

ACTUALIZACIÓN REGLAMENTO INPRES-CIRSOC 103 PARTE II: UN ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DISEÑO DE VIGAS

Bay, Cristian; Martínez, Carlos
Dr. Ing. Civil; Dr. Ing. Civil
GEDEC – FR San Rafael – Universidad Tecnológica Nacional
cbay@frsr.utn.edu.ar

RESUMEN

Nuestro país cuenta con peligrosidad sísmica de todos los matices, siendo muy elevada en el centro norte y atenuándose hacia el este. Esto radica en la necesidad de contar con normativa actualizada para el diseño sísmo resistente de estructuras. El Instituto Nacional de Prevención Sísmica es el encargado de redactar la normativa sismorresistente de nuestro país. Así, para el diseño de estructuras de hormigón armado bajo acciones sísmicas está vigente el INPRES-CIRSOC 103-II (2005). En 2020 se puso en discusión pública nacional una nueva versión que, desde 2021 está en trámite de aprobación. En este trabajo se presentan los avances de la versión 2021 para el diseño de vigas de pórticos con ductilidad completa. Se destacan, cambios en el formato del documento, facilitando la lectura para el diseñador, también algunos cambios en materiales y modificaciones en la determinación de cuantías de vigas. Los cambios se ilustran mediante gráficas y tablas que permiten analizar la influencia de estos cambios.

ABSTRACT

Our country has seismic danger of all shades, being very high in the north center and attenuating towards the east. This lies in the need to have updated regulations for the earthquake resistant design of structures. The National Institute for Seismic Prevention is in charge of drafting the seismic-resistant regulations of our country. Thus, for the design of reinforced concrete structures under seismic actions, INPRES-CIRSOC 103-II (2005) is in force. In 2020, a new version was put up for national public discussion, which has been in the approval process since 2021. In this work, the advances of the 2021 version for the design of frame beams with full ductility are presented. Changes in the format of the document stand out, facilitating reading for the designer, as well as some changes in materials and modifications in the determination of amounts of beams. The changes are illustrated by graphs and tables that allow the influence of these changes to be analysed.

INTRODUCCIÓN

En la República Argentina una importante extensión de superficie se encuentra en zonas propensas a actividad sísmica destructiva, entonces resulta una necesidad contar con normativa de diseño estructural acorde a los avances de la investigación. Es conocido que los terremotos son fenómenos naturales inevitables, cuya acción es capaz de producir catástrofes, por tanto, deben ser considerados al momento de proyectar edificios, y dado que, el comportamiento sísmico inadecuado de las estructuras ha sido la principal causa de pérdidas humanas y económicas ^[1].

En el oeste argentino el desarrollo de la ingeniería sísmica y normativa asociada ha permanecido en el ámbito de las universidades, por lo tanto, los resultados obtenidos en ella también se han volcado en la formación de profesionales y en la redacción de normativa a través de la participación de investigadores y docentes ^[2].

La evolución de los reglamentos nacionales, al igual que en el ámbito internacional, ha tenido una correlación con eventos sísmicos destructivos, en nuestro país desde 1861 hasta la actualidad. Siendo la provincia de Mendoza pionera en América latina en tener algunos lineamientos básicos desde el año 1923 ^[2].

El Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES), desde su fundación ha desarrollado y puesto en vigencia tres reglamentos: Normas antisísmicas argentinas CONCAR 70, Normas antisísmicas argentinas NAA 80 e INPRES-CIRSOC 103 - 1991. Este último presenta distintos tomos. El primero hace referencia a la determinación de la acción sísmica, zonificación y factores de modificación de respuesta. Luego se presenta un tomo para cada material de uso estructural (hormigón armado, acero, mampostería y recientemente puentes).

En el año 2000 el INPRES lanzó un programa de renovación de reglamentos, así se publicó en 2005 la versión que actualmente está en vigencia, con el diseño por capacidad como principal eje y basado en la norma neozelandesa ^[3].

En cuanto a la determinación de la demanda sísmica, se ha seguido los lineamientos de las normas estadounidenses. Así lo establece desde la primera versión del año 1982 hasta la actualmente en vigencia con fecha de 2018 ^[4].

