

# ***Resiliencia o antifragilidad. Tipologías para la vivienda***

NAYAR GUTIÉRREZ ASTUDILLO  
ADOLFO PRECIADO QUIROZ

**Resumen:** *se compara la definición de sistema estructural antifrágil contra la resiliencia estructural y se aplican en tipologías estructurales de vivienda de la región partiendo de la concepción típica de tipologías de vivienda. De este análisis, con base en resiliencia y antifragilidad, se establecen algunos criterios para la viabilidad de la generación de sistemas constructivos para dar respuesta a sucesos catastróficos o normales, así como controlar su influencia en el entorno. Se hacen propuestas para modificar las tipologías existentes y provocar un cambio de paradigma en prácticas constructivas hacia sistemas que se restauran o mejoran por definición.*

**Palabras clave:** *evolución, resiliencia, antifragilidad, sistema estructural.*

**Abstract:** *this work contrasts the definition of anti-fragile structural system with structural resilience, and applies both to structural typologies of housing in the region, starting with the typical conception of housing typologies. This analysis, based on resiliency and anti-fragility, leads to the establishment of a number of criteria to assess the feasibility of generating construction systems can resist catastrophic or normal phenomena, as well as control their impact on their surroundings. Proposals are made to modify existing typologies and provoke a paradigm shift in construction practices toward systems that by definition can be restored or improved.*

**Key words:** *evolution, resilience, antifragility, structural system.*

## PROBLEMÁTICA O ÁREA DE DESARROLLO

### Contexto

Las filosofías constructivas actuales, en términos generales, se preocupan por producir edificaciones con un máximo de rendimiento y un mínimo de seguridad. Los reglamentos de construcción y sus filosofías de diseño están orientados a que las estructuras resistan lo suficiente para salvaguardar el tiempo necesario para evacuar lo valioso que hay en su interior. En el caso de los criterios de diseño para edificación, las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, del gobierno de la ahora Ciudad de México, explícitamente, mencionan que las estructuras deben controlar el daño máximo para dar tiempo a desalojar el edificio (Gobierno de la Ciudad de México, 2008). No consideran la ocupación posterior o tratamiento de la estructura.

La evidencia de un daño se puede manifestar de diferentes maneras en una estructura a través de deformaciones que pueden ser giros, desplazamientos o grietas. No todos los giros o desplazamientos son daños ya que consideramos un daño cuando, al retirar la carga o el efecto, queda la distorsión del sistema y su capacidad funcional, disminuida. También, dependiendo del material, pueden aparecer grietas o distorsiones localizadas. Un daño, a su vez, nos representa que hubo una falla en el material o el sistema constructivo pero que no hay un colapso de la estructura por lo tanto se puede intervenir sobre la misma en caso de necesitarlo. Arman Tatar, Ali Niouscha y Faya Rofooei (2017) agregan a lo mencionado que una forma de identificar daño generalizado en las estructuras es mediante un análisis de sus frecuencias naturales, y nos presentan un caso de estudio aplicado a la rehabilitación de un edificio dañado por sismo.

La fragilidad o robustez de un sistema, la podemos expresar en términos de daño, de tal manera que un sistema evidencia su calidad cuando se presenta un daño. Dependiendo de la escala del daño puede ser inocuo, reparable, no reparable o provocar el colapso de forma directa.

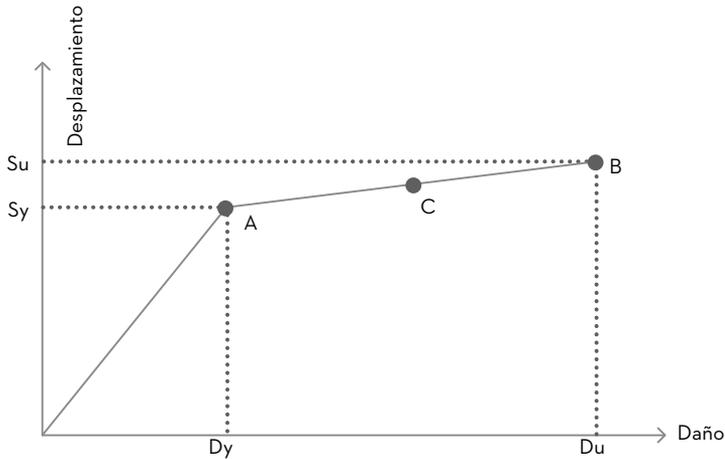
En ese sentido, podemos decir que un sistema es robusto cuando, para una misma demanda que produce daño, este queda en los rangos de inocuidad a reparable y frágil cuando el daño está entre lo no reparable y colapso; lo anterior es una simplificación de la curva de daños (Moreno-González & Bairán, 2011) donde vemos una curva de capacidad bilineal de un sistema estructural (véase la figura 5.1).

