

Anchor Reinforcement for Anchor Channels

An advanced concept for increasing the concrete shear capacity at small edge distances

by Christoph Mahrenholz, Akanshu Sharma, Maciej Kucharski, Rolf Eligehausen, Neil L. Hammill, and Brian Hastings

Increasing worldwide urbanization pushes city centers to grow in height. The skylines of cosmopolitan cities are increasingly dominated by tall buildings clad with curtain wall façade panels (Fig. 1(a)). In many cases, these panels are attached to the structure by anchor channels. One of the challenges of this is that the concrete decks are becoming thinner and connection points of the façade panels are moving closer to the edge to maximize floor space. The solution is an anchor channel supplemented with anchor reinforcement, for which an advanced concept has been developed.

The prefabricated curtain wall façade panels are typically installed in quick succession as the structure rises. The façade panels are set on brackets (Fig. 1(b)) that have been preinstalled with channel bolts in cast-in anchor channels. Before loading, the channel bolts may be moved along the slot of the anchor channel, allowing the fastening of the brackets at any point along the length of the anchor channel. Together with the slotted holes in the brackets oriented in the perpendicular direction, construction tolerances can be easily accommodated by adjusting all connection points before the façade panels are installed.

The Story of Anchor Channels

Anchor channels are a success story over 100 years old.¹ Anchor channels consist of anchors either forged or welded to C-channels that are cast flush in reinforced concrete elements and allow the installation of matching channel bolts, also known as T-bolts. The robust anchor system can take relatively high tension and shear loads, and it can transfer loads in all directions by mechanical interlock. The installation of anchor channels as well as channel bolts is fail-safe because of the simple installation shown in Fig. 2. First, the channel is nailed to the formwork (for front-face installation) or to a template (for top-of-slab installation) before concreting (Fig. 2(a)). After the concrete has set and

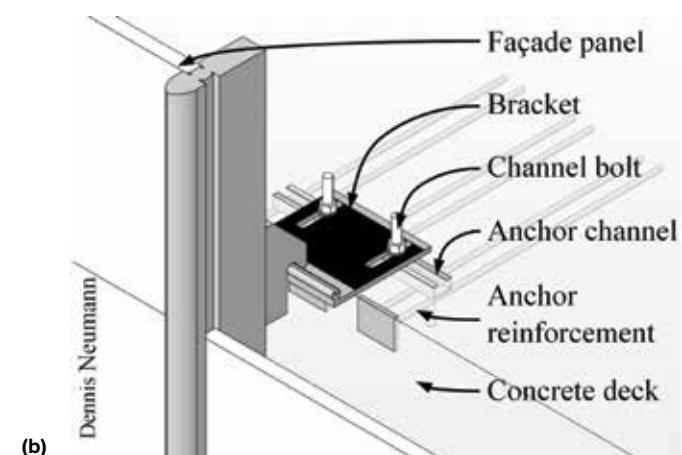


Fig. 1: Modern tall buildings typically have curtain wall façade panels: (a) new examples at Wolf Point Chicago (photo courtesy of Chris6d - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=72101208>); and (b) façade panels engage brackets fastened with channel bolts to a cast-in anchor channel enhanced with anchor reinforcement

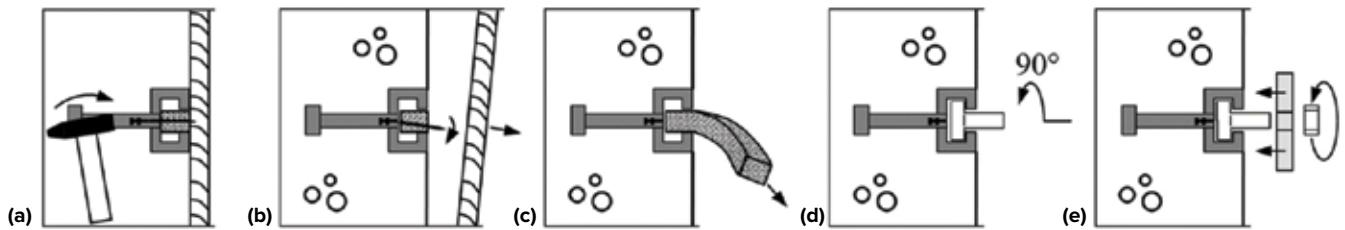


Fig. 2: Anchor channel installation sequence: (a) anchor channel is nailed to formwork or template and concrete is placed; (b) formwork is stripped after concrete has set; (c) filler material is removed from channel; (d) channel bolt is inserted and rotated 90 degrees to engage channel lip; and (e) components are fastened to the channel bolt

the formwork or template is removed, the pliable filler material, which prevents the concrete from leaking into the profile during placement, is removed from the channel (Fig. 2(b) and (c)). Channel bolts are then inserted and twisted in the slot of the anchor channel, allowing the fastening of components at any point along the length of the channel (Fig. 2(d) and (e)).

Qualification and Design of Anchor Channels

Independent third-party testing to ensure the performance of anchor channels started as early as the 1970s,² and well-established design rules are now available for design engineers. Highly loaded anchor channels embedded near the edge of concrete elements (for example, for façade installations) have, however, remained a critical design situation to date. In particular, it has been a challenge to safely anchor assemblies that impose high loads in thin concrete decks. However, anchor reinforcement can be used to considerably increase the capacity of such assemblies, and so it offers an efficient and safe solution. An advanced concept of anchor reinforcement is presented in the following discussion.

The design of anchor channels and channel bolts is codified in ACI 318-19³ and ICC-ES AC232.⁴ The latter document provides Acceptance Criteria (AC) for the extensive qualification of the anchor system to attain Evaluation Service Reports (ESR) with product-specific parameters (for example, ICC ESR-2854⁵). The design procedure is elaborate and involves the calculation of capacities against 20 possible failure modes and their interactions. Any of the failure modes can be decisive. Safety is ensured by the application of lower-strength reduction factors for brittle concrete-related failure modes with higher scattering, and the application of higher-strength reduction factors for ductile steel-related failure modes with lower scattering. Details of the design concept and the qualification procedure are discussed elsewhere.⁶

In the following sections, only two failure modes (concrete edge breakout and reinforcing bar yielding of the anchor reinforcement) are considered, as they are most relevant for anchor channels installed close to the edge of concrete elements and loaded by shear forces perpendicular to the channel axis.

Concrete Edge Breakout

Concrete edge breakout may occur if an anchor channel close to an edge is overloaded in shear applied toward the edge and breaks off the concrete between the anchor channel and edge. The corresponding capacity is calculated as

$$V_{ch} = V_b \cdot \psi_i = \alpha_{ch,V} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot c_{al}^{4/3} \cdot \psi_i$$

The product specific parameter $\alpha_{ch,V}$ takes into account the influence of the anchor channel geometry (typically determined as $10.5 \text{ lb}^{0.5}/\text{in.}^{0.33}$); and the modification factors ψ_i account for various other influences (for example, if the anchor channel is placed near a corner); f'_c is the specified concrete compressive strength; and c_{al} is the edge distance to the anchor (Fig. 3). Note that the first step of the verification is the distribution of the loads imposed by the channel bolts to the anchors of the channel. That is, anchors closer to the applied load are assigned a higher load and vice versa. In the second step, the steel- and concrete-related failure modes involving anchors are verified anchor by anchor (“anchor under consideration”). This approach allows total flexibility of the number and location of the channel bolts as well as the length of the channel. To carry out extensive calculations, the engineer can use free design software (for example, JORDAHL® EXPERT).

