

COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ARMADO EXPUESTAS A TEMPERATURAS POR DEBAJO DEL PUNTO DE CONGELACIÓN¹

Luis A. Montejo², Mervyn J. Kowalsky³ y Tasnim Hassan⁴

Resumen: Este artículo recopila los principales resultados de una serie de pruebas experimentales en las cuales columnas circulares de hormigón armado fueron sujetas a incrementos cíclicos de carga lateral y carga axial constante. Durante las pruebas las columnas fueron expuestas a temperaturas ambiente y a temperaturas por debajo del punto de congelación. Con el objetivo de caracterizar cada aspecto de la respuesta sísmica a temperaturas muy bajas, algunas de las columnas fueron diseñadas para fallar por cortante y otras para fallar por flexión, estas últimas incluyendo columnas convencionales de hormigón armado y tubos de acero rellenos de hormigón armado. Se encontró que las columnas probadas a temperaturas bajas experimentan un incremento en rigidez y en la capacidad a cortante y a flexión. En el caso de las columnas dominadas por flexión, el aumento en capacidad está acoplado con una reducción en la capacidad de desplazamiento.

Palabras clave: capacidad a cortante, columnas de hormigón armado, diseño sísmico, ductilidad, temperaturas bajas.

SEISMIC BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS AT SUB-FREEZING TEMPERATURES

Abstract: This paper summarizes the results obtained from a series of large scale circular columns tests under increasing cyclic reversals and constant axial load while subjected to ambient and sub-freezing temperatures. In order to characterize every aspect of the seismic response at low temperatures, some of the columns were designed to be shear critical while the others were flexural dominated; this last including reinforced concrete filled steel tube columns (RCFST). It was found that columns tested at low temperatures exhibit an increase in the stiffness and in the shear and flexural strength. In the case of flexural dominated columns the increase in strength was accompanied by a reduction in the displacement capacity.

Keywords: ductility, low temperatures, RC columns, seismic design, shear strength.

INTRODUCCIÓN

Uno de los factores más importantes en el diseño de estructuras en zonas frías y sísmicamente activas es el riesgo de una falla frágil debido al efecto combinado de demandas laterales y temperaturas muy bajas (por debajo del punto de congelación). Varias zonas de alto riesgo sísmico se encuentran localizadas en regiones donde la temperatura puede bajar a niveles donde la ductilidad de los materiales de construcción se puede ver comprometida. En los Estados Unidos de América, por ejemplo, Alaska es el estado con los inviernos más crudos y uno de los más activos sísmicamente. El objetivo de esta investigación consistió en determinar el efecto de temperaturas muy bajas en la resistencia y ductilidad de estructuras de hormigón armado en zonas de alto riesgo sísmico. Para lograr este objetivo, 14 columnas circulares de hormigón armado fueron probadas dentro de una cámara ambiental en el laboratorio de estructuras ("Constructed Facilities Laboratory", o CFL por sus siglas en inglés) en la Universidad Estatal de Carolina del Norte (NC SU por sus siglas en inglés). Las columnas fueron sujetas a incrementos cíclicos de carga lateral y carga axial constante, mientras

¹ Artículo recibido el 25 de agosto de 2009 y aceptado 6 de abril de 2010.

² Catedrático Auxiliar, Departamento de Ciencias de la Ingeniería y Materiales, Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez, Mayagüez, Puerto Rico. E-mail: luis.montejo@upr.edu

³ Professor, Department of Civil Engineering, North Carolina State University, Box 7908, Raleigh, North Carolina 27695-7908. E-mail: kowalsky@eos.ncsu.edu

⁴ Professor, Department of Civil Engineering, North Carolina State University, Box 7908, Raleigh, North Carolina 27695-7908. E-mail: thassan@eos.ncsu.edu

eran expuestas a temperaturas ambiente ($\sim 20^{\circ}\text{C}$, 68°F) y temperaturas por debajo del punto de congelación ($\sim -40^{\circ}\text{C}$, -40°F). Con el objetivo de caracterizar cada aspecto de la respuesta sísmica a temperaturas bajas, algunas de las columnas fueron diseñadas para fallar por flexión, otras para fallar por cortante y otras fueron construidas como tubos de acero rellenos de hormigón armado. Este artículo recopila los principales resultados de esta investigación.

EFFECTO DE TEMPERATURAS BAJAS EN LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Tanto el hormigón como el acero de refuerzo experimentan un incremento notable en su resistencia cuando son expuestos a temperaturas por debajo del punto de congelación. En el caso del hormigón, el incremento en su capacidad a compresión (f'_c) es proporcional a su contenido de humedad (w , porcentaje del peso de hormigón seco) y puede ser estimado usando la ecuación (1) propuesta por Browne y Bamforth (1981). El contenido de humedad en el hormigón depende del volumen de poros, que a su vez depende de la edad del material, las condiciones de curado, la proporción agua-cemento y las propiedades del agregado grueso. El contenido de humedad de hormigones expuestos al aire se encuentra usualmente en el rango 3%-5% y puede aumentar dependiendo del grado de exposición. En hormigones saturados el contenido de humedad puede estar alrededor de 8%. La Figura 1 muestra el incremento en f'_c a temperaturas bajas para un hormigón con $f'_c = 35 \text{ MPa}$ (5 ksi) a temperatura ambiente (20°C); por ejemplo, si $w = 3\%$ la capacidad a compresión a -40°C es $f'_c(-40) = 35 - (-40 \cdot 3/12) = 45 \text{ MPa}$ (28.6% de incremento).

