Modelling," PhD dissertation, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany, 2013, 391 pp.
9. Sharma, A., "Urgent Need for a Performance-Based Approach for Seismic Assessment and Design of fastenings used in Structural Applications," *Advancements in Civil Engineering and Technology*, V. 3, No. 1, Apr. 2019, pp. 285-287.
10. Trautner, C.A., and Hutchinson, T.C., "Parametric FiniteElement Modeling for Exposed Steel Moment Frame Column Baseplate Connections Subjected to Lateral Loads," *Journal of Structural Engineering*, V. 144, No. 6, June 2018.
11. Bokor, B.; Sharma, A.; and Hofmann, J., "Experimental Investigations on Concrete Cone Failure of Rectangular and NonRectangular Anchor Groups," *Engineering Structures*, V. 188, June 2019, pp. 202-217
12. "Bemessung von zugbeanspruchten Befestigungen in Beton mit einem nicht-linearen Federmodell - Hintergrund und Softwarelösung für die Versagensart Betonausbruch (Un modelo de resorte no lineal para el diseño de anclajes cargados a tensión en concreto - Antecedentes y solución de software para fallas de cono de concreto)," *Bauingenieur*, V. 94, núm. 9, septiembre de 2019, págs. 326-335.



Boglárka Bokor, Experto Senior en el campo de la tecnología de anclaje en el Grupo de empresas fischer desde 2020. Tra bajó como investigadora asociada en el Instituto de Materiales de Construcción, Universidad de Stuttgart, Stuttgart, Alemania, de 2013 a 2020. Es una miembro de fib TG 2.9, Fijaciones. Bokor recibió su Doctorado en Ingeniería en 2021 de la Universidad de Stuttgart sobre el tema del desarrollo de un modelo de resorte no lineal para la evaluación de grupos de anclaje en concreto.



Akanshu Sharma, Miembro del ACI, Profesor asociado en la Universidad de Purdue, West Lafayette, IN, Estados Unidos. el es técnico secretaria para la fib TG 2.9, Sujeciones, y miembro de varios ACI y fib comités Ha trabajado en Bhabha Centro de Investigaciones Atómicas, Bombay, India, de 2004 a 2013, como Oficial Científico y en la Universidad de Stuttgart desde 2013 a 2021, como Profesor Asistente para el fortalecimiento innovador métodos que utilizan fijaciones (2017-2021) y como Jefe, Departamento de Seguridad contra Incendios, Instituto de Pruebas de Materiales (2020- 2021). Sharma recibió su Doctorado en Ingeniería en 2013 de la Universidad de Stuttgart



Thilo Pregartner, se unió a Fischer Grupo de Empresas en 2018 como responsable de la Transferencia y Aprobación de Tecnología departamento, y la Simulación Departamento. De 2003 a 2009, trabajaba en la Oficina de Ingeniería Eligehausen & Asmus, Stuttgart. Desde 2009 a 2018, fue Director Técnico, luego Gerente Senior de Ingeniería, con Powers, que fue adquirida por Stanley Black & Decker en 2012. Recibió su maestría en ingeniería civil de la Universidad de Karlsruhe, Karlsruhe, Alemania, y su doctorado en el campo de la tecnología de fijación del Instituto de Materiales de Construcción, Universidad de Stuttgart. Champaign, Urbana, IL, USA.

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de Ecuador Centro y Sur

Título: Diseño basado en desplazamiento de anclajes en hormigón



*Traductor y Revisor Técnico:
Santiago Velez Guayasamin*

En cada proyecto debemos esperar que los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión sean inferiores a la resistencia especificada

Involucrar el juicio de un ingeniero, ensayar cilindros de reserva y extraer núcleos sólo si se pueden evaluar

por James Klinger, Colin L. Lobo, Eamonn F. Connolly y Bruce A. Suprenant

¿Le sorprende el título? En cada proyecto, los profesionales experimentados de la industria del concreto reconocen que los resultados de las pruebas individuales de resistencia a la compresión pueden ser inferiores a la resistencia especificada, f'_c . Aunque hay numerosas razones por las que esto podría ocurrir, una razón importante es: los estándares para los criterios de aceptación utilizados en Estados Unidos se basan en conceptos estadísticos que permiten un resultado de prueba bajo, y es una práctica estándar para los productores de concreto diseñar mezclas de concreto basadas en una probabilidad de alrededor del 10% de que una prueba de resistencia individual pueda ser inferior al valor de f'_c .¹⁻³ Esto se hace de manera que el propietario se beneficie de una mezcla de concreto económica y sustentable que cumpla con el Código ACI 318-19⁴ y represente un riesgo limitado para el desempeño estructural considerando en el diseño el uso de factores de seguridad y resistencia. Cuando el resultado de un ensayo de resistencia a compresión es sustancialmente inferior al valor de f'_c , para resolver el problema se recurre al juicio técnico, al uso de cilindros de reserva y, si es necesario, a la evaluación de los núcleos extraídos.

¿Es normal que una prueba de resistencia sea inferior al f'_c y con qué frecuencia?

Un resultado individual de una prueba de resistencia a compresión menor que el

valor de f'_c es aceptable de acuerdo con el Código.^{3,5,6} En la Sección 26.12.3.1 del ACI 318-19, los criterios de aceptación de la resistencia establecen que los resultados de la prueba de resistencia son aceptables si:

- El promedio de tres pruebas consecutivas es igual o superior al valor de f'_c ; y
- Cada ensayo individual supera el valor de $(f'_c - 500 \text{ psi})(f'_c - 35 \text{ kg/cm}^2)$ o $0.9 f'_c$, si el valor de f'_c supera los 5000 psi. (350 kg/cm^2)

El ACI 301-20, en su Sección 4.2.3.3,¹ establece el proceso para determinar la resistencia promedio requerida, f'_{cr} , con una probabilidad de cumplimiento del 99% (las pruebas de resistencia pueden fallar al criterio en un 1% de probabilidad).

