

Displacement-Based Design of Anchorages in Concrete

The future of fastening technology

by Boglárka Bokor, Thilo Pregartner, and Akanshu Sharma

As the construction industry increasingly moves toward digitalization, anchor technology will need to keep up. In structural design, displacement-based approaches are being incorporated for better and more realistic assessment of structural behavior. From the perspective of anchorage, there is a need for displacement-based approaches for design that can consider realistic anchorage behavior by accounting for relevant parameters such as anchor stiffness, baseplate geometry, anchorage pattern, and other factors.^{1,2} This article is a discussion of the general concept of linear and nonlinear spring models suitable for the calculation of anchorage forces.

Linear spring models can provide the realistic anchor force distribution and thus enable a stiffness check of the baseplate. Nonlinear spring models include all relevant parameters and provide complete load-displacement curves as output, thus allowing consideration of both structural and nonstructural interactions.

Traditionally, anchorages are designed using force-based approaches and semi-empirical methods such as the concrete capacity design (CCD) method.^{3,4} In this approach, the resistance of the anchorage is calculated against various possible failure modes, and the least resistance governs the design. Thus, in effect, the design approach follows a capacity-based design concept. However, due to the semi-empirical nature of the problem, several simplifications are made in the design calculations, and the scope of design is limited to the limits of the test database.

One basic requirement for the design of anchorages by the current methods is the requirement of a rigid baseplate whose deformations are small compared to the anchor displacements. This requirement essentially means that under concentric tension, all anchors within a group are equally displaced and therefore, equally loaded, assuming equal stiffness for all the anchors of a group. Under eccentric tension load or moment loading, the baseplate can be considered to have a rigid body

rotation, and the displacement (or force) in the individual anchors of the group can be calculated assuming a linear distribution of strains or displacements (Fig. 1(a)).

According to the current standards,⁵⁻⁷ the baseplate can be considered as rigid (sufficiently stiff) provided it remains linear elastic under design actions, and its deformation remains negligible in comparison with the axial displacement of the anchors. Although the first requirement can be quantitatively ascertained through force-based calculations, the second requirement necessitates the calculation of baseplate deformations and anchor displacements. Because anchor displacements are inversely related to the anchor stiffness, a given baseplate may be considered to be sufficiently stiff when linked with anchors with low stiffness, but insufficiently stiff when linked with another type of anchors with a relatively high stiffness. Because the current methods for anchorage design are force-based, the baseplate deformations and the anchor displacements are not calculated. Therefore, the criterion of baseplate deformations being negligible with respect to the anchor displacements cannot be quantitatively verified. Consequently, in standard practice the baseplate is often considered rigid only by ensuring that it remains linear elastic. This is principally incorrect because the stiffness of a plate is independent of its yield strength.

The consequence of considering a baseplate as rigid when it is not is shown in Fig. 1(b) for an anchor group subjected to a tension and moment loading. For this case, the baseplate deformation deviates from linearity, resulting in significantly different forces in the anchors than those calculated assuming a linear profile as shown in Fig. 1(a). Furthermore, as the baseplate presses against the concrete surface, prying (compression) forces are developed underneath the plate that must be in equilibrium with the tension forces in the anchors and the external forces or moments. For a flexible baseplate, the resultant compression force is larger compared to the rigid baseplate. Therefore, to maintain equilibrium, the tension

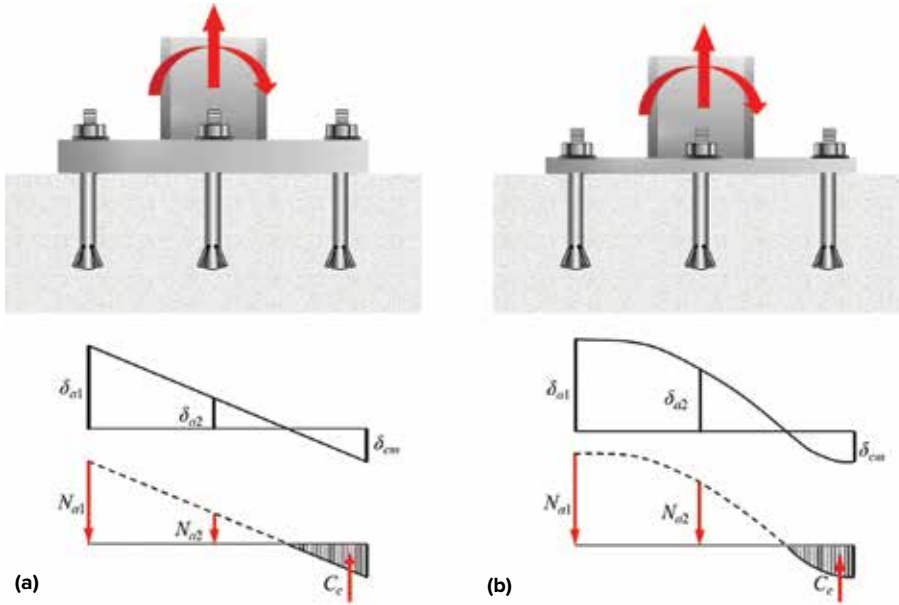


Fig. 1: Implications of baseplate stiffness on force distribution among anchors within a group under tension and moment loading: (a) rigid baseplate; and (b) flexible baseplates