En la figura 5.1 podemos ver dos límites principales: (los puntos A y B) que representan el lugar en donde la estructura no presenta daño; solo deformación (punto A), y donde la estructura está al borde del colapso, (punto B). El punto C representa el límite económico-técnico donde la estructura tiene daño pero es reparable y delimita nuestra región robusta (antes del punto C), y frágil (después de C). Lo que nos permite medir si un sistema es robusto o frágil depende de qué tan rápido llega a estar entre los puntos C y B. El eje vertical nos expresa la deformación representativa en el sistema y su relación con el daño.

## **Función de un sistema estructural**

La demanda generalmente está ligada a la función del sistema por lo que podemos tener demandas permanentes y transitorias; estas pueden ser a su vez constantes o variables. En términos conceptuales, las demandas dimensionan la funcionalidad del sistema en todos los sentidos desde las interacciones de los elementos y los materiales hasta la geometría del mismo. Las interacciones de los elementos definen aspectos generales de la geometría y ayudan a determinar los materiales y procedimientos de fabricación del sistema. Los materiales definen la geometría y procedimientos particulares del sistema; la combinación de estos son elementos detonantes de nuevos conceptos tecnológicos. En Heino Engel (2003) tenemos ejemplos de sistemas constructivos en representaciones gráficas que nos dejan ver la relación entre el trabajo interno, la geometría del sistema y el material como limitante.

**FIGURA 5.1 CURVA DAÑO DEFORMACIÓN**



### Origen de la propuesta

De manera conjunta, podemos ver al daño como agente de visualización de la fragilidad derivado de una demanda actuante y por lo tanto podemos generar información sobre la demanda y el daño. Al mismo tiempo la funcionalidad, los materiales y la geometría de los elementos en el sistema se pueden ver como agentes de distribución de la demanda y el daño. Así podemos considerar la demanda como elemento que produce daño e información y tomarlos como elementos detonantes de nuevos conceptos tecnológicos. No es novedad tomar a la naturaleza como agente de innovación sin embargo si lo es como un elemento activo de innovación *in situ* y en tiempo real. La naturaleza como una fuente de conceptos de diseño aplicables a los sistemas constructivos se ha abordado desde el biomimetismo (Benyus, 2002) y sus aplicaciones van desde sistemas informáticos con filosofías evolutivas hasta materiales de alto desempeño que se limpian por sí mismos (De Florio, 2015).

Haciendo una analogía a los sistemas vivos, el dolor es un elemento que informa, al individuo mediante el sistema nervioso, dónde hay un daño o un potencial daño. Hay algunas iniciativas por proveer de un “sistema nervioso” a nuestras construcciones mediante redes de sensores que se le conoce como instrumentación. Estos sensores pueden ser analógicos o digitales con un rango amplio de posibles elementos mecánicos o de información del sistema a medir: inclinaciones, variaciones de longitud, temperatura, humedad entre otros. Una analogía instrumental casi homónima sería la instrumentación con fibra óptica, ya que permite un rango amplio de mediciones (temperatura, deformación en un punto localizado) con un único elemento. De la información de esta instrumentación, se derivan acciones de agentes externos en el sistema. Ejemplos de instrumentación para el monitoreo de estructuras los encontramos en Hong-Nan Li, Liang Ren, Zi-Guang Jia, Ting-Hua Yi y Dong-Sheng Li (2016).

El enfoque que abordamos aquí es sobre construcciones ligeras en contextos urbanos y tomando como principio que, en la naturaleza, los sistemas se auto regeneran con base en información sobre el daño y la demanda. Un sistema natural da una respuesta no lineal que permite resistir demandas aún mayores, obsérvese la regeneración de los músculos y el sistema inmune.

## CONTEXTO

Consideramos aquí a una tipología como los elementos mínimos que definen a un sistema estructural en particular; como lo son los materiales de los que está hecho, su ubicación y su geometría.