En lo que refiere al diseño de estructuras de hormigón armado a partir del año 2000 los reglamentos nacionales se han basado en las normas neozelandesas ^[3], sobre todo para incorporar el diseño sismorresistente por capacidad propuesto por Priestley [5], tanto para estructuras con ductilidad completa, como para estructuras con ductilidad limitada.

En el año 2020 se presentó una actualización de la versión 2005 que se puso en discusión pública nacional, hasta que en 2021 [6] paso a estar trámite de aprobación.

En la *Figura 1* se presentan las tapas de ambas versiones (2005, 2021) que serán objeto de análisis en este trabajo.



Figura 1. Tapa del reglamento versión 2005 y 2021.

Este trabajo tiene como objetivo analizar los cambios en el diseño de vigas de hormigón armado de pórticos de ductilidad completa entre las versiones 2005 y 2021. Aunque también se presentan los cambios de orden general, formal y de materiales. Respecto de los demás elementos que forman a los pórticos se realizan comentarios generales, no hay cambios sustanciales en la versión 2021.

CAMBIOS A LOS REQUISITOS GENERALES

Aspectos formales

En términos generales la versión 2021 mantiene los mismos alcances de la versión 2005, siendo cambios formales y de contenido los que presenta la nueva versión.

La necesidad de actualización surge de que, la experiencia acumulada durante los últimos años ha demostrado que los profesionales involucrados en el diseño sísmico de estructuras han tenido inconvenientes en la aplicación efectiva de las prescripciones contenidas en la versión 2005. Esto que ha conducido, en muchos casos, a diseños inadecuados que se alejan del espíritu reglamentario. Entonces, la experiencia, consultas, comentarios y propuestas recibidas durante su vigencia legal han puesto de manifiesto la necesidad de transparentar dichas prescripciones, las cuales, sin modificarse en mayor medida, se han ampliado y aclarado en la versión 2021, con abundante material gráfico incorporado a los comentarios.

La versión 2021 se presenta en formato unificado, incluyendo los comentarios en el cuerpo principal del Reglamento, inmediatamente después de las prescripciones reglamentarias, recuadrados con fondo grisáceo, de manera tal que el diseñador encuentre rápidamente los fundamentos y aclaraciones sin la necesidad de consultar otro documento. La idea de documento unificado es trasladarla a los demás

reglamentos a medida que sea necesaria su actualización.

Propiedades de los materiales

En las propiedades de los materiales hay cambios importantes, en el hormigón simple por el avance de la tecnología y en el acero por la disponibilidad de materiales en nuestro país. A continuación, se hace referencia a ambos.

Respecto del hormigón simple es conocido que a medida que aumenta la resistencia, disminuyen las deformaciones correspondientes a la máxima tensión y a la rotura, Razón por la que la versión 2005 limita la tensión característica del hormigón (f'_c) a 40 Mpa. Esto es porque, al aumentar las tensiones de compresión se requieren detalles especiales de confinamiento. En consecuencia, es posible utilizar hormigones de mayor resistencia a la especificada en la versión 2005 pues la deformabilidad estará controlada por el confinamiento que proveen en forma combinada las armaduras longitudinales y transversales.

Bajo este concepto la versión 2021 permite el uso de hormigones con resistencia de hasta 70 Mpa. Es importante destacar que la tecnología del hormigón ha evolucionado y estos hormigones no resultan demasiado complejo de ejecutarlo, por otro lado, el desarrollo inmobiliario hace que sea necesario, sobre todo en columnas, aumentar las resistencias características a fin de reducir las secciones de hormigón.

Este incremento de f'_c origina un aumento de armadura transversal para lograr el confinamiento necesario para las demandas de deformación unitarias del hormigón.

En la Figura 2 se representa este efecto. A la izquierda cada curva muestra cómo, para una determinada relación de carga axial, se reduce la sección necesaria de hormigón conforme aumenta f'_c . Las curvas están para una cuantía de acero longitudinal de 0,02. Y a la derecha como, a medida que aumenta f'_c se requiere mayor armadura transversal de confinamiento (expresión 2.3-18 de la versión 2021). En el eje de la derecha se representan, a modo ilustrativo, la cantidad de ramas de estribos de 8mm en cada dirección necesarias para obtener A_{sh} (armadura transversal de confinamiento en cada dirección).