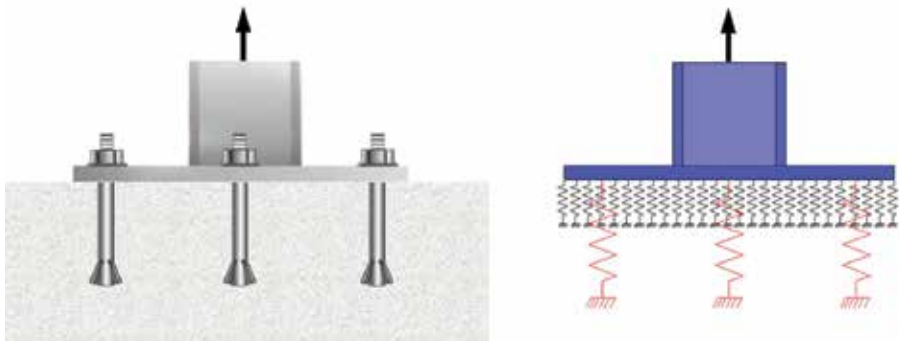


Fig. 2: The general concept of the spring model for anchorages.¹ The baseplate and connected profile are modeled using shell or solid elements, shown in blue; the concrete is modeled using compression-only springs, shown in black; and the anchors are modeled using tension-only springs, shown in red

forces in the anchors must be higher for the flexible baseplate.

As a matter of fact, the higher the degree of deviation from the linear displacement profile of the baseplate, the higher would be the deviation of the tension forces among the anchors of the group from the forces calculated assuming a rigid baseplate. This mismatch might lead to a severe reduction in the degree of safety of the anchorages. Therefore, considering the realistic baseplate deformations and anchor displacements is essential for the reliable calculation and assessment of anchorages.

The rigidity of the baseplate is a question of its relative stiffness with respect to the anchor stiffness rather than its absolute value. Therefore, the stiffness of the anchors plays a major role in deciding the behavior of the anchorages. Sharma showed that for everything else remaining exactly the same, the performance of anchorages with different anchor types

and their influence on the structural behavior can be significantly different.^{8,9} Therefore, it is essential to consider the displacement behavior of anchors, the anchor pattern, and the baseplate geometry appropriately for a safe and reliable design of anchorages. The current force-based methods are inadequate to consider these influences in the calculation and assessment of anchor groups. Note that in the current design methods, for anchorages under tension and moment loads, the anchor forces are calculated assuming a linear strain distribution, assuming the baseplate as rigid, and considering the anchor stiffness as the axial stiffness of the steel shaft (EA/h_{ef} , where E is the modulus of elasticity of an anchor, A is the cross-sectional area of an anchor, and h_{ef} is the effective embedment depth of an anchor), irrespective of the anchor type.

Displacement-Based Approach for the Calculation of Anchorages

General concept

A displacement-based approach requires a direct consideration of the stiffness and deformations of the baseplate and the anchor stiffness in the calculation of the anchorages. The baseplate stiffness and deformations can be accounted for by modeling the baseplate and the connecting profile with shell or solid finite elements with an appropriate bedding on the concrete surface modeled through compression-only springs. The anchor stiffness can be modeled through tension-only springs that are associated with a linear (constant stiffness) or nonlinear (varying stiffness) load-displacement characteristics. This kind of modeling is generally referred to as the spring model for calculation of the anchorages.^{1,2,10} Figure 2 provides a schematic of a spring model for an anchor group with three anchor rows subjected to a concentric tension force.

The concept of modeling the anchors through tension-only springs and bedding through compression-only springs originates from the well-accepted assumption in anchor technology that for an anchorage under tension forces, the anchors take up the tension force while the compression force is transferred directly by the baseplate to concrete. Such a model allows the deformed shape of the baseplate, anchor displacements and forces, as well as the prying action of the

baseplate (if any) to be considered realistically. Figure 3 explains the functioning of the spring model for a group where the prying action is present at the outer edges of the baseplate.

Anchor stiffness modeled using linear (elastic) springs

In its most basic form, the spring model for anchorages uses the anchors modeled as tension-only springs with a constant stiffness value, irrespective of the level of force taken up by the anchors (Fig. 4). Because the anchor force distribution of a group depends directly on the relative stiffness of the baseplate and the anchor, the method is well-suited to calculate the realistic distribution of forces among the anchors of a group, provided all the anchors remain within the elastic range. In principle, the anchors in a group are considered to have identical stiffness values because design codes require that the same type and size of anchors are used in one group.

