

Vulnerabilidad estructural considerando el intemperismo y edad de construcción para edificios escolares públicos

Structural vulnerability considering weathering and age of construction for public school buildings

Ricardo Segura Cuatepozo¹, Mauro Niño-Lázaro^{1*}

RESUMEN

En este trabajo se demuestra la importancia de incluir en los análisis estructurales de edificaciones existentes, el factor de la corrosión debido al intemperismo al que se ven sujetas las estructuras, tomando como base diversas publicaciones que parametrizan valores como el índice de la velocidad de corrosión (i_{corr}) y las ecuaciones que relacionan este parámetro con la pérdida de resistencia en los materiales. Como ejemplo de aplicación, se ha tomado una estructura de concreto reforzado de uso escolar ubicada en la Ciudad de México, construida en 1980. Las curvas de vulnerabilidad estructural del estado actual se comparan con las curvas de vulnerabilidad en el primer momento que entró en servicio, donde se observa la variación del daño esperado y el potencial impacto que esto representa en el cálculo del riesgo por efectos sísmicos.

Recibido: Mayo 2025

Aceptado: Noviembre 2025

Publicado: Diciembre 2025

ABSTRACT

This research focuses efforts on demonstrating the importance of including the corrosion factor in long-term structural analyzes, based on various publications that parameterize values such as the corrosion rate index (i_{corr}) and the equations that relate this parameter with the loss of resistance in materials. To carry out the corresponding analyzes, a school designed with RC has been taken in Mexico City, built in 1980. The structural vulnerability curves of the current state are compared with the vulnerability curves when it first entered service, showing the variation in the expected damage and the potential impact this has on the computation of seismic risk.

Palabras Clave:

Vulnerabilidad estructural,
Corrosión en concreto reforzado,
Edificios escolares,
Evaluación del riesgo sísmico

Keywords:

Structural vulnerability,
Reinforced concrete corrosion,
School buildings,
Seismic risk assessment

1. INTRODUCCIÓN

La importancia de incluir en los análisis estructurales el efecto de la corrosión en las estructuras de Concreto Reforzado (CR), tomando en cuenta que el uso del CR en México para fines de edificación es relativamente viejo, cobra gran relevancia para conocer el comportamiento de todas las estructuras, con especial atención a aquellas que ya han sobrepasado su vida útil o que presentan deterioros significativos. Es posible entonces considerar que son un riesgo potencial

*Mauro Niño Lázaro, mninol@ingenieria.unam.edu

¹Facultad de Ingeniería. Av. Universidad 3000, Ciudad de México, 04510, mgonzalezs1309@gmail.com

para todos y en especial para sus ocupantes con base en el análisis de vulnerabilidad estructural, este aspecto ya ha sido tratado por varios autores anteriormente (ej. Chen et al., 2020; Di Sarno y Pugliese, 2020; Gopal y Sangoju, 2020; Xu et al., 2020; Bojórquez et al. 2021; Wei-Ping Zhang et al., 2024)

En México no se cuenta con una normativa que recomiende considerar los efectos de la corrosión en los análisis estructurales. La corrosión impacta en la reducción del área del refuerzo longitudinal y transversal, en la capacidad de anclaje y adherencia acero-concreto, genera grietas y reduce las capacidades resistentes de los materiales en conjunto. La principal tarea para poder determinar todos los aspectos anteriores es cuantificar qué nivel de corrosión se tiene en el acero de refuerzo. Para ello, existe una gran cantidad de investigaciones realizadas alrededor del mundo de las cuales se hace uso y se muestran en las referencias de este documento, considerando principalmente las similitudes climatológicas y los niveles de contaminación registrados, aspectos fundamentales en la iniciación de la corrosión.

Intemperismo en el Concreto Reforzado

El impacto del intemperismo en el CR puede representar la razón más importante del deterioro de las estructuras hechas de este material. La razón es simple, produce corrosión en el acero de refuerzo y con ello una serie de afectaciones al elemento estructural. Dependiendo del sitio en el cual se ubique la estructura, ésta estará sometida a condiciones menos o más severas, por ejemplo, en una ciudad como la Ciudad de México, el principal factor de corrosión es la humedad y la contaminación debido a que hay moléculas de dióxido de carbono en el aire, además el efecto de la lluvia ácida hace que los átomos y moléculas de carbono, oxígeno y agua penetren en los poros del concreto, produciendo la despasivación del acero y colocándolo en un potencial estado de iniciación de corrosión. El tiempo que se requiere para comenzar un estado de corrosión en cualquier estructura es un tema complejo de determinar, ya que influyen diversas variables tales como el uso de la estructura, ubicación geográfica y climatológica, eventos o acciones accidentales que durante su vida útil ha estado sometida, calidad de materiales y de construcción, por mencionar tal vez los más importantes. En la (fig. 1) se presenta el efecto de la oxidación por intemperismo de una estructura de CR, situación en la que se encuentra una gran cantidad de estructuras en la Ciudad de México.

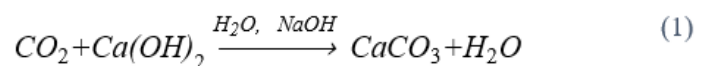


Figura 1 Efectos de la corrosión en el CR

Esta investigación se acota a la parte relacionada con la corrosión y específicamente a la carbonatación. La razón por la cual no se desarrolla el análisis de la cloración (otra manera de corrosión en las estructuras) es porque no se tienen los recursos para desarrollar una investigación apropiada, ya que se tendrían que hacer pruebas de laboratorio para poder determinar experimentalmente la cantidad de cloruros en el concreto, por otra parte, la carbonatación está bastante documentada y los parámetros se ajustan a las condiciones de la estructura de estudio en esta investigación.

Carbonatación

La pasivación del acero de refuerzo inmerso en el concreto se debe principalmente a la alta alcalinidad del concreto ($12 < \text{pH} < 13$) (Peixoto y Delgado, 2013; Belda et al., 2018). La carbonatación es el proceso químico mediante el cual el CR va perdiendo alcalinidad debido a la presencia de dióxido de carbono (CO_2) que se introducen en los poros, solo se requiere una pequeña concentración de CO_2 , y que está presente en la atmosfera (0.04%), para que inicie el proceso de la corrosión, en la figura (fig. 2) se muestra la gráfica porcentaje de CO_2 contra la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, parámetro fundamental para la determinación de la pérdida de diámetro por año debido a la corrosión y registrada en estudios e investigaciones elaboradas en la referencia (Stefanoni et al., 2017). La presencia del CO_2 reacciona con el hidróxido de calcio, y otros compuestos del concreto, para convertirlo en carbonato de calcio.



La carbonatación no es tan grave como la presencia de cloruros en el CR, pero no se debe dejar de tomar en cuenta para la evaluación de los efectos que ésta le provoca al acero de refuerzo. Los factores que determinan el nivel de carbonatación en el CR pueden ser propios de factores ambientales como la humedad, la temperatura y el contenido de CO₂ en la atmósfera (fig. 2) (Stefanoni et al., 2017), así como las propiedades del mismo CR, principalmente debido a su alcalinidad y permeabilidad.