Entonces, por ejemplo, para una columna de relación de carga axial de 0,3 se requiere una sección de 500 mm x 500 mm y 6 ramas de estribo de 8 mm para alcanzar el confinamiento necesario cuando $f'_c = 40$ Mpa (límite de la versión 2005). Incrementar f'_c hasta 70 Mpa (versión 2021), permite reducir la sección a 380 mm x 380 mm, pero se requieren 12 ramas de estribos de 8 mm en cada dirección para garantizar la deformación del hormigón.

Entonces si bien la versión 2021 permite el incremento de f'_c , el diseñador debe tener especial cuidado con la cantidad de armadura transversal que se necesita.

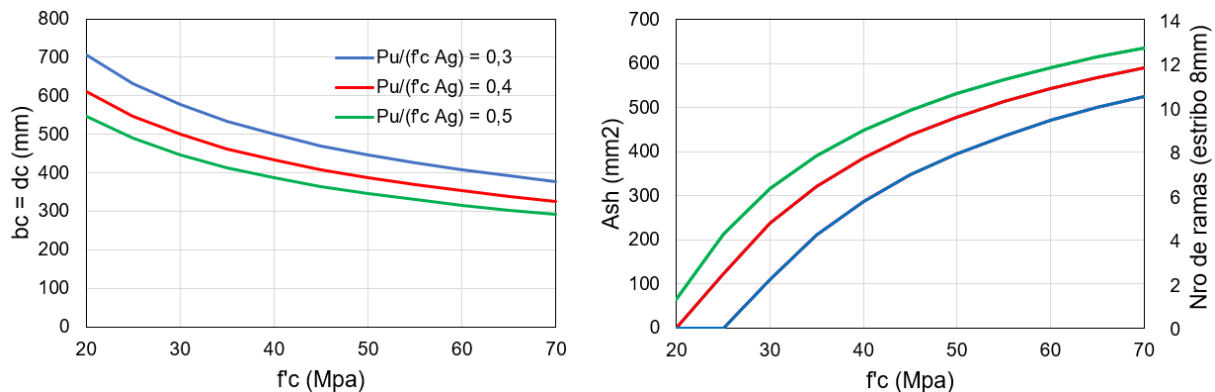


Figura 2. Efecto del aumento de f'_c en la sección de hormigón y cantidad de armadura transversal.

Respecto del acero de construcción, la versión 2021 incluye a los aceros soldables, ADN420S, que se fabrican actualmente en nuestro país. En estos aceros, el proceso de fabricación implica un enfriamiento rápido de la superficie mientras que el núcleo permanece caliente, y este calor interno es el que temple las capas exteriores. Esto permite obtener aceros de relativamente alta resistencia (>550 Mpa) con un bajo contenido de carbono (<0,52%), entonces resultan soldables [7].

La versión 2005 indica que las características de los aceros, para estructuras que deban desarrollar ductilidad son, un *plateau* de fluencia extendido seguido por un endurecimiento gradual (superior al 25%) y baja variabilidad entre la tensión real y tensión nominal de fluencia. Sin embargo, los aceros ADN420-S, tal como muestra la Figura 3, son de bajo endurecimiento post fluencia (10%) y no cumplen con los requisitos de la versión 2005.

La versión 2021 incluye a los aceros de bajo endurecimiento post fluencia, es decir a los ADN420S. Sin embargo, el reglamento no contempla prescripciones sobre los efectos que estos podrían tener en la estructura. Ensayos realizados en columnas han mostrado disminución en la longitud de la rótula plástica y mayor facilidad de pandeo de las barras longitudinales por el bajo endurecimiento posterior a la fluencia [5].

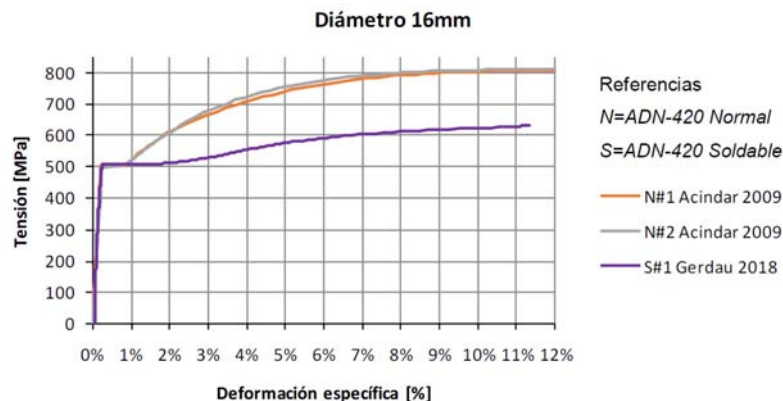


Figura 3. Ensayos barras de acero $db=16mm$ para aceros ADN420 y ADN420S.

