

ACI 350 Shrinkage and Temperature Reinforcement

Design requirements and implications on tank water-tightness performance

by John J. Roller

Throughout its history, the ACI 350 code has provided minimum requirements for structural design, material selection, and construction of environmental engineering concrete structures. Engineers generally presume that structures designed and constructed in accordance with the code will be liquid-tight. However, even with code-compliant designs, performance shortfalls in the form of wider-than-expected vertical cracks in tank walls that allow leakage can still occur. These vertical wall cracks are generally the result of restrained concrete shrinkage and temperature (S&T) movements. Leaking structures often leave owners wondering why, and leave contractors having to accept responsibility for repairing leaking cracks that were ultimately the result of code-compliant, yet insufficient, design. Over the 50-year history of ACI Committee 350, Environmental Engineering Concrete Structures, recommendations and requirements related to minimum S&T reinforcement for tank walls have evolved somewhat as engineers and researchers have developed a better understanding of structural behavior and restraint. This article summarizes historic committee recommendations and new ACI 350 code requirements related to minimum S&T reinforcement, and addresses the question of why many containment structures designed per the ACI 350 code have leaked.

History of ACI Committee 350

ACI Committee 350 was formed to address the need for design, material selection, and construction recommendations related to tanks, reservoirs, and other structures used for water or wastewater containment. The committee's first report was published in the August 1971 edition of the *ACI Journal Proceedings*,¹ and a revised edition was subsequently published in the June 1977 edition of the *ACI Journal Proceedings*.² An updated version of the committee report was published as a stand-alone document in 1983 under the title "Concrete Sanitary Engineering Structures (ACI 350R-83)."³ The 1989 version of the report was retitled "Environmental Engineering Concrete Structures (ACI 350R-89)."⁴

In December 2001, ACI Committee 350 issued "Code

Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures (ACI 350-01) and Commentary (ACI 350R-01)."⁵ This new standard was written as a legal document that could be adopted by reference in a general building code or other regulations governing the design and construction of environmental structures. Prior to this year, the ACI 350 code had been revised only once (ACI 350-06).⁶

Evolution of Minimum S&T Reinforcement Requirements for Walls

Minimum S&T reinforcement recommendations or requirements stated in ACI Committee 350 documents have always been prescriptive in nature. Prior to 1983, the recommended minimum percentages of S&T reinforcement were based on wall thickness. From then on, ACI Committee 350 reports expressed minimum recommendations based on distance between movement joints. Beginning with the issuance of the ACI 350 code in 2001, language was included to alert designers that it might be necessary to increase the amount of S&T reinforcement above the minimum quantities in situations where movements are subject to significant restraint. However, no meaningful guidance was provided regarding the definition of "significant restraint." To further complicate matters, ACI 350-01 and ACI 350-06 cited minimum quantities of S&T reinforcement for the condition where no movement joints have been provided, which apparently left some designers with the impression that wall restraint imposed by supporting foundation elements (that is, base restraint) need not be considered significant.

Minimum S&T reinforcement quantities cited in the 1983 and 1989 committee reports and the 2001 and 2006 codes are presented graphically in Fig. 1. As can be seen, the minimum quantities of S&T reinforcement have remained somewhat consistent since 1983, with one noteworthy change being the introduction of the distinction between Grade 40 and Grade 60 reinforcement in 1989. Other noteworthy changes relate to the limits imposed on maximum movement joint spacing.

In ACI 350R-83, the recommended minimum S&T reinforcement is 0.6% of the gross wall area for movement

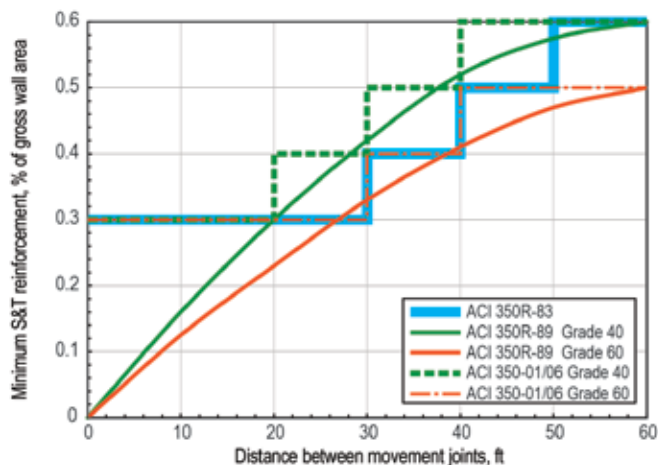


Fig. 1: Minimum S&T reinforcement per ACI 350R-83,³ ACI 350R-89,⁴ and ACI 350-01⁵ and ACI 350-06⁶ (Note: 1 ft = 0.30 m)