Early studies on shear-loaded anchors showed that anchor reinforcement such as hairpins will substantially increase the shear capacity.⁷ Also, reinforcing bars with end plates without concrete cover have been used to tie back the shear load.⁸ This is a method that is common in reinforced concrete design to resist high-shear loads at bearing pedestals, end bearings of beams, or pinned connections of precast elements. Another focus has included the surface reinforcement typically present at the edges of concrete decks (vertically placed hairpins combined with horizontal edge reinforcement oriented parallel to the slab edge and passing through the hairpin bend) forming the basis for codified design rules for concrete anchors and anchor channels (Fig. 4).²

Reinforcing Bar Yielding of Anchor Reinforcement

Provided the anchor reinforcement has sufficient bond length in the concrete edge breakout body and end anchorage length outside that body (Fig. 4), reinforcing bar yielding of

the anchor reinforcement may occur if the shear load transferred from the loaded anchor of the channel to the reinforcing bars surpasses the yield strength of the reinforcing bars. Taking the eccentricity into account, the corresponding shear capacity is calculated as

$$V_{ca,y} = N_{ca,re}/(1+e_s/z) = \sum A_s \cdot f_y/(1+e_s/z)$$

The eccentricity e_s is defined as the distance between the shear load applied through the channel bolt and the reinforcing bar. The internal lever arm of compression and tension force in the concrete element z is estimated as $0.85 \cdot \min(h - h_{ch} - 0.5d_b; 2h_{ef}; 2c_{al})$, where h is the height of the concrete element (for example, the concrete deck); h_{ch} is

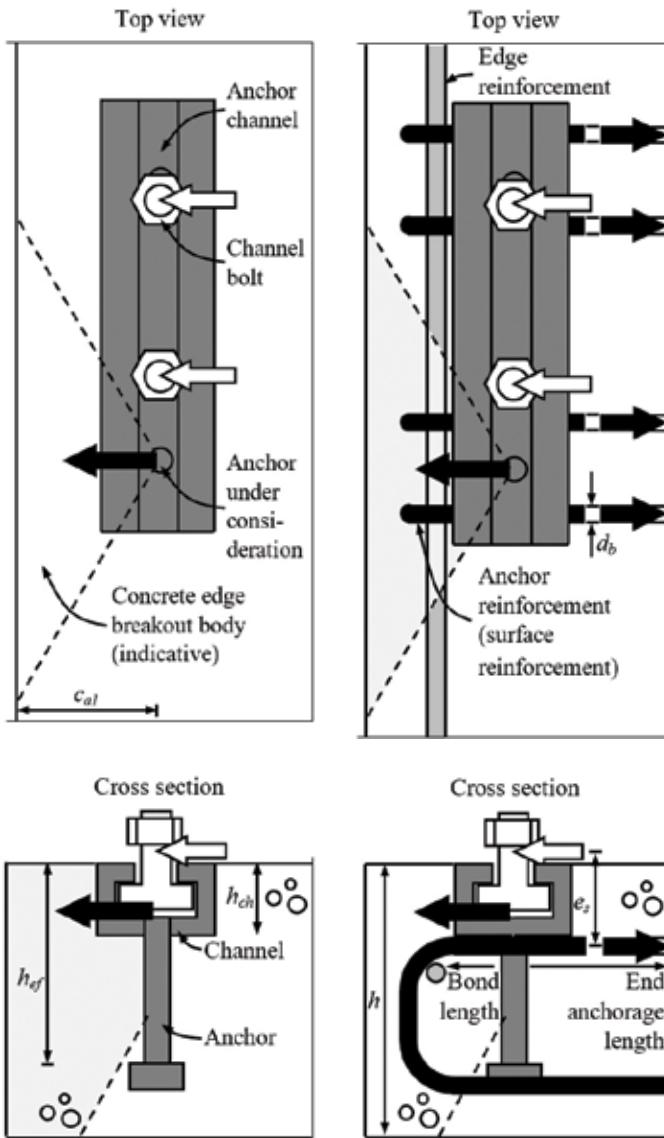


Fig. 3: Assumed load transfer from the channel bolt via the channel to the anchor (schematic, ignoring equilibrium of forces)

the height of the anchor channel; d_b is the diameter of the reinforcing bar; and h_{ef} is the embedment depth of the anchor channel (Fig. 3 and 4). A_s and f_y are the total cross-sectional area and the yield strength of the reinforcing bars, respectively. Note that the lateral distance between the anchor reinforcement and anchor must not exceed $0.5c_{al}$ and that an edge reinforcement must be provided.⁴ So far, the design of anchor reinforcement for anchor channels has been codified only for surface reinforcement and has not been codified for hairpins.

Advanced Concept of Anchor Reinforcement for Anchor Channels

Conventionally, shear-loaded anchor channels close to concrete edges are designed by checking either for concrete edge breakout, if no anchor reinforcement is provided, or the reinforcing bar yielding, if anchor reinforcement is provided and designed with sufficient bond length in the concrete edge breakout body and sufficient anchorage length outside the assumed breakout body. This means that in the latter case, only the reinforcing bar capacity is taken into account and the contribution of the concrete capacity is neglected. For typical anchor channel applications, where the edge distance c_{al} is small, however, the design capacity of the anchor reinforcement is limited because of a relatively short bond length within the concrete edge breakout body.

To overcome the problem of bond failure of the anchor reinforcement in the concrete edge breakout body, the JORDAHL® Edge confinement JEC was developed (Fig. 5(a)) to enhance the capacity of JORDAHL® Anchor channels JTA. The JEC anchor reinforcement consists of an end plate with welded reinforcing bars—melted and made in the United States or Canada. One pair of anchor reinforcement with the end plate is placed at every anchor of the channel without a structural connection. Anchor channel and edge confinement are included in the free design software JORDAHL® EXPERT (Fig. 5(b)).

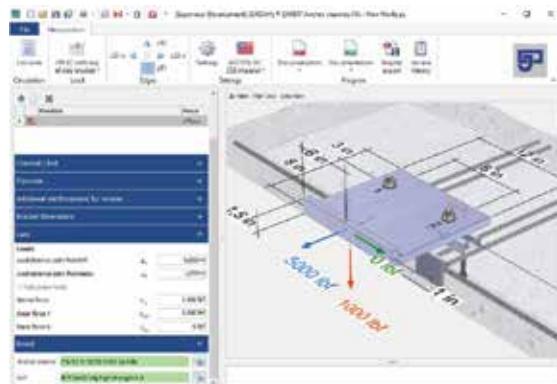
Due to the presence of the end plate, bond failure in the concrete edge breakout body is precluded and the yielding capacity of the anchor reinforcement can be used with sufficient end anchorage length outside the concrete edge breakout body (Fig. 6).

To back up the advanced concept that combines concrete capacity and reinforcing bar capacity for anchor channels with edge-confining anchor reinforcement, and to observe the hierarchy of failure modes as well as crack patterns, nonlinear finite element simulations and tests on cast-in anchor channels loaded by one or two channels bolts were carried out:

- The nonlinear finite element simulations were performed to investigate the performance of anchor channels with JEC anchor reinforcement in terms of load-displacement behavior and to optimize the anchor reinforcement to match with the capacity of the anchor channels (Fig. 7(a)). The finite element simulations allowed parametric studies on the influence of edge distance, anchor spacing, diameter of reinforcing bars, thickness of concrete element, and



(a)



(b)

Fig. 5: An anchor channel with edge confinement: (a) JORDAHL® Anchor channel JTA W50/30 with JORDAHL® Edge confinement (JEC); and (b) free design software JORDAHL® EXPERT

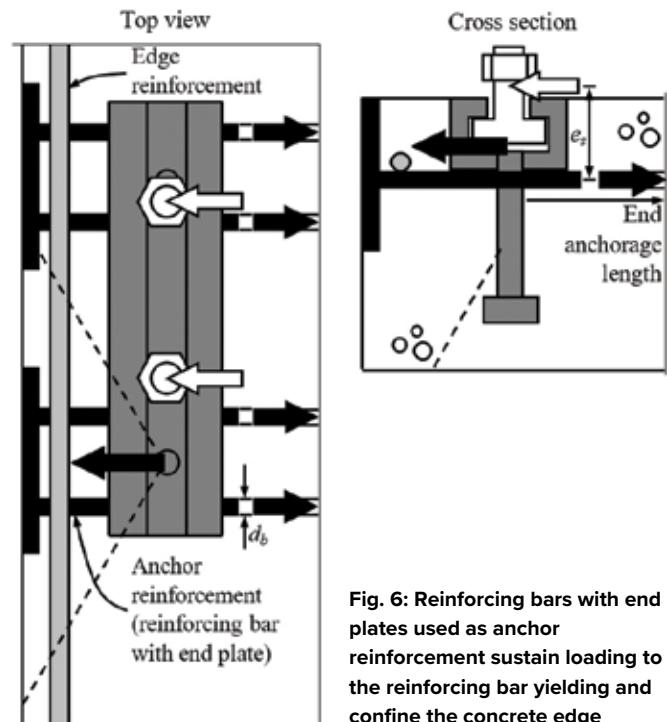
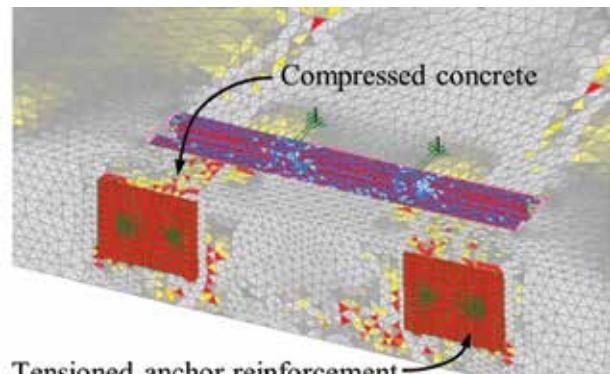