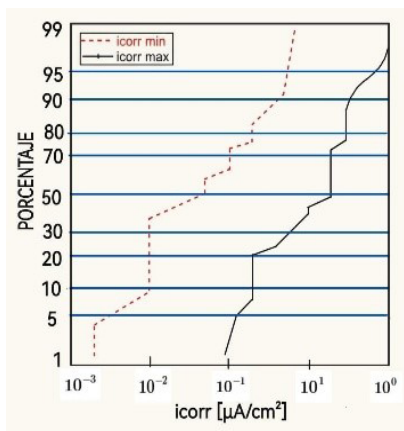


Figura 2 Gráfica %CO₂ contra densidad de corriente de corrosión [8]

La humedad en el ambiente desempeña un papel importante en la generación de la corrosión, el umbral en el cual la humedad impacta significativamente se ubica entre el 60% y 70% (fig. 3). El dióxido de carbono se traslada más rápido a través del aire por ello la humedad dentro de los poros saturados del CR reduce la propagación de CO₂; sin embargo, la carbonatación no tiene lugar sin presencia de agua, hay un rango ideal para esta reacción que ya se ha mencionado (Bertolini et al., 2013).

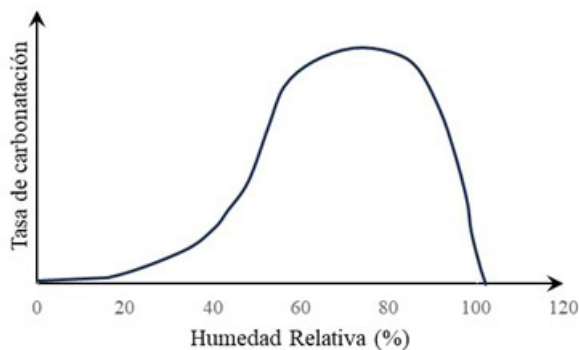


Figura 3 Relación carbonatación – humedad [5]

Modelos de deterioro

La iniciación de la despasivación es un proceso complejo de determinar ya que se deben tener en cuenta las diversas variables ya mencionadas; sin embargo, una buena aproximación es la curva parabólica propuesta para determinar el tiempo estimado (Ec. 2), en el cual la carbonatación alcanza el nivel de refuerzo y por consecuencia, después de un tiempo dado, la iniciación de la corrosión (Bertolini et al., 2013).

$$d = K \sqrt{t} \quad (2)$$

Donde K es una variable que depende de las propiedades de permeabilidad y factores climáticos de la estructura en unidades de mm/año^{1/2}. Para estructuras con baja porosidad K oscila entre 2 y 6, para media porosidad va de 6 a 9 y para una porosidad altamente fuerte el rango puede alcanzar hasta 15 (Bertolini et al., 2013).

Deterioro del acero de refuerzo a causa de la corrosión

Como se ha podido inferir, una de las principales consecuencias de la corrosión es la pérdida de sección del acero de refuerzo, la manera precisa para determinar esto es inexistente, pero se tienen modelos matemáticos que dan un buen índice de respuesta asumiendo ciertas simplificaciones. La primera simplificación es la reducción del diámetro de manera uniforme muy relacionada con un tipo de corrosión por carbonatación, esto no es exactamente lo que se ve en la realidad, ya que la pérdida de sección se puede presentar de manera local y puntual. La segunda simplificación y no menos importante, asume que la velocidad de corrosión i_{corr} ($\mu A/cm^2$) se mantiene constante una vez que se produce la iniciación, teniendo como modelo base el propuesto en por algunas investigaciones (Rodríguez et al., 1997; Shamsoddini et al., 2020).

$$\phi' = \phi - 2V_{corr}t = 2(11.6) i_{corr}t \quad (3)$$

En donde ϕ y ϕ' representan el diámetro inicial y final, en mm, respectivamente de las barras de acero, t expresada en años, el valor 11.6 pasa a 0.0116 en la ec. 6 para medir la pérdida en mm/año. Resulta bastante útil conocer el porcentaje de pérdida de la sección (COIN, 2008), ya que se usará posteriormente para calcular la pérdida de la resistencia a la compresión del concreto y las propiedades mecánicas del acero,

L , a través de la siguiente expresión, con L expresada en porcentaje:

$$L = 100 \left(1 - \left(\frac{4}{\phi^2} \right) \left(\frac{\phi}{2} - 0.0116 i_{corr} t \right)^2 \right) \quad (4)$$

A continuación, se presentan las gráficas correspondientes a diferentes valores de i_{corr} para visualizar el comportamiento del modelo matemático del porcentaje de pérdida de sección.

Deterioro en las propiedades mecánicas de los materiales

El acero y el concreto forman la unidad denominada elemento estructural, puede ser una trabe, columna, muro, losa, etc., pero cuando se trata de analizar los cambios en las propiedades mecánicas, específicamente

hablando, de los límites de fluencia y módulos de elasticidad, hay que hacerlo de manera aislada si se consideran los efectos de la corrosión, siendo congruentes en cuanto a las variables consideradas para el análisis.

Propiedades mecánicas del acero

Como se ha mencionado en los párrafos anteriores, el impacto que tiene el porcentaje de corrosión en el refuerzo va a determinar el grado de reducción en las propiedades mecánicas del acero y del concreto. Estudios, experimentos y análisis hechos en Japón (Han-Seung y Young-Sang, 2009) han determinado la forma más argumentada para deducir modelos matemáticos que ayuden a efectuar un cálculo en la degradación del límite de fluencia y el módulo elástico del acero. En la Tabla 1 (Han-Seung y Young-Sang, 2009) se presentan las ecuaciones para encontrar los

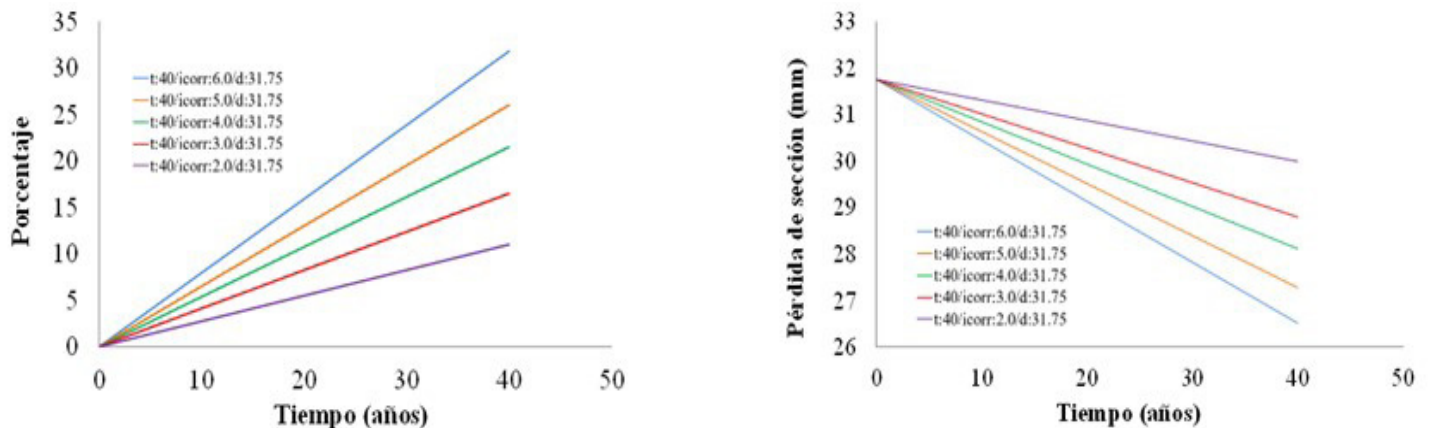


Figura 4 Relación i_{corr} -diámetro-tiempo: a) porcentaje de pérdida y b) diámetro residual en un tiempo t

Tabla 1 Modelo matemático de reducción de propiedades mecánicas (Han-Seung y Young-Sang, 2009)

Propiedades mecánicas	Tipo de corrosión	Fórmula	No. Ecuación
Punto de fluencia	Uniforme	$\sigma_{cy} = (1 - 1.24(\frac{L}{100}))\sigma_{sy}$	(5)
	Picadura	$\sigma_{cy} = (1 - 1.98(\frac{L}{100}))\sigma_{sy}$	(6)
Modulo elástico	Uniforme	$E_{cs} = (1 - 0.75(\frac{L}{100}))E_s$	(7)
	Picadura	$E_{cs} = (1 - 1.15(\frac{L}{100}))E_{ss}$	(8)

parámetros mecánicos ya mencionados en función del porcentaje de corrosión en el acero de refuerzo:

El tipo de corrosión determinará el modelo matemático a usar; L representa el porcentaje de reducción de sección en el acero de refuerzo, este parámetro se puede determinar con el modelo matemático propuesto en este documento ec. 4.