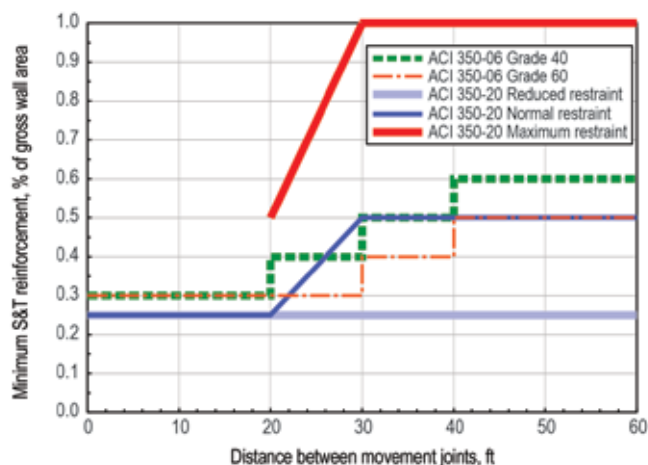


Fig. 2: Minimum S&T reinforcement per ACI 350-06 and ACI 350-20⁷ (Note: 1 ft = 0.30 m)

joint spacing greater than 50 ft (15.2 m), regardless of steel grade. In ACI 350R-89, the recommended minimum S&T reinforcement for walls with movement joint spacing greater than 60 ft (18.3 m) is either 0.5% or 0.6% of the gross wall area for Grade 60 or Grade 40 bars, respectively. Minimum S&T reinforcement quantities required by ACI 350-01 and ACI 350-06 codes are comparable to those recommended in ACI 350R-89. However, the codes consider 40 ft (12.2 m) to be the limiting movement joint spacing beyond which no additional S&T reinforcement would be required (that is, equivalent to the condition where no movement joint are provided).

New Minimum S&T Reinforcement Requirements for Walls

ACI Committee 350 recently completed a new version of the ACI 350 code: ACI 350-20.⁷ This version of the code incorporates significant changes to the provisions for minimum S&T reinforcement, particularly for horizontal bars in walls. Minimum S&T reinforcement requirements are now categorized based on three levels of restraint: reduced, normal, and maximum.

In walls, the reduced restraint category (Section 12.13.2.2) pertains only to vertical reinforcement or situations where an effective means to prevent restraint is provided as determined by the licensed design professional. The maximum restraint category (Section 12.13.2.4) pertains to horizontal reinforcement within the first 6 ft (1.8 m) above a horizontal, monolithic construction joint in walls greater than 20 ft (6.1 m) in length or walls with movement joints spaced greater than 20 ft apart. The normal restraint category (Section 12.3.2.3) covers all conditions where reduced restraint or maximum restraint do not apply.

The new ACI 350-20 minimum horizontal S&T reinforcement requirements are plotted in Fig. 2, along with the requirements specified in the previous edition of the code (ACI 350-06). The plot clearly illustrates that the minimum amount of horizontal S&T reinforcement per ACI 350-20

(Table 12.13.2.1) is double the amount required by ACI 350-06 (Table 7.12.2.1) for the condition where Grade 60 steel is used, and no movement joints are provided (movement joint spacing \geq 40 ft).

The normal restraint condition requires minimum horizontal S&T reinforcement quantities that are comparable to those cited in the previous version of the ACI 350 code. The reduced restraint condition will not be applicable to horizontal S&T wall reinforcement unless an effective means to prevent horizontal movement restraint can be provided. The new minimum S&T reinforcement requirements in ACI 350-20 make no distinction between Grade 40 and Grade 60 steel, presumably due to the now prominent use of Grade 60 steel.

For most structures designed in accordance with the new version of the ACI 350 code, the quantity of horizontal wall reinforcement located within 6 ft of the foundation base will need to be at least 1% of the wall section. If walls are constructed using multiple horizontal construction joints (as they often are for relatively tall walls), the 1% requirement would also apply within 6 ft above each additional horizontal joint. Beyond 6 ft above each horizontal construction joint, minimum S&T reinforcement requirements would be based on normal restraint conditions.

The significant increase in the minimum required amount of horizontal S&T reinforcement within 6 ft of horizontal construction joints is the direct result of research that demonstrates the effects of wall base restraint. Concrete footings and other foundation base elements are commonly constructed well before the walls they support. Consequently, by the time the walls are cast, the base elements have already experienced most of the ultimate drying shrinkage (shrinkage-related volume change movement). In addition, the expansion volume change movement associated with the temperature rise caused by the exothermic hydration reaction of the cement has typically already subsided to a great extent. After casting, the walls will also undergo S&T volume change



Fig. 3: Vertical wall cracking resulting from base restraint of concrete S&T volume change

movements. However, the base elements will impose significant restraint, often resulting in vertical cracking like that shown in Fig. 3. Therefore, to keep crack widths within acceptable limits and thus minimize leakage, it is important to provide enough S&T reinforcement in areas where significant restraint exists.