Por lo que respecta al primer criterio de resultados aceptables del ensayo de resistencia, el valor de f'_{cr} debe ser al menos 1.34 s_s mayor que el de f'_c , siendo s_s la desviación estándar de al menos 30 ensayos de resistencia de la misma clase de concreto de un proyecto anterior. En una distribución estadística normal, el factor 1.34 indica que aproximadamente el 10% de las pruebas de resistencia individuales pueden ser inferiores a f'_c .

El ACI 318-19, Sección 26.12.2.1, y el ACI 301-20, Sección 1.7.3.3(d), establecen la misma frecuencia mínima de pruebas de resistencia a la compresión a razón de una prueba por cada 150 yd³ (114.68 m^3) de concreto. Se suele hacer referencia al

ACI 301 en las Especificaciones del Proyecto y en el AIA MasterSpec® Sección 033000- Concreto Colado en el Lugar.⁷ Algunas especificaciones de proyectos exigen ensayos con una frecuencia mayor, normalmente un ensayo por cada 100 yd³ (76.46 m³) de concreto. La Tabla 1 muestra con qué frecuencia es probable que el ensayo de resistencia a compresión medido esté por debajo del f'_c , basándose en los conceptos estadísticos de la frecuencia de los ensayos a razón de un ensayo por cada 100 o 150 yd³ (76.46 o 114.68 m³) de concreto.

Para un proyecto con 10,000 yd³ (7,645.55 m³) de concreto, es de esperar entre siete y 10 pruebas con resultados menores al valor de f'_c . En un proyecto grande con 100,000 yd³ (76,455.49 m³) de concreto, este número es de 67 a 100. Si esto no se cumple, la mezcla de concreto se sobredimensiona más de lo requerido por el ACI 301. Esto puede estar relacionado con los requerimientos de las normas donde una relación máxima agua/materiales cementantes (a/cm) no es consistente con el valor de f'_c o se especifica un contenido mínimo de cemento. Algunos productores también aumentan la resistencia

Tabla 1:
Número esperado de resultados de pruebas de resistencia a la compresión inferiores al valor de f'_c

Volumen de concreto colocado, yd ³	Número mínimo de pruebas		Número esperado de pruebas inferiores al valor de f'_c	
	Una por cada 150 yd ³ (ACI 318-19, ACI 301-20)	Una por cada 100 y ³	Una por cada 150 yd ³ (ACI 318-19, ACI 301-20)	Una por cada 100 y ³
1000	7	10	1	1
10,000	70	100	7	10
50,000	334	500	34	50
100,000	667	1000	67	100

de las mezclas para evitar problemas relacionados con las pruebas.

Cuando los resultados de las pruebas de resistencia son inferiores al f'_c , es posible que la falla esté en las pruebas y no sea representativa del concreto entregado. Esto es especialmente cierto cuando la fabricación, la manipulación, el curado y los ensayos de los cilindros no se realizan de acuerdo con las normas ASTM aplicables. Por lo tanto, los problemas relacionados con las pruebas pueden complicar el establecer cuántos resultados de estas serán inferiores al valor de f'_c y, lo que es más importante, si los resultados de las pruebas de resistencia son representativos del concreto suministrado.

Cuando las pruebas de resistencia no cumplen los criterios de aceptación del ACI 318, deben tomarse medidas para aumentar las siguientes pruebas de resistencia. En la Sección de Comentarios de R26.12.3.1(b) del ACI 318-19, se ofrece orientación sobre los pasos a seguir para aumentar las pruebas de resistencia en el futuro. La Asociación Nacional de Concreto Premezclado (NRMCA, por sus siglas en inglés) sugiere una secuencia de evaluación más relevante.⁸ Si una prueba de resistencia individual no cumple con el segundo criterio del ACI 318-19 para los resultados de pruebas de resistencia aceptables, entonces el Código solicita una investigación de baja resistencia.

Los laboratorios de pruebas no reconocen que una prueba de resistencia a la compresión puede ser inferior a f'_c y seguir cumpliendo los criterios de aceptación del Código. Lamentablemente, el laboratorio de pruebas marca el informe de pruebas como “fallido” o “rechazado”, ambas calificaciones son inapropiadas. En primer lugar, la prueba no incumplió los criterios de aceptación del Código y, en segundo lugar, el laboratorio de pruebas no tiene autoridad para aceptar o rechazar. Esta información

engañoso suele crear confusión, gastos y retrasos innecesarios. Esta cuestión debería discutirse en la reunión previa a la construcción. Algunos laboratorios de pruebas creen que deben alertar al propietario o al equipo de diseño si la resistencia medida en un solo cilindro a los 7 días no alcanza un determinado porcentaje que se supone para la resistencia especificada a los 28 días. Esta práctica podría causar un pánico innecesario y debería evitarse porque normalmente no hay ningún requisito a los 7 días, ensayar un cilindro no es una prueba válida, y cada mezcla tiene una tasa única de ganancia de resistencia.

Cuesta menos estar por debajo del f'_c – Beneficios para el propietario

¿Cuál es el gasto si ninguna prueba de resistencia puede ser inferior al valor de f'_c ? Si f'_c es la resistencia mínima absoluta, la mezcla debe ser diseñada para un nivel de resistencia al menos tres desviaciones estándar mayor que f'_c . Esto requerirá al menos 50 libras más de cemento en cada yarda cúbica de concreto. Esto podría aumentar el precio del concreto hasta unos \$15 dólares por yarda cúbica. Para un proyecto con 10,000 yd³ de concreto, el costo adicional del concreto sería de \$15,000 dólares. Y en un proyecto de gran tamaño con 100,000 yd³ de concreto, el costo adicional del concreto sería de \$1'500,000 dólares. Ese es el beneficio que recibe el propietario al permitir algunas pruebas de resistencia por debajo del f'_c . Con un mayor contenido de cemento, se pueden generar problemas adicionales como el incremento del potencial de agrietamiento por mayor contracción o efectos térmicos. En esta era de la construcción ecológica, al aumentar la resistencia del concreto también se incrementa su huella de carbono y se dificulta la consecución de los objetivos de sustentabilidad de los proyectos.