$$f'_c(T) = f'_c(20^{\circ}\text{C}) - Tw / 12 \quad 0^{\circ}\text{C} > T > -120^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

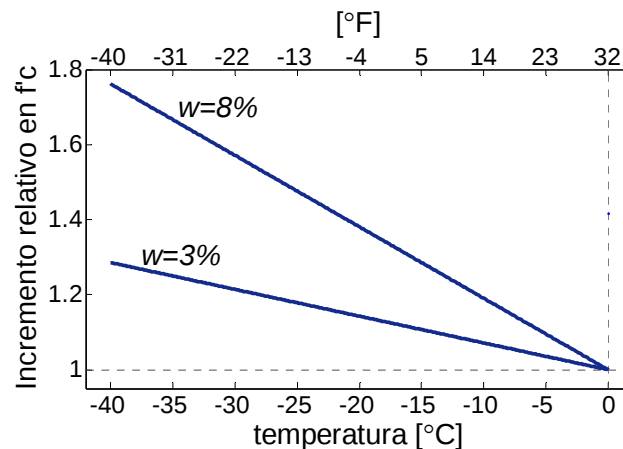


Figura 1: Incremento en f'_c a temperaturas bajas.

La Figura 2 muestra la relación esfuerzo-deformación para cilindros de hormigón probados a distintas temperaturas. Además del incremento en esfuerzo, se puede notar que la falla a -40°C es más frágil ya que no cuenta con el brazo descendente después de alcanzar la carga máxima: la falla fue “explosiva”.

En el acero de refuerzo, el esfuerzo de fluencia y la capacidad última a tensión aumentan aproximadamente en la misma proporción cuando la temperatura decrece por debajo del punto de congelación (véase la Figura 3). Para propósitos de diseño, la ecuación (2) puede ser usada para estimar la capacidad del acero a temperaturas bajas (Montejo et al., 2008a). En ninguna de las pruebas realizadas se detectó algún efecto considerable de las temperaturas bajas en la capacidad de deformación del acero de refuerzo. Se debe notar aquí que todos los ensayos en el acero de refuerzo han sido monotónicos y ninguna conclusión es posible sobre el efecto combinado de cargas cíclicas y temperaturas bajas. Otras propiedades como el esfuerzo de adherencia entre el acero y el hormigón, la capacidad a tensión del hormigón y la energía de fractura en el hormigón también aumentan a temperatura bajas (Montejo et al., 2008a).

$$\begin{aligned} f_s(T) &= (1 - 0.004T) f_s(20^{\circ}\text{C}) & 0^{\circ}\text{C} > T > -25^{\circ}\text{C} \\ f_s(T) &= 1.1 f_s(20^{\circ}\text{C}) & -25^{\circ}\text{C} > T > -40^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (2)$$

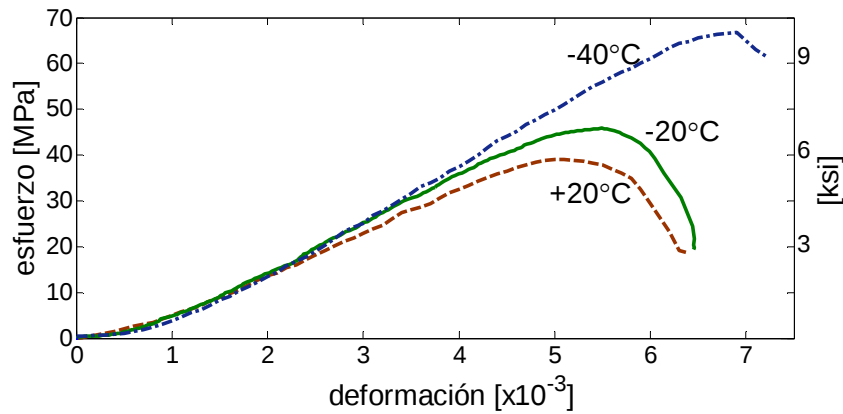


Figura 2: Relación esfuerzo- deformación para hormigón a distintas temperaturas.

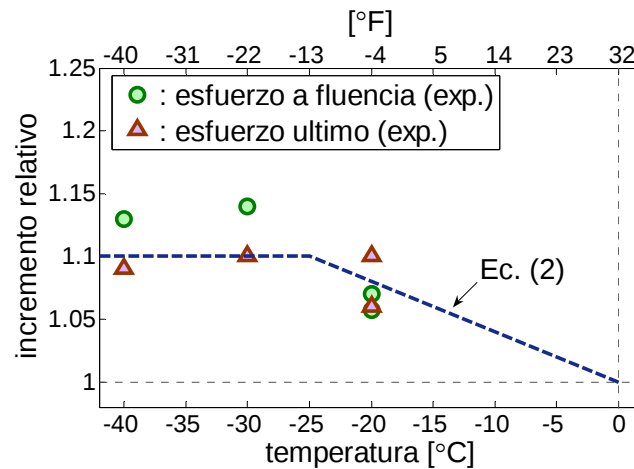


Figura 3: Incremento en f_s a temperaturas bajas.