Combinación de acciones

La versión 2005 incluye las combinaciones de carga que incluyen sismo en estado último. Para la carga permanente (D) utiliza un factor de 1,2 y 0,9. Sin embargo, según la tendencia de las normas actuales ([3]; [8]) han demostrado que es suficiente considerar 1,00 D, tal como lo propone la versión 2021. Sobre todo, considerando que la carga sísmica vertical (E_v) resulta un porcentaje de D y permite tener en cuenta la cierta variabilidad que puede presentar D.

La Figura 4, extraída de [8], muestra como el coeficiente de D y el sismo vertical afectan en el diagrama de iteración. Nótese como para el caso ilustrativo de la figura, la consideración de 1,2D y 0,9D resulta más favorable que considerar 1,0D.

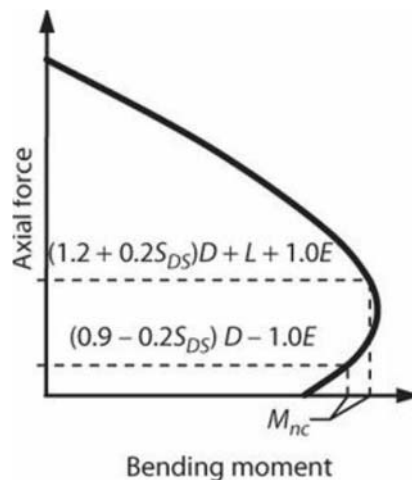


Figura 4. Influencia de las combinaciones de carga en el diagrama de iteración.

DISEÑO DE VIGAS DE PORTICOS CON DUCTILIDAD COMPLETA

En este apartado se analizan los cambios entre la versión 2005 y 2021 para vigas de pórticos con ductilidad completa.

Aspectos dimensionales

Respecto del ancho de la sección en la zona comprimida (b_w), no debe ser menor que 180 mm en la versión 2021, a diferencia con la versión 2005 que establece 200 mm de ancho mínimo. Este cambio permite utilizar estructura del ancho de ladrillos cerámicos, algo que en nuestro país es todavía de uso común, y con la versión 2005 resultaba complejo desde lo constructivo.

Por otro lado, se continúa estableciendo relaciones máximas de esbelteces de la sección, L_n/b_w y $L_n h_b/b_w^2$, donde L_n es la longitud y h_b la altura de la viga. Estas

relaciones tienen por objeto favorecer el comportamiento dúctil de la sección, y en la versión 2021 han sufrido pequeñas modificaciones respecto de la versión 2005.

El diseñador estructural está familiarizado con esbelteces seccionales (h_b/b_w) y esbelteces de vigas (L_n/h_b), entonces se proponen gráficos para relacionar ambas esbelteces según la versión 2021. En la Figura 7 se presentan estas relaciones y se las compara con las indicadas en el CIRSOC 201-05 (Tabla 9.5.a), para vigas T o L (VTL), vigas I (VI) continuas en la gráfica izquierda y en voladizo gráfica derecha.