Utilizar conscientemente los cilindros de prueba – Discutirlo en la reunión previa a la construcción

Durante la reunión previa a la construcción, el ingeniero debe dar instrucciones al laboratorio encargado de las pruebas sobre las medidas

adecuadas cuando los resultados de las pruebas de resistencia sean inferiores al f'_c . Generalmente, se elabora un juego de cuatro a seis cilindros a partir de una muestra de concreto (Figura. 1). Preferentemente, retener cilindros adicionales para ensayar a una edad posterior si es necesario (Figura. 2).

Los detalles de los cilindros de reserva o adicionales se analizan en una sección posterior. No obstante, cabe señalar que estos cilindros deben utilizarse antes de los ensayos de núcleos porque el equipo de diseño consideró prudente exigir cilindros de reserva o adicionales en las especificaciones del proyecto y el propietario consideró que era benéfico pagarlos. La decisión de sacar núcleos añade un costo extra sin obtener el beneficio de la información adicional de los cilindros de reserva que ya están pagados..

Se debe discutir un elemento de prueba adicional, según las recomendaciones del NRMCA CIP 35: “Si uno o ambos cilindros de una muestra se rompen con una resistencia inferior al f'_c , hay que evaluar los cilindros en busca de problemas obvios y retener los cilindros probados para su examen posterior”.³ Esto es generalmente una práctica común en un laboratorio de pruebas; sin embargo, debe ser discutido para asegurarse de que los cilindros están disponibles para ser examinados.



Figura. 1: Normalmente, se fabrican de cuatro a seis cilindros de concreto de 6 x 12 pulg. en la obra para cumplir con los requisitos de las especificaciones del proyecto (foto cortesía de PCA)

DATOS DE CAMPO Y DE LABORATORIO	Fecha:	5/28/2010	Hora de dosificación del concreto:	8:10 A.M.	Hora de muestreo del concreto:	8:35 A.M.	Muestreado por:	KT
	Camión de concreto núm.:	24453	Recibo núm.	31259786	Tamaño de la Carga (yd ³)	10	Condiciones Ambientales:	Despejado
	Agua Añadida en Sitio:	<input type="checkbox"/> Yes <input checked="" type="checkbox"/> No Si sí: Galones totales yd ³					Agua Extra Autorizada por:	N/A
	Revenimiento (pulgadas) ² :	6	Temperatura del Aire (°F)	78	Temperatura del Concreto (°F) ³ :	75	Peso Húmedo (lbs/pie ³)	N/A
	Contenido de Aire (% por Vol) ⁴	N/A	Moldeado y Curado ⁵ de conformidad con ASTM C-31: <input type="checkbox"/> Yes No <input type="checkbox"/> Desconocido				Ensayado con ASTM C-39	<input checked="" type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No
	Lugar del Colado Losa sobre rasante en el lado este de la zona H/S de la obra, 100° al norte de la esquina sureste							

Juego No. 709	Fecha de recibido en el Laboratorio	Fecha de ensayo	Edad (años)	Tamaño del espécimen de prueba		Carga total aplicada (lbs)	Resistencia de ensayo (psi)	Tipo de fractura	Peso del espécimen (Secado al aire)
				Diámetro (pulg.)	Área (pulg. ²)				
A	06/01/10	06/04/10	7	4.04	12.82	77,000	6,010	5	
B	06/01/10	06/04/10	7	4.05	12.88	80,500	6,250	5	
C	06/01/10	06/25/10	28	4.03	12.76	97,000	7,600	5	
D	06/01/10	06/05/10	28	4.05	12.88	96,000	7,450	5	
E	06/01/10	06/25/10	28	4.03	12.76	96,500	7,560	4	
F	06/01/10		H						
G	06/01/10		H						

Figura. 2: El laboratorio encargado de las pruebas fabricó siete cilindros de concreto de 4 x 8 pulg. Dos cilindros se ensayaron a los 7 días, tres cilindros se ensayaron a los 28 días, y dos cilindros adicionales se retuvieron para ensayarlos a una edad posterior si fuera necesario

A menudo, la simple medición del peso de un cilindro para calcular una densidad aproximada antes de la prueba puede ser útil para determinar si hubo una compactación inadecuada, objetos extraños incrustados u otros problemas.

A veces los ingenieros son reacios o se niegan a considerar la información que aportan los cilindros de reserva o adicionales. Si ese es el caso, se debe mantener una conversación con el propietario antes de la construcción. El propietario sólo quiere pagar para recibir un beneficio y, si los cilindros de reserva o adicionales no lo hacen, deben ser eliminados del contrato de pruebas.

Investigando los resultados de las pruebas con baja resistencia

El ACI 318 y el ACI 301 establecen los requisitos cuando una prueba de baja resistencia debe ser investigada. Se debe involucrar el juicio de un ingeniero para determinar el alcance de la investigación a fin de verificar si es necesaria una acción correctiva. En primer lugar, hay que preguntarse: si el resultado de la prueba es cierto, ¿tiene importancia?

La sección 26.12.6.1, parte (b), del ACI 318-19 requiere que el ingeniero considere si “los cálculos indican que la capacidad estructural se ha reducido significativamente”. Si el resultado bajo de la prueba es adecuado, ¿por qué gastar tiempo y dinero en determinar la causa principal? No obstante, según los principios estadísticos aceptados, debe considerarse la posibilidad de realizar un análisis de la causa raíz cuando haya un número de resultados de baja resistencia superior al previsto.