Propiedades mecánicas del concreto

Para determinar el grado real de la resistencia a compresión del concreto después de corroerse el acero, se calcula mediante las ecs. 11, 12, 13 (Ghanoo-ni-Bagha et al., 2016). Básicamente consiste en un método indirecto en el cual se toma como índice al cociente de los pesos del acero de refuerzo C_w :

$$C_w = \Delta w / W_o * 100 \quad (9)$$

$$\lambda = 2.265 C_w - 1.61 \quad (10)$$

$$f'_{cc} = (1 - \lambda) f'_c \quad (11)$$

En la ec. 9 Δw es la diferencia del peso inicial del acero (W_o) con el peso después del efecto de la corrosión, el método sugerido es utilizar el cambio por peso en metro lineal. Una vez determinado C_w , se calcula el factor lambda, λ , para determinar el nuevo valor de la resistencia teórica de compresión del concreto.

Para el cálculo del módulo de elasticidad se aplicará el modelo matemático que se sugiere en el Reglamento para las Construcciones de la Ciudad de México (GCM, 2017) para un concreto tipo 1, para condiciones sanas ec. 12 y para condiciones disminuidas por efectos de la corrosión ec. 13

$$E_c = 14000 \sqrt{f'_c} \quad (12)$$

$$E_{cc} = 11000 \sqrt{f'_{cc}} \quad (13)$$

De la ec. 12 y ec. 13 E_c y E_{cc} representan el módulo de elasticidad sano y disminuido por la corrosión respectivamente.

Con base en lo anterior, este trabajo se centrará en evaluar el comportamiento de una escuela típica de la Ciudad de México, considerando su edificación con CR en 1980, y que presenta un deterioro significativo en su composición estructural debido al intemperismo corrosivo. Como se abordará a lo largo de los siguientes capítulos, es bien sabido que una de las principales consecuencias del deterioro de las estructuras de CR es la corrosión. Un agente presente y de esencial cuidado en el acero de refuerzo que causa alteraciones en su composición molecular ocasionando reducciones en las capacidades resistentes no solo del acero sino también del concreto.

2. METODOLOGÍA

Para la construcción de las curvas de capacidad, se hizo uso de lo descrito en las secciones anteriores y de Opensees (McKenna et al., 2024). En esta sección se describe de manera resumida el conjunto de pasos a seguir para la obtención de los resultados y su implementación en un ejemplo de aplicación.

La estructura está formada por marcos de concreto reforzado con dimensiones de 24 x 8 m en planta, con ocho crujías en el sentido largo formado 9 marcos y una crujía en sentido corto, con altura de entrepiso de 3.5 m (fig. 5), con tres niveles, construidas con las demandas sísmicas definidas Normas Técnicas

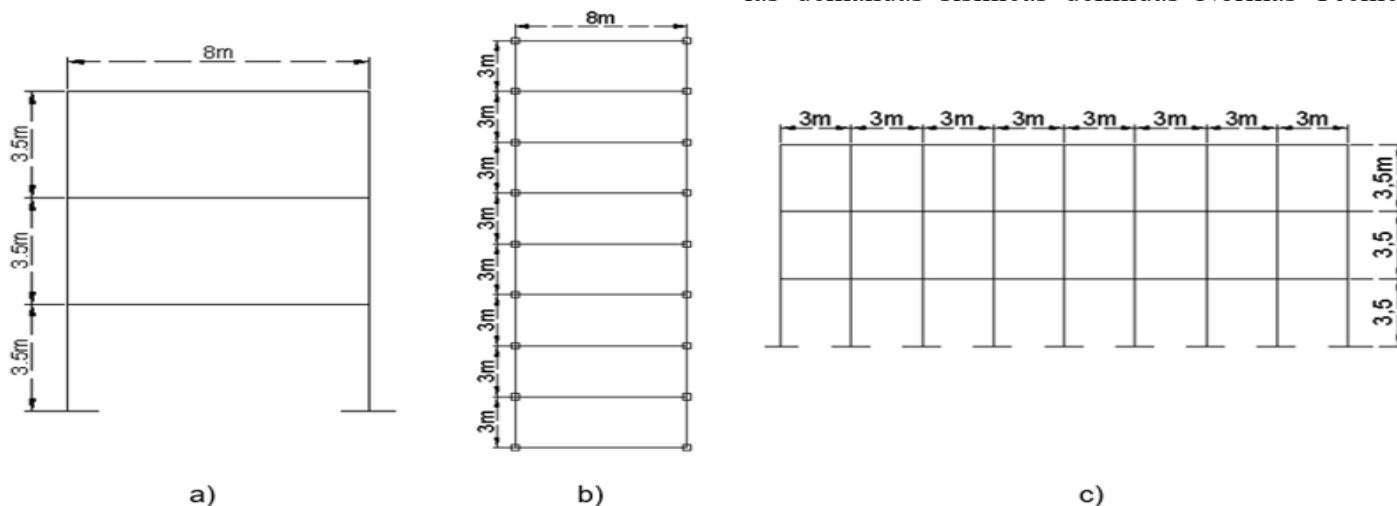


Figura 5 Geometría de las estructuras estudiadas a) Elevación lateral, b) Planta, c) Elevación frontal

Complementarias para el Diseño por Sismo de 1977 (DDF, 1977). La elección de la tipología estructural se realizó tomando en cuenta las características de las instituciones educativas actualmente funcionales en la Ciudad de México.

Definición de los elementos estructurales y sus propiedades mecánicas en condiciones sanas

El resumen de las secciones y las propiedades mecánicas de los materiales se muestran en las tablas a continuación descritas para las condiciones originales de servicio y las secciones corroídas.

Tabla 2 Resumen de las secciones iniciales

Nivel	Secciones cm x cm	Armado Perimetral o Superior	Armado inferior	Estribos	Armado Perimetral o Superior [cm ²]
1	Col45x45	12#10	/	#3 @ 22 cm	95.01
	V30x30	2#3	4#6	#3 @ 15 cm	1.43
	V30x45	2#3	4#6	#3 @ 22 cm	1.43
2	Col45x45	12#9	/	#3 @ 22 cm	76.96
	V30x30	2#3	4#6	#3 @ 15 cm	1.43
	V30x45	2#3	4#6	#3 @ 22 cm	1.43
3	Col45x45	8#8	/	#3 @ 22 cm	40.54
	V30x30	2#3	5#4	#3 @ 15 cm	1.43
	V30x45	2#3	5#4	#3 @ 22 cm	1.43

Tabla 3 Resumen de propiedades iniciales

Propiedad	Valor [kg/cm ²]
f_y	4200
E_s	2100000
f'_c	250
E_c	221359

Definición de los elementos estructurales y sus propiedades mecánicas en condiciones de daño debido al intemperismo

Suponiendo una corrosión debida a los fenómenos de la carbonatación (reducción de sección uniforme), y dado que la variación de cloruros por composición en los materiales es complicada generalizar o inferir, se propone un i_{corr} de $2 \mu A/cm^2$ un valor medio para muchas de las investigaciones consultadas pero característico de una región con humedad relativa cercana al 70% y condiciones ordinarias de concreto en la fabricación (Stefanoni et al., 2017). Por practica usual el método más común entre las investigaciones consultadas para medir el índice de corrosión fue la Polarización Lineal. Para un tiempo de corrosión supuesto de 8 años debido a carbonatación y permeabilidad de concreto con $K = 3.5 mm/año^{1/2}$ (fig. 4), se asume que el concreto ha perdido su recubrimiento de 2cm afectando el refuerzo a tensión y los estribos en un lapso de 32 años de despasivación. Las condiciones actuales de esta estructura y contemplando exclusivamente los efectos de la corrosión son los que se muestran (tabla 4 y 5).

tando el refuerzo a tensión y los estribos en un lapso de 32 años de despasivación. Las condiciones actuales de esta estructura y contemplando exclusivamente los efectos de la corrosión son los que se muestran (tabla 4 y 5).