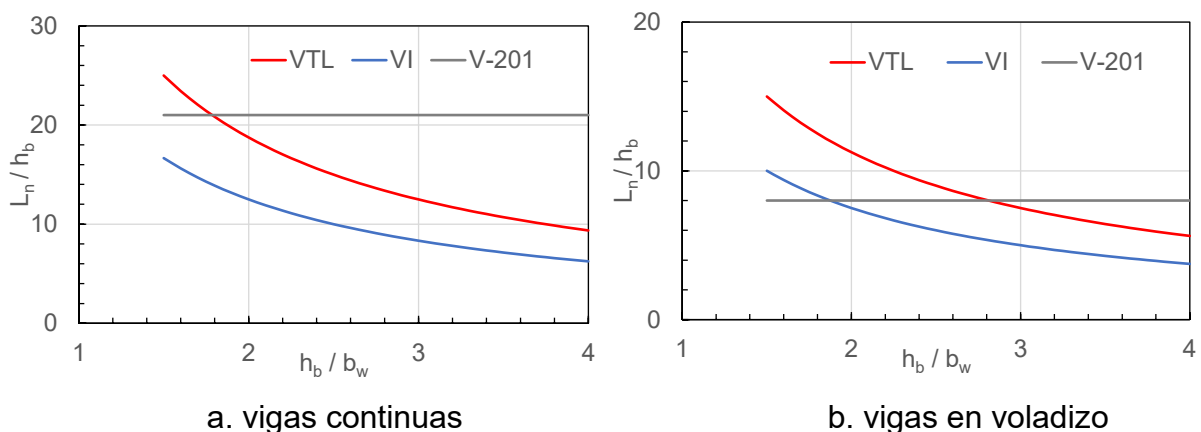


Figura 5. Esbelteces máximas de vigas según versión 2021 y CIRSOC 201-05

Se observa que para ambos casos la esbeltez seccional máxima es de 4 ($h_b/b_w < 4$). También que las esbelteces son notablemente inferiores que las requeridas por el CIRSOC 201-05. Por ejemplo, para una viga 250 mm x 600 mm, $h_b/b_w = 2,4$ se admite esbeltez de viga de hasta 15 para vigas T o L, 10 para vigas I, frente a los 21 que admite el diseño por resistencia.

Ancho efectivo en vigas T y L

En vigas T y L, construidas monolíticamente con la losa debe considerarse el ancho efectivo en compresión y tracción, para reducir la sección de acero necesaria, pero también para considerar toda la resistencia y sobre resistencia de la viga que se considerada en el diseño a corte (fundamental en el diseño por capacidad).

La versión 2005 indica que los anchos colaborativos en tracción (momento negativo) son diferentes a los anchos de compresión (momento positivo), además en la versión 2005 solo se indican los primeros, para los segundos remite al lector al reglamento CIRSOC 201-05, lo cual resulta complejo y tedioso al momento del diseño.

La versión 2021 simplifica utilizando los mismos anchos efectivos para compresión y tracción, tal como lo indica la Tabla 1, donde L_b es el largo de la viga en estudio y los demás parámetros se indican en la tabla.

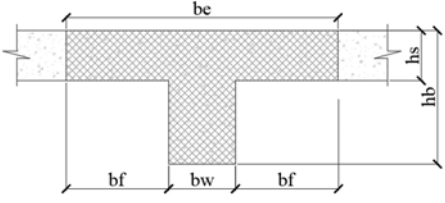
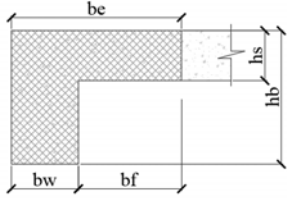
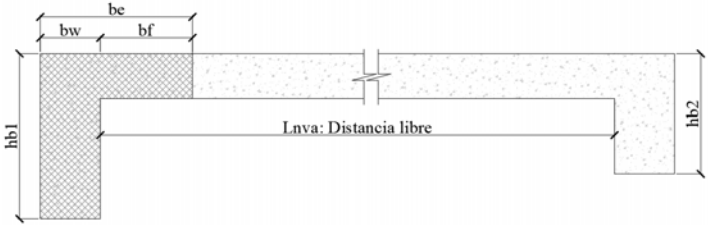
En tracción y compresión b_f resulta:		Vigas en T	Vigas en L
(a)	$b_f \leq L_b / 8$		
(b)	$b_f \leq 8 h_s$		
(c)	$b_f \leq h_b$		
(d)	$b_f \leq L_{nva} h_{b1} / (h_{b1} + h_{b2})$		

Tabla 1. Anchos efectivos de vigas T y L (versión 2021).

Diseño de la armadura longitudinal

No hay cambios en cuanto a la determinación de la demanda y capacidad flexional de vigas. Sin embargo, hay modificaciones importantes en cuantías y la forma de evaluarlas, cambios que se exponen a continuación.