El ingeniero dispone de herramientas para investigar el resultado de una prueba de resistencia baja, entre ellas: 1) utilizando el juicio de un ingeniero experimentado; 2) evaluando las variaciones de las pruebas con respecto a las normas; 3) datos complementarios de las pruebas de cilindros de reserva o adicionales; 4) pruebas no destructivas para una evaluación relativa; y 5) pruebas de núcleos utilizando los criterios de resistencia de núcleos indicados en ACI 318.

Juicio de los ingenieros

El ACI 318-19 utiliza la palabra “juicio” 16 veces en el documento. La primera cita que aparece en la Introducción podría ser la más importante: “El Código y el Comentario no pueden sustituir a los sólidos

conocimientos del ingeniero, la experiencia y el juicio”. La Sección de Comentarios R26.12.6.1 en el ACI 318-19 indica que se debe aplicar el juicio en cuanto a la importancia de los resultados de las pruebas de baja resistencia y si son una causa de preocupación. En caso de que se considere conveniente realizar una investigación adicional, ésta puede incluir ensayos en el lugar como se describe en el ACI 228.1R-19⁹ o, en casos extremos, la extensión y ensayo de núcleos.

El juicio de los ingenieros se desarrolla a través de la experiencia. Un ingeniero debe evaluar los resultados de las pruebas de baja resistencia teniendo en cuenta las siguientes observaciones:

- Cualquier discrepancia o deficiencia en los ensayos proporciona un valor inferior del concreto entregado en el proyecto. Por lo tanto, si se sospecha que hay un problema en la prueba, la resistencia a la compresión real es mayor que el valor de la prueba. Además, el problema más probable podría ser la falta de un curado inicial adecuado de las muestras de ensayo en la obra;
- La resistencia a la compresión del concreto aumenta con la edad. Por lo tanto, la resistencia del concreto ensayado a una edad más avanzada es mayor que la resistencia ensayada a una edad más temprana. La tasa de aumento de la resistencia es mayor para las mezclas que contienen materiales cementantes suplementarios, como las cenizas volantes o el cemento de escoria; y
- La resistencia a la compresión de un solo cilindro ensayado a una edad posterior puede servir de base para determinar si el concreto es estructuralmente adecuado. Así pues, aunque no sea una prueba de resistencia reconocida por el Código, puede utilizarse como base para la aceptación. El ingeniero puede considerar que las cargas de servicio y vivas sobre un elemento estructural pueden aplicarse a una edad posterior a los 28 días.

Evaluación de las variaciones en los ensayos con respecto a las normas ASTM

Es importante que los procedimientos se realicen de acuerdo con los estándares de la ASTM. Las deficiencias en la manipulación y el

ensayo de los cilindros darán lugar a una menor resistencia medida.¹⁰ Todas las violaciones se suman para causar reducciones significativas en la resistencia medida. Richardson¹¹ afirma que “la simplicidad de la prueba de resistencia es engañosa porque los resultados medidos dependen en gran medida del estricto cumplimiento de los procedimientos uniformes estandarizados. El incumplimiento de estos procedimientos puede dar lugar a resultados imprecisos. Con demasiada frecuencia, los resultados de las mediciones de resistencia están plagados de errores en los ensayos. La mayoría de las desviaciones de los procedimientos estandarizados para los ensayos dan lugar a resultados de resistencia bajos. Las consecuencias de unos resultados falsamente bajos pueden ser: 1) retrasos innecesarios; 2) ensayos de seguimiento costosos; 3) sobrediseño innecesario; y 4) posible rechazo de un concreto aceptable para el propósito.¹²”

Según la Sección 3.3 del ACI 214R-11(19): “Las desviaciones en el muestreo de campo, la preparación de la muestra, el curado y los procedimientos de ensayo pueden causar resultados de ensayos de resistencia inferiores”. El comité proporciona una lista de las principales fuentes de variación de la resistencia:

- Muestreo inadecuado del lote;
- Variaciones debidas a las técnicas de fabricación:
 - o Condiciones inferiores a las indicadas en la norma,
 - o Herramientas incorrectas,
 - o Moldes de pobre calidad, dañados o defectuosos,
 - o Moldeo y compactación no estándar, y
 - o Manipulación incorrecta de las muestras para ensayo en estado fresco;
- Diferencias en el curado:
 - o Retrasos en el inicio del curado inicial,
 - o Variación de la temperatura,
 - o Control variable de la humedad,
 - o Curado inicial no estándar,
 - o Retrasos en el transporte de los cilindros al laboratorio,
 - o Manipulación brusca de los cilindros durante el transporte, y
 - o Curado final inadecuado; y
- Variaciones en los ensayos de las muestras:
 - o Técnico no certificado,
 - o Preparación de la superficie de la muestra,
 - o Equipo de ensayo inadecuado o no calibrado,

- o Velocidad de carga no estándar, y
- o Mala conservación de los registros.

La evaluación de las variaciones de las pruebas puede llevar mucho tiempo y ser costosa. Sin embargo, una revisión del informe de las pruebas de resistencia puede proporcionar una evaluación preliminar de los procedimientos de ensayo:

- Comprobar el diámetro y la altura de los cilindros. No todos deben tener exactamente 6 x 12 pulg. o 4 x 8 pulg.;
- Comprobar el coeficiente de variación entre los cilindros compañeros ensayados a la misma edad. En promedio, no debe exceder el 3% y la diferencia en la resistencia de cilindros compañeros no debe exceder el 8% más que alrededor de 1 en 20;
- Comprobar las resistencias a los 3 y 7 días en comparación con la resistencia a los 28 días. Deben tener una tendencia consistente; y
- Otros detalles pueden proporcionar alguna información: camión muestreado, tamaño de la carga, tiempo entre la elaboración del lote y el muestreo, temperatura ambiente y otras condiciones, y las fechas de fabricación de los cilindros y de su transporte al laboratorio.