Obtención de las curvas momento – rotación y la bilinealización

Con las dimensiones de las secciones y resistencias mecánicas de los materiales antes y después de la corrosión, se calcularon las curvas momento rotación de cada sección, esto debido a que el modelo histérico utilizado para los análisis fue el propuesto por Ibarra et al. (2005) y uno de los datos de entrada es el punto de fluencia en las curvas bilinealizadas. En las siguientes figuras se ilustra en que consiste el proceso de la bilinealización de las curvas momento rotación para una sección específica.

Tabla 4 Resumen de secciones residuales

Nivel	Secciones Residuales cm x cm	Armado perimetral o superior [cm ²]	Armado inferior [cm ²]	Estribos
1	Col41x41	85.80	/	#0.65 mm @ 22 cm
	V30x28	1.43	9.62	#0.65 mm @ 15 cm
	V30x43	1.43	9.62	#0.65 mm @ 22 cm
2	Col41x41	68.76	/	#0.65 mm @ 22 cm
	V30x28	1.43	9.62	#0.65 mm @ 8 cm
	V30x43	1.43	9.62	#0.65 mm @ 22 cm
3	Col41x41	35.62	/	#0.65 mm @ 22 cm
	V30x28	1.43	4.86	#0.65 mm @ 18 cm
	V30x43	1.43	4.86	#0.65 mm @ 22 cm

Tabla 5 Resumen de propiedades residuales

Nivel	Secciones	$f'_c[\text{kg/cm}^2]$	$E_c[\text{kg/cm}^2]$	$f_y[\text{kg/cm}^2]$	$E_s[\text{kg/cm}^2]$	L(%)	Cw(%)
1	Col41x41	228.06	166116.67	4079.174	2063460	2.32	4.60
	V30x28	211.15	159842.60	3998.971	2039205	3.86	7.60
	V30x43	211.15	159842.60	3998.971	2039205	3.86	7.60
2	Col41x41	225.07	165026.80	4065.113	2059207.5	2.59	5.10
	V30x28	211.15	159842.60	3998.971	2039205	3.86	7.60
	V30x43	211.15	159842.60	3998.971	2039205	3.86	7.60
3	Col41x41	221.55	163729.65	4048.447	2054167.5	2.91	5.70
	V30x28	190.46	151807.27	3898.978	2008965	5.78	11.20
	V30x43	190.46	151807.27	3898.978	2008965	5.78	11.20

Es importante comentar que se hizo una modificación en el valor del módulo de elasticidad del concreto considerado inicialmente, esto debido al efecto de despasivación que se sufre en el elemento.

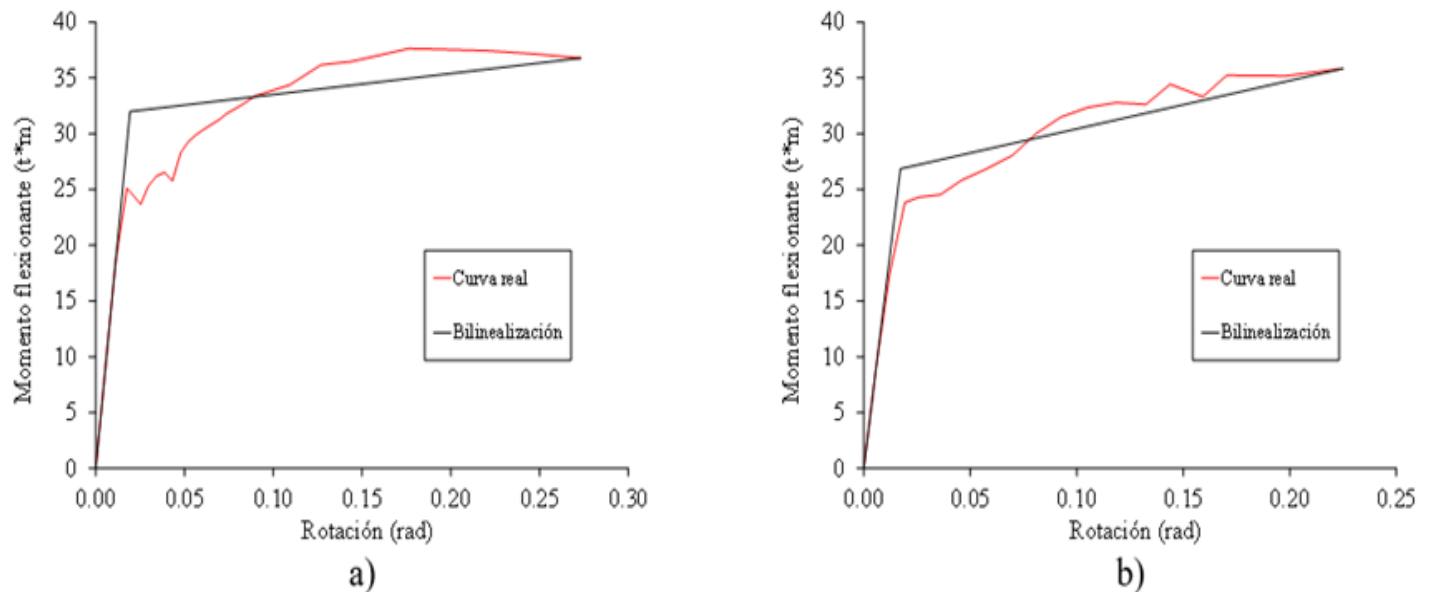


Figura 6 Momento-rotación de una sección V30x45 a. Sección sana b. Sección corroída

Obtención de las curvas momento – rotación y la bilinealización

Con las dimensiones de las secciones y resistencias mecánicas de los materiales antes y después de la corrosión, se calcularon las curvas momento rotación de cada sección, esto debido a que el modelo histérico utilizado para los análisis fue el propuesto por Ibarra et al. (2005) y uno de los datos de entrada es el punto de fluencia en las curvas bilinealizadas. En las siguientes figuras se ilustra en que consiste el proceso de la bilinealización de las curvas momento rotación para una sección específica.

El concepto de la bilinealización es pasar de la curva original a una más estilizada y con un claro punto de fluencia, el valor de este punto de fluencia se utilizó en el modelo histérico. Otro aspecto importante de este método es que el área bajo la curva es idéntica al área bajo las rectas bilinealizadas.

Obtención de la curva de capacidad del modelo mediante un análisis pushover

Para determinar la ductilidad de la estructura en condiciones sanas y corroídas se calcularon las curvas de capacidad mediante un análisis pushover, en la siguiente figura (fig. 7,) se muestran un par de curvas para la dirección corta y larga de análisis, en ellas se aprecia la pérdida de rigidez y resistencia máxima de fuerza horizontal antes del colapso.