En la versión 2021 se mantiene una armadura mínima de 2 d_b12 mm en la cara superior e inferior para asegurar una cantidad de momento mínimo. Sin embargo, en los comentarios se indica que, a diferencia de la versión 2005, puede reemplazarse por una cuantía equivalente. Esto permite, en forma implícita, reducir el tamaño de las columnas de 300 mm a 250 mm por la limitación indicada en ambas versiones sobre tamaño máximo de barras longitudinales.

En la versión 2021 se incorpora el concepto de armadura efectiva (A_{se}), como la armadura equivalente ubicada a una profundidad coincidente con la de la capa más traccionada de la sección. Este concepto se manifiesta en la expresión (1) donde, $A_{s,i}$ es el área de la capa en la posición i y d_i es la distancia de la capa i desde la fibra comprimida (ver Figura 8).

$$\rho = \frac{A_{se}}{b_w d} \quad ; \quad A_{se} = \sum_{i=1,t}^n (A_{s,i} \frac{d_i}{d}) \quad (1)$$



Figura 6. Sección transversal para determinar armadura longitudinal efectiva

El concepto de A_{se} resulta más racional que el utilizado en la versión 2005 (y otras normativas) donde se utiliza toda la armadura traccionada para determinar la cuantía, sin embargo, no se han encontrado antecedentes normativos.

Claramente el concepto de cuantía efectiva permite incorporar mayor cantidad de armadura que el concepto tradicional. La cantidad dependerá básicamente de la cantidad de capas y cantidad de armadura de estas capas. Así, por ejemplo, para una sección con relación $h_b/b_w = 2$ y con 4 capas de armadura traccionada incrementan la cantidad de armadura longitudinal en un 15%.

La cuantía máxima (ρ_{max}), para garantizar una ductilidad adecuada de la sección, se mantiene igual que en la versión 2005. En términos de cuantías mínimas (ρ_{min}), además de las expresiones ya utilizadas, una nueva condición donde se requiere que el momento nominal de la sección (M_n) sea al menos 1,5 veces el momento de fisuración (M_{cr}), para garantizar una falla dúctil de la sección. Esta limitación no tiene antecedentes normativos (ACI318-19; NZS3101:06), aunque si está basada en el concepto físico de alejarse del M_{cr} para evitar la falla frágil. Prietley [5] recomienda alejarse al menos un 50%, de ahí surge el 1,5.

Resulta interesante analizar como impacta esta nueva limitación de cuantía mínima. En la Figura 7 se presentan, además de ρ_{min} tradicionales, la cuantía que representa el $1,5 M_{cr}$. Para este último se ha considerado una sección rectangular de relación $h_b/b_w = 2$ y capas de armadura simétricas ubicadas a la profundidad de capa de fluencia, para distintas resistencias características del hormigón (f_c)

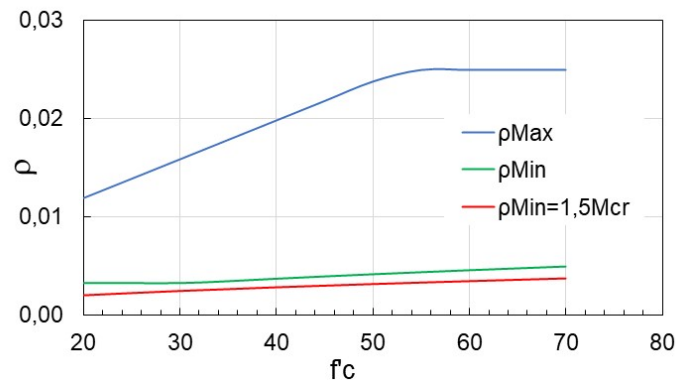


Figura 7. Cuantías límites para vigas de hormigón armado

Se observa que la cuantía referida al 1.5 M_{cr} es menor para todo f_c , siguiendo la tendencia de ρ_{min} de la versión 2005 y 2021. También se aprecia la limitación de ρ_{max} , con el máximo valor de 0,025 que se alcanza para $f_c = 50$ Mpa.

Resulta interesante evaluar cuanto es posible reducir ρ_{min} por el concepto $M_n > 1,5 M_{cr}$. Entonces, considerando que el M_{cr} depende de h_b/b_w y de f_c , se trazan los gráficos (Figura 8) donde se compara la cuantía equivalente para 1,5 M_{cr} respecto de ρ_{min} tradicional.