Información complementaria de los cilindros de reserva o adicionales

No está claro cuándo los cilindros de reserva o adicionales se convirtieron en una adición normal a las especificaciones de los proyectos para las pruebas de concreto, pero parece que se remonta al menos a 50 años atrás. En las especificaciones de proyectos recientes que hemos encontrado (para un hotel, un centro médico, un centro de tránsito y una instalación de tratamiento de aguas) se incluía la siguiente disposición:

“Pruebas de resistencia a la compresión: ASTM C39/C39M-12, un juego por cada 100 yardas cúbicas (76.46 m³) o fracción, de cada tipo de concreto colocado en cualquier día o por cada 5,000 pies cuadrados (464.51 m²) de superficie colocada: un espécimen ensayado a los 7 días, dos especímenes ensayados a los 28 días y un espécimen retenido en reserva en el laboratorio para ensayos posteriores en caso de ser necesario.”

La especificación del proyecto exige una muestra adicional por cada 100 yd³ de concreto colocado. En un proyecto con 10,000 yd³ (283.17 m³) de

concreto, el propietario paga 100 cilindros adicionales de reserva o retención. Y en un proyecto grande con 100,000 yd³ (2831.69 m³) de concreto, el propietario paga por 1000 cilindros adicionales de reserva o retención. El costo de fabricar, curar, almacenar y probar un cilindro varía de 75 a 150 dólares. El costo será menor si no se ensayan los cilindros de retención. Para simplificar, consideremos que el costo es de 100 dólares, con lo que el costo de las pruebas puede llegar a ser de 100,000 dólares. El equipo de diseño y el propietario deben creer que el aumento en el costo es necesario y en beneficio del proyecto. En otras palabras, las especificaciones del proyecto que requieren cilindros de reserva o adicionales anticipan posibles problemas, así como la necesidad y el uso de datos de resistencia adicionales. Se debe equilibrar este costo con el de las pruebas de núcleos y los retrasos asociados en el programa.

El documento Diseño y Control de Mezclas de Concreto de la Asociación de Cemento Portland (PCA) reconoce el uso de cilindros “adicionales”: “Además de los cilindros para las pruebas de aceptación, las especificaciones del proyecto a menudo requieren uno o dos cilindros de 7 días y uno o más cilindros de ‘retención’. Con los cilindros de 7 días se controla la ganancia de resistencia temprana para señalar posibles problemas en el cumplimiento de la resistencia especificada. Los cilindros de retención se utilizan habitualmente para proporcionar información adicional en caso de que los cilindros ensayados para su aceptación estén dañados o no cumplan la resistencia a la compresión requerida. Para resultados bajos a la edad de 28 días, los cilindros de retención suelen probarse a los 56 días”.¹³ Esta declaración se incluyó por primera vez en el año 2003 en la 14^a edición de esta publicación.¹⁴

En respuesta a una interrogante sobre el número mínimo de cilindros de reserva, en la sección de Q&R del Concrete International de noviembre de 2011 se señalaba que: “Es prudente tener al menos un cilindro ‘de reserva’ como respaldo para un cilindro mal fabricado o dañado (no es aceptable descartar el resultado del ensayo de un cilindro simplemente porque

fue bajo-debe quedar fuera de un rango provisto en la declaración de precisión en ASTM C39, 'Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto'.¹⁵ El NRMCA CIP 35³ también aboga por el uso de cilindros de reserva adicionales que puedan probarse si un cilindro de un juego falla con una resistencia inferior.

Introducido por primera vez en el ACI 318-14¹⁶ y mantenido en el ACI 318-19, la Sección de Comentarios R26.12.1.1(a) establece: "La fabricación y el ensayo de un número de especímenes superior al mínimo puede ser deseable en caso de que sea necesario descartar la resistencia de un cilindro individual fuera del rango, de acuerdo con el ACI 214R. Si se descartan las resistencias individuales de los cilindros de acuerdo con el ACI 214R, una prueba de resistencia es válida siempre que se promedien al menos dos resistencias individuales de cilindros de 6 x 12 pulg, o al menos tres resistencias de cilindros de 4 x 8 pulg. Todas las resistencias individuales de los cilindros que no se descarten de acuerdo con el ACI 214R se utilizarán para calcular la resistencia media". Así pues, el Código respalda el concepto de utilizar cilindros de reserva o de retención.

Información de resistencia de un cilindro

El Comentario en el ACI 318-63 abordó la cuestión de un solo cilindro como prueba:

"Una excesiva discrepancia en la resistencia entre los cilindros individuales que constituyen un ensayo indica o bien un espécimen defectuoso o procedimientos de muestreo y ensayo inadecuados. Si se puede establecer que uno de los especímenes era defectuoso, su resistencia debe descartarse y el otro valor debe utilizarse como el resultado del ensayo. En ausencia de tales evidencias, puede ser necesario descartar todo el ensayo, ya que su validez como medida de la calidad del concreto es cuestionable"¹⁷

Mientras que en el Comentario del Código de 1963 se recomendaba utilizar el valor único como resultado del ensayo, los comentarios del código posteriores a la edición de 1963 indican que un solo cilindro no es una prueba de resistencia válida.

El PCI MNL-116-21 proporciona una orientación más precisa sobre el uso de un cilindro como prueba: "Sólo puede utilizarse un espécimen para determinar la resistencia al desprendimiento o a la transferencia de esfuerzos a medida que avanza la producción. Si algún espécimen muestra evidencia definitiva (a excepción de una baja resistencia) de un muestreo, moldeado, manejo, curado o ensayo inadecuado, será descartado, y la resistencia del cilindro restante será considerada como el resultado del ensayo".¹⁸ Nótese que el propósito de esto es estimar la resistencia en el lugar para la producción de elementos pretensados.