### **Tipologías actuales**

Volumen de construcción; con esta tipología, en términos de vivienda en México, estas se pueden repartir en, según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi, 2015b), 28’614,991 viviendas, de las cua-

les 28'607,568 corresponden al rubro de vivienda particular, de estas últimas, 90.6% están catalogadas como una vivienda independiente mientras que el 7% son tipificadas como departamentos o cuarto de vecindad.

De los datos del Inegi también podemos concluir lo siguiente: en las tipologías constructivas en el país predomina los materiales durables en las paredes con un 86.3%. Se consideraron materiales durables en las paredes: tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto. En los techos hay una disminución a 71.6% de utilización de materiales durables como lo son el concreto, tabique, viguetas con bovedilla y terrado con vigería.

Caracterizando los sistemas constructivos en México tenemos que:

- La construcción con mampostería es ortogonal con paredes de 10 a 30 centímetros (cm) de espesor; techos rígidos en alturas de 2.2 a 3 metros (m) y claros de 1.5 a 7 m.
- Construcción de concreto, espesores de 7 cm a 1 m. Edificaciones de hasta 335 m de altura.
- Construcción con acero.
- Construcción con materiales alternativos (madera, bambú, tierra y desechos).

Otro dato a resaltar es que quien construye vivienda en México, en una proporción de casi 60%, es un albañil (véase la tabla 5.1).

## **Clasificación de tipologías de sistemas estructurales**

Describiendo las tipologías por su funcionalidad estructural en la región y en sistemas de comunes, tenemos las siguientes:

- *Tipologías generales de sistemas estructurales.* Principalmente se construye con elementos ortogonales y con elementos planos que, en su conjunto, resisten todas las demandas mecánicas del sistema.

**TABLA 5.1 QUIÉN CONSTRUYE EN MÉXICO**

Viviendas particulares habitadas por tipo de constructor según periodo de inicio y término de la construcción									
Estructura porcentual									
Tipo de constructor	Total	Periodo						No sabe	Sigue construyendo
		Anterior a 1990	1990 1994	1995 1999	2000 2004	2005 2009	2010 2014		
<b>Inició la construcción</b>									
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	NA
Albañil	62.30	58.15	63.57	64.38	64.78	68.97	58.94	57.16	NA
Ingeniero, arquitecto o empresa constructora	3.19	3.32	3.27	3.17	2.96	3.63	2.24	2.30	NA
La construyó él mismo o algún integrante del hogar	34.52	38.53	33.16	32.45	32.26	27.39	38.82	40.54	NA
	100.00	34.53	14.65	13.54	18.01	11.83	6.12	1.32	NA
Albañil	100.00	32.23	14.95	13.99	18.73	13.09	5.79	1.21	NA
Ingeniero, arquitecto o empresa constructora	100.00	36.00	15.04	13.48	16.74	13.49	4.30	0.95	NA
La construyó él mismo o algún integrante del hogar	100.00	38.55	14.08	12.72	16.83	9.38	6.89	1.54	NA
<b>Finalizó la construcción</b>									
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Albañil	62.30	56.40	59.68	64.60	61.80	65.74	61.83	65.66	64.20
Ingeniero, arquitecto o empresa constructora	3.19	4.55	5.36	3.75	3.60	3.96	1.94	0.85	2.21
La construyó él mismo o algún integrante del hogar	34.52	39.05	34.95	31.65	34.60	30.30	36.23	33.48	33.59
	100.00	17.89	7.93	8.68	14.81	14.92	14.24	18.92	2.61
Albañil	100.00	16.20	7.60	9.00	14.69	15.74	14.13	19.94	2.69
Ingeniero, arquitecto o empresa constructora	100.00	25.55	13.35	10.23	16.76	18.54	8.69	5.06	1.81
La construyó él mismo o algún integrante del hogar	100.00	20.24	8.03	7.96	14.85	13.09	14.94	18.35	2.54

NA: No aplica

Nota: los totales pueden no coincidir debido al redondeo de las cifras.

Fuente: Inegi, 2015a.

Quedan algunos lugares en la península de Yucatán que construyen en plantas con segmentos circulares, y es relativamente común el uso de bóvedas (cilíndricas, esféricas o con otros tipos de curvaturas) en varias regiones del país.