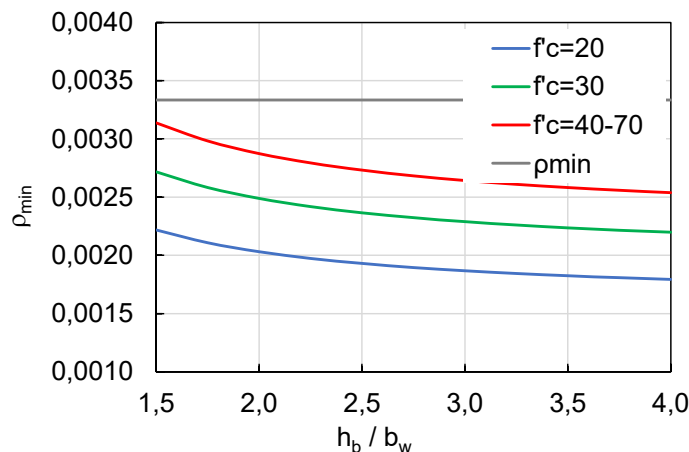


Figura 8. Relación entre cuantía para 1.5 M_{cr} y cuantía mínima

Se observan curvas decrecientes a medida que aumenta h_b/b_w y la relación se reduce a medida que aumenta f_c . Para $f_c = 20$ Mpa se puede reducir la cantidad de armadura en un 65% para $h_b/b_w = 1.5$ e incrementarse hasta el 50% para $h_b/b_w = 4$. Esta reducción resulta menor cuando aumenta f_c y se reduce la relación de esbeltez del elemento.

Finalmente, es importante destacar que, el concepto incorporado de ρ_{min} permite reducir la cantidad de armadura sin pérdida de seguridad estructural del elemento. Entonces, por aplicación del diseño por capacidad está reducción impacta directamente en el diseño de todos los elementos de la estructura.

Diseño de la armadura transversal

En primera instancia se destaca que, en la versión 2021, la sección se ha reordenado siendo más fácil su seguimiento para el diseñador, además se han incorporado gráficos que ayudan a comprender el diseño por capacidad.

Respecto de los detalles de armado, en la versión 2021 no se permite el uso de estribos exteriores o con una rama que contengan ganchos a 90° , esto para garantizar el anclaje del estribo y que garantice su contribución al pandeo de barras longitudinales y confinamiento del núcleo de hormigón.

En la versión 2021 se limita la tensión de corte, aunque se permiten tensiones mayores si se utiliza armadura diagonal para tomar el corte. Se destaca que en la versión 2005 existía una limitación de la tensión nominal.

Cantidad mínima de armadura transversal en zona normal

La versión 2005 no menciona requisitos sobre armaduras mínimas en zonas normales, entonces se regía por el CIRSOC 201-05. La versión 2021 incorpora una expresión de armadura mínima, extraída del NZS3101:06, que aumenta en un 30% los requerimientos del CIRSOC 201-05.

En la Figura 9 se presenta la cantidad mínima de armadura para diversos anchos de viga b_w y f'_c . En la figura también se indican la cantidad de armadura que aportan estribos de dos ramas.

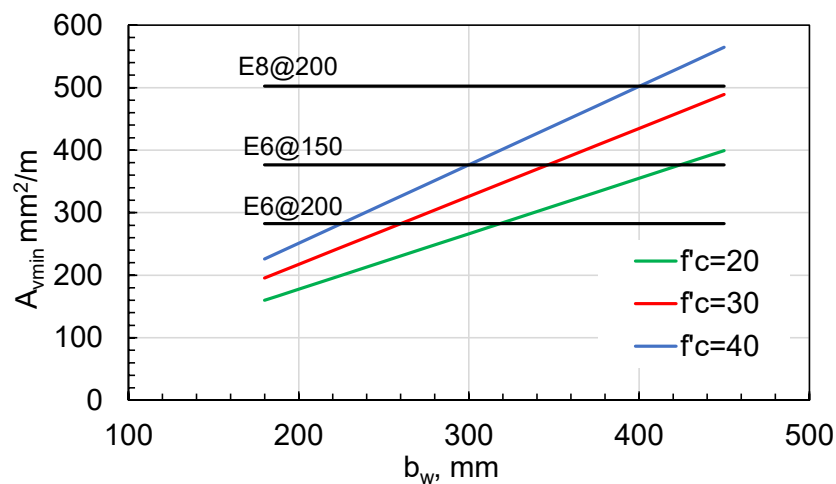


Figura 9. Cantidad mínima de armadura transversal para vigas según versión 2021.