Históricamente, los ingenieros de muchos y diversos proyectos han utilizado su juicio de ingeniería para aceptar la resistencia del concreto a una edad más avanzada, basándose en la información complementaria de un cilindro. Animamos a los ingenieros a que sigan utilizando su criterio de ingeniería y la información complementaria sobre la resistencia para determinar si el concreto es aceptable.

Resistencia del concreto en sitio a partir de pruebas de núcleo

Con demasiada frecuencia, los gerentes de construcción o los contratistas generales inician las pruebas de núcleos sin la dirección del ingeniero cuando una prueba de resistencia a la compresión está por debajo del valor de f'_c . Esto es a menudo un gasto innecesario y con frecuencia lleva a la extensión de núcleos y a la realización de pruebas que no se ajustan a la norma ASTM C42/C42M, "Método de prueba estándar para la obtención y el ensayo de núcleos perforados y vigas aserradas de concreto".¹⁹ La Sección de Comentarios R26.12.6.1(c) del ACI 318-19 considera al ingeniero como el especificador de los ensayos. Se trata de una distinción importante, ya que la norma ASTM C42/C42M reconoce que esta persona puede alterar los requisitos establecidos y es responsable del análisis o de la revisión y aceptación de los resultados de los ensayos de núcleos.

Además, la Sección de Comentarios R26.12.6.1 del ACI 318-19 proporciona tres consideraciones importantes con respecto a las pruebas de núcleos:

- La medición de la resistencia a la compresión de los núcleos sólo debe utilizarse en casos extremos;
- La extensión de núcleos y su posterior ensayo se realiza normalmente a una edad posterior a la especificada para el f'_c ; y
- Las resistencias de los núcleos no necesitan ser ajustadas en base a la edad de estos.

La misma Sección de Comentarios también afirma que el Código proporciona “criterios de aceptación conservadores” para los núcleos de “prácticamente cualquier tipo de construcción.” Y que “se puede tolerar una resistencia menor en muchas circunstancias, pero esto es una cuestión de juicio por parte del profesional de diseño autorizado y del responsable de la construcción”. Según el ACI 318-19, sección 26.12.6.1, parte (e): “El concreto en un área representada por las pruebas de núcleos se considerará estructuralmente adecuado si se cumplen (1) y (2):

- (1) La media de tres núcleos es igual al menos al 85 por ciento del f'_c .
- (2) Ningún núcleo es inferior al 75 por ciento del f'_c .

Cuando surjan “casos extremos” y sea necesario se deberán obtener núcleos adicionales, utilice la “Lista de comprobación técnica: Ensayos de núcleos de concreto”²⁰ de la Sociedad Americana de Contratistas de Concreto (ASCC por sus siglas en inglés) para garantizar que los núcleos extraídos se obtienen y se ensayan correctamente.

Antes de poner en marcha las costosas y posiblemente problemáticas pruebas de núcleos, el equipo del proyecto debería considerar la posibilidad de realizar pruebas en el lugar. Como se indica en la Sección de Comentarios R26.12.6.1 del ACI 318-19: “Los ensayos del concreto en el sitio, como la penetración de la sonda (ASTM C803²¹), el martillo de rebote (ASTM C805²²) o el ensayo de extensión (ASTM C900^[23]), pueden ser útiles para determinar si una parte de la estructura contiene realmente

concreto de baja resistencia. A menos que estas pruebas en el lugar se hayan correlacionado con la resistencia a la compresión utilizando procedimientos aceptados, como los descritos en el ACI 228.1R, resultan útiles principalmente para las comparaciones dentro de la misma estructura y no como estimaciones cuantitativas de la resistencia.”

Reclamaciones, créditos y daños, ¡Cielos!

La reclamación más citada es: “La resistencia de los cilindros a los 28 días debería ser igual o superior a la especificada o los propietarios no están recibiendo por lo que han pagado. No hay nada de malo en aceptar el concreto si se está convencido de que es adecuado, pero tal vez debería haber un ajuste financiero en beneficio de los propietarios, ya que claramente no obtuvieron lo que pagaron.” Lamentablemente, este argumento asume que f'_c es un mínimo absoluto. Si esto fuera cierto, entonces el criterio de aceptación de la resistencia del Código (1) en la sección 26.12.3.1(a) de “cada promedio de tres pruebas de resistencia consecutivas iguales o superiores a f'_c ” no tendría sentido. Si f'_c fuera un mínimo, entonces, por supuesto, la media de tres pruebas de resistencia consecutivas siempre superaría f'_c . Por lo tanto, este criterio del Código reconoce claramente que algunos resultados de pruebas de resistencia individuales serán inferiores a f'_c .

En cuanto al ajuste financiero, ¿cómo se calcularía? Como se indica en La ley de la construcción con sentido común²⁴, el requisito de que los ajustes financieros sean razonablemente proporcionales a los daños reales se deriva del hecho de que los tribunales se han negado tradicionalmente a aplicar lo que equivale a una sanción por incumplimiento de contrato. Una de las principales objeciones a las sanciones es que, si bien la ley favorece el reembolso por pérdidas, no aprueba la concesión de una indemnización o de beneficios inmerecidos, incluso para una de las partes inocentes. Permitir que una parte perjudicada recupere una cantidad superior a los daños reales que ha sufrido pondría, de hecho, a esa parte en una mejor situación que la que habría tenido si el contrato se hubiera cumplido.

Este resultado sería incompatible con la teoría básica de los daños contractuales.