Walls Designed Using ACI Committee 350 Documents

Concrete cracking constitutes a significant obstacle to achieving a liquid-tight environmental engineering concrete structure. While owners expect a leak-free structure, this objective is not always achieved, even when tank structures are designed in accordance with the ACI 350 code and constructed per the engineer's plans and specifications. According to ACI 350-06, Commentary Section R7.12.1.2, the specified minimum S&T reinforcement quantities have been shown to be satisfactory where S&T movements are permitted to occur (that is, movements are not significantly restrained). However, many designers have failed to recognize

that reinforced concrete liquid-containing structures often incorporate details that impose significant wall restraint to in-plane S&T movements.

Potential sources of significant wall restraint include base restraint imposed by adjoining slabs, footings, or walls. Restraint-related factors that could influence the propensity for, and extent of, cracking include:

- The relative stiffness of connected elements in the plane of anticipated movement;
- Overall geometry of the structure (including movement joint placement);
- Construction sequencing and timing; and
- Extent of anticipated shrinkage and/or temperature movements.


It is noteworthy that many researchers have concluded that the minimum S&T reinforcement provisions cited in ACI 350-06 and previous ACI Committee 350 documents may not be adequate to achieve a leak-tight structure.⁸⁻¹¹ According to Hanskat,⁸ when designing a liquid-containing structure without movement joints, reinforcement amounts of 0.7 to 0.8% or more may be required, depending on concrete shrinkage properties, geometry, and external restraint. Kianoush et al.^{9,10} determined that a reinforcement percentage of about 0.7 to 0.8% would be required to keep crack widths within acceptable limits in base-restrained walls with movement joint spacing ≥ 40 ft. However, many designers have continued to rely on minimum S&T reinforcement provisions of ACI 350 documents as a means for providing sufficient control of cracking.

The minimum S&T reinforcement requirements cited in ACI 350-20 should prove to be beneficial with respect to limiting crack widths and reducing the likelihood of leakage. However, in some instances, simply increasing the amount of S&T reinforcement alone may not be enough. For example, I recently investigated an environmental structure that had leakage issues, even though the walls incorporated horizontal steel equal to approximately 1.5% of the gross section. One possible explanation for this finding is that the larger bar sizes often needed to increase steel area without causing excessive steel congestion or potential concrete consolidation problems may not be as effective in controlling cracking as smaller bars would be. Early reports by ACI Committee 350 (ACI 350R-89 and earlier) contained provisions that limited the bar size for S&T reinforcement to No. 4 (13 mm) or No. 5 (16 mm) size. These documents also incorporated statements indicating that it is preferable to use a larger number of small-diameter bars rather than an equal area comprised of larger bars. To ensure adequate leak-tight performance, it may be necessary to use a multifaceted approach to crack control that includes considerations such as:

- Optimizing the quantity, placement, and distribution of horizontal bars;
- Optimizing the concrete mixture to minimize shrinkage;
- Optimizing construction sequencing and jointing practices; or


**Errata for
ACI Publications**

Available Online



Under the menu for "Publications" at www.concrete.org, document errata can be searched by document number or keywords.

Call ACI Customer Service at +1.248.848.3700 for more information.



American Concrete Institute
Always advancing

- Specifying an impervious concrete coating or barrier.

Leakage Prevention

Unlike cracks resulting from bending stresses (that is, flexural cracks), cracks associated with restrained volume change typically extend through the full thickness of the element. Through-wall cracks in liquid-containing structures that exceed a width of approximately 0.004 in. (0.10 mm) will generally leak.^{8,9} While autogenous healing may stop leaks through fine cracks, the likelihood and rate of healing depends on concrete characteristics, age of crack opening, the initial effective crack width, the chemical composition of the water, and water pressure.

According to one source, a crack having an initial width of 0.008 in. (0.20 mm) in “normal strength concrete” could take 5 to 7 weeks to heal.¹² For a contractor tasked with building a liquid-tight environmental engineering structure on schedule, it is rarely practical to adopt a “wait and see” stance with respect to potential crack healing. Further, attempting to fix numerous leaking wall cracks can be a very challenging exercise that requires multiple iterations, particularly in cases where the cracks are very fine and the walls contain relatively large quantities of vertical and horizontal reinforcement. Consequently, when leakage occurs, considerable time and monetary resources may be required to fix the cracks.

Unfortunately, many project specifications are written using language that essentially absolves the designer from all responsibility for tank leakage, placing the burden for repairing cracks squarely on the shoulders of the contractor. The underlying rationale for this scenario seems to be rooted in the assumption that the designer’s responsibility for overall tank performance begins and ends with the delivery of a code-compliant design. However, as previously stated, following the minimum requirements of the ACI 350 code alone will not suffice in all cases.

Ultimately, the designer is in the best position to determine what is necessary to achieve code compliance and to address the owner’s expectations related to watertightness of the structure. However, based on my experiences with investigating numerous tank leakage issues, I have concluded that many designers have not been able to consistently discern what is required to ensure a leak-tight structure. Clearly, it is in everyone’s best interest to ensure that environmental structures are designed and built in a manner that will result in a leak-tight structure. But in order to achieve this outcome on a more consistent basis, I believe designers need to be aware of the limitations of the ACI 350 code, understand that a multifaceted approach to crack control may be required, and hold themselves to a higher level of accountability for the designs they deliver to their clients.