Fig. 6: Reinforcing bars with end plates used as anchor reinforcement sustain loading to the reinforcing bar yielding and confine the concrete edge

positioning of channel bolts. Moreover, the interaction of tension and shear load was analyzed; and

- The tests on cast-in anchor channels without anchor reinforcement and with JEC anchor reinforcement were conducted to verify the design concept (Fig. 7(b)). The experimental campaign was carried out at the Institute of Construction Materials (IWB), University of Stuttgart, Stuttgart, Germany. Including shear and tension tests, the tests comprised eight test series, each of which was tailored to study a particular failure mode. The reinforcing bars of the anchor reinforcement were strain gauged to measure the load share taken up by reinforcing bars. The channel bolts were loaded by an actuator with a calibrated load cell. The displacement of the loading fixture and the concrete in the breakout zone were measured. The displacements of the concrete were used to verify crack widths for the serviceability limit state.

The finite element simulations and tests showed that once the applied shear load approaches the concrete edge breakout capacity of the corresponding anchor channel without anchor reinforcement, the anchor reinforcement increasingly picks up the load. The concrete significantly contributes to the total capacity at design load levels (Fig. 8(a)). The maximum contribution of the concrete is approximately equal to the total concrete edge breakout capacity of anchor channels without anchor reinforcement because the brittle concrete cracks prior to the activation of the ductile reinforcing bars of the anchor reinforcement. At higher loads, well above design load levels,



(a) Tensioned anchor reinforcement

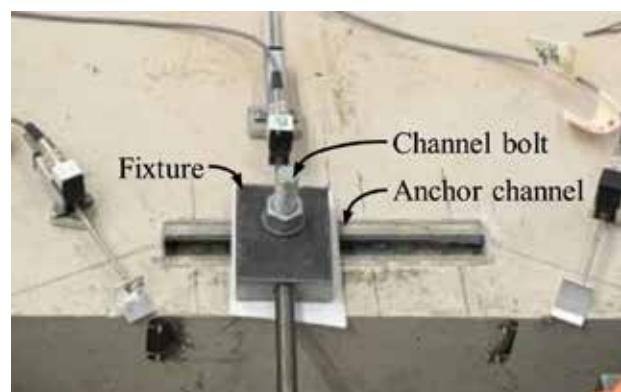
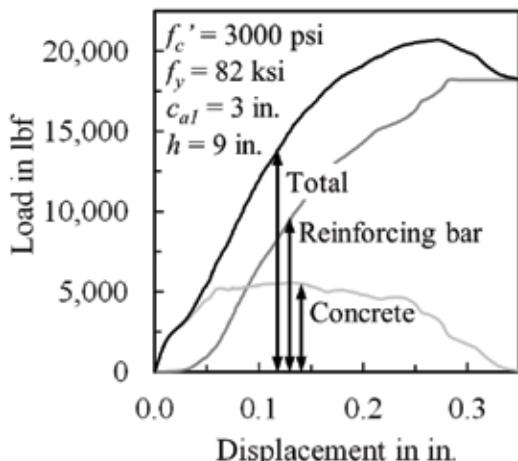


Fig. 7: Simulations and physical tests were used to investigate behavior of the anchors and anchor reinforcement: (a) finite element simulation; and (b) test on cast-in anchor channel with anchor reinforcement



(a)

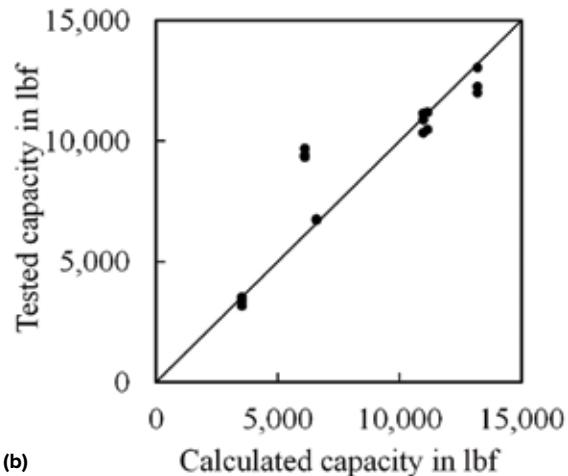


Fig. 8: Example test results: (a) contribution of concrete and JORDAHL® Edge confinement JEC reinforcing bars for a test on JORDAHL® Anchor channels JTA W50/30 with channel bolts JB; and (b) verification of the design model for most loaded anchor¹⁰

the concrete struts that form between the loaded bolts and the end plates may fail and the channel may experience considerable lateral bending. The observations are in agreement with the findings of a recent research project,⁹ which verified that the ultimate capacity of a shear-loaded anchor plate is determined by a combination of concrete capacity and reinforcing bar capacity. Thus, higher utilization can be allowed, resulting in more economic designs of anchor plates.

The anchor reinforcement with edge confinement increases the shear capacity of an anchor channel by a factor of up to four compared to the same anchor channel without anchor reinforcement. The tested high capacity confirmed the advanced concept to combine concrete capacity and reinforcing bar capacity. This quantity, the increase factor, is high because the anchor reinforcement can develop yielding.¹⁰ Amendments to the existing set of design equations were made to limit lateral bending of the channel and to avoid strut failure. For verification of the advanced concept, the calculated mean capacity was compared with the tested capacity (Fig. 8(b)). Though one of the newly introduced design equations for shear appears to be somewhat conservative, the comparison showed a good agreement (test-calculated capacity ratio of 1.07, coefficient of variation equal to 20% for p-value of 0.90). Moreover, the amended set of design equations correctly predicts the governing failure mode for any particular case (for example, yielding of reinforcing bars).

For common applications, the design of interacting tension and shear loads is decisive. Typically, concrete elements (for example, concrete decks of tall buildings) are too thin to accommodate anchor reinforcement for the tension load. In cases for which anchor reinforcement is feasible for the shear load only, the anchor reinforcement will result in a lower increase factor of the overall capacity for anchor channels under combined tension and shear than for anchor channels loaded only in shear.

In Summary

As with concrete anchors, the overall shear capacity of anchor channels installed close to the edge of concrete elements is typically governed by the concrete edge breakout capacity. It can be improved by anchor reinforcement for which the maximum capacity is determined by reinforcing bar yielding. This capacity, however, can rarely be used due to the small bond length of the anchor reinforcement in the concrete edge breakout body. For this reason, JORDAHL® Edge confinements JEC have been developed as an anchor reinforcement for JORDAHL® Anchor channels JTA. The anchor reinforcements consist of a pair of reinforcing bars with end plates that confine the concrete edge and eliminate bond failure, allowing the utilization of the yielding capacity of the anchor reinforcement, if sufficient end anchorage length is provided outside the concrete edge breakout body.

Another aim was to take the contribution of concrete capacity additionally into account. Nonlinear finite element simulations and tests on cast-in anchor channels were done to analyze the advanced concept. The advanced concept was successfully verified, and additional design checks were proposed.

Thus, the capacity of anchor channels installed close to the concrete edge loaded in shear toward the edge is considerably increased. The increase in capacity is up to four times the concrete capacity, though the effect is diluted to some extent if the anchor channel is loaded in combined tension and shear due to the required interaction design checks.