- *Tipologías de sistemas prismáticos (sistemas vertical y horizontal).* En general se considera que debe existir un conjunto de elementos para resistir las demandas mecánicas provocados por cargas en el sentido de la gravedad; a lo que se le llamaría sistema vertical. Al sistema que debe resistir demandas por viento y / o sismo, con un componente principal paralelo al suelo, se les considera sistema horizontal.
- *Tipologías de sistemas de alto desempeño.* Se consideran así los sistemas que, además de resistir demandas mecánicas en cualquier sentido, tienen alguna funcionalidad extra explícita como parte del sistema. Estas funcionalidades pueden estar relacionadas con el ensamble, la trasportación, el almacenamiento u otra fuera de las demandas mecánicas.

Aquí se propone un tipo de sistema estructural de alto desempeño que permite dar características resilientes o antifrágiles según sea el caso.

## ANTECEDENTES

En esta sección se explorarán las definiciones actuales de resiliencia y antifrágilidad en la construcción o áreas afines.

### **Resiliencia**

El concepto de resiliencia aplicado a los sistemas constructivos surge a partir de la psicología, es definida como la medida que tiene un individuo para recuperarse de situaciones adversas. En términos particulares, la capacidad resiliente en una edificación, según el Resilience-

based Design Initiative (REDi™) (Almufti & Willford, 2013), puede medirse en términos de pérdidas probables si ocurriera un evento de magnitud máxima. Estas pérdidas se limitan en términos de re-ocupación de la estructura, funcionalidad, financieros y heridas en sus ocupantes. Esta aproximación limita la re-ocupación y recuperación de la funcionalidad a menos de seis meses, el daño máximo a 10% de pérdidas financieras, con heridas en los ocupantes por componentes de la estructura (sin que esta colapse) y pocas probabilidades de muerte. Esta aproximación así mismo limita los desplazamientos para que no haya daño en los sistemas esenciales de la edificación, así como los accesorios que pueden representar un 80% del costo de una edificación.

Para la realidad de nuestro país, donde las edificaciones altas y costosas apenas representan un 3% de las edificaciones actuales, esta iniciativa representaría un sobre costo importante ya que la pérdida financiera en acabados sería limitante en la reocupación de una estructura que aunque en buen estado tendría mala apariencia. Lo que implica que se podrían tener escenarios donde sistemas no esenciales pero caros sean los que salgan perjudicando la reutilización de una estructura, condición no contemplada en el REDi™ (Almufti & Willford, 2013).

Otra aproximación posible a la resiliencia en tipologías constructivas es la capacidad de un sistema para recuperar su resistencia mecánica anterior a partir de daños no catastróficos. Dando un peso preponderante a la re-ocupación y recuperación de la funcionalidad (no necesariamente la misma) combinándolo con escenarios de heridas a los ocupantes. Esto permite flexibilidad en la estructura y las combinaciones de diseño de tal manera que pudieran generarse sistemas más económicos. En este sentido tenemos los sistemas de placas auto-centrantes (Clayton, Dowden, Li, Berman, Bruneau, et al., 2016) que permiten movimiento durante un evento sísmico pero el sistema regresa a su condición inicial de manera automática.

## **Fragilidad**

Tenemos en la literatura que, en la escala de un edificio, la fragilidad se define como una función de probabilidad de distribución acumulada en términos de la intensidad de la aceleración, u otro parámetro de diseño, necesitada para violar el estado límite de diseño (Dolšek, 2015; Kennedy, Cornell, Campbell, Kaplan & Perla, 1980). Los estados límites se representan como situaciones funcionales de la estructura en sentido de resistencia de los materiales que está compuesta y las deformaciones que se pueden tolerar por el uso de la estructura. Con base en lo anterior, se formulan umbrales de daño que acotan el nivel de fragilidad de la misma.

## **Antifragilidad**

Es la capacidad de un sistema de retroalimentarse de sucesos aleatorios para mejorar a partir de ellos. Estos sucesos aleatorios generan información que se traduce en dos tipos de acciones: sustracción de fragilidad o adquisición de robustez (Taleb, 2012). Tenemos aplicaciones de antifragilidad en sistemas informáticos (Verhulst, Spath, & Van Schaik, 2015 y De Florio, 2014). Kennie Jones (2014) expresa el punto de que las filosofías actuales de diseño que cumplen requerimientos específicos llevan siempre a cierto grado de fragilidad por lo tanto, es necesario un cambio de paradigma para que los sistemas se adapten de manera automática. Definiciones formales de fragilidad y antifragilidad las podemos encontrar en (Taleb, 2013).