DISEÑO EXPERIMENTAL

Con el objetivo de alcanzar el rango de temperaturas deseado, los ensayos fueron realizados dentro de una cámara ambiental como se muestra en la Figura 4. Debido a las dimensiones de la cámara ambiental, las columnas fueron probadas en posición horizontal. La carga axial fue aplicada por medio de gatos hidráulicos y una válvula de presión constante fue usada para mantener la carga axial constante.

La carga lateral fue aplicada usando un actuador con una capacidad de 500 kN. La Figura 5 muestra el protocolo de carga lateral usado. Los primeros cuatro ciclos consistieron de incrementos en fuerza de 25% de la fuerza lateral (F'_y) requerida para hacer fluir por primera vez una de las barras de refuerzo. Después de los cuatro primeros ciclos el ensayo fue controlado por desplazamientos a un valor determinado de ductilidad (μ). El desplazamiento para ductilidad 1 (μI) es calculado como $\Delta'(F_n/F'_y)$ donde Δ' es el desplazamiento registrado a F'_y y F_n es la carga lateral asociada con el momento nominal de la columna.

La temperatura dentro de las columnas fue monitoreada por medio de termopares incrustados en el hormigón. La Figura 6 muestra la variación de temperatura registrada durante uno de los ensayos fríos. Se puede apreciar que aunque existen algunos grados de diferencia entre la temperatura registrada en las barras de refuerzo con la registrada en el centro de la sección, fue posible mantener la temperatura constante durante toda la prueba. Información más detallada sobre el diseño experimental se puede encontrar en Montejó et al. (2008b).

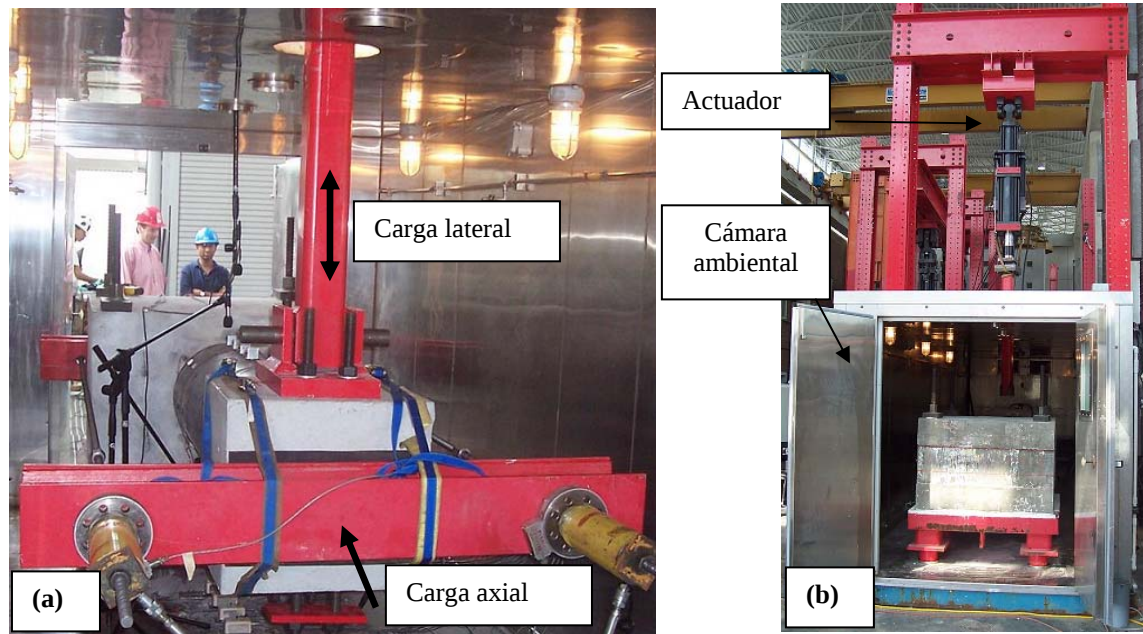


Figura 4: Diseño experimental; (a) foto desde adentro de la cámara ambiental; (b) foto desde afuera de la cámara ambiental.

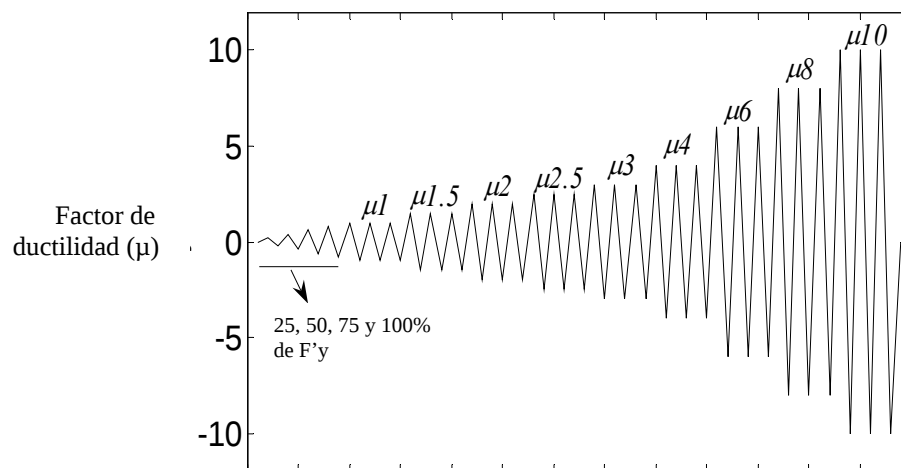


Figura 5: Protocolo de carga lateral.