References

1. ACI Committee 350, “Concrete Sanitary Engineering Structures,” *ACI Journal Proceedings*, V. 68, No. 8, Aug. 1971, pp. 560-577.
2. ACI Committee 350, “Revisions to Concrete Sanitary Engineering

Structures,” *ACI Journal Proceedings*, V. 74, No. 6, June 1977, pp. 235-237.

3. ACI Committee 350, “Concrete Sanitary Engineering Structures (ACI 350R-83),” *ACI Journal Proceedings*, V. 80, No. 6, Nov.-Dec. 1983, pp. 467-486.

4. ACI Committee 350, “Environmental Engineering Concrete Structures (ACI 350R-89),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1989, 24 pp.

5. ACI Committee 350, “Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures (ACI 350-01) and Commentary (ACI 350R-01),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001, 492 pp.

6. ACI Committee 350, “Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures (ACI 350-06) and Commentary,” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2006, 485 pp.

7. ACI Committee 350, “Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures and Commentary (ACI 350-20),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2021.

8. Hanskat, C., “Why Does My New Concrete Tank Leak?” Structures Congress 2008: Crossing Borders, American Society of Civil Engineers, Apr. 24-26, 2008, Vancouver, BC, Canada.

9. Kianoush, M.R.; Acarcan, M.; and Dullerud, E., “Cracking in Liquid-Containing Structures,” *Concrete International*, V. 28, No. 4, Apr. 2006, pp. 62-66.

10. Kianoush, M.R.; Acarcan, M.; and Ziari, A., “Behavior of Base Restrained Reinforced Concrete Walls Under Volumetric Change,” *Engineering Structures*, V. 30, No. 6, June 2008, pp. 1526-1534.

11. Barenberg, J.; Quarantino, J.; and Allison, D., “Design and Construction of Liquid-Tight Concrete Structures,” *TECHBriefs*, No. 4, 2003, 3 pp.

12. Aldea, C.-M.; Song, W.-J.; Popovics, J.S.; and Shah, S.P., “Extent of Healing of Cracked Normal Strength Concrete,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, V. 12, No. 1, Feb. 2000, pp. 92-95.

Selected for reader interest by the editors.



ACI member **John J. Roller** is a Principal Structural Engineer at CTLGroup, Skokie, IL, USA. He is a licensed professional and structural engineer with over 35 years of experience in field and laboratory investigations focusing on evaluating performance of building materials, civil structures, and structural or building components. Over the course

of his career, he has evaluated more than 60 structures used for water storage, distribution, or drainage nationwide. He is a member of ACI Committee 355, Anchorage to Concrete, and a member of the Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI) and American Water Works Association (AWWA). He has co-authored more than 50 publications, three of which have won awards: the 2012 and 2008 ASCE T.Y. Lin Award and the 1992 ACI Wason Medal for Most Meritorious Paper.

ACI 350 Refuerzo para Temperatura y Contracción.

Requisitos de diseño e implicaciones en el rendimiento de impermeabilidad de un tanque.

Por John J. Roller

A lo largo de su historia, el código ACI 350 ha provisto requisitos mínimos para los diseños estructurales, selección de materiales, y construcción de estructuras de concreto para ingeniería ambiental. Los ingenieros generalmente presumen que las estructuras diseñadas y construidas bajo el código serán completamente impermeables. No obstante, aún con diseños en cumplimiento con el código, pueden ocurrir fallas de rendimiento como fisuras verticales más anchas de lo esperado, que pueden producir fugas en las paredes de los tanques. Generalmente, estas fisuras verticales en las paredes son resultado de restricción en el movimiento por temperatura y contracción (T&C). Usualmente estas fugas dejan a los clientes preguntándose el por qué, y dejan a los contratistas teniendo que aceptar responsabilidad de reparar filtraciones, que finalmente, fueron resultado de diseños que cumplían con los códigos, pero no por completo. Tras 50 años de historia del Comité ACI 350, Estructuras en Hormigón para Ingeniería Ambiental, los requisitos y recomendaciones relacionados al refuerzo mínimo para T&C para las paredes de tanques, han evolucionado a medida que los ingenieros desarrollan un mejor entendimiento del comportamiento estructural y sus restricciones. Este artículo resume recomendaciones históricas y nuevos requisitos del código ACI 350 relacionados al refuerzo mínimo para T&C, y hace señalamiento a la pregunta del por qué tantas estructuras de contención diseñadas bajo la ACI 350 han tenido fugas.

Historia del Comité ACI 350.