Para terminar, el propietario se está beneficiando de una reducción del costo del concreto al permitir que algunos resultados de las pruebas estén por debajo de la f'_c . La concesión de un crédito financiero por esta cuestión sería, en efecto, la concesión de una ganancia inesperada para el propietario y no sería apropiada.

Referencias

1. ACI Committee 301, "Specifications for Concrete Construction (ACI 301-20)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2020, 69 pp.
2. ACI Committee 214, "Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete (ACI 214R-11) (Reapproved 2019)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2011, 16 pp.
3. "CIP 35—Testing Compressive Strength of Concrete," National Ready Mixed Concrete Association, Alexandria, VA, 2014, 2 pp.
4. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 623 pp.
5. ACI Committee E702, "Designing Concrete Structures: Acceptance of Concrete Compressive Strength Test Results According to ACI 318-19 (ACI E702.3-21)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2021, 5 pp.
6. Malisch, W.R., and Suprenant, B.A., "Acceptance of Concrete Test Results," *Concrete Contractor*, Aug./Sept. 2015, pp. 6-8.
7. MasterSpec®, The American Institute of Architects, Washington, DC.
8. "In-Place Concrete Strength Evaluation—A Recommended Practice," Publication 133, National Ready Mixed Concrete Association, Alexandria, VA, 2011.
9. ACI Committee 228, "Report on Methods for Estimating In-Place Concrete Strength (ACI 228.1R-19)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 48 pp.
10. "CIP 9—Low Concrete Cylinder Strength," National Ready Mixed Concrete Association, Alexandria, VA, 2014, 2 pp.
11. Richardson, D.N., "Review of Variables that Influence Measured Concrete Compressive Strength," *Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 3, No. 2, May 1991.
12. Goeb, E.O., "Why Low Cylinder Tests in Hot Weather?" *Concrete Construction*, Jan. 1986, 3 pp.
13. Wilson, M.L., and Tennis, P.D., *Design and Control of Concrete Mixtures*, 17th edition, EB001, Portland Cement Association, Skokie, IL, 2021, 586 pp.
14. Kosmatka, S.H.; Kerkhoff, B.; and Panarese, W.C., *Design and Control of Concrete Mixtures*, EB001, 14th edition, Portland Cement Association, Skokie, IL, 2002, 358 pp.
15. "Concrete Q&A: Reserve Cylinders for Compressive Strength Testing," *Concrete International*, V. 33, No. 11, Nov. 2011, p. 72.
16. 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.
17. ACI Committee 318, "Commentary on Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-63)," SP-10, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1963, 91 pp.
18. "Manual for Quality Control for Plants and Production of Structural Precast Concrete Products," MNL-116-21, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL, 2021, 340 pp.
19. ASTM C42/C42M-20, "Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, 7 pp.
20. "Technical Checklist: Concrete Core Testing," American Society of Concrete Contractors, St. Louis, MO, June 2008, 4 pp.
21. ASTM C803/C803M-18, "Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, 5 pp.
22. ASTM C805/C805M-18, "Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, 4 pp.
23. ASTM C900-19, "Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, 10 pp.
24. Smith, Currie & Hancock's *Common Sense Construction Law: A Practical Guide for the Construction Professional*, fourth edition, T.J. Kelleher, Jr. and G.S. Walters, eds., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2009, 736 pp.



James Klinger, miembro de ACI, es especialista en construcción con concreto de la American Society of Concrete Contractors (ASCC), St. Louis, MO, USA. Es miembro del Comité Conjunto ACI-ASCC 117, Tolerancias; de los Comités ACI 134, Constructibilidad del Concreto, y 318, Código de Construcción del Concreto Estructural; y del Subcomité ACI 318-A, General, Concreto y Construcción. Klinger obtuvo un máster en ingeniería estructural en la Universidad de Maryland, College Park, MD, USA.



Eamonn F. Connolly, miembro de ACI, es el Director de Ingeniería de James McHugh Construction Co., Chicago, IL, USA. Cuenta con más de 20 años de amplia experiencia como ingeniero estructural y responsable del diseño y la construcción de numerosos edificios de gran altura y proyectos de infraestructuras. Fue presidente del Comité ACI 309, Consolidación del Concreto, y miembro del Comité Conjunto ACI-ASCC 117, Tolerancias, así como de los Comités ACI 134, Constructibilidad del Concreto; 347, Encofrado del Concreto; y 435, Deflexión de Estructuras de Concreto para Edificios; y de los Subcomités ACI 301-I, Concreto Postensado - Sección 9, y 318-A, General, Concreto y Construcción. Obtuvo su licenciatura en ingeniería civil por el Instituto Tecnológico de Illinois, Chicago, IL, USA, y su máster en ingeniería por la Universidad de Aberdeen, Aberdeen, UK. Es ingeniero estructuralista autorizado en Illinois y profesionalista autorizado en ocho estados.



Colin L. Lobo, FACI, es Vicepresidente Ejecutivo de la División de Ingeniería de la National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA), Alexandria, VA, USA. Es miembro de varios comités del ACI, entre ellos el 132, Responsabilidad en la Construcción con Concreto; el 211, Proporcionamiento de Mezclas de Concreto; el 214, Evaluación de los Resultados de Ensayos Utilizados para Determinar la Resistencia del Concreto; el 301, Especificaciones para la Construcción con Concreto; el 318, Código de Construcción con Concreto Estructural; y el 329, Criterios de Desempeño para el Concreto Premezclado. Obtuvo su licenciatura en ingeniería civil por la Universidad de Mysore, Mysore, Karnataka, India; su máster por la Universidad de Northeastern, Boston, MA, USA; y su doctorado por la Universidad de Purdue, West Lafayette, IN, USA. Es ingeniero autorizado en el estado de Maryland.