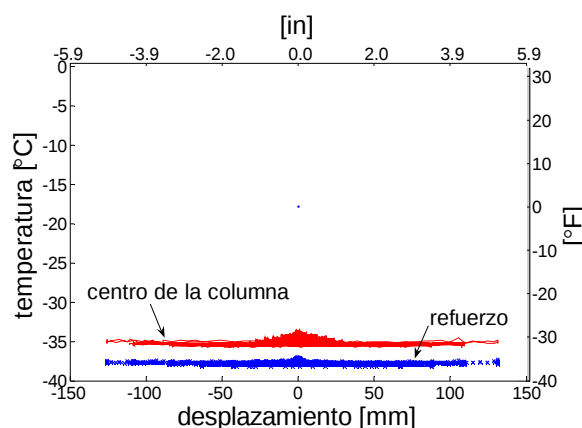


Figura 6: Temperaturas registradas en una de las columnas probadas a temperaturas bajas.

EFFECTO DE TEMPERATURAS BAJAS EN COLUMNAS DOMINADAS POR FLEXIÓN

La Tabla 1 recopila las principales propiedades de las columnas diseñadas para fallar por flexión. La Figura 7 muestra la respuesta obtenida para un par de columnas idénticas (FL-89A y FL-89C) probadas a distintas temperaturas. Ambas columnas exhiben una respuesta con ciclos de histéresis bastante estables. Para facilitar la comparación de resultados, la Figura 8 fue generada tomando el promedio de los picos de los primeros ciclos en cada dirección, generando así lo que podría llamarse una “envolvente promedio”. De la Figura 8 podemos notar que la columna ensayada a temperaturas bajas presenta un incremento en la rigidez inicial y en la capacidad a flexión cuando se compara con la columna probada a temperatura ambiente. El incremento en rigidez fue del 27%. Si el incremento en capacidad es calculado como el promedio de las diferencias en las fuerzas requeridas para alcanzar cada desplazamiento impuesto en la columna, entonces el incremento en la capacidad a flexión es del 16%. Si comparamos las máximas fuerzas soportadas por las columnas durante todo el ensayo, el incremento es del 14%. En este caso la capacidad de deformación no se vio afectada por las temperaturas bajas, ya que ambas columnas fallaron por pandeo de una de las barras de refuerzo al mismo nivel de demanda lateral. Sin embargo, la falla de la columna fría fue de naturaleza más frágil ya que la barra de refuerzo además de pandearse también sufrió ruptura.

Tabla 1: Columnas dominadas por flexión*.

Col.	Temp.	Refuerzo long.	Refuerzo Transversal	Carga Axial
SL-P20	23°C 74°F	8#5	#3@64mm (2.5in)	No
SL-M20	-20°C -4°F	8#5	#3@64mm (2.5in)	No
SL-M30	-30°C -22°F	8#5	#3@64mm (2.5in)	No
SL-M40	-40°C -40°F	8#5	#3@64mm (2.5in)	No
FL 89A	22°C - 72°F	8#9	#3@60mm (2.4in)	220kN (49kip)
FL 89C	-36°C -33°F	8#9	#3@60mm (2.4in)	218kN (49kip)

*Para todas las columnas: diámetro: 457mm (18 in), largo: 1651 mm (65 in)

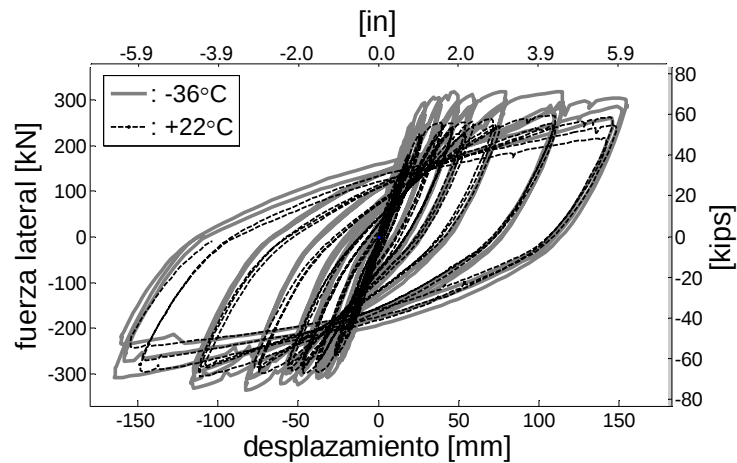


Figura 7: Respuesta fuerza-desplazamiento para las columnas FL-89A y FL-89C.