Ejecución de los análisis dinámicos incrementales en las dos direcciones ortogonales

Los datos que se obtuvieron en los análisis IDA (por sus siglas en inglés) fueron producto de 98 registros con condiciones de suelo blando característico de la Ciudad de México, se ha logrado conocer los desplazamientos, distorsiones y fuerza lateral máxima resistente de la estructura antes y después de la corrosión, además del cambio en los periodos de vibrar,

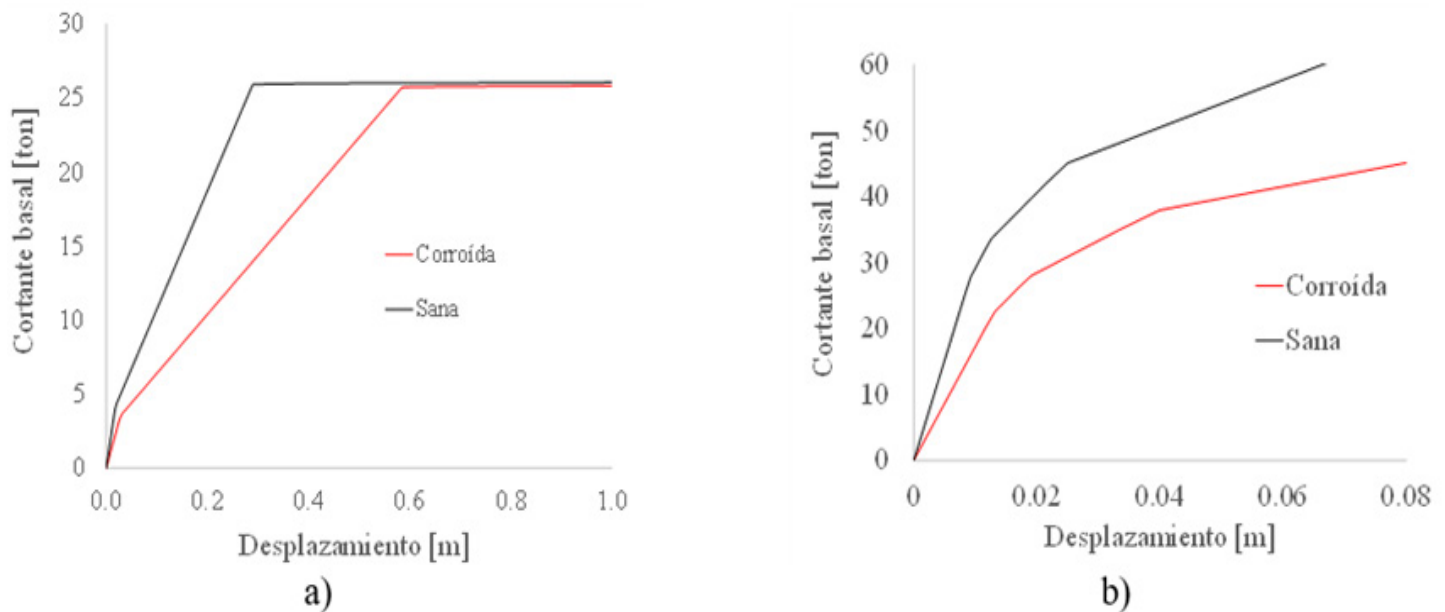


Figura 7 Curvas de capacidad en dos direcciones: a) corta y b) larga

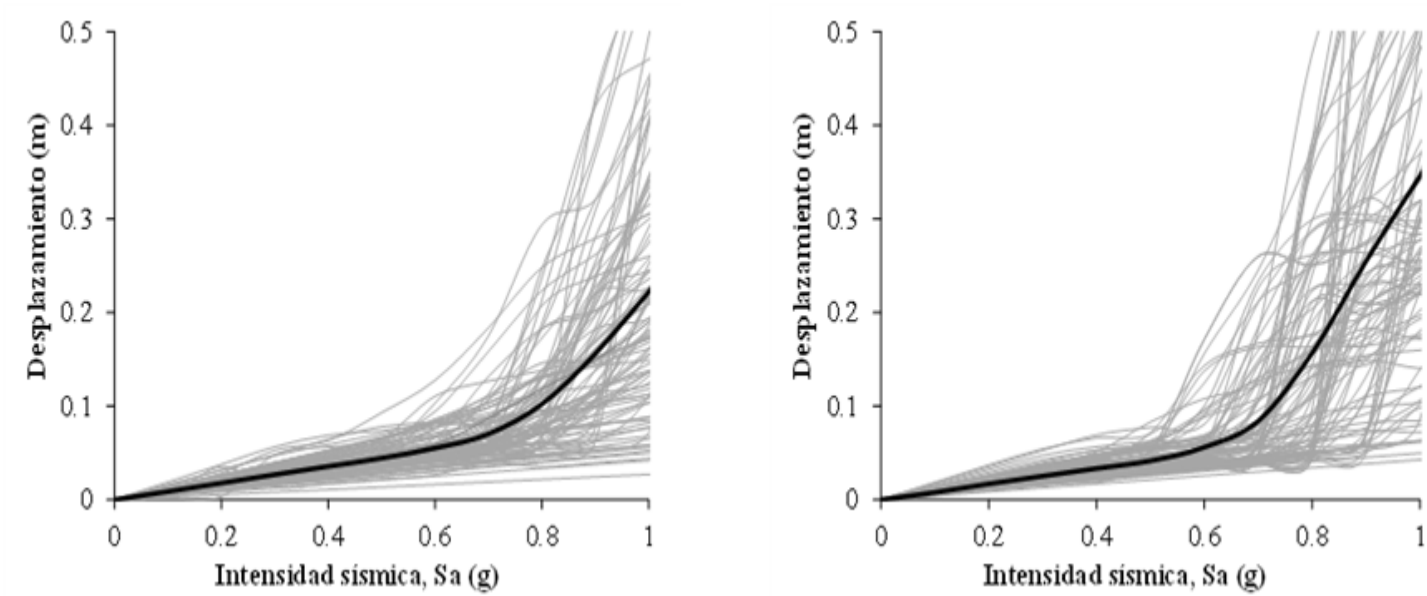
Se nota que hay una resistencia y ductilidad similar en ambas curvas, pero se aprecia que hay una disminución en la rigidez.

como se muestra en las tablas 6 y 7. Estos resultados concluyen que no es un tema menor el aspecto de la corrosión en las estructuras de CR, por lo que se debe tomar en cuenta, en los análisis a largo plazo, las variables del intemperismo potencial de la estructura. El resumen de los resultados y manejo estadístico se muestra en las figuras siguientes (fig. 8 y 9) donde se colocan en forma par para tener una mejor visualización de los cambios entre la condición corroída y sana.