For a given anchorage and load configuration, the degree of deviation of actual anchor force distribution from a corresponding linear force distribution (as assumed according to the current methods of design) depends on the stiffnesses of the baseplate and the anchors. The baseplate stiffness depends on the baseplate thickness and geometry, attached profile and stiffeners (if any), load application, and the anchorage configuration. The force-distribution approaches a linear

distribution as the stiffness of the baseplate increases relative to stiffness of the anchors. This is explained with the help of Fig. 5. The deviation from linearity can be judged by taking the ratio of the difference of forces taken up by the middle anchor and the outer anchors to the total force applied. For a rigid baseplate, this ratio should be equal to 0 (equal force taken up by all anchors). The relatively thin baseplate in Fig. 5(a) is elastic and does not result in prying action. The described ratio is equal to 0.4, suggesting a relatively large deviation from linearity. The thicker and thus stiffer plates in Fig. 5(b) and 5(c) have ratios of 0.1 and (practically) 0, respectively.

Note that the linear spring model is based on the assumption of a constant stiffness of the anchors, irrespective of the level of applied load. The method does not consider the resistance or the displacement behavior of the anchors beyond linear elastic limit. Therefore, the method is primarily applicable for calculation of the deviation of anchor forces from linear force-distribution, which might be used to judge the baseplate stiffness.

Anchor stiffness modeled using nonlinear (inelastic) springs

As the behavior of anchors is essentially nonlinear, it is imperative that the best way to model the anchor behavior would be to associate nonlinear load-displacement

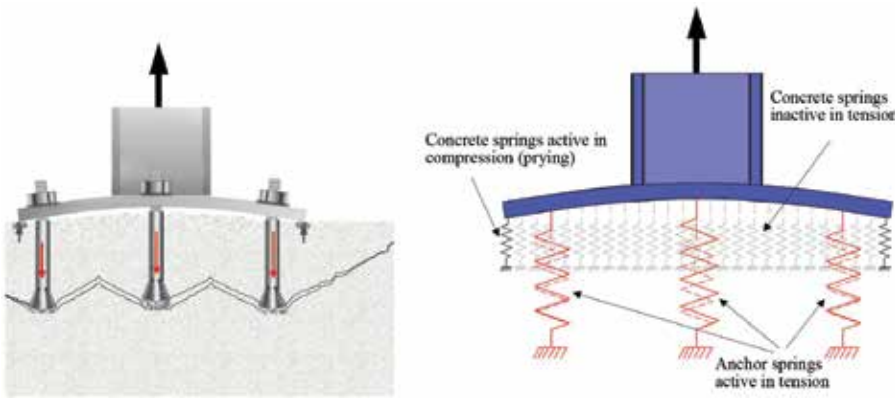


Fig. 3: Functioning of the spring model for an anchor group with prying action of the baseplate¹

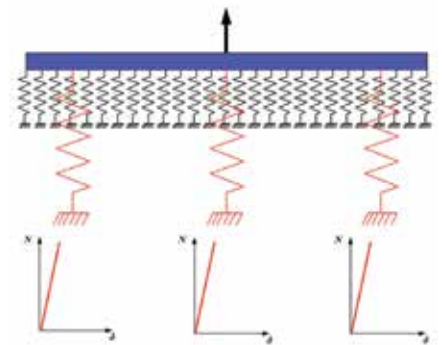


Fig. 4: Spring model for anchorages with linear stiffness of the anchors

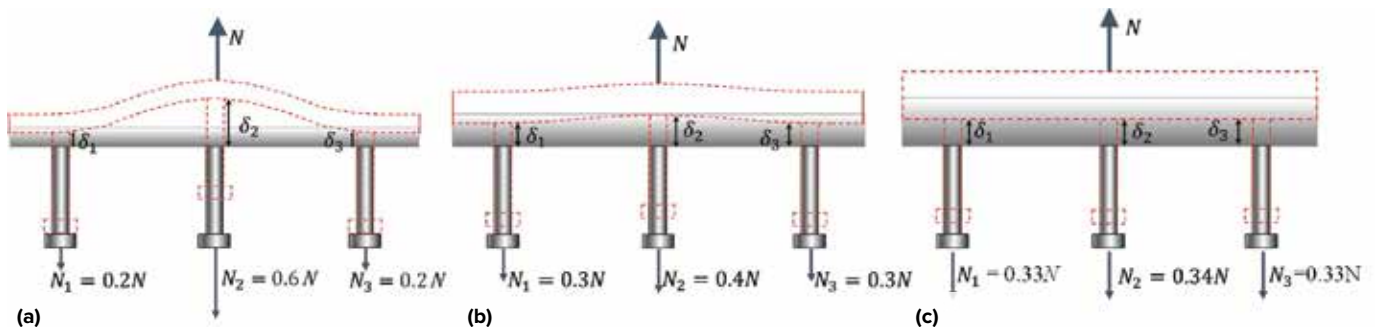


Fig. 5: A qualitative representation of the influence of baseplate stiffness on force distribution among anchors of a group: (a) low-stiffness plate; (b) medium-stiffness plate; and (c) high-stiffness plate

characteristics to the anchor springs. It is well known that in redundant structures, once a component of the structure cracks or yields and its stiffness decreases, the force and moments are redistributed among the other members of the structure that can take up those forces/moments. Only after a sufficient number of hinges are formed, the structure (or a part of it) fails or collapses. Analogously, also in an anchor group with multiple anchors, as the stiffness of one (or some) of the anchors decreases due to cracking or slipping or yielding resulting from overloading, the forces are redistributed to the other anchors of a group. This

aspect of considering not only the force distribution but also the force-redistribution among the anchors of a group can be accounted for by modeling the anchors through nonlinear springs and performing a displacement-based analysis.