References

1. Jordahl, A., "Geschlitztes hohles Bewehrungseisen für Eisenbetonbauten zur Aufnahme von Befestigungsbolzen für Lagerblöcke und desgleichen (Slotted Hollow Reinforcing Iron for Reinforced Concrete Structures for the Reception of Fastening Bolts for Bearing Blocks and the Like)," German Patent AT73670B, Kaiserliches Patentamt, Berlin, Germany, Aug. 25, 1917. (in German)

2. Elgehausen, R., and Mallée, R., *Befestigungstechnik im Beton- und Mauerwerksbau* (Anchorage in Concrete and Masonry Construction), first edition, Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 2000, 380 pp. (in German)
3. 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.
4. ICC-ES AC232, "Acceptance Criteria for Anchor Channels in Concrete Elements," ICC Evaluation Service, LLC, Brea, CA, 2019, 94 pp.
5. ICC-EC Evaluation Report: ESR-2854, "Jordahl Anchor Channel System in Uncracked and Cracked Concrete," ICC Evaluation Service, LLC, Brea, CA, 2020, 31 pp.
6. Mahrenholz, C., and Sharma, A., "Qualification and Design of Anchor Channels with Channel Bolts According to the New EN 1992-4 and ACI 318," *fib Structural Concrete*, V. 21, No. 1, Feb. 2020, pp. 94-106.
7. Klingner, R.E.; Mendonca, J.A.; and Malik, J.B., "Effect of Reinforcing Details on the Shear Resistance of Anchor Bolts under Reversed Cyclic Loading," *ACI Journal*, V. 79, No. 1, Jan.-Feb. 1982, pp. 3-12.
8. Fisher, J.M., "Steel Design Guide 7: Industrial Buildings—Roofs to Anchor Rods," second edition, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, IL, 2004, 98 pp.
9. Sharma, A.; Elgehausen, R.; and Asmus, J., "Experimental Investigation of Concrete Edge Failure of Multiple-Row Anchorages with Supplementary Reinforcement," *fib Structural Concrete*, V. 18, No. 1, Feb. 2017, pp. 153-163.
10. Elgehausen, R., and Sharma, A., "Design of Jordahl Anchor Channels JTA Arranged Parallel and Near to an Edge with Jordahl Edge Confinement (JEC) to Take Up Shear Loads Towards the Edge According to ACI 318-14, ACI 318-19, IBC 2018 or ICR 2018 in Connection with AC232 and ESR-2854," Evaluation Report, IEA (Ingenieurbüro Elgehausen Asmus), Stuttgart, Germany, 2021, 204 pp.

Selected for reader interest by the editors.



ACI member **Christoph Mahrenholz** is the Head of Engineering at JORDAHL GmbH, Berlin, Germany. He has over 20 years of experience in the construction industry, academia, and construction products industry. He received his PhD in civil engineering and has many years of research experience in the field of anchorage to concrete, focusing on anchor channels with channel bolts, cast-in-place and post-installed anchors, and reinforcing bars subjected to seismic actions.



ACI member **Akanshu Sharma** is a Professor at the University of Stuttgart, Stuttgart, Germany, where he received his Doctor of Engineering in 2013. His research interests include behavior and strengthening of reinforced concrete structures subjected to extreme hazards such as earthquake, fire, impact, and connections in concrete structures

(anchorage and bond). He is a member of ACI Committees 349, Concrete Nuclear Structures, and 355, Anchorage to Concrete; as well as Joint ACI-TMS Committee 216, Fire Resistance and Fire Protection of Structures, and Joint ACI-ASCE Committee 408, Bond and Development of Steel Reinforcement.



Maciej Kucharski is an R&D Engineer at JORDAHL GmbH in Berlin. He has 8 years of experience in the construction industry. He works on the development and certification of the JORDAHL product portfolio, with a focus on the anchor channels system, as well as the development and optimization of the design software.



Rolf Elgehausen, FAcI, is a Professor Emeritus at the Institute of Construction Materials at the University of Stuttgart.

His research interests include anchorage to concrete, as well as bond and detailing of reinforcement. He is a member of

ACI Committees 349, Concrete Nuclear Structures, and 355, Anchorage to Concrete; as well as Joint ACI-ASCE Committee 408, Bond and Development of Steel Reinforcement.

ACI member **Neil L. Hammill** is President of JORDAHL Canada Inc., Brampton, ON, Canada. He is a member of Joint ACI-ASCE Committees 421, Design of Reinforced Concrete Slabs, and 445, Shear and Torsion; as well as Joint ACI-ASCE Subcommittee 445-C, Shear & Torsion-Punching Shear.



Brian Hastings is the Lead Engineer for anchor channels at JORDAHL Canada Inc., Brampton, ON. He has 25 years of experience with concrete construction products, including 12 years with anchor channels. He has designed the anchor channels used to connect the curtain wall to the concrete frame for numerous tall buildings throughout North America.

Refuerzo de anclaje para canales de anclaje

Un concepto avanzado para incrementar la capacidad a corte del concreto a pequeñas distancias de los bordes

Por Christoph Mahrenholz, Akanshu Sharma, Maciej Kucharski, Rolf Eligehausen, Neil L. Hammill, and Brian Hastings

El incremento de la urbanización a nivel mundial ha promovido el crecimiento en altura de los centros de las ciudades. El horizonte de las ciudades cosmopolitas va siendo dominado cada vez más por edificios altos recubiertos con muros cortina con paneles de fachada (Fig. 1(a)). En muchos casos estos paneles se fijan a la estructura mediante canales de anclaje. Uno de los retos de esto es que las losas de piso se están volviendo más delgadas y que los puntos de apoyo de la fachada se están corriendo hacia los bordes para maximizar el área utilizable. La solución es una canal de anclaje suplementada con refuerzo de anclaje, para lo cual se ha desarrollado un concepto avanzado.

Los paneles prefabricados de los muros cortina de fachada típicamente se instalan en rápida sucesión a medida que la estructura sube. Los paneles de fachada se fijan en soportes (Fig 1(b)) previamente conectados con tornillos de canal a canales de anclaje preinstaladas.

Antes de aplicarles carga, los tornillos se pueden mover a lo largo de la ranura de la canal de anclaje permitiendo fijar los soportes en cualquier punto a lo largo de la canal. Esto, junto con los agujeros alargados orientados perpendicularmente en los soportes,

permite que las tolerancias de construcción se puedan acomodar fácilmente ajustando todos los puntos de conexión antes de la instalación de los paneles de fachada.

Historia de las Canales de Anclaje

Las canales de anclaje han constituido una historia de éxito por más de 100 años. Consisten en anclajes forjados o soldados a canales (perfíles en C) que se colocan en elementos de concreto reforzado y que permiten la instalación de tornillos que encajan en la canal, también conocidos como tornillos en T. El robusto sistema de anclaje puede tomar cargas de tracción y cortante relativamente grandes y puede transmitir cargas en todas las direcciones por trabazón mecánica.

La instalación de las canales de anclaje, así como la de los pernos es a prueba de fallas porque la instalación es sencilla como se muestra en la Fig. 2.