El comité 350 de la ACI fue formado para destacar la necesidad de recomendaciones de diseño, selección de materiales y construcción relacionados a tanques, reservas, y otras estructuras utilizadas para la contención de agua potable y aguas residuales. El primer reporte del comité fue publicado en la edición de agosto del 1971 del ACI Journal Proceedings¹, y posteriormente una edición revisada fue publicada en junio del 1977 del ACI Journal Proceedings². Una versión actualizada del reporte del comité fue publicada como un documento propio en el 1983 con el título "Concrete Sanitary Engineering Structures (ACI 350R-83)"³. La versión del 1989 de este reporte fue titulada "Environmental Engineering Concrete Structures (ACI 350R-89)"⁴. En diciembre del 2001, el Comité ACI 350 emitió "Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures (ACI 350-01) and Commentary (ACI 350R-01)"⁵. Este nuevo estándar fue escrito como un documento legal capaz de adoptarse como referencia para un código de edificación general u otra regulación que gobierne el diseño y construcción de estructuras ambientales. Previo a este año, el código ACI 350 solo ha sido revisado una vez (ACI 350-06)⁶.

Evolución de Requisitos Mínimos para Refuerzo T&C de Paredes.

Las recomendaciones y requisitos de refuerzo mínimo para T&C escritos en los documentos del Comité ACI 350 siempre han sido de naturaleza preceptiva. Previo al 1983, los porcentajes mínimos recomendados para el refuerzo T&C eran basados en los espesores de las paredes. Desde entonces, reportes del comité ACI 350 expresaban recomendaciones mínimas basadas en la distancia entre juntas de movimiento. Al comienzo de las publicaciones del código ACI 350 en el 2001, se incluyó lenguaje que alertara a los diseñadores que quizás sería necesario incrementar la cantidad de refuerzo T&C sobre las cantidades mínimas en ocasiones en el que el movimiento se vea significativamente restringido. Sin embargo, no se proveyó una guía útil que definiera “restricción significativa”. Para empeorar la situación, el ACI 350-01 y ACI 350-06 citaba cantidades mínimas de refuerzo T&C para la condición en la que ninguna junta de movimiento fuese provista, dando la impresión a ciertos diseñadores que la restricción de paredes por elementos de fundaciones (sea restricciones de base) no fuesen consideradas significativas. Las cantidades mínimas de refuerzo T&C citadas en los reportes del 1983 y 1989 del comité y los códigos del 2001 y 2006 son presentadas gráficamente en la Fig. 1. Como se puede ver, las cantidades mínimas de refuerzo T&C se han mantenido de cierta manera consistentes desde el 1983, con un cambio notable en el 1989 siendo la introducción de la distinción entre el refuerzo de Grado 40 y Grado 60. Otros cambios dignos de notar están relacionados a los límites impuestos en el espaciamiento máximo de las juntas de movimiento. En el ACI 350R-83, las recomendaciones mínimas de refuerzo T&C son 0.6% del área gruesa de las paredes para las juntas de movimiento mayores de 50ft (15.2 m), independientemente el grado del acero. En el ACI 350R-89, la recomendación mínima para refuerzo T&C en las paredes con espaciamiento de juntas de movimiento mayores de 60 ft (18.3 m) puede ser 0.5% o 0.6% del área gruesa de las paredes para barras de Grado 60 o Grado 40, respectivamente. Las cantidades mínimas de refuerzo T&C requeridas por los códigos ACI 350-01 y el ACI 350-06 son comparables a esos

recomendados en el ACI 350R-89. No obstante, los códigos consideran que 40 ft (12.2 m) son el límite para el espaciamiento de juntas de movimiento en donde no se requiere refuerzo T&C adicional (ya sea, equivalente a la condición en que no se provea juntas de movimiento).

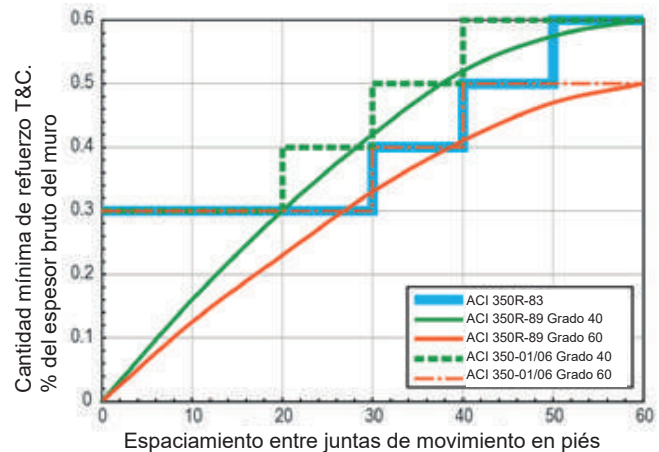


Fig.1: Refuerzo mínimo de T&C según ACI 350R-83,³ ACI 350R-89,⁴ y ACI 350-01⁵ y ACI 350-06⁶ (Nota: 1 pie = 0,30 m)