The basic concept is to associate a nonlinear (multilinear) load-displacement response of the anchors as the spring characteristics. Thus, the spring characteristics are the idealized form of the load-displacement curves obtained from the tension tests on the anchors. The tests should be carried out on single anchors away from any edge and should result in the failure mode for which the anchor spring characteristics are required. For failure modes, where the response of the anchors is not influenced by neighboring anchors or a nearby edge (for example, anchor steel failure¹⁰), the load-displacement curves obtained from the single anchor tests can be used directly as the anchor springs in the idealized form. For concrete cone breakout failure mode, where the anchorage capacity and behavior are influenced by the neighboring anchors or an edge, the anchor spring characteristics must be modified accordingly. Bokor developed a nonlinear spring model for anchorages undergoing concrete breakout failure mode.^{1,2} In this model, the influence of neighboring anchors and a nearby edge (if any) is taken into account by a tributary area approach. The concept of the tributary area approach¹ is explained in Fig. 6.

In the nonlinear spring model for concrete cone failure mode, the load-displacement curve is typically idealized through five line-segments (penta-linear format).^{1,2} The salient points defining the format correspond to the secant stiffnesses k_1 through k_4 . The format of idealization with five segments offers a good balance between simplicity and accuracy. However, a greater number of line segments may be used for improved accuracy if needed. If the test data do not provide a reliable descending branch, the curve may be simplified with a vertical descending branch that would result in a limited redistribution of anchor forces.

To account for the spacing and edge distance, the idealized load-displacement curve of the reference case is reduced in

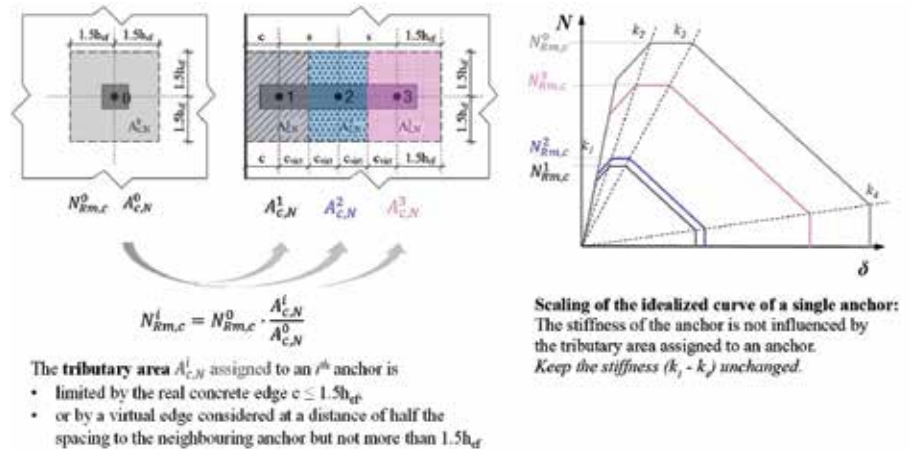


Fig. 6: Tributary area approach proposed by Bokor¹ to account for neighboring anchors and a free edge on the anchor spring characteristics used in the nonlinear spring model

such a way that the secant stiffness of the corresponding points of the curves remain unchanged (refer to Fig. 6). The peak load for the anchors is reduced with respect to the peak load of the reference anchor in proportion to the ratio of the tributary area of the anchor to the reference tributary area of the single anchor. These postulates are based on the evaluation of the reported tests.¹

The anchor spring characteristics thus ascertained are assigned to the corresponding springs in the spring model (Fig. 3). In this model, the compression springs (concrete) are assumed to have an elastic perfectly plastic behavior.¹ The general concept of the spring model as discussed previously is valid for the nonlinear spring model as well. A nonlinear static analysis is carried out on the model where the stiffness matrix is updated at every step of the analysis to account for the change in stiffness of the anchors of the group. Due to the step-by-step updating of the stiffness matrix, any load redistribution is automatically accounted for. Therefore, unlike the force-based methods, in the nonlinear spring model there is no need to use the additional factors (the ψ -factors prominently used in the CCD method specified in Chapter 17 of Reference 5) to account for load eccentricity, or the stress disruption assumed in vicinity of an edge. By appropriate consideration of the tributary areas, the nonlinear spring model is also applicable to the anchorages with nonrectangular or arbitrary anchor pattern.¹

The complete load-displacement curve for the anchorage is obtained as an output of the nonlinear static analysis carried out using the nonlinear spring model. Thus, not only the resistance in terms of load but also the entire performance of the anchorage can be judged. Furthermore, the output of the nonlinear spring model (load-displacement curve) can be used in a structural model to account for the anchorage performance and the interaction between the members or components connected using the anchorage.