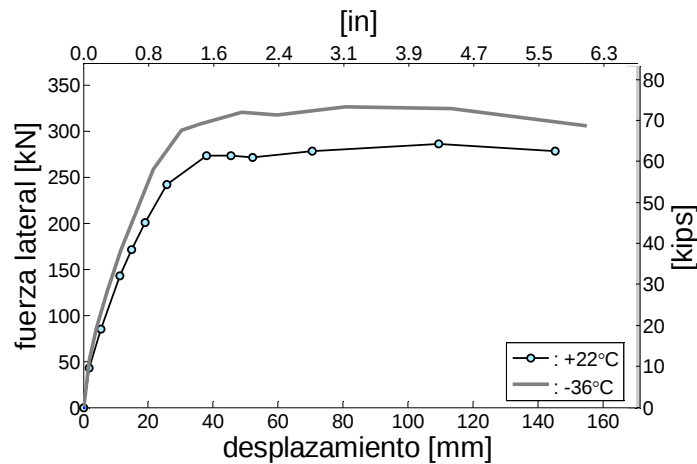


Figura 8: Envolvente promedio de la respuesta fuerza-desplazamiento para las columnas FL-89A y FL-89C.

El efecto de las temperaturas bajas fue más evidente en las columnas con menos cuantía de refuerzo. La Figura 9 presenta la envolvente promedio para las columnas SL-P20, SL-M20 y SL-M40. La columna probada a -40°C exhibió una capacidad a flexión 20% mayor que la columna probada a temperatura ambiente (si se comparan las fuerzas por ciclo). Si se comparan las fuerzas máximas alcanzadas durante ambos ensayos el incremento es del 16%. No obstante, la columna probada a -40°C también presentó la menor capacidad de desplazamiento, fallando a ductilidad 5 mientras que la columna a temperatura ambiente falló a ductilidad 6. Las tres columnas fallaron por pandeo y subsecuente fractura del refuerzo longitudinal. La rigidez calculada para la columna probada a -40°C fue 35% mayor que para la columna a temperatura ambiente.

Los desplazamientos relativos registrados por potenciómetros lineales ubicados en los extremos de compresión y tensión de la columna permitieron el cálculo de curvaturas promedio a lo largo de la columna. Esas curvaturas y los desplazamientos registrados en el tope de la columna fueron usados para definir un largo equivalente de la rótula plástica (L_p), presumiendo que la deflexión de la columna después de fluencia se debe a la formación de una rótula plástica de largo L_p donde la curvatura es constante e igual a la curvatura medida en la base de la columna (Priestley et al., 2007). La Figura 10 muestra los resultados de L_p obtenidos para las columnas FL-89A y FL-89C: se puede apreciar que la columna probada a temperaturas bajas experimenta una reducción bastante marcada ($\sim 37\%$) en L_p cuando se compara con los resultados obtenidos a temperatura ambiente. Esta reducción en la extensión de plasticidad es evidente también a partir de la condición de las columnas después de los ensayos (véase la Figura 11). Una reducción en la extensión de la rótula plástica causa un incremento en la curvatura requerida en la base de la columna para alcanzar un

desplazamiento dado. Si la demanda de curvatura aumenta, la deformación impartida en las barras de refuerzo aumenta también, lo cual explica en parte la rotura temprana del refuerzo en las columnas probadas a temperaturas bajas. Para información más detallada sobre los resultados de las columnas dominadas por flexión se puede consultar Montejó et al. (2009a).

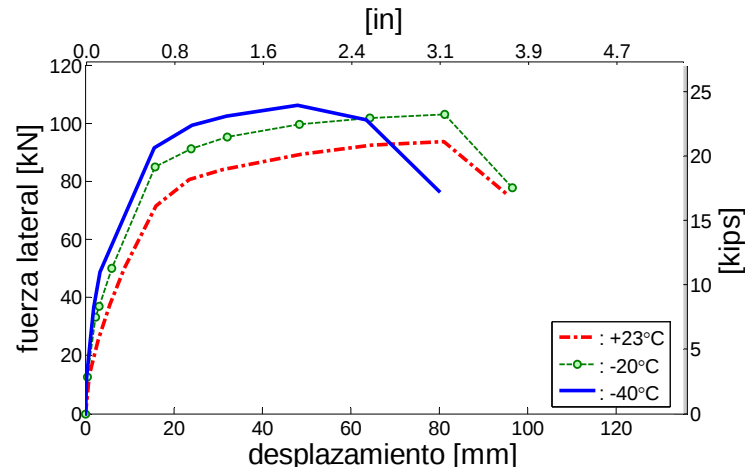


Figura 9: Envolvente promedio de la respuesta fuerza-desplazamiento para las columnas SL-P20, SL-M20 y SL-M40.

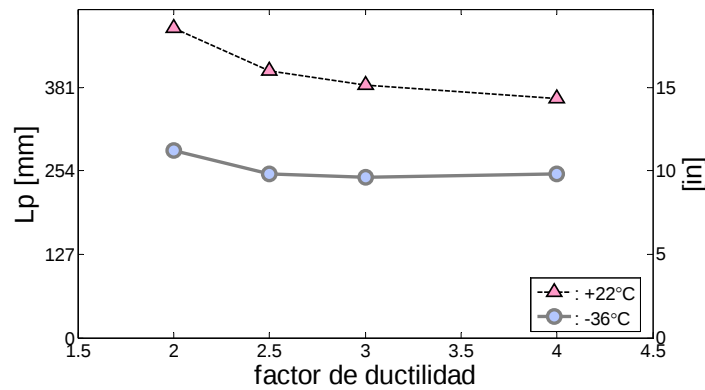


Figura 10: Largo equivalente de la rotula plástica (L_p) FL-89A y FL-89C.