## **Antifragilidad en la construcción**

Tenemos en el trabajo de (Gkoumas, Petrini, & Bontempi, 2016) una exposición amplia de los conceptos de robustez, resiliencia y antifragilidad aplicados al ambiente construido y urbano. Ellos exponen un desarrollo completo de los conceptos anteriores en el contexto

urbano y de sistemas estructurales, además, nos proveen de dos casos de estudio. En el sentido de la antifragilidad ellos coinciden en que los materiales tienen un potencial importante para generarla mediante acciones como auto-repararse, cambiar de lugar el material a donde las demandas de esfuerzo sean mayores o crecer en resistencia como los músculos. Mencionan que otra fuente de antifragilidad puede venir de los sistemas modernos de monitoreo estructural. Otro caso de estudio de antifragilidad lo expresa Gabriel Schwake (2016) en el que expone el caso del diseño de dos barrios en Tel Aviv donde en uno se toma una filosofía “arriba abajo” llamado Manshiya y el otro una filosofía “antifrágil” (abajo a arriba) llamado Neve Tzedek. El primero se quedó rezagado sin poder incorporar los cambios que la ciudad está pasando y el segundo, aparte de la adaptación, tomó ventaja de sucesos potencialmente perjudiciales.

Las tipologías constructivas pueden ser antifrágiles si tienen la capacidad de incorporar elementos externos que ayuden a soportar demandas mayores que para las que fueron concebidas. Otra manera es dejar fuera elementos frágiles del sistema con base a la información del medio. Ivan Ble-i- y Arnaldo Cecchini (2017) hacen una propuesta para diseñar un plan urbano desde el punto de vista antifrágil y hacen una propuesta para que los edificios en ella pudieran crecer. Ellos hacen una aproximación sobre lo que no se debe hacer para no fragilizar una ciudad, proponen:

- Eliminar planes basados en predicciones frágiles.
- Eliminar el exceso de centralismo.
- Evitar la eficiencia y la optimización cuando reducen las opciones.
- No a la especialización del sistema.
- No a la excesiva simplificación que no considera retroalimentación.
- No a la falta de consenso.
- No inequidad o desigualdad.

En cuanto al edificio, Ble-i- y Cecchini (2017) hablan de que un edificio puede persistir siempre y cuando cree persistencia, madure con gracia, aprenda y abraza lo impredecible mediante la adaptación y mejora continua; todos sus sistemas deben ser antifrágiles.

## **Sistemas resiliente y antifrágil**

A continuación se presentan las definiciones sintetizadas de sistema resiliente y antifrágil:

- *Sistema resiliente.* Conjunto de elementos que trabajan en una función determinada y que tienen las siguientes características particulares: mecanismos, formas que pueden soportar un efecto negativo (degradan los mecanismos y / o las formas de los elementos en el sistema) pero los mismos elementos del sistema (o con ayuda de una intervención externa de bajo impacto) pueden restaurar la función esencial del sistema después de pasado el evento negativo.
- *Sistema antifrágil.* Conjunto de elementos que trabajan en una función determinada y que sus características particulares son: mecanismos, formas que se valen de los efectos potencialmente negativos como información para mejorar la forma y los mecanismos en el mismo sistema con impactos positivos no cuantificados.

## **PROPUESTAS**

### **Objetivo general**

Desarrollar una tipología antifrágil en el sentido estructural y sintetizar la propuesta constructiva resiliente actual. En el sentido de la resiliencia se presupone que hay un daño esperado y la estructura puede recuperar su capacidad inicial. En el sentido antifrágil, la estructura puede recibir daños pequeños o no presentarse ninguno, pero el sistema se

fortalece con la información de eventos negativos y así puede soportar eventos extraordinarios o mejorar en proporciones desconocidas.

### **Tipología estructural resiliente**

Consideramos que las tipologías resilientes, similares a las propuestas por Roberto Leon y Yu Gao (2016) para estructuras de acero, se generan a partir de las siguientes acciones:

- Identificación o cuantificación de agentes de daño (la fragilidad se reduce a un mínimo). Con lo que se cuantifica la demanda del ambiente, registrando históricamente eventos catastróficos.
- Diseño para daño mínimo (medida de la robustez del sistema). Se diseña para que, en caso de ocurrir algún evento histórico, el mismo produzca el mínimo de daño o un daño cuantificado previamente.
- Espera de suceso máximo. En caso de que ocurra el evento máximo, el sistema se pueda reestablecer en un tiempo previsto.
- Verificar daños mínimos. Los daños deben permitir alcanzar las condiciones de resistencia previa.
- Reestablecer funcionalidad anterior.