With the nonlinear spring model, various aspects of the behavior of anchorages can be accounted for that are otherwise not considered in the current force-based

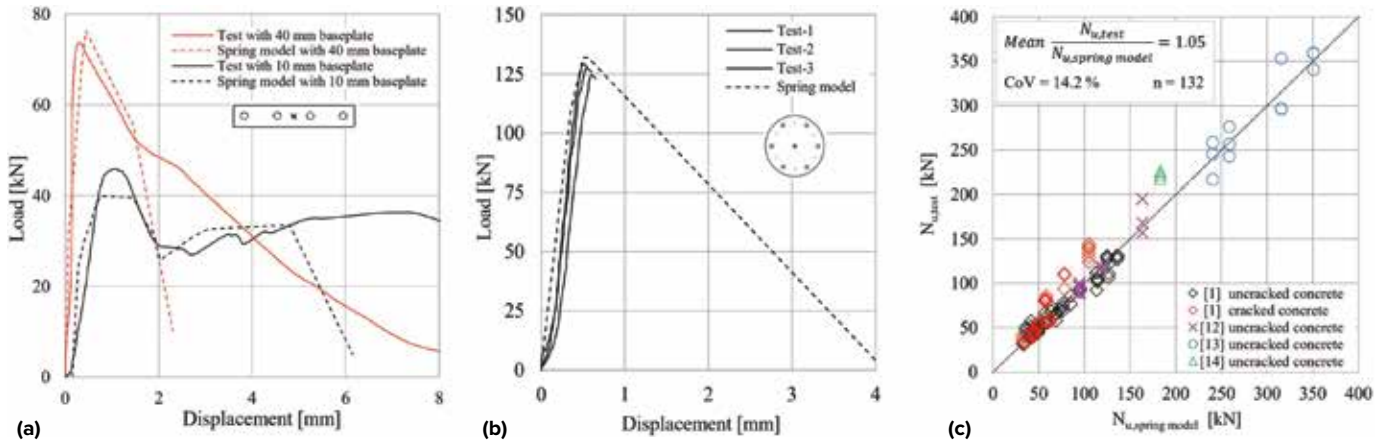


Fig. 7: Example cases of anchorages calculated with nonlinear spring model: (a) 1 x 4 anchor groups; (b) hexagonal anchorages; and (c) comparison of failure loads^{1,2}

approaches. Bokor et al.¹¹ tested large number of anchorages with various configurations including those not covered by the current standards. It was shown that for all the cases, the nonlinear spring model is able to calculate the load-displacement response of the anchorages very well.^{1,2} A few typical examples are shown in Fig. 7. All the major influences such as the stiffness of the baseplate, anchor pattern, baseplate geometry, loading position, vicinity of an edge, and so forth can be considered very well through the nonlinear spring model. Figure 7(c) shows the comparison of failure loads from tests with the peak loads obtained from the nonlinear spring model.

Software implementation

The spring models described herein are powerful tools for the assessment and design of anchorages. Due to a redundant system with several finite elements and springs that may be in the nonlinear range, an iterative procedure is required to solve the equilibrium equations and compatibility conditions. Furthermore, the nonlinear spring model requires step-by-step updating of the stiffness matrix to account for the redistribution of anchor forces. Therefore, the spring models are best used with the help of a software program. For the benefit of its customers, the fischer company is working toward the implementation of the spring models in their user-friendly online software, FiXperience C-FIX, as an additional module called “FEM design.”¹² The concepts discussed previously are followed and implemented in the software through corresponding mathematical formulations. A linear spring model is implemented and available for the users (<https://www.fixperience.online/cfix>), while the implementation of a nonlinear spring model is underway and will be available soon. A few screenshots of an example case of a typical column base connection calculated using the FEM design module of C-FIX are shown in Fig. 8. The program in the current state is capable of calculating the realistic distribution of anchor forces and their displacements