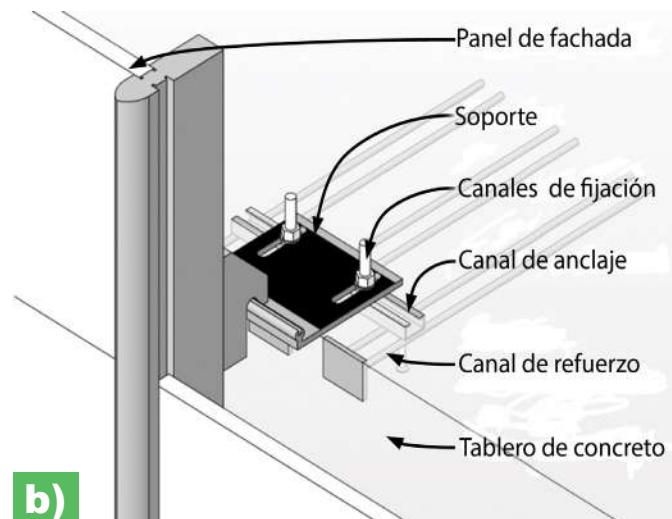
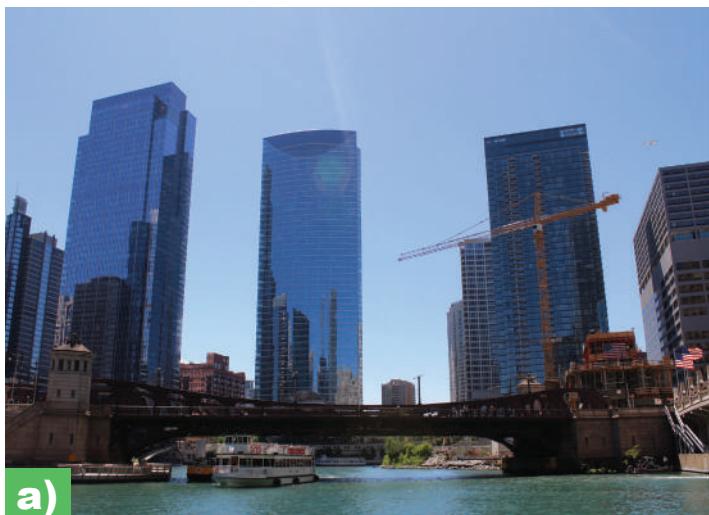


Fig. 1: Los edificios modernos típicamente tienen muros cortina de paneles de fachada (a) nuevos ejemplos en el Wolf Point de Chicago (foto cortesía de Chris6d- Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=72101208>) y (b) Los paneles de fachada encajan en soportes ajustados mediante tornillos de canal a la canal del anclaje preinstalada, cuyo comportamiento se ha mejorado con refuerzo de anclaje

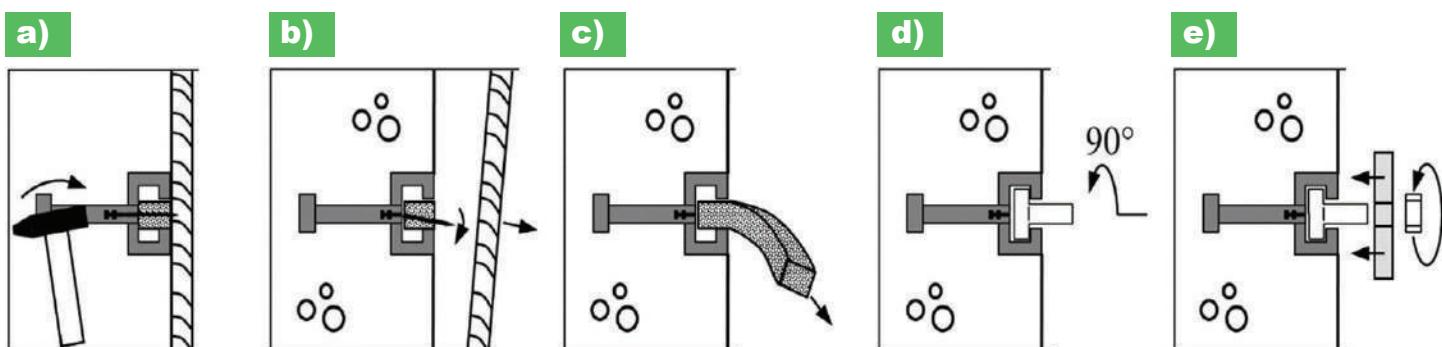


Fig. 2: Secuencia de instalación de la canal de anclaje: (a) la canal de anclaje se fija a la formaleta o plantilla y se coloca el concreto (b) se retira la formaleta después de que el concreto ha fraguado (c) se remueve el material de relleno de la canal (d) Se inserta el tornillo de canal y se rota 90° para engancharlo en el labio de la canal y (e) los componentes se fijan al tornillo de canal.

Primero, la canal se fija a la formaleta (para instalación en la cara frontal) o a una plantilla (para instalación en la cara superior) antes de colocar el concreto. Después de que el concreto ha fraguado y de que la formaleta o la plantilla se ha retirado, el material flexible de relleno, que evita que el concreto se filtre dentro del perfil, se retira de la canal (Fig 2(b) y (c)). Los tornillos de canal se insertan y giran en la ranura del perfil en canal, permitiendo que se fijen los componentes en cualquier punto a lo largo de la canal (Fig. 2(d) y (e)).

Calificación y Diseño de las Canales de Anclaje

Los ensayos realizados por un tercero independiente para asegurar el desempeño de las canales de anclaje empezaron en la década de los 70², y los ingenieros de diseño cuentan con reglas de diseño bien establecidas. Sin embargo, las canales de anclaje con cargas altas embebidas cerca al borde de elementos de concreto permanecían como un caso crítico de diseño hasta ahora. En particular, ha sido un reto anclar en forma segura montajes que imponen cargas altas a losas de concreto delgadas. Sin embargo, se puede utilizar refuerzo de anclaje para incrementar considerablemente la capacidad de tales montajes de tal forma que constituyan una solución eficiente y segura.

A continuación, se presentan detalles de un concepto avanzado de refuerzo de anclaje. El diseño de canales de anclaje y de tornillos de canal se trata en el ACI 318-19³ y en el ICC ES AC232⁴. Este último provee criterios de aceptación (AC) para el extenso proceso de calificación que se debe seguir para que el sistema de anclaje pueda lograr Reportes del Servicio de Evaluación (ESR) con parámetros específicos del sistema (por ejemplo. ICC ESR-2584⁵). El procedimiento de diseño es elaborado e incluye el cálculo de capacidad contra 20 posibles modos de falla y sus interacciones. Cualquiera de los modos de falla puede ser decisivo. La seguridad se garantiza mediante la aplicación de factores de reducción de resistencia más bajos para los modos de falla relacionados con el comportamiento frágil del concreto, asociados con alta dispersión y la aplicación de factores de reducción de resistencia más altos para fallas relacionadas con el comportamiento dúctil del acero, asociados con menor dispersión. Los detalles de los conceptos de diseño y de los procedimientos de calificación se discuten en otras fuentes.⁶

En las siguientes secciones, sólo se consideran dos modos de falla (arrancamiento del concreto del borde y fluencia del refuerzo de anclaje), pues son los más relevantes para canales de anclaje instaladas cerca al borde de elementos de concreto y sometidos a fuerzas cortantes perpendiculares al eje de la canal.

Arrancamiento del concreto de borde

La ruptura del borde del concreto puede ocurrir si una canal de anclaje cercana a un borde es sobrecargada en corte dirigido hacia el borde y fractura el concreto entre la canal y el borde. La capacidad correspondiente se calcula como:

$$V_{ch} = V_b \cdot \Psi_i = \alpha_{ch,V} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot c_{a1}^{4/3} \cdot \Psi_i$$

El parámetro del producto específico a $\alpha_{ch,V}$ considera la influencia de la geometría de la canal de anclaje (típicamente su valor es de 10.5 lb^{0.5}/in^{0.33}) mientras los factores de modificación Ψ_i tienen en cuenta otras influencias (por ejemplo, si el anclaje de canal está colocado cerca de una esquina); f'_c es la resistencia especificada a compresión del concreto y c_{a1} es la distancia al borde del anclaje (Fig 3). Nótese que el primer paso de la verificación es la distribución de cargas impuestas por los tornillos de canal a los anclajes de la canal. Esto es, que a los anclajes más cercanos a la carga aplicada se les asigna una carga mayor y viceversa. En el segundo paso, se verifican los modos de falla relacionados con el acero y el concreto, anclaje por anclaje (“anclaje en consideración”).