Por lo que una tipología resiliente es aquella donde se pueden predecir, con bastante precisión, los daños que tendría la estructura después de un evento particular y repararse para alcanzar la funcionalidad anterior completa (Alfmuti & Willford, 2013).

A manera de ejemplo podemos suponer el siguiente caso:

Se tiene un recipiente de cualquier forma y está completamente cerrado (un huevo, por ejemplo) pero el material del que está hecho se puede reparar bajo daños pequeños o no admitir daño (solo se deforma) bajo eventos conocidos. Todos los sistemas tienen una capacidad limitada pero sus funciones se acotan por el entorno y / o el diseño. Aquí el recipiente completamente cerrado tiene una

única función que se pierde al acceder al contenido o fallar dentro de los límites físicos.

En el caso de las tipologías actuales de vivienda se pueden ver como el recipiente cerrado al que por cuestiones tecnológicas hacemos resiliente (un material que se puede reparar o no admitir daño) pero cuyos elementos tienen esa única función lineal de soportar carga o daño. Cualquier modificación en la función de este sistema implica un sobre costo inesperado con beneficios limitados y posibilidad de daño irreparable.

### **Tipología estructural antifrágil**

Una tipología antifrágil debe seguir las siguientes acciones para generarse:

- Identificar fragilidad. Se detectan los elementos que provocan fragilidad en el sistema. Conexiones, materiales, procesos constructivos y usos.
- Sustracción de la fragilidad. Se sustraen estos elementos del sistema en el caso del diseño, pueden eliminarse en papel y, en el caso de edificaciones existentes, deberían agregarse sistemas de detección de fragilidad como redes de instrumentación para detectar los elementos con susceptibilidad a daño.
- Inclusión de antifragilidad (aprovechar la aleatoriedad positiva, mínimo de información para toma de decisiones, retroalimentación del sistema y acciones de robustecimiento).
- Se incluye elementos que se benefician de situaciones aleatorias y que robustecen de manera no lineal al sistema con la información derivada. Sistemas con fibras que se desgarran y que después se pueden reforzar de manera localizada. Flexibilizar los sistemas para que, ante grandes eventos, tengan la posibilidad de absorber grandes

cantidades de energía y la trasfieran a los elementos que generaron fragilidad.

- Se construyen sistemas que se benefician de fenómenos potencialmente catastróficos para otros sistemas de la misma naturaleza. En una estructura, además de los materiales, deben ser antifrágiles: las instalaciones y los elementos no esenciales.
- En caso de falla se elimina el sistema. La falla no representa el colapso de la estructura necesariamente sino que va en el sentido de haber fallado en proporcionar antifrágilidad. Y lo que se elimina es la información del sistema que no proporcionó antifrágilidad (sale del catálogo de posibilidades de diseño).

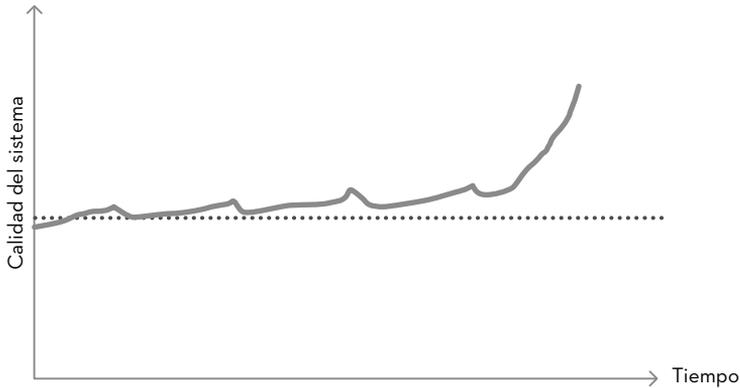
Un sistema constructivo antifrágil es aquel que a partir de situaciones de daño “pequeño” (eventos históricos comunes) se auto-prepara para el que pudiera causarle el mayor daño (evento máximo extraordinario). De este evento saldría sin daño y preparado para resistir otros eventos aún mayores (véase la figura 5.2). En la revisión de la literatura encontramos definiciones de sistemas antifrágiles en el campo de la informática, ciencias sociales y educación (De Florio, 2015; Haider, Abbas, Ali, Iqbal, Raza, et al., 2016; Gkoumas, 2016; Fortunato, 2017).