Con base en los resultados de la tabla anterior, el primer modo se ve mayormente afectado debido a la corrosión en un incremento de su periodo del 35%. Esto resulta lógico dado que se han reducido las dimensiones en las secciones debido a los efectos de la despasivación y la corrosión, además las propiedades mecánicas se han reducido en este instante. La traducción a respuestas de los cambios en los periodos y resistencias de los materiales se pueden

Tabla 6 Tabla resumen de periodos dirección corta de análisis

Modo	Periodo (s) con corrosión	Periodo (s) sin corrosión
1	1.04	0.77
2	0.28	0.21
3	0.14	0.10



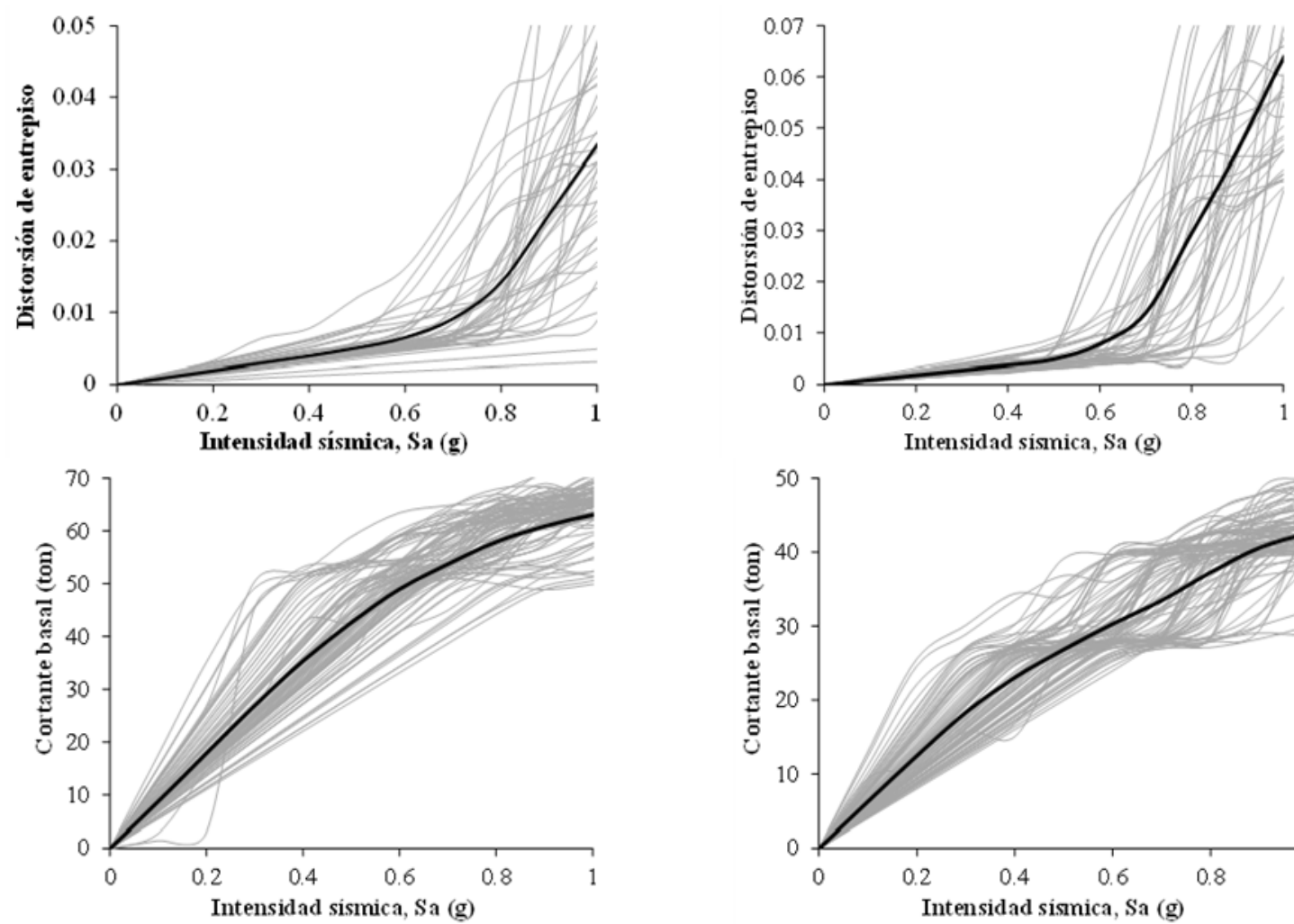


Figura 8 Curvas IDA en la dirección de análisis corta: (izquierda) sana; (derecha) corroída

Los 98 registros se muestran en un color gris, la curva que sobresale de las demás es la media de los resultados de los análisis aplicados a los 98 registros.

Tabla 7 Tabla resumen de periodos dirección larga de análisis+

Modo	Periodo (s) con corrosión	Periodo (s) sin corrosión
1	0.80	0.60
2	0.25	0.18
3	0.14	0.10

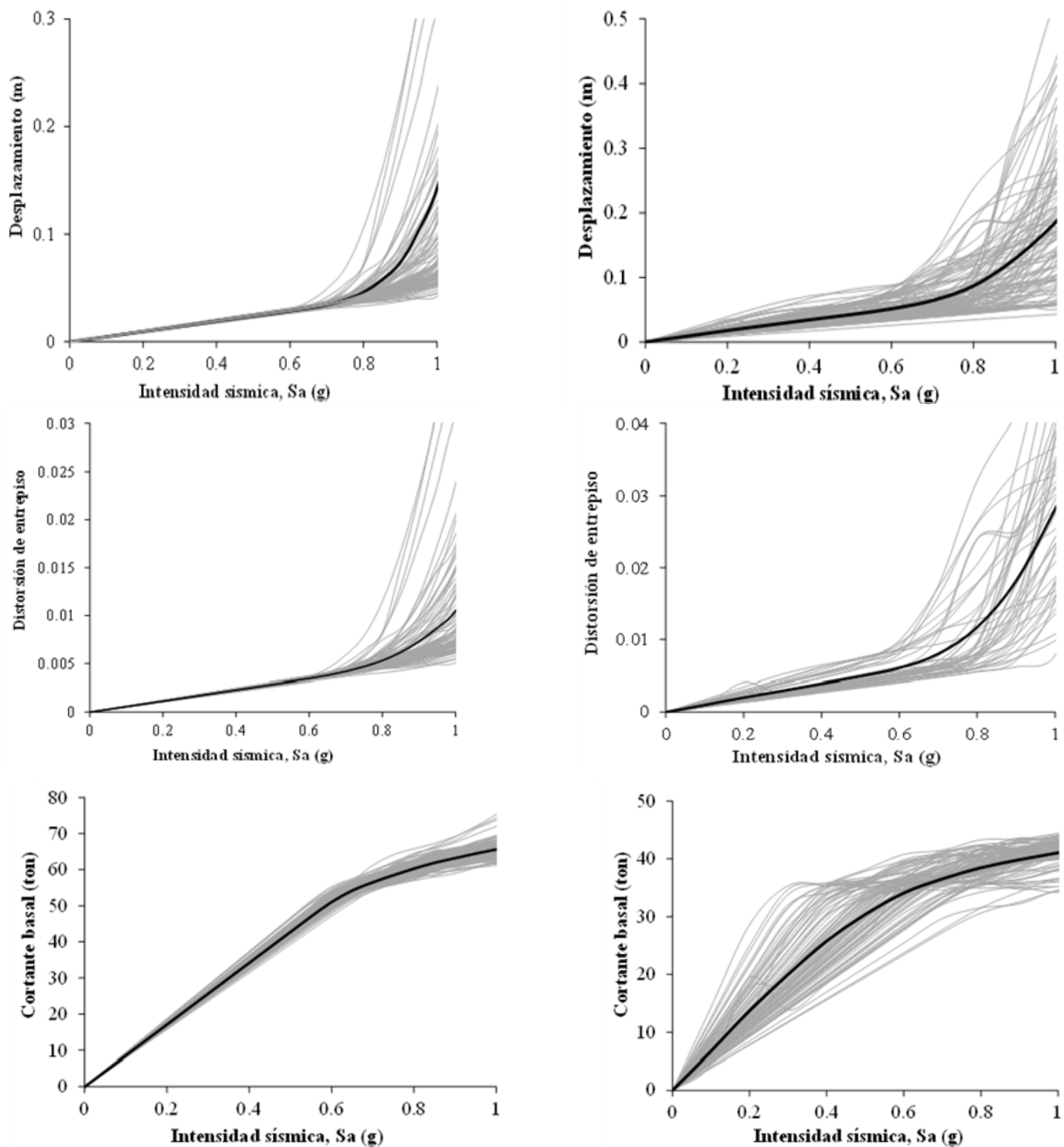


Figura 9 Curvas IDA en la dirección larga: (izquierda) sana; (derecha) corroída

entender mejor viendo las figuras que se muestran a continuación.