Este enfoque permite total flexibilidad en cuanto a número y localización de los anclajes, y en cuanto a la longitud de la canal. El ingeniero podría usar un software de diseño libre (por ejemplo, JORDAHL^(R) EXPERT) cuando se requiera hacer un gran número de cálculos. Los primeros estudios sobre anclajes sometidos a fuerzas cortantes mostraron que el refuerzo de anclaje, tal como horquillas, incrementaba sustancialmente la resistencia a cortante⁷. Se han utilizado también barras de refuerzo con platinas en los extremos sin recubrimiento de concreto para tomar fuerzas cortantes.⁸ Este es un método que es común en diseño de concreto reforzado para resistir grandes fuerzas de corte en ménsulas, apoyos extremos de vigas o conexiones articuladas de elementos prefabricados. Otro enfoque incluye el refuerzo de superficie típicamente presente en los bordes de las losas de concreto (horquillas verticales combinadas con refuerzo horizontal de borde orientado paralelo al borde de la losa y que pasa a través del doblez de la horquilla) formando la base para las reglas de diseño codificadas para anclajes al concreto y canales de anclaje (Fig 4).²

Fluencia de la barra de refuerzo del refuerzo de anclaje

Siempre y cuando el refuerzo de anclaje tenga suficiente longitud de adherencia en la cuña de concreto de borde y suficiente longitud de anclaje fuera de la cuña (Fig 4), se puede presentar fluencia de la barra de refuerzo del refuerzo de anclaje si la fuerza de corte transferida desde el anclaje cargado de la canal a las barras de refuerzo supera el esfuerzo de fluencia de las barras de refuerzo. Considerando la excentricidad,

$$V_{ca,y} = N_{ca,re}/(1+e_s/z) = \sum A_s \cdot f_y/(1+e_s/z)$$

la capacidad a corte se puede calcular como:

La excentricidad es se define como la distancia entre la fuerza de corte aplicada a través del tornillo de canal y la barra de refuerzo. El brazo de palanca interno entre la fuerza de compresión y de tensión en el elemento de concreto, z , se puede tomar como $0.85.\min(h-h_{ch} - 0.5d_b; 2h_{ef}, 2c_{a1})$, donde h es la altura del elemento de

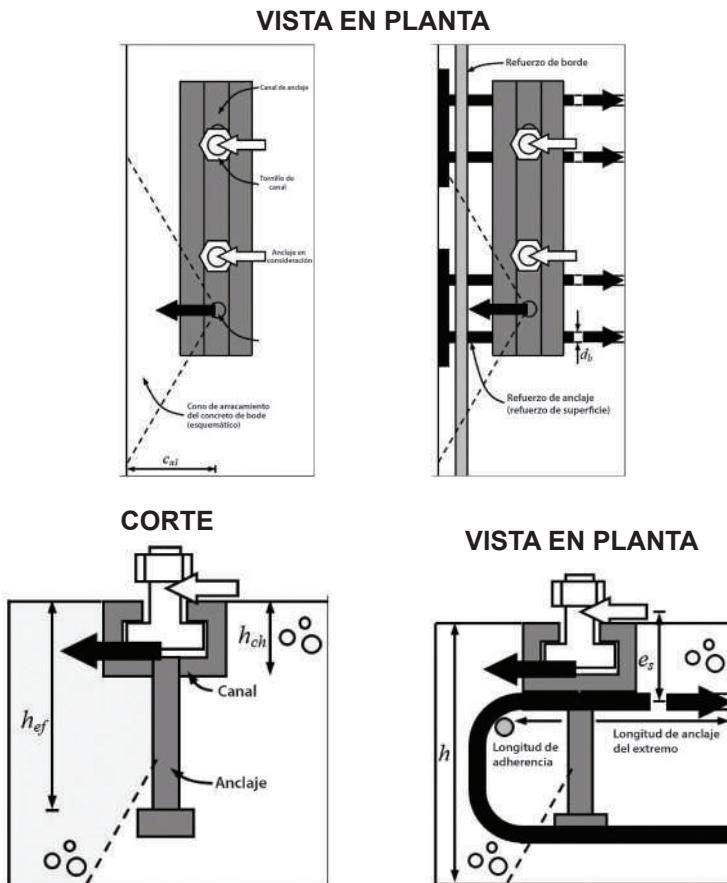


Fig. 3. Transferencia asumida de carga del tornillo de canal al anclaje a través de la canal (esquemáticamente, ignorando equilibrio de fuerzas).

Fig. 4. El refuerzo de superficie usado como refuerzo de anclaje difícilmente se puede anclar en la cuña de arrancamiento del concreto de borde

concreto (por ejemplo, la losa de concreto);

h_{ch} es la altura de la canal de anclaje; d_b es el diámetro de la barra de refuerzo y hef es la profundidad de embebido de la canal de anclaje (Fig. 3 y 4). A_s y f_y son el área transversal total y el esfuerzo de fluencia, respectivamente, de las barras de refuerzo. Nótese que la distancia lateral entre el refuerzo de anclaje y el anclaje no debe exceder $0.5c_{a1}$ y que se debe proveer refuerzo de borde.⁴ Hasta el momento, el diseño de refuerzo de anclaje para canales de anclaje se ha codificado sólo para refuerzo de superficie, aún no para horquillas.

Concepto avanzado de refuerzo de anclaje para canales de anclaje

Convencionalmente, las canales de anclaje cercanas a bordes de concreto, cargadas a corte se diseñan verificando el arrancamiento del concreto de borde, si no se provee refuerzo de anclaje, o la fluencia del acero de refuerzo, si se provee refuerzo de anclaje y se diseña con suficiente longitud de anclaje dentro de la cuña de concreto que sufre arrancamiento y suficiente longitud de anclaje fuera de la cuña. Esto significa que, en el último caso, solo se considera la capacidad del refuerzo y se desprecia la contribución de la capacidad del concreto. Sin embargo, en aplicaciones típicas de canales de anclaje, en los que la distancia al borde c_{a1} es pequeña, la capacidad de diseño del anclaje es limitada debido a la relativamente pequeña longitud de adherencia dentro de la cuña del concreto de borde.

Para resolver el problema de la falla por adherencia del refuerzo de anclaje dentro de la cuña de concreto del borde, se desarrolló el confinamiento de borde JEC JORDAHL® (Fig 5(a)) para mejorar la capacidad de las canales de anclaje JTA de JORDAHL®. El refuerzo de anclaje JEC consiste en una platina de extremo con barras de refuerzo soldadas –fundidas y fabricadas en Estados Unidos o Canadá.

Un par de barras de refuerzo de anclaje con una platina de extremo se colocan en cada anclaje de la canal sin conexión estructural. El anclaje de canal y el confinamiento de borde están incluidos en el software de diseño libre JORDAHL®. EXPERT (Fig 5(b)). Debido a la presencia de la placa de extremo no se presenta falla de adherencia en la cuña del concreto de borde y se puede usar la capacidad a fluencia del refuerzo de anclaje siempre que haya suficiente longitud de anclaje fuera de la cuña de arrancamiento del concreto de borde (Fig 6). Para respaldar el concepto avanzado que combina la capacidad del concreto y la del refuerzo para canales de anclaje con refuerzo de anclaje que confina el borde, y para observar la jerarquía de los modos de falla, así como los patrones de fisuración, se hicieron simulaciones con elementos finitos no lineales y se ensayaron canales de anclaje preinstaladas cargadas a través de uno o dos tornillos de canal:

- Se llevaron a cabo simulaciones con elementos finitos no lineales para investigar el desempeño de canales de anclaje con refuerzo de anclaje JEC en términos del comportamiento carga-desplazamiento y para optimizar el refuerzo de anclaje para hacerlo coincidir con la capacidad de los canales de anclaje (Fig 7(a)). Las simulaciones con elementos finitos permitieron hacer estudios paramétricos de la influencia de la distancia al borde, espaciamiento de anclajes, diámetro de las barras de refuerzo, espesor del elemento de concreto y ubicación de los tornillos de canal. Adicionalmente, se analizó la interacción entre cargas de tracción y corte; y