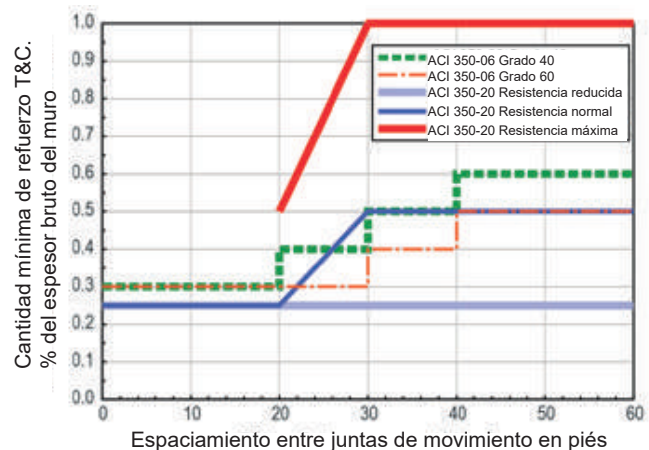


Fig.2: Refuerzo mínimo de T&C según ACI 350-06 y ACI 350-20⁷ (Nota: 1 pie = 0,30 m)

Nuevo Requisito de Refuerzo T&C para Paredes.

El Comité ACI 350 recientemente completó una nueva versión del código ACI 350: ACI 350-20⁷. Esta versión del código incorpora cambios significativos a las provisiones de refuerzo mínimo para T&C, particularmente para barras horizontales en paredes. Los refuerzos T&C mínimos requeridos ahora son categorizados a base de tres niveles de restricción: reducido, normal, y máximo. En las paredes, la categoría de restricción reducida

(Sección 12.13.2.2) está orientada solamente al refuerzo vertical o a situaciones en el que una medida efectiva de prevenir restricción sea provista y determinada por el profesional licenciado de diseño. La categoría de máxima restricción (Sección 12.13.2.4) es orientado a los refuerzos horizontales dentro de los primeros 6 ft (1.8 m) sobre una junta de construcción monolítica horizontal en paredes con longitud mayores de 20 ft (6.1 m) o en paredes con juntas de movimiento espaciadas a más de 20 ft (6.1 m).

Los requisitos nuevos de la ACI 350-20 para refuerzos T&C están trazados en la Fig. 2, junto a los requisitos especificados en previas ediciones del código (ACI 350-06). El trazado ilustra claramente que la cantidad mínima de refuerzo T&C horizontal por ACI 350-20 (Tabla 12.13.2.1) es doble a la cantidad requerida por la ACI 350-06 (Tabla 7.12.2.1) para la condición donde se use acero de Grado 60, y no se provea juntas de movimiento (juntas de movimiento espaciadas más de 40 ft).

Las condiciones de restricción normales requieren cantidades de refuerzo T&C horizontal mínimo comparables a esos citados en las versiones previas del código ACI 350. Las condiciones reducidas de restricción no serán aplicables al refuerzo T&C horizontal en las paredes si no se provee una manera efectiva de prevenir movimiento horizontal restringido. El nuevo requisito mínimo de refuerzo T&C en el ACI 350-20 no hace distinción entre el acero de Grado 40 y Grado 60, probablemente por el destacado uso del acero Grado 60.

Para la mayoría de las estructuras diseñadas de acuerdo con la nueva versión del código ACI 350, la cantidad de refuerzo horizontal en las paredes localizados dentro de 6 ft de la base de fundación necesitará que sea al menos 1% de la sección de la pared. Si la pared está siendo construida con múltiples juntas de construcción horizontales (como lo son comúnmente en paredes relativamente altas), el requisito de 1% también sería aplicable dentro de los 6ft sobre cada junta horizontal adicional. Los requisitos mínimos de refuerzo T&C para juntas horizontales de construcción sobre los 6 ft se basarían en condiciones normales de restricción.

El incremento significativo en la cantidad mínima requerida para refuerzo T&C horizontal dentro de los 6 ft de juntas horizontales de construcción es un resultado directo de investigaciones que demuestran los efectos de restricciones en paredes de base. Es común que las zapatas y otras bases de fundación en concreto sean construidas mucho antes que las paredes a las que soportan. Como consecuencia, al tiempo que las paredes son fundidas, las bases han experimentado casi toda su contracción por secado (movimiento por cambio en volumen relacionado a contracción). Además, el movimiento por cambio en expansión de volumen asociado con el aumento en temperatura, causado por la reacción de hidratación exotérmica del cemento, típicamente ha disminuido a gran medida. Luego de fundir, las paredes también exhibirán cambios en volumen de T&C. Sin embargo, los elementos de la base pondrán restricción significativa, muchas veces resultando en fisuras verticales similares a las que se muestran en la Fig. 3. Por lo tanto, es importante proveer suficiente refuerzo T&C en áreas donde exista restricción significativa para así mantener las fisuras dentro de un límite aceptable y así minimizar las fugas.



Fig.3: Agrietamiento vertical de la pared resultado de la restricción de la base de concreto por cambios en volumen de T&C.

Paredes Diseñadas Utilizando Documentación del Comité ACI 350.