Con base en los resultados de la tabla anterior, el primer modo se ve mayormente afectado debido a la corrosión en un incremento de su periodo del 35%. Esto resulta lógico dado que se han reducido las dimensiones en las secciones debido a los efectos de la despasivación y la corrosión, además las propiedades mecánicas se han reducido en este instante.

La traducción a respuestas de los cambios en los periodos y resistencias de los materiales se pueden entender mejor viendo las figuras que se muestran a continuación.

El cambio en los periodos del primer modo fue menor en comparación a la dirección corta, debido a los efectos de la corrosión este periodo se incrementó un 33%. Los desplazamientos, las distorsiones y los cortantes también sufrieron cambios sustanciales como se puede observar lo que refuerza aún más la premisa de considerar estos efectos del intemperismo en los análisis estructurales a largo plazo.

Vulnerabilidad estructural

Con los IDA desarrollados anteriormente, se propone calcular la vulnerabilidad empleando el concepto de índices de daño, los cuales fueron obtenidos a partir de la respuesta estructural, aplicando el modelo de daño propuesto por Teran y Jirsa (2005) a un sistema equivalente de un grado de libertad. A pesar de que el modelo de Teran-Jirsa no considera interacción suelo-estructura, sí toma en cuenta la disipación de energía histerética y los desplazamientos asociados en términos de ductilidad (Ec.14).

$$ID_{TJ} = \frac{NE_{H\mu}(2 - c)}{r(2\mu_u - 1)} \quad (14)$$

donde μ_u es la capacidad dúctil de un elemento sometido a una carga monotónica, c y r son parámetros estructurales que miden la estabilidad del ciclo histerético, y NE es la demanda normalizada de energía histerética provocada por una excitación sísmica, dada por:

$$NE_{H\mu} = \frac{E_{H\mu}}{F_y \delta_y} \quad (15)$$

En donde $E_{H\mu}$ es la demanda de energía durante un ciclo histerético, F_y y δ_y son la resistencia y desplazamiento de fluencia, respectivamente.

3. ANÁLISIS DE DATOS

Para cuantificar el daño asociado a los diferentes niveles de respuesta estructural, se evaluó el índice de daño propuesto por Terán y Jirsa (2005), empleando osciladores de un grado de libertad, que tuvieran las mismas características de periodo fundamental y resistencia que las estructuras estudiadas; para ello, se utilizaron 1100 registros sísmicos sintéticos, en un rango de magnitudes de 7.2 a 8.2, obtenidos mediante una formulación basada en funciones de Green empíricas (Niño, 2018).

La distribución de los índices de daño obtenidos, se muestran en la fig. 10 para cada oscilador asociado a las diferentes estructuras estudiadas. En esta figura se muestra el índice de daño asociado a la máxima distorsión que se presentó en la estructura para cada sismo. Para obtener una función que representara este comportamiento, se hizo una regresión no lineal, de donde se obtuvo que el mejor ajuste se logró a través de una función de distribución lognormal; la variable dependiente representa el índice de daño; la variable independiente, es la distorsión máxima.

Curvas de vulnerabilidad

Para obtener las curvas de vulnerabilidad se utilizan las funciones de daño de la fig. 10 y las curvas IDA de distorsión de cada estructura (fig. 8 y 9), con el fin de obtener el daño esperado asociado al desempeño de cada estructura. Como la función de daño depende únicamente de la distorsión, y ésta a su vez, está en función de una intensidad sísmica, es posible entonces obtener resultados en términos de la pseudoaceleración versus el daño esperado. En la Figura 11, se muestran las curvas de daño para los dos casos: la estructura sana y la estructura que presenta la corrosión.

Si bien se ha estado mostrando el comportamiento de la estructura en sus dos direcciones, las curvas que se presentan corresponden únicamente a la dirección larga, pues ésta representa el comportamiento más desfavorable. Como puede observarse en la figura anterior, la curva de vulnerabilidad de la estructura corroída indica que ante menores aceleraciones, se presentarán mayores niveles de daño comparado con el comportamiento que tendría la estructura de compararla con las características de sus condiciones iniciales. Lo anterior indica que, para llevar a cabo la

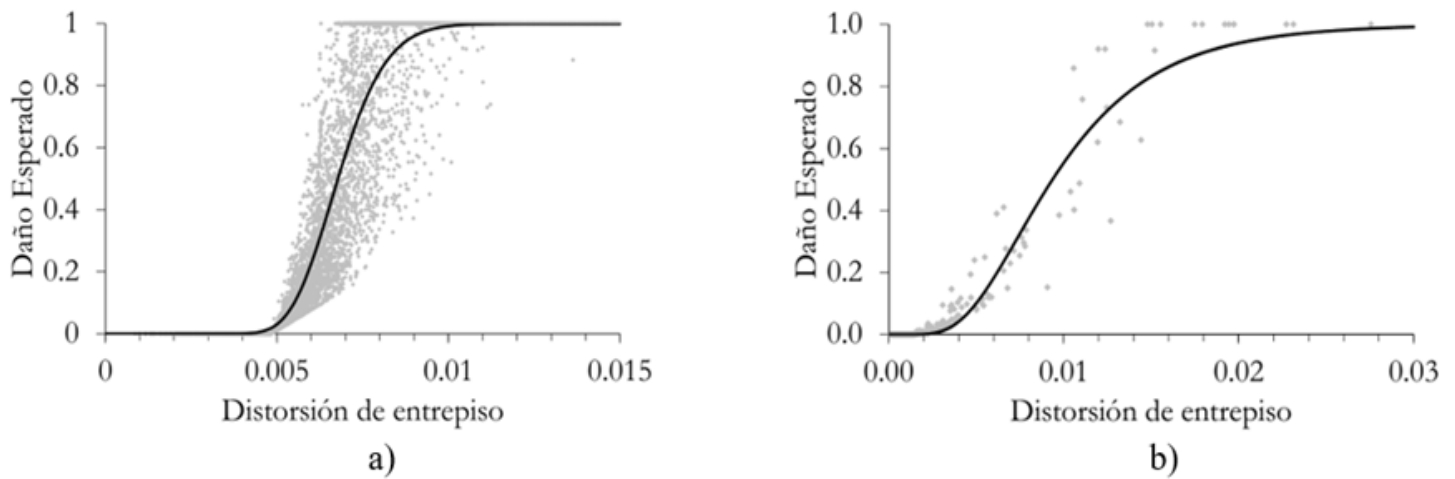


Figura 10 Curvas de vulnerabilidad de la estructura en estudio

estimación de pérdidas para estructuras cuya vida útil está por terminar debido a una falta de mantenimiento o a un ambiente agresivo, el no considerar aspectos como el intemperismo provocará una subestimación

del daño y, por lo tanto, a no tomar las medidas adecuadas para minimizar el efecto negativo que podrían ocasionarle sismos futuros.