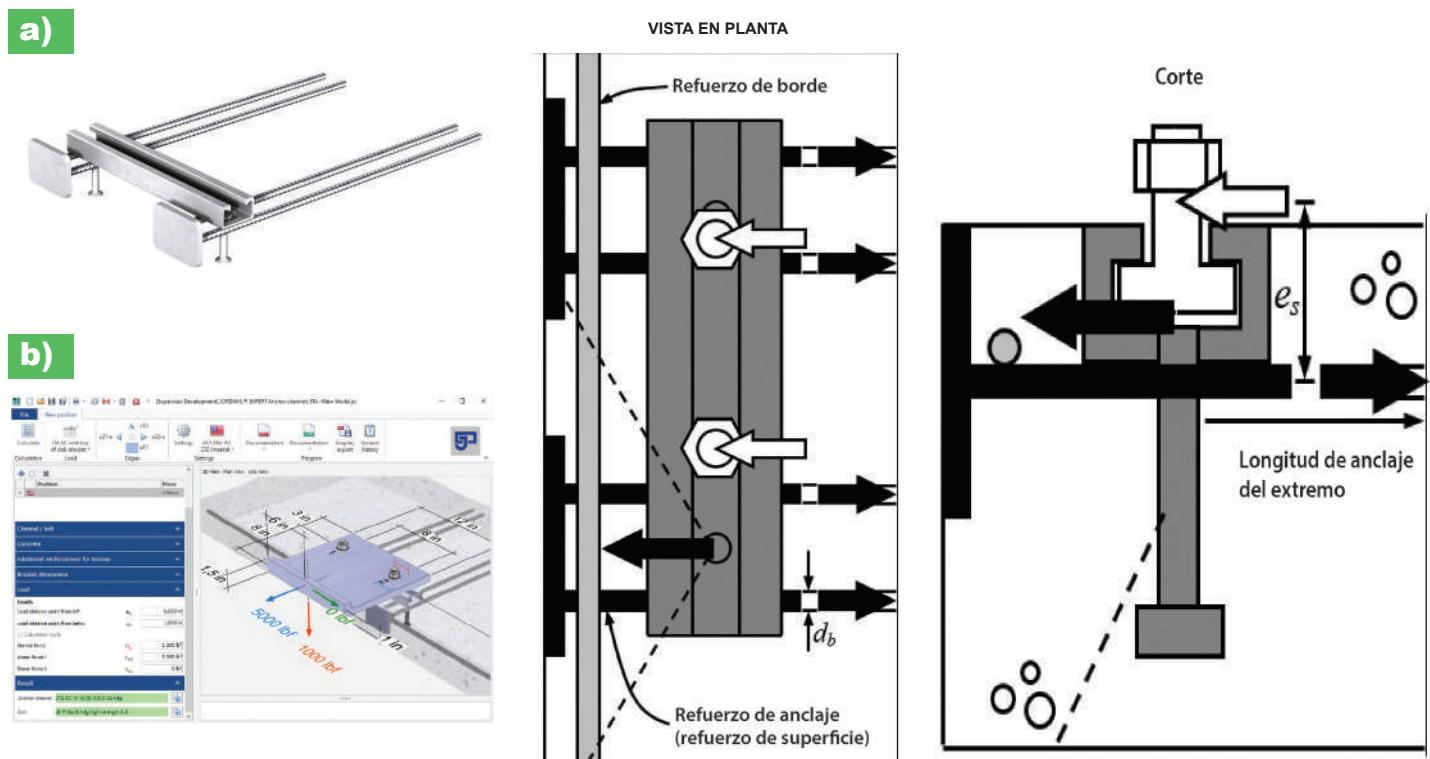


Fig. 5. Canal de anclaje con confinamiento de borde: (a) Canal de anclaje JTA W50/30 de JORDAHL® con confinamiento de borde JEC JORDAHL®; y (b) Software de diseño libre JORDAHL® EXPERT.

Fig. 6. Barras de refuerzo con platinas de extremo usadas como refuerzo de anclaje soportan cargas hasta la fluencia de las barras y confinan el concreto de borde.

- Se hicieron ensayos en canales de anclaje preinstaladas sin refuerzo de anclaje y con refuerzo de anclaje JEC para verificar el concepto de diseño (Fig 7(b)). El programa experimental se llevó a cabo en el Instituto de Materiales de Construcción (IWB) de la Universidad de Stuttgart, Stuttgart, Alemania. El estudio consistió ocho series de ensayos incluyendo ensayos a tracción y corte, cada una diseñada para estudiar un modo particular de falla. Se pusieron galgas en las barras del refuerzo de anclaje para medir la fuerza que tomaban. Se aplicó carga a los tornillos de canal mediante actuadores con celdas de carga calibradas. Se midió el desplazamiento del aditamento de aplicación de carga y el del concreto en la zona de arrancamiento. Los desplazamientos del concreto se usaron para verificar el ancho de las fisuras en el estado límite de servicio.

Las simulaciones de elementos finitos y los ensayos mostraron que una vez la fuerza de corte aplicada alcanzaba la resistencia a arrancamiento del concreto de borde de las correspondientes canales de anclaje sin refuerzo de anclaje, el refuerzo de anclaje tomaba cada vez más carga. El concreto contribuye significativamente a la capacidad total al nivel de las cargas de diseño (Fig 8(a)). La máxima contribución del concreto es aproximadamente igual a la resistencia a arrancamiento del concreto de borde de canales de anclaje sin refuerzo de anclaje debido a las fisuras frágiles del concreto antes de la activación de las barras de refuerzo dúctiles del refuerzo de anclaje. A cargas mayores, bien por encima de las cargas de diseño, los puntales que se forman entre los tornillos cargados y las platinas de extremo pueden fallar y la canal puede experimentar una flexión lateral considerable. Lo observado concuerda con los resultados de un proyecto reciente,⁹ que confirma que la capacidad última de una platina de anclaje cargada a corte está dada por una combinación de la capacidad del concreto y la capacidad del acero de refuerzo. En consecuencia, se pueden permitir cargas más altas, dando lugar a diseños más económicos de placas de anclaje.

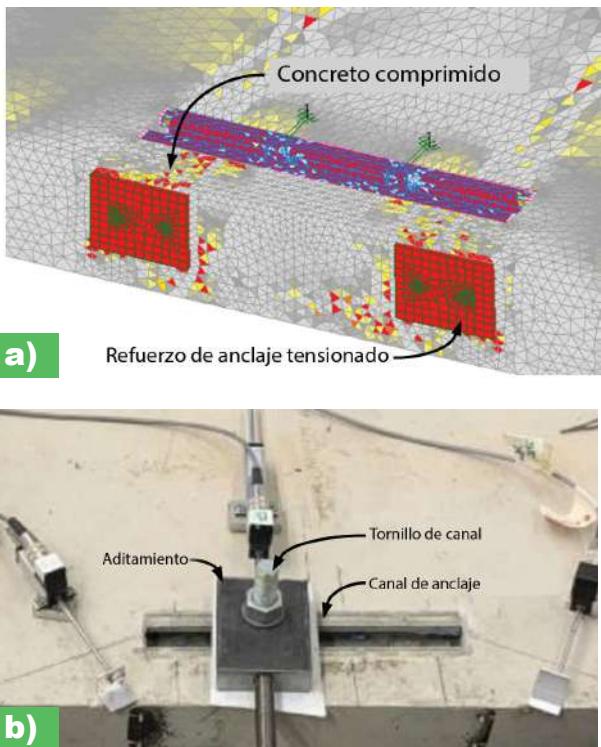


Fig. 7. Se hicieron simulaciones y ensayos físicos para investigar el desempeño de anclajes y refuerzo de anclaje: (a) simulación con elementos finitos y (b) ensayo en canal preinstalada con refuerzo de anclaje