El agrietamiento del concreto constituye un obstáculo significativo para lograr una estructura impermeable de

ingeniería ambiental. Mientras que los clientes esperan una estructura libre de fugas, este objetivo no siempre es logrado, aun cuando la estructura es diseñada de acuerdo con el código ACI 350 y construido por especificaciones y planos del ingeniero. De acuerdo con la Sección de Comentarios R7.12.1.2, del ACI 350-06, la cantidad mínima de refuerzo T&C han demostrado ser satisfactorias en donde los movimientos por T&C son permitidos a ocurrir (ya sea, el movimiento no está restringido significativamente). No obstante, muchos diseñadores han fallado en reconocer que estructuras que contienen líquidos muchas veces incorporan detalles que imponen restricción significativa al movimiento T&C en las paredes.

Fuentes potenciales de restricción en las paredes incluyen restricción en la base impuesta por losas, zapatas o paredes contiguas. Factores relacionados a la restricción los cuales pudiesen influenciar la propensión de fisuras incluyen:

- La relativa rigidez de los elementos conectados en el plano del movimiento anticipado.
- Geometría general de la estructura (incluyendo la ubicación de las juntas por movimiento).
- Secuencia y ritmo de construcción.
- Grado de anticipación de movimiento por contracción y/o temperatura.

Cabe señalar que muchos investigadores han concluido que las provisiones de esfuerzo T&C mínimo-citados en el ACI 350-06 y documentos previos del Comité ACI 350 quizás no son adecuadas para lograr una estructura impermeable⁸⁻¹¹. De acuerdo con Hanskat⁸, cuando se diseña una estructura que contengan líquidos y no tienen juntas por movimiento, la cantidad de refuerzo requerida debería ser entre 0.7% y 0.8%, dependiendo en las propiedades de contracción del concreto, geometría y restricciones externas. Kianush et al^{9,10}, determinó que un porcentaje de refuerzo de 0.7% a 0.8% debería ser requerido en paredes de base restringida con juntas por movimiento mayores a 40 ft para así mantener las fisuras dentro de un límite aceptable. Sin embargo, muchos diseñadores continúan dependiendo de las provisiones de refuerzo T&C mínimo de los documentos del ACI 350 como método de proveer control suficiente de las fisuras.

Los requisitos mínimos para refuerzo T&C citados en el ACI 350-20 deberían ser beneficiosos con respecto a la limitación del ancho de las fisuras y la reducción en la probabilidad de fuga. Sin embargo, en ciertos casos, el incrementar la cantidad de refuerzo T&C no serán suficientes. Por ejemplo, recientemente investigué una estructura ambiental que tenía fugas aun teniendo acero horizontal incorporado aproximadamente a un 1.5% del área gruesa. Una posible explicación para este hallazgo es que el tamaño mayor de las barras que se necesitan para aumentar el área del acero sin ocasionar una congestión de acero o potenciales problemas de consolidación del concreto, no son tan efectivas en controlar las fisuras como lo son con las barras de menor tamaño. Los primeros informes del Comité ACI350 (ACI 350R-89 y anteriores) contenían provisiones que limitaban los tamaños de las barras de refuerzo T&C a No. 4 (13 mm) o No. 5 (16 mm). Estos documentos también incorporan explicaciones indicando la preferencia de utilizar una cantidad mayor de barras de menor diámetro, al contrario de utilizar un área igual compuesta por barras más grandes. Para asegurar un rendimiento adecuado de impermeabilidad, podría ser necesario utilizar un enfoque multifacético para el control de fisuras el cual incluye consideraciones como:

- Optimizar la cantidad, colocación, y distribución de barras horizontales.
- Optimizar la mezcla de hormigón para minimizar contracción.
- Optimizar la secuencia de construcción y prácticas de juntas.
- Especificar un revestimiento impermeable para el concreto.

Prevención de Fugas.

A diferencia de fisuras que resultan por esfuerzos de flexión (ya sea, fisuras de flexión), fisuras asociadas por la restricción de cambio en volumen típicamente se extiende por el grosor completo del elemento. Fisuras de este tipo que excedan de 0.004 in (0.10 mm) de ancho típicamente ocasionan fugas en estructuras que contengan líquidos.^{8,9} Mientras que la auto reparación interna podría detener fugas por fisuras finas, la

probabilidad y la razón de reparación dependerán de las características del concreto, tiempo de apertura de la fisura, el ancho efectivo de la fisura inicial, la composición química del agua y la presión del mismo. De acuerdo con una fuente, una fisura con anchura inicial de 0.008 in (0.20 mm) en un concreto con “esfuerzo normal” puede tomarse de 5 a 7 semanas en repararse.¹² Para un contratista designado con la construcción a tiempo de una estructura impermeable de ingeniería ambiental, no es práctico adoptar una postura de “esperar y ver” con respecto a la auto reparación de la fisura. Además, tratar de reparar numerosas fisuras con fugas en una pared es un ejercicio desafiante que requiere iteraciones múltiples, particularmente en casos donde la fisura es muy fina y la cantidad de refuerzo horizontal y vertical es alto. Como consecuencia, cuando se exhiben fugas, se requieren considerables recursos monetarios y tiempo para reparar las fisuras.