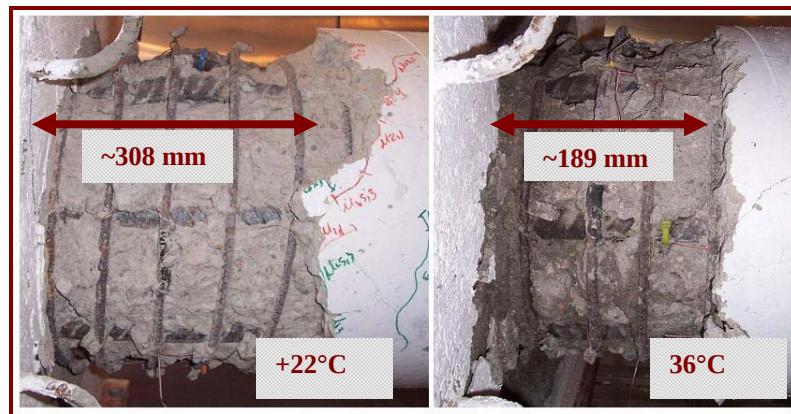


Figura 11: Condición de las columnas FL-89A y FL-89C después de las pruebas.

EFFECTO DE TEMPERATURAS BAJAS EN TUBOS DE ACERO RELLENOS DE HORMIGÓN ARMADO

En este tipo de columnas un tubo de acero es usado como formaleta al momento de vaciar el hormigón. En la mayoría de los casos se deja un espacio entre el tubo de acero y el nudo viga-columna o la fundación, de tal manera que el tubo de acero aporta solo en la capacidad a cortante y en el confinamiento del hormigón y no (de una manera directa) en la capacidad a flexión (la cual es provista por las barras longitudinales y el hormigón). La Tabla 2 recopila las principales propiedades de los tubos de acero rellenos de hormigón ensayados. La Figura 12 muestra la envolvente promedio de las columnas RCFST-87A y RCFST-87C. Al igual que en la columnas convencionales de hormigón armado, la columna probada a temperaturas bajas exhibió un incremento en la capacidad a flexión. Sin embargo, para este tipo de columnas el incremento registrado fue menor (10% para los especímenes RCFST-87 y 7% para los especímenes RCFST-89). No se notó ningún efecto de la temperatura en la capacidad de desplazamiento. Sin embargo, la falla de las columnas frías fue de naturaleza más frágil ya que presentó rotura de las barras de refuerzo, mientras que la falla de las columnas a temperatura ambiente estuvo controlada por daño excesivo en el hormigón de la columna y el cimiento. La Figura 13 muestra la condición de las columnas RCFST-87A y RCFST-87C después de los ensayos.

Tabla 2: Tubos de acero rellenos de hormigón armado*.

Col.	Temp.	Refuerzo Long.	Refuerzo Transversal	Carga Axial
RCFST 89A	22°C 72°F	8#9	#3@60mm (2.4in) 9.5mm (3/8in) steel tube	231 kN (51.9 kip)
RCFST 89C	-36°C - 33°F	8#9	#3@60mm (2.4in) 9.5mm (3/8in) steel tube	219 kN (49.2 kip)
RCFST 87A	22°C 72°F	8#7	#3@60mm (2.4in) 9.5mm (3/8in) steel tube	226 kN (50.8 kip)
RCFST 87C	-36°C - 33°F	8#7	#3@60mm (2.4in) 9.5mm (3/8in) steel tube	231 kN (51.9 kip)

*Para todas las columnas: diámetro: 457 mm (18in), largo: 1651 mm (65 in)

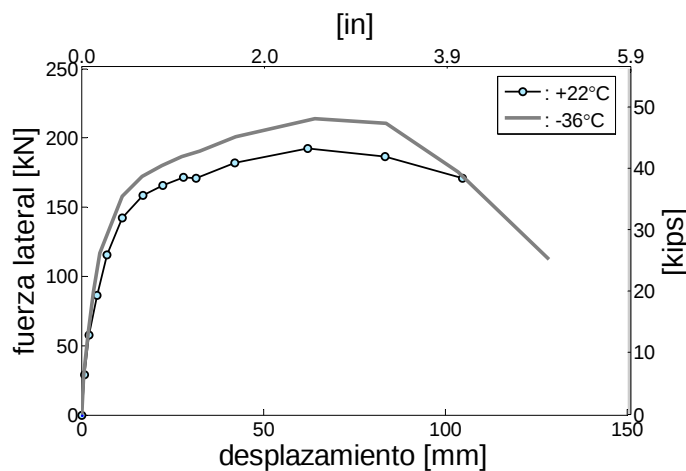


Figura 12: Envolvente promedio de la respuesta fuerza-desplazamiento para las columnas RCFST-87A y RCFST-87C.