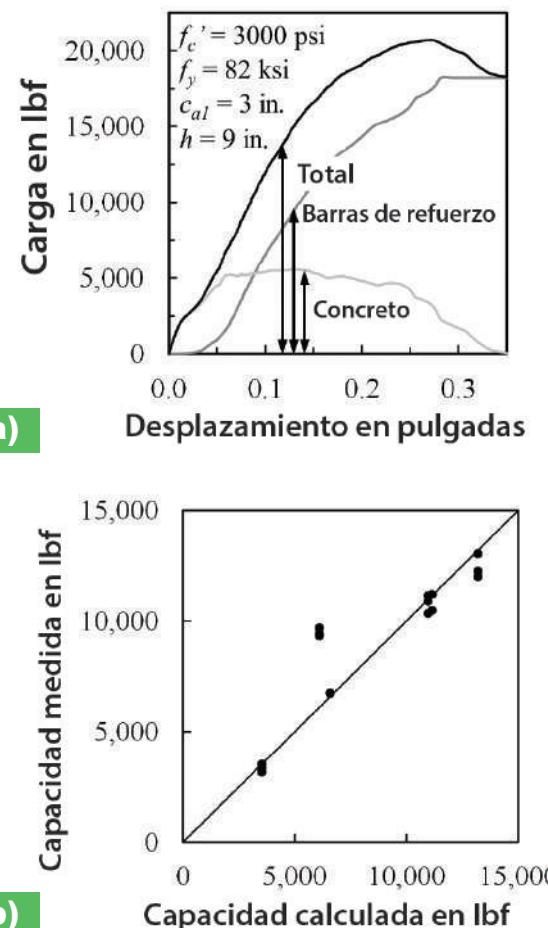


Fig. 8. Ejemplo de resultados de ensayo: (a) contribución del concreto y de las barras de refuerzo JEC para confinamiento del borde de JORDAHL® en un ensayo en canales de anclaje JTA W50/30 JORDAHL® con tornillos de canal JB y (b) verificación del modelo de diseño para la mayoría de los anclajes¹⁰

En Resumen

Al igual que otros anclajes al concreto, la capacidad a corte de las canales de anclaje instaladas cerca del borde de elementos de concreto es gobernada típicamente por la resistencia a arrancamiento del concreto. Esta se puede mejorar mediante refuerzo de anclaje con lo cual la máxima capacidad es gobernada por la fluencia de las barras de refuerzo. Sin embargo, esta capacidad rara vez se puede usar debido a la pequeña longitud de adherencia del refuerzo de anclaje en la cuña del concreto de borde. Por esta razón, JORDAHL® ha desarrollado confinamientos de borde JEC como refuerzo de anclaje para las canales de anclaje JTA de JORDAHL®.

El refuerzo de anclaje consiste en un par de barras de refuerzo con platinas de extremo que confinan el concreto de borde y eliminan la falla por adherencia, permitiendo usar la resistencia a fluencia del refuerzo de anclaje, si se provee una longitud de anclaje suficiente por fuera de la cuña de arrancamiento. Otro objetivo era tomar en cuenta la contribución de la resistencia del concreto. Se hicieron simulaciones con elementos finitos no lineales y ensayos en canales de anclaje preinstaladas para analizar este concepto avanzado. Este concepto se verificó satisfactoriamente y se propusieron chequeos adicionales. En consecuencia, la capacidad de canales de anclaje instaladas cerca al borde sometidas a fuerza cortante en dirección del borde se puede incrementar en forma considerable. Este aumento en capacidad es hasta de 4 veces la capacidad del concreto, aunque este incremento se ve reducido hasta cierto punto si el anclaje de canal se somete a una combinación de tracción y cortante, debido a los chequeos de interacción que se deben realizar como parte del diseño.

Referencias

1. Jordahl, A., "Geschlitztes hohles Bewehrungseisen für Eisenbetonbauten zur Aufnahme von Befestigungsbolzen für Lagerblöcke und desgleichen (Slotted Hollow Reinforcing Iron for Reinforced Concrete Structures for the Reception of Fastening Bolts for Bearing Blocks and the Like)," German Patent AT73670B, Kaiserliches Patentamt, Berlin, Germany, Aug. 25, 1917. (in German).
2. Elgehausen, R., and Mallée, R., *Befestigungstechnik im Beton- und Mauerwerksbau* (Anchorage in Concrete and Masonry Construction), first edition, Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 2000, 380 pp. (in German)
3. 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.
4. ICC-ES AC232, "Acceptance Criteria for Anchor Channels in Concrete Elements," ICC Evaluation Service, LLC, Brea, CA, 2019, 94 pp.
5. ICC-EC Evaluation Report: ESR-2854, "Jordahl Anchor Channel System in Uncracked and Cracked Concrete," ICC Evaluation Service, LLC, Brea, CA, 2020, 31 pp.
6. Mahrenholz, C., and Sharma, A., "Qualification and Design of Anchor Channels with Channel Bolts According to the New EN 1992-4 and ACI 318," fib Structural Concrete, V. 21, No. 1, Feb. 2020, pp. 94-106.
7. Klingner, R.E.; Mendonca, J.A.; and Malik, J.B., "Effect of Reinforcing Details on the Shear Resistance of Anchor Bolts under Reversed Cyclic Loading," ACI Journal, V. 79, No. 1, Jan.-Feb. 1982, pp. 3-12.
8. Fisher, J.M., "Steel Design Guide 7: Industrial Buildings—Roofs to Anchor Rods," second edition, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, IL, 2004, 98 pp.
9. Sharma, A.; Elgehausen, R.; and Asmus, J., "Experimental Investigation of Concrete Edge Failure of Multiple-Row Anchorages with Supplementary Reinforcement," fib Structural Concrete, V. 18, No. 1, Feb. 2017, pp. 153-163.
10. Elgehausen, R., and Sharma, A., "Design of Jordahl Anchor Channels JTA Arranged Parallel and Near to an Edge with Jordahl Edge Confinement (JEC) to Take Up Shear Loads Towards the Edge According to ACI 318-14, ACI 318-19, IBC 2018 or ICR 2018 in Connection with AC232 and ESR-2854," Evaluation Report, IEA (Ingenieurbüro Elgehausen Asmus), Stuttgart, Germany, 2021, 204 pp.



Christoph Mahrenholz, miembro de ACI, es el director de ingeniería de JORDAHL GmbH, Berlín, Alemania. Tiene más de 20 años de experiencia en la industria de la construcción, academia y la industria de productos para la construcción. Recibió su PhD en ingeniería civil y tiene muchos años de experiencia en investigación en el área de anclajes al concreto, con énfasis en canales de anclaje con tornillos de anclaje, anclajes preinstalados y postinstalados y barras de refuerzo sometidas a acciones sísmicas.



Akanshu Sharma, miembro de ACI, es profesor de la Universidad de Stuttgart, Stuttgart, Alemania, donde recibió su Doctorado en Ingeniería en 2013. Sus intereses de investigación incluyen comportamiento y reforzamiento de estructuras de concreto reforzado sometidos a eventos extremos como sismo, fuego, impacto y conexiones en estructuras de concreto (anclaje y adherencia). Es miembro de los comités ACI 349, Concreto para Estructuras Nucleares y 355, Anclaje al Concreto; así como de los comités conjuntos ACI-TMS 216, Resistencia al fuego y Protección de Estructuras Contra Fuego, ACI-ASCE 408, Adherencia y Desarrollo del Acero de Refuerzo.



Maciej Kucharski, es Ingeniero de I&D de JORDAHL GmbH en Berlín. Tiene 8 años de experiencia en la industria de la construcción. Trabaja en el desarrollo y certificación del portafolio de productos de JORDAHL, con énfasis en sistemas de canales de anclaje, así como en el desarrollo y optimización del software de diseño.



Rolf Elgrehause, FACI, es profesor emérito del Instituto de Materiales de Construcción de la Universidad de Stuttgart. Sus intereses de investigación incluyen anclajes al concreto, así como adherencia y detallado del refuerzo. Es miembro de los Comités ACI 349, Estructuras Nucleares de Concreto y 355, Anclaje al Concreto; así como del comité conjunto ACI-ASCE 408, Adherencia y Desarrollo del Acero de Refuerzo.



Brian Hastings, es el ingeniero líder de canales de anclaje en JORDAHL Canadá Inc., Brampton, ON, Canadá. Tiene 25 años de experiencia en productos de concreto para la construcción, incluyendo 12 años con canales de anclaje. Ha diseñado las canales de anclaje usadas para conectar los muros cortina a la estructura de concreto de numerosos edificios altos a lo largo de Norte América.



Neil L. Hammill, miembro de ACI, es el presidente de JORDAHL Canadá Inc., Brampton, ON, Canadá. Es miembro de los comités conjuntos ACI-ASCE 421, Diseño de Losas de Concreto Reforzado, y 445, Cortante y Torsión; así como del Subcomité conjunto ACI-ASCE 445-C, Cortante y Torsión-Cortante por Punzonamiento.

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de Colombia

Título: Refuerzo de anclaje para canales de anclaje



*Traductor y Revisor Técnico:
Dr. Pedro Nel Quiroga*