Desafortunadamente, muchas especificaciones de proyectos son escritas utilizando un lenguaje que, en esencia, absuelve de responsabilidad al diseñador por tanques con fugas, e impone la carga de reparar las fisuras sobre el contratista. El argumento racional de este caso nace a raíz de la suposición que la responsabilidad del diseñador en el rendimiento general de la estructura comienza y termina con la entrega de un diseño que esté en cumplimiento con el código. No obstante, como previamente se ha expresado, siguiendo los requisitos mínimos por el código ACI 350 no será satisfactorio para todos los casos.

Por último, el diseñador está en la mejor posición en determinar que es necesario para lograr cumplir con el código y atender la expectativa del cliente en relación con la impermeabilidad de la estructura. No obstante, basado en experiencia personal investigando numerosas fugas en tanques, he concluido que muchos diseñadores no han sido capaces de discernir qué es requerido para asegurar una estructura impermeable. Claramente, es en el mejor interés de todos asegurar que las estructuras ambientales sean diseñadas y construidas de manera que la estructura sea impermeable. Para lograr este resultado de manera

consistente, entiendo que los diseñadores tienen que ser conscientes de las limitaciones del código ACI 350, entender que un enfoque multifacético puede ser requerido para el control de fisuras, y que deben asumir un nivel de responsabilidad mayor por los diseños que le entregan a sus clientes.

Referencias.

1. ACI Committee 350, “Concrete Sanitary Engineering Structures,” ACI Journal Proceedings, V. 68, No. 8, Aug. 1971, pp. 560-577.
2. ACI Committee 350, “Revisions to Concrete Sanitary Engineering Structures,” ACI Journal Proceedings, V. 74, No. 6, June 1977, pp. 235-237.
3. ACI Committee 350, “Concrete Sanitary Engineering Structures (ACI 350R-83),” ACI Journal Proceedings, V. 80, No. 6, Nov.-Dec. 1983, pp. 467-486.
4. ACI Committee 350, “Environmental Engineering Concrete Structures (ACI 350R-89),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1989, 24 pp.
5. ACI Committee 350, “Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures (ACI 350-01) and Commentary (ACI 350R-01),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001, 492 pp.
6. ACI Committee 350, “Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures (ACI 350-06) and Commentary,” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2006, 485 pp.
7. ACI Committee 350, “Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures and Commentary (ACI 350-20),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2021.
8. Hanskat, C., “Why Does My New Concrete Tank Leak?” Structures Congress 2008: Crossing Borders, American Society of Civil Engineers, Apr. 24-26, 2008, Vancouver, BC, Canada.
9. Kianoush, M.R.; Acarcan, M.; and Dullerud, E., “Cracking in Liquid-Containing Structures,” Concrete International, V. 28, No. 4, Apr. 2006, pp. 62-66.
10. Kianoush, M.R.; Acarcan, M.; and Ziari, A., “Behavior of Base Restrained Reinforced Concrete Walls Under Volumetric Change,” Engineering Structures, V. 30, No. 6, June 2008, pp. 1526-1534.
11. Barenberg, J.; Quarantino, J.; and Allison, D.,

“Design and Construction of Liquid-Tight Concrete Structures,” Burns & McDonnell, TECHBriefs, No. 4, 2003, 3 pp.

12. Aldea, C.-M.; Song, W.-J.; Popovics, J.S.; and Shah, S.P., “Extent of Healing of Cracked Normal Strength Concrete,” Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, V. 12, No. 1, Feb. 2000, pp. 92-95.



John J. Roller es un miembro de la ACI y Ingeniero Estructural Principal en CTLGroup, Skokie, IL, USA. Es un profesional licenciado e ingeniero estructural con más de 35 años de experiencia en el campo e investigaciones de laboratorios enfocadas en la evaluación del rendimiento de materiales de construcción, estructuras civiles, y componentes estructurales. En el transcurso de su carrera ha evaluado sobre 60 estructuras

alrededor de toda la nación utilizadas para el almacenamiento, distribución o drenaje de agua. Es miembro del Comité ACI 350, Anclaje al Concreto, y miembro del Instituto del Concreto Prefabricado/Prestressed (PCI por sus siglas en inglés) y de la Asociación Americana de Obras Hidráulicas (AWWA por sus siglas en inglés). John ha sido coautor de más de 50 publicaciones, de las cuales 3 han ganado premios: Premio ASCE T.Y. Lin en el 2008 y 2012 y la Medalla ACI Wason por Documento Meritorio.

La traducción de este artículo correspondió a la Sección Puerto Rico

Título: ACI 350 Refuerzo para Temperatura y Contracción



Traductor: José M. Mejía Borrero



Revisor Técnico: Ing. Rubén Segarra Montelara