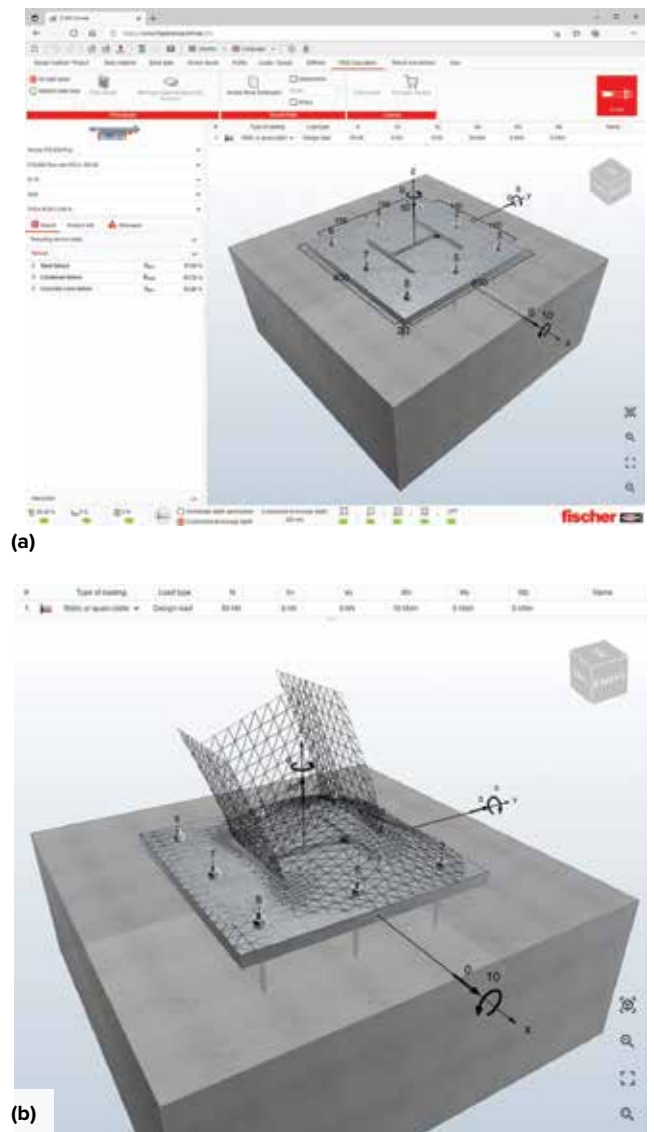


Fig. 8: Example screenshots of the C-FIX software to calculate the anchorages with spring model

as well as the displacement profile and stress contours of the baseplate and the attachment. An additional feature in the program allows a direct calculation of the minimum thickness of the baseplate required to achieve a deviation of forces less than 5, 10, or 15% of the forces calculated assuming a linear force-distribution. Due to a strong graphical user interface, the time required to model an anchorage in C-FIX is about 10% of the time that would be needed to create a corresponding model in any general purpose finite element code. The basic purpose of the software is not to replace vigorous engineering thinking but to support engineers with advanced methods that would save significant time and help achieve reliable and efficient design of anchorages.

References

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 Finite-Element 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 Non-Rectangular Anchor Groups," *Engineering Structures*, V. 188, June 2019, pp. 202-217.
12. Bokor, B.; Pregartner, T.; Sharma, A.; and Hofmann, J.,

"Bemessung von zugbeanspruchten Befestigungen in Beton mit einem nicht-linearen Federmodell - Hintergrund und Softwarelösung für die Versagensart Betonausbruch (A Nonlinear Spring Model for Design of Tension Loaded Anchorages in Concrete - Background and Software Solution for Concrete Cone Failure)," *Bauingenieur*, V. 94, No. 9, Sept. 2019, pp. 326-335.

Selected for reader interest by the editors.



Boglárka Bokor is a Senior Expert in the field of anchor technology at the fischer Group of Companies since 2020. She worked as a Research Associate at the Institute of Construction Materials, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany, from 2013 to 2020. She is a member of fib TG 2.9, Fastenings. Bokor received her Doctor of Engineering in

2021 from the University of Stuttgart on the topic of development of a nonlinear spring model for the evaluation of anchor groups in concrete.



Thilo Pregartner joined the fischer Group of Companies in 2018 as head of the Technology Transfer and Approval department, and the Simulation department. From 2003 to 2009, he worked at the Engineering Office Eligehausen & Asmus, Stuttgart. From 2009 to 2018, he was Technical Director, later Senior Engineering Manager,

with Powers, which was acquired by Stanley Black & Decker in 2012. He received his master's degree in civil engineering from the University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, and his doctorate in the field of fastening technology from the Institute of Construction Materials, University of Stuttgart.



ACI member **Akanshu Sharma** is Associate Professor at Purdue University, West Lafayette, IN, USA. He is technical secretary for the fib TG 2.9, Fastenings, and a member of various ACI and fib committees. He has worked at Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai, India, from 2004 to 2013, as a Scientific Officer and at the University of Stuttgart from

2013 to 2021, as Assistant Professor for innovative strengthening methods using fastenings (2017-2021) and as the Head, Department of Fire Safety, Materials Testing Institute (2020-2021). Sharma received his Doctor of Engineering in 2013 from the University of Stuttgart.

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.

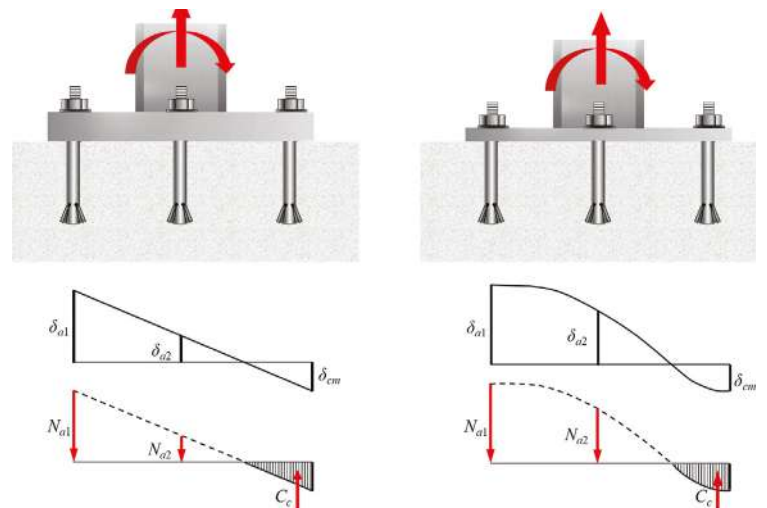


Figura. 1: Implicaciones de la rigidez de la placa base en la distribución de fuerzas entre los anclajes dentro de un grupo bajo tensión y carga de momento: (a) placa base rígida; y (b) placas base flexibles.