Bruce A. Suprenant, FACI, es Director Técnico de la ASCC, San Luis, MO. Es miembro de los Comités ACI 134, Constructibilidad del Concreto, y 302, Construcción de Pisos de Concreto; y de los Comités Conjuntos ACI-ASCC 117, Tolerancias, y 310, Concreto Decorativo. Sus distinciones incluyen la Medalla ACI Arthur R. Anderson en 2021, el Premio ACI a la Construcción en 2020, el Premio ACI a la Certificación en 2013, el Premio ACI Roger H. Corbetta al Constructor con Concreto en 2010 y el Premio ACI a la Construcción en 2010.

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de México Noroeste

Título: En cada proyecto debemos esperar que los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión sean inferiores a la resistencia específica



Traductora:
Iliana M. Gárza Gutiérrez



Revisor Técnico:
Dr. Alejandro Durán Herrera

Transportador Automático de Personas de LAX

Solución personalizada utilizada para construir sobre el tránsito activo y alrededores de las estructuras existentes

El Aeropuerto Internacional de los Ángeles (LAX) ha emprendido un esfuerzo para aliviar el congestionamiento de las personas que viajan hacia y desde el tercer aeropuerto más transitado del mundo. Un componente clave de ese esfuerzo es el nuevo transportador automático de personas (APM, por sus siglas en inglés) de 2.25 millas (3.62 kms) de largo. El APM reducirá el tráfico y proveerá acceso rápido a las terminales y estaciones de transporte. El sistema eléctrico del tren operará un máximo de nueve trenes de cuatro vagones en una vía elevada con seis estaciones—tres dentro del Área de la Terminal Central (CTA, por sus siglas en inglés) y tres afuera de la CTA. Además de mejorar la eficiencia de los viajes por el aeropuerto, el APM reducirá la huella de carbono del aeropuerto con vehículos totalmente eléctricos que generarán parte de su propia energía a través del frenado regenerativo. El centro de mando está diseñado para obtener la certificación LEED Gold. El desarrollo del APM involucró la construcción de la vía guía sobre el tránsito del Century Boulevard y Sepulveda Boulevard y alrededores de las estructuras existentes incluido el Parqueo P2B, así como el soporte curvo sobre el boulevard Century. El equipo del proyecto necesitaba una solución a la medida para el encofrado móvil y cumplir con los planes de diseño, eficiencia, y sostenibilidad.

Soporte de todos los lados

Las condiciones del sitio—incluido incluyendo los cruces de carreteras en operación—significaron que no se podían utilizarse los métodos tradicionales de encofrado para este proyecto. En su lugar, PERI diseñó un método de construcción de puentes segmentado utilizando encofrados transportables para la colocación de concreto en sitio. Concreto colocado en sitio utilizando encofrados transportables. El involucramiento de PERI inició desde el principio del proyecto. El sistema VARIOKIT VBC no se había utilizado previamente en Estados Unidos, por lo que el equipo PERI y el equipo de diseño del proyecto visitaron un lugar en Austria para ver el sistema en uso. Posteriormente PERI inició un nuevo diseño de mecanismo de giro para la curva y soluciones para cruzar el tránsito de LAX. El resultado del sistema PERI VARIOKIT Balanced Cantilever (VBC) usa seis encofrados transportables VBC para un total de cuatro tramos —una sobre Sepulveda Boulevard, una sobre Century Boulevard, y dos tramos paralelos sobre la estructura del parqueo del CTA. Cada uno de los cuatro tramos tiene de 13 a 17 segmentos de 15 pies (5 m) y ubicaciones de cierre en el centro del tramo. El sistema PERI VARIOKIT reduce la construcción con alta capacidad de carga por aplastamiento, hidráulica integrada y soluciones de acceso seguro. Con VARIOKIT, las cuadrillas pueden transferir cargas de concreto fresco a la estructura de soporte y mover el encofrado de una sección a otra más fácilmente.



El sistema PERI VARIOKIT en uso durante la construcción del Transportador de Personas Automatizado en LAX en Los Ángeles, CA, EE. UU. (fotos cortesía de Arellano Associates)

Aspectos destacados

Se utilizaron cuatro torres de escaleras flexibles PERI UP de 80 pies (24 m) de altura para acceder a las áreas de encofrado. El sistema de escaleras PERI UP de acero está diseñado para cargas de 3.0 kN/m² (60 lb/ft²) con peldaños anchos, lo que hace que la escalera sea adecuada para que un gran número de usuarios se crucen entre sí y transporten material de forma segura. Para ayudar a planificar la solución de cada segmento, se utilizó el software PERI, incluido el análisis estructural y estático, PERI CAD 23 y PERI Extended Experience, para dar vida al diseño y garantizar que todos los componentes necesarios estuvieran listos a tiempo. PERI CAD, ideal para ingenieros CAD experimentados y profesionales de la construcción en encofrados y planificación de andamiaje, permitió planos detallados de las estructuras, dibujos de montaje y detalles de dibujos tridimensionales (3-D), lo que proporcionó una reducción de costes con una planificación de cantidad precisa. La aplicación PERI Extended Experience proporcionó una visualización en 3-D del proyecto con realidad virtual aumentada. El cliente pudo rastrear toda la información sobre el proyecto usando myPERI, un portal de clientes 24/7 que permite rastrear pedidos, ver informes y dibujos.

Tiempo de viaje

La construcción de concreto con soluciones PERI comenzó en agosto de 2021 y se espera este completado en el segundo trimestre de 2022. Se espera que el APM comience a servir a los viajeros en 2023. Para más información, visite www.peri-usa.com

Créditos del Proyecto

Arquitectos/Ingenieros HDR Inc.
Consultores: McNary Bergeron & Associates
Contratista: LAX Integrated Express Solutions

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de Guatemala
Título: *Transportador Automático de personas de LAX*



Traductor:
Ing. Andrés Verdín



Revisor Técnico:
Ing. Xiomara Sapón



CONCRETO
LATINOAMÉRICA