EFFECTO DE TEMPERATURAS BAJAS EN COLUMNAS DOMINADAS POR CORTANTE

La Tabla 3 recopila las principales propiedades de las columnas diseñadas para fallar por cortante. Se puede apreciar que fueron diseñados dos pares de columnas idénticas. La única diferencia entre columnas de un mismo par es la temperatura a la que fueron probadas. La diferencia entre los dos pares de columnas es la cuantía de acero longitudinal y transversal. Un par de columnas (especímenes BSH) fue diseñado para fallar por cortante a niveles bajos de ductilidad, mientras que el otro par (especímenes DSH) fue diseñado para fallar por cortante a niveles más altos de ductilidad. Para el diseño, la capacidad a cortante de las columnas fue estimada usando el método “UCSD” (Kowalsky y Priestley, 2000).

Tabla 3: Columnas dominadas por cortante*.

Col.	Temp.	Comportamiento	Refuerzo Long.	Refuerzo Transversal	Carga Axial
DSH 87A	22°C 72°F	Dúctil	8#7	#3@102mm (4in)	142 kN 32 kip
DSH 87C	-36°C - 32°F	Dúctil	8#7	#3@102mm (4in)	130 kN 29 kip
BSH 89A	22°C 72°F	Frágil	8#9	#3@145mm (5.7in)	135 kN 30 kip
BSH 89C	-36°C - 32°F	Frágil	8#9	#3@145mm (5.7in)	135 kN 30 kip

*Para todas las columnas: diámetro: 419 mm (16.5 in), largo: 762 mm (30 in)

La Figura 14 presenta la respuesta obtenida para las columnas DSH-87A y DSH-87C y la Figura 15 muestra la envolvente promedio. En estas gráficas se puede apreciar que la columna probada a temperaturas bajas desarrolló ciclos estables de histéresis hasta el primer ciclo a ductilidad 8, mientras que la columna a temperatura ambiente falló después del primer ciclo a ductilidad 6, es decir que la columna fría fue capaz de sostener deformaciones cíclicas 33% mayores que la columna a temperatura ambiente. La columna fría también exhibió mayor resistencia a la carga lateral (~20%) y mayor rigidez inicial (56%) al compararla con la columna a temperatura ambiente.

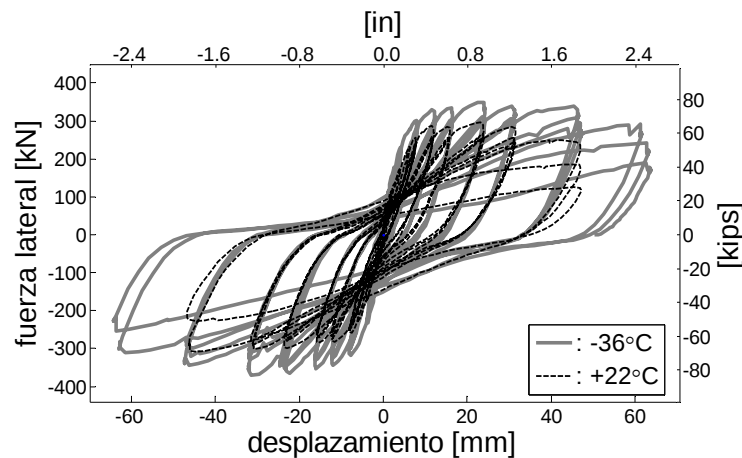


Figura 14: Respuesta fuerza-desplazamiento para las columnas DSH-87A y DSH-87C.

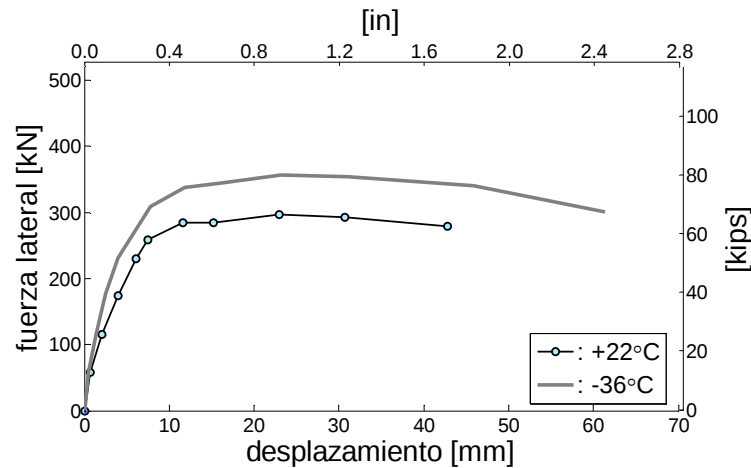


Figura 15: Envoltorio promedio de la respuesta fuerza-desplazamiento para las columnas DSH-87A y DSH-87C.