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

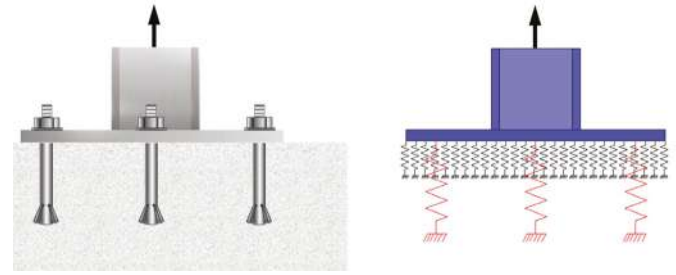


Figura. 2: El concepto general del modelo de resorte para anclajes. 1 La placa de base y el perfil conectado se modelan utilizando elementos de cubierta o sólidos, que se muestran en azul; el concreto se modela utilizando resortes de compresión únicamente, que se muestran en negro; y los anclajes se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

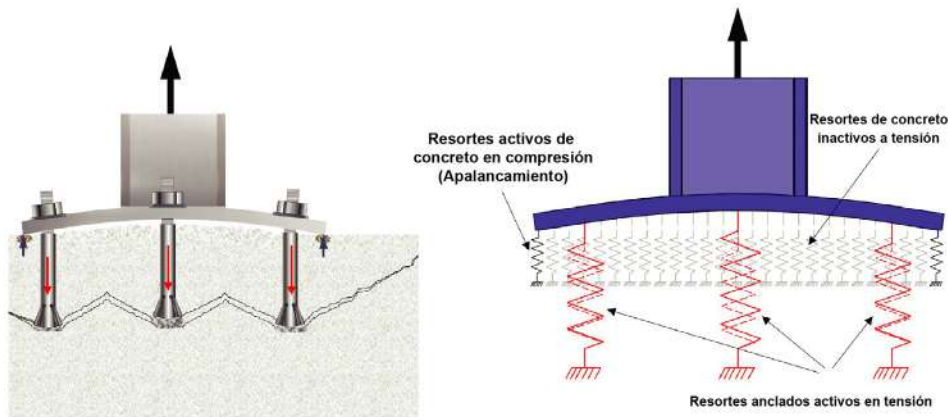


Figura 3: Funcionamiento del modelo de resorte para un grupo de anclaje con acción de palanca de la placa base

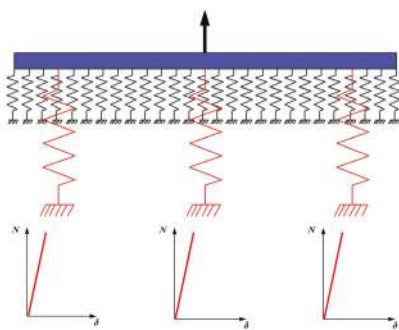


Figura 4: Modelo de resorte para anclajes con rigidez lineal de los anclajes.

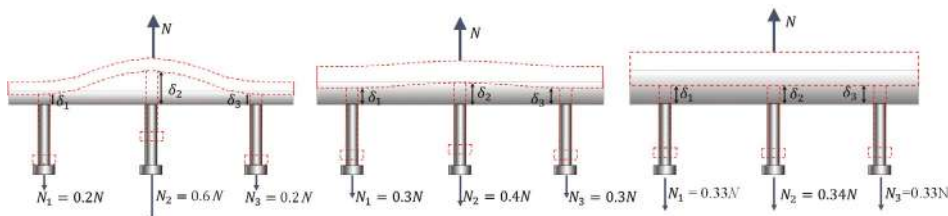


Figura 5: Representación cualitativa de la influencia de la rigidez de la placa base en la distribución de fuerzas entre los anclajes de un grupo: (a) placa de baja rigidez; (b) placa de rigidez media; y (c) placa de alta rigidez

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.