Es importante destacar que la versión 2021 no incluye un requisito de separación máxima de estribos de $12 d_b$, como si lo hace el NZS3101:06. Esta limitación es importante, sobre todo para no generar cambios bruscos en la cantidad de armadura transversal entre la zona de rotula plástica y la zona normal, sobre todo

considerando que, como se comentó anteriormente, los aceros ADN420-S incrementan la longitud de rotula plástica [5].

CONCLUSIONES

En línea con el objetivo descripto, se desarrolló un análisis comparativo del reglamento INPRES-CIRSOC 103-II versión 2005 (actualmente en vigencia) y versión 2021 (en trámite de aprobación). El análisis a las generalidades del reglamento y al diseño de vigas que forman parte de pórticos dúctiles de hormigón armado.

Se realizó una comparación de aspectos formales en primera instancia y luego desde lo conceptual. Se marcaron las diferencias entre ambas normativas indicando los motivos y consecuencias de cada uno de los cambios realizados.

La nueva versión incluye a hormigones de alta resistencia con el debido confinamiento. También se incluyen los aceros de bajo endurecimiento post fluencia, disponibles en el mercado argentino.

La incorporación de armadura efectiva y cuantía mínima a partir del concepto del momento de fisuración permiten reducir la armadura en vigas, y consecuentemente en toda la estructura, lo cual representa una economía sin pérdida de seguridad estructural. También se simplificó la forma en que se determina el ancho colaborante de vigas con forma de T y L. Por último, se incluye una cantidad mínima de armadura transversal.

Es importante destacar, sigue la premisa del diseño por capacidad como eje central.

Entonces, el aporte fundamental de este trabajo es mostrar y cuantificar los cambios que se exponen con la nueva versión del reglamento, y marcar aquellas tendencias que se mantienen.

Agradecimientos

El presente trabajo ha sido financiado parcialmente por el Proyecto de Investigación ECUTNSR0006616 de la UTN. Los autores desean expresar su agradecimiento a la Facultad Regional San Rafael de la UTN por facilitar las instalaciones para el desarrollo de la investigación.

Referencias

- [1] M. Priestley, M. Kowalsky y M. Calvi, Displacement Based Seismic Design Of Structure, Pavia, Italia, Pavia: IUSS Press, 2007.
- [2] N. Malonado, M. Tornello y C. Frau, «Estado actual de la investigación y conocimiento de la ingeniería sísmica en Mendoza. Avances. Estado de los códigos de edificación,» de *Publicación interna*, 2012.
- [3] NZS3101:P1, «Concrete Structures Standard Part 1 – The Design of Concrete Structures,» New Zealand Standard, New Zeland, 2006.
- [4] INPRES-CIRSOC 103-I, Reglamento argentino para construcciones sismorresistente. Parte I. Construcciones en general, Bs. As.: INTI, 2018.
- [5] T. Paulay y M. Priestley, Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings, USA: John Wiley and Sons, Inc, 1990.
- [6] INPRES-CIRSOC 103-II, Proyecto de Reglamento Argentino para construcciones sismorresistentes. Parte II - Estructuras de hormigón armado, Bs.As.: INTI, 2021.
- [7] E. Vega, C. Llopiz, F. Crisafulli y M. Jeremy, «Aceros ADN-420S (Soldables) vs. Aceros ADN-420. Situación normativa en Argentina. 25° Jornadas argentinas de Ingeniería Estructural.,» Resistencia, Chaco, 2018.
- [8] ASCE-7, «Minimum design loads for buildings and other structures.,» American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, EEUU, 2016.
- [9] INPRES-CIRSOC 103-II, Reglamento Argentino para construcciones sismorresistentes. Parte II - Estructuras de hormigón armado, Bs.As.: INTI, 2005.