Un ejemplo similar a la sección anterior sería el siguiente:

Utilicemos el mismo recipiente, pero con dos pequeñas aperturas que se cierran y abren para acceder al material interior y / o introducir otro material en el mismo. Por el material y la forma se puede utilizar de la misma manera que el recipiente anterior pero las pequeñas perforaciones permiten funcionalidades adicionales con beneficios no medidos.

En una analogía constructiva tendríamos una vivienda que esté preparada para ampliarse y con la ampliación se refuerza la estructura, existe un sobre costo conocido para tener esta nueva funcionalidad,

**FIGURA 5.2 COMPORTAMIENTO ANTIFRÁGIL DE UN SISTEMA**



pero el beneficio no está dimensionado ya que los usos podrían variar de manera subjetiva.

## ANÁLISIS DE PROPUESTAS

En una tipología resiliente se identifica la intensidad máxima de un evento que pudiera provocar la violación de un estado límite y se diseña la estructura para soportarlo sin daño; sin embargo, es imposible tener precisión en la estimación de la magnitud de un evento catastrófico por lo que siempre tendremos algún grado de fragilidad. Tendríamos que analizar qué pasa si nuestra estimación falla; de la que se derivarían dos posibles escenarios: estaríamos sobre-diseñando para un evento que no pudiera ocurrir o sub-diseñando para un evento que consideramos poco probable. El sobre diseño lleva una sobre inversión que es más cara que tolerar cierto daño o no estaríamos destinando los suficientes recursos en un sistema que realmente tiene altas posibilidades de colapso, ejemplos de fallas en este tipo de estimaciones las podemos ver en Leon y Gao (2016) que nos expresan que las pérdidas por desastres naturales se deben principalmente a decisiones

de las comunidades y sociedades con respecto al ambiente construido que afecta la vulnerabilidad del mismo y que resultan en pérdidas cada vez mayores cuando ocurre un evento natural o sobre costos para adaptar sistemas sobre-demandados aunque se tenga más análisis, más información para diseñarlo, medirlo o prevenirlo.

En una tipología antifrágil se considera que habría siempre información disponible para retroalimentar al sistema de tal manera que se pudiera mejorar conforme a las condiciones de sitio, pero hay que considerar sistemas de monitoreo continuos. Las redes de instrumentación actuales se basan en posiciones, configuraciones o puntos críticos del sistema que representan tipos de fallas preestablecidas y por lo tanto también generan cierta fragilidad por ser sistemas de monitoreo discretos. La tecnología se mueve rápido y podríamos generar sistemas continuos de monitoreo (que no dependen de un punto, configuración o posición inicial), y que estos, a su vez, sean antifrágiles. El sistema de monitoreo sería central e imprescindible en una propuesta antifrágil, pero para el sistema resiliente no es una necesidad lo que podría representar una ventaja importante en un sistema resiliente sobre uno antifrágil. Hay también posibilidades híbridas en donde la combinación de sistemas antifrágiles y resiliente es posible; Gerhard Chroust y Georg Aumayr (2017) nos dan ejemplo, un disturbio social, de la liga entre un sistema resiliente y su parte antifrágil.

En la tabla 5.2 se presenta una comparación de un sistema resiliente contra uno antifrágil.

En términos económicos se tiene que el concepto de resiliencia se basa en conocer la magnitud del daño, el momento cuando tienes que intervenir y los recursos a emplear lo que significa que se puede determinar lo que va a emplearse, cómo y en qué momento. En el caso de la antifragilidad no se estimas un daño, se estima la fragilidad; las intervenciones son aleatorias, no cuantificables pero pequeñas y con beneficios no medidos pero muy altos en proporción a la intervención (Taleb, 2012).

**TABLA 5.2 ELEMENTOS COMPARATIVOS EN LOS SISTEMAS RESILIENTES Y ANTIFRÁGILES**

<b>Resiliente</b>	<b>Antifrágil</b>
Predicción de eventos catastróficos.	Medición más estimación de eventos cotidianos y catastróficos.
Diseño con base a daño.	Diseño sustrayendo elementos frágiles.
Aproximación probabilista al evento.	Aproximación determinista al evento