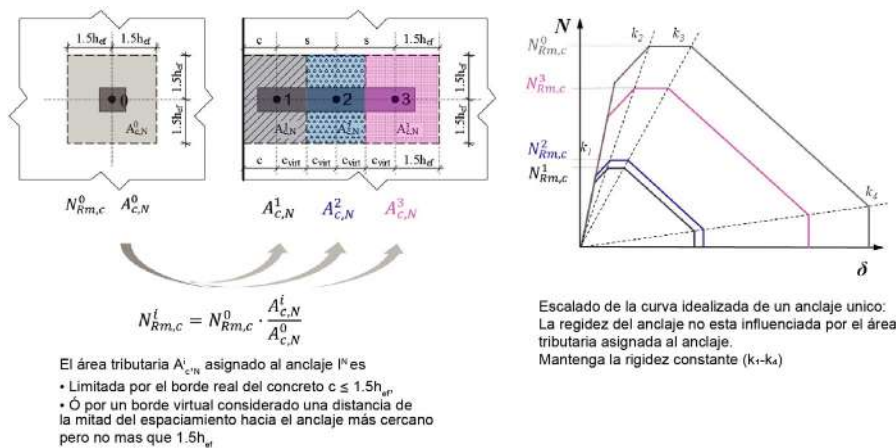


Figura. 6: Enfoque de área tributaria propuesto por Bokor¹ para tener en cuenta los anclajes vecinos y un borde libre en las características del resorte de anclaje utilizadas en el modelo de resorte no lineal.

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_5 . 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.

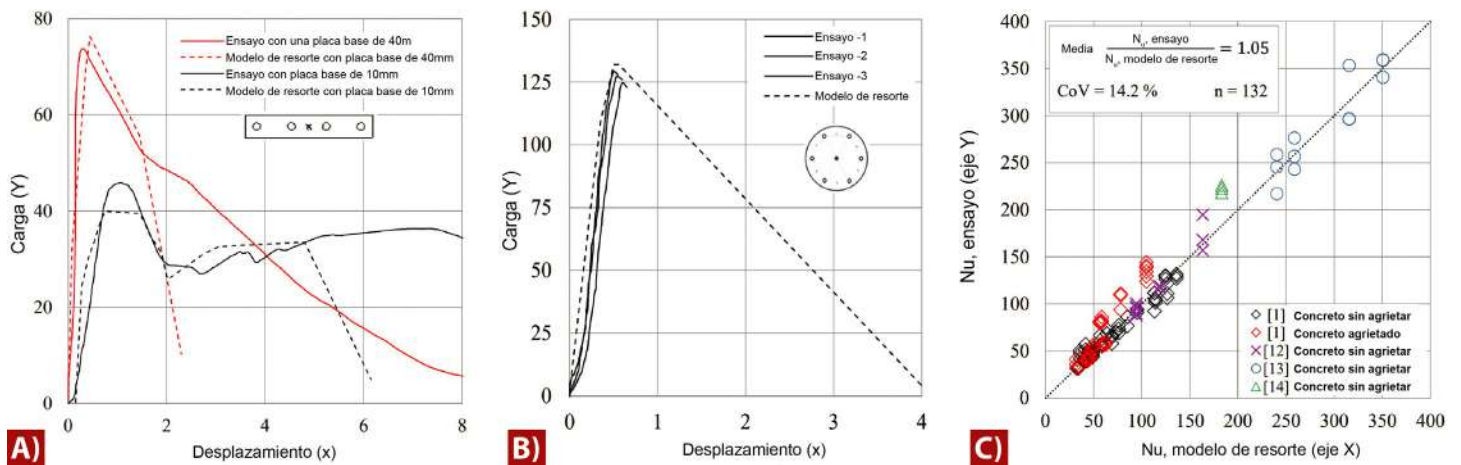


Figura. 7: Casos de ejemplo de anclajes calculados con modelo de resorte no lineal: (a) 1 x 4 grupos de anclaje; (b) anclajes hexagonales; y (c) comparación de cargas de falla

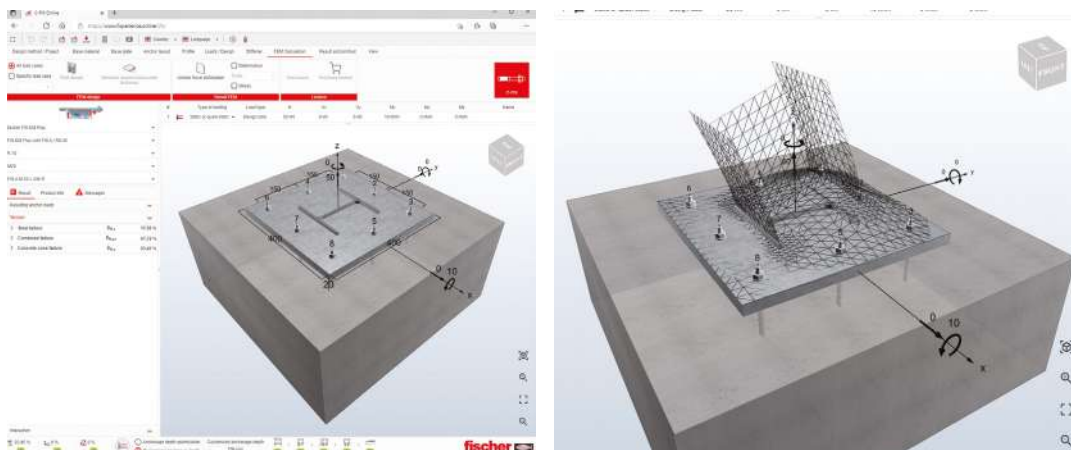


Figura. 8: Capturas de pantalla de ejemplo del software C-FIX para calcular los anclajes con modelo de resorte

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*