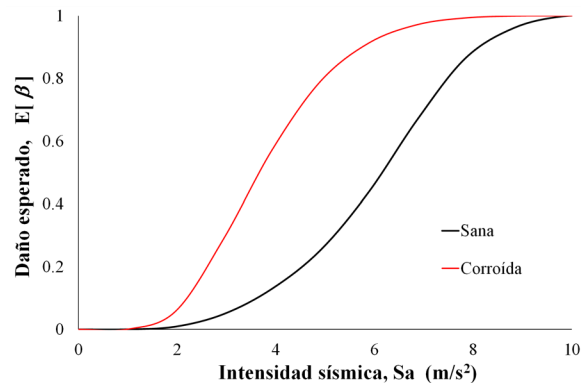


Figura 11 Curvas de vulnerabilidad de la estructura en estudio

CONCLUSIONES

Es importante generar conciencia a nivel nacional y tener un control estricto de las licencias de construcción, conocer el año de construcción y calidad del diseño estructural de cualquier edificación nos daría información importante para realizar estudios de vulnerabilidad estructural. La corrosión es un agente que

no se debe menospreciar, las razones ya se han mostrado en este artículo. Una despasivación temprana del CR puede generar comportamientos dinámicos poco deseados. Para poder implementar estos análisis en las estructuras como escuelas, se debe tener una buena formación y adiestramiento en el tema de los efectos de la corrosión además se requiere de ingenieros con

alto conocimiento de dinámica estructural y análisis no lineales.

La instrumentación en edificios y el monitoreo podrían venir bien para ajustar los modelos matemáticos que en este artículo se proponen. Esto requiere recursos y tiempo ya que el proceso de la corrosión es largo y complicado de modelar, pero necesario si de seguridad estructural se habla. El manejo y la generación de bases de datos de estructuras estudiadas y monitoreadas, no solo a nivel nacional, serían una gran oportunidad de desarrollo de conocimiento en un área que no ha sido considerada en los reglamentos de construcción actuales.

Como se ha logrado ver en el análisis estadístico de este artículo, la respuesta estructural es afectada si se permiten corrosiones excesivas en los elementos estructurales. Se deben hacer estudios que caractericen a las estructuras y a las condiciones a las que estarán sometidas durante su vida útil y cuando estas se presenten en condiciones críticas definir líneas de acción para garantizar la seguridad de todos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico, DGA-PA, por el patrocinio del proyecto IN115418 “Propuesta de una metodología para la evaluación de la resiliencia estructural sísmica en infraestructura escolar pública” y al CONACYT, por el patrocinio del proyecto A1-S-35223 “Definición de demandas sísmicas para el diseño de estructuras basado en riesgo y resiliencia”.

REFERENCIAS

Belda Revert A., De Weerd K., Hornbostel K. y Rica G. M. (2018), “Carbonation-induced corrosion: investigation of the corrosion onset”, *Construction and Building Materials*, vol. 162, Elsevier, January, pp. 847-856.

Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Redaelli E. y Polder R. (2013), “Degradation of concrete. Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair”, Wiley-VCH, Weinheim, February, 434 pp.

Bojórquez J., Ponce S., Ruiz S.E., Bojórquez E., Reyes-Salazar A., Barraza M., Chávez R., Valenzuela F., Leyva H. y Baca V. (2021), “Structural reliability of reinforced concrete buildings under earthquakes and corrosion effects”, *Engineering Structures*, vol. 237, núm. 112161.

Concrete Innovation Centre (2008), “Modelling of reinforcement corrosion in concrete - state of the art”, AIT AS, Oslo, 50 pp.

Celarec Daniel, Vamvatsikos D. y Dolšek M. (2011), “Simplified estimation of seismic risk for reinforced concrete buildings with consideration of corrosion over time”, *Bull Earthquake Eng.*, vol. 9, Springer, February, pp. 1137-1155.

Chen E., Berrocal C.G., Löfgren I. y Lundgren K. (2020), “Correlation between concrete cracks and corrosion characteristics of steel reinforcement in pre-cracked plain and fibre-reinforced concrete beams”, *Materials and Structures*, vol. 53, núm. 33.

DDF, Departamento del Distrito Federal (1977), “Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo”, *Gaceta Oficial del Distrito Federal*.

Di Sarno L. y Pugliese F. (2020), “Seismic fragility of existing RC buildings with corroded bars under earthquake sequences”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 134, Elsevier, April, art. 106169.

GCM, Gobierno de la Ciudad de México (2017), “Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto”, *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*.

Ghanooni-Bagha M., Shayanfar M.A., Shirzadi J. A. y Ziaadiny H (2016), “Corrosion-induced reduction in compressive strength of self-compacting concretes containing mineral admixtures”, *Construction and Building Materials*, vol. 113, Elsevier, June, pp. 221-228.

Gopal R. y Sangoju B. (2020), “Carbonation-Induced Corrosion: A Brief Review on Prediction Models”, *J. Inst. Eng. India Ser.*, vol. 101, Springer, February, pp. 247-257.

Ibarra L. F., Medina, R. A. y Krawinkler H. (2005), “Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, pp. 1489-1511.

Kivell A., Palermo A., ASCE M., y Scott A (2015), “Complete Model of Corrosion-Degraded Cyclic Bond Performance in Reinforced Concrete”, *Journal of Structural Engineering*, vol. 141, ASCE, September, art. 04014222.

Lee H. y Cho Y. (2009), "Evaluation of mechanical properties of steel reinforcement embedded in concrete specimen as a function of the degree of reinforced corrosion", *International Journal of Fracture*, vol. 157, ResearchGate, May, pp. 81-88.

Liu Y. (1996), "Modeling the time-to-corrosion cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures", *Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg*, October, 128 pp.

Niño, M., Ayala, G. y Ordaz, M. (2018), "Ground-motion simulation by the empirical Green's function method with a source defined by two corner frequencies and a two-stage summation scheme", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 108, pp. 901-912.

Pantazopoulou S. J. y Papoulia K. D. (2001), "Modeling cover-cracking due to reinforcement corrosion in RC structures", *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 127, ASCE, April, pp. 342-351.

Peixoto V. y Delgado J. M. (2013), "Corrosion of reinforcement in existing concrete façades. durability of building materials and components", *Springer*, vol. 3, Porto, pp. 253-273.

Ramesh G. y Bhaskar S. (2020), "Carbonation-Induced Corrosion: A Brief Review on Prediction Models", *J. Inst. Eng. India Ser.*, vol. 101, Springer, February, pp. 247-257.

Rodriguez J., Ortega L.M. y Casal J. (1997), "Load carrying capacity of concrete structures with corroded

reinforcement", *Construction and Building Materials*, vol. 11, Elsevier, June, pp. 239-248.

Shamsoddini M. Z., Raissi D.M., Eghbali M., y Samadian D. (2020), "Evaluation of seismic resilience index for typical RC school buildings considering carbonate corrosion effects", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 46, Elsevier, June, art.101511.

Stefanoni M., Angst M. y Elsener B. (2017), "Corrosion rate of carbon steel in carbonated concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 103, Elsevier, October, pp. 35-48.

Terán G. A. y Jirsa J. O. (2005), "A damage model for practical seismic design that accounts for low-cycle fatigue", *Earthquake Spectra* 21, pp. 803-832.

Vamvatsikos, D., Cornell, C. A. (2001), "The incremental dynamic analysis and its application to performance-based earthquake engineering", 12th European conference on earthquake engineering. Elsevier Science.

Zhang W.P., Liu Y. y Yu Q.Q. (2024), "Life-cycle seismic fragility evolution of RC structures subjected to chloride-induced corrosion: State-of-the-art review", *Journal of Building Engineering*, vol. 91, núm. 109584.

Xu J.G., Wu G., Feng D.H., Cotsovos D. y Lu Y. (2020), "Seismic fragility analysis of shear-critical concrete columns considering corrosion induced deterioration effects", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 134, núm. 106165.