Resultados similares fueron obtenidos para el otro par de columnas, BSH-89A y BSH-89C. Sin embargo, como se puede apreciar en la Figura 16, durante el ensayo del espécimen a temperaturas bajas el actuador alcanzó su capacidad máxima (500 kN) cuando la columna fue sujeta a un desplazamiento equivalente a $\mu 1.5$. Después de tres ciclos a esta ductilidad donde no se notó ningún deterioro en la capacidad de la columna, se decidió suspender el ensayo. Con el objetivo de confirmar que el incremento en capacidad se debió al efecto de la temperatura, el ensayo se continuó el día siguiente a temperatura ambiente. La columna fue sujeta a otro ciclo a $\mu 1.5$, la carga lateral registrada fue de 414 kN (32% mayor que la registrada para la columna fría). El efecto benévolo de las temperaturas bajas en la capacidad a cortante en columnas de hormigón armado puede ser apreciado también en la Figura 17. En esta figura se observa cómo para condiciones de igual demanda lateral, el daño inducido en la columna ensayada a temperaturas bajas fue considerablemente menor que el inducido en la columna a temperatura ambiente. En Montejó et al. (2009b) se puede obtener información más detallada sobre los resultados de las columnas dominadas por cortante.

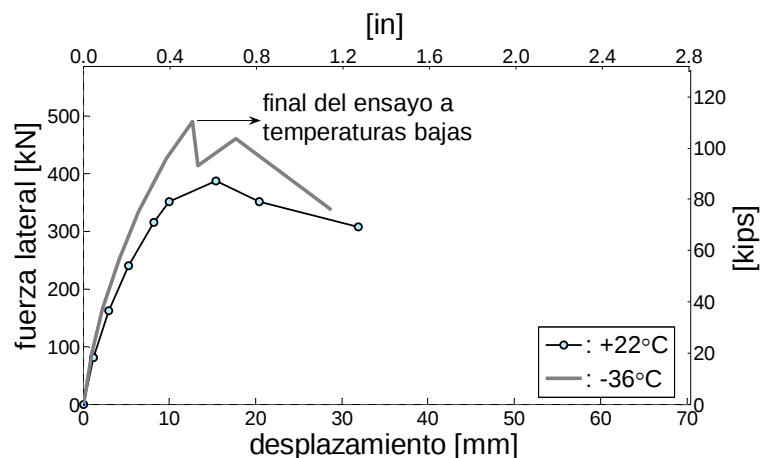


Figura 16: Envoltorio promedio de la respuesta fuerza-desplazamiento para las columnas BSH-87A y BSH-87C.



Figura 17: Condición de las columnas BSH-89A y BSH-89C a $\mu 1.5$.

CONCLUSIONES

Las columnas de hormigón armado dominadas por flexión y expuestas al efecto combinado de temperaturas muy bajas y carga lateral cíclica experimentan un aumento en su rigidez y en su capacidad a flexión acoplado con una disminución en su capacidad de desplazamiento. El aumento en su capacidad se atribuye al efecto benévolo que las temperaturas bajas tienen en el comportamiento independiente de cada uno de los materiales constitutivos, hormigón y acero de refuerzo. La reducción en la capacidad de desplazamiento se atribuye a una reducción en la extensión de la rótula plástica que conlleva a un incremento en la demanda de curvatura en la base de la columna generando la rotura temprana del refuerzo.

Aunque los resultados obtenidos muestran un incremento en la capacidad a flexión a temperaturas bajas, incrementando así también la demanda de cortante, se encontró que la capacidad a cortante aumenta en mayor proporción retrasando de esta manera la falla por cortante a ductilidades más altas.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Departamento de Transportación de Alaska. Todos los especímenes fueron contruidos y ensayados en el laboratorio estructural (CFL) en la Universidad Estatal de Carolina del Norte (NCSU).

REFERENCIAS

- Browne, R. D. y Bamforth, P. B. (1981). "The use of concrete for cryogenic storage: a summary of research past and present", First International Conference on Cryogenic Concrete, Newcastle upon Tyne, United Kingdom.
- Kowalsky, M. J. y Priestley, M. J. N. (2000). "Improved analytical model for shear strength of circular reinforced concrete columns in seismic regions", *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 3, pp. 388-396.
- Montejo, L. A., Sloan, J. E., Kowalsky, M. J. y Hassan, T. (2008a). "Cyclic response of reinforced concrete members at low temperatures", *Journal of Cold Regions Engineering*, ASCE, Vol. 22, No. 3, pp. 79-102.
- Montejo, L. A., Kowalsky, M. J. y Hassan, T. (2008b). "Seismic behavior of reinforced concrete bridge columns at sub-freezing temperatures", Research Project Report FHWA-AK-RD-08-01, pp. 388, available at: http://www.dot.state.ak.us/stwddes/research/assets/pdf/fhwa_ak_rd_08_01.pdf

- Montejo, L. A., Kowalsky, M. J. y Hassan, T. (2009a). "Seismic behavior of flexural dominated reinforced concrete columns at low temperatures", *Journal of Cold Regions Engineering*, ASCE, Vol. 23, No. 1, pp. 18-42.
- Montejo, L. A., Kowalsky, M. J. y Hassan, T. (2009b). "Seismic behavior of shear dominated reinforced concrete columns at low temperatures", *ACI Structural Journal*, Vol. 106, No. 4, pp. 445-454.
- Priestley, M. J. N., Calvi, G. M. y Kowalsky, M. J. (2007). *Direct Displacement Based Seismic Design of Structures*, IUSS Press, Pavia, Italy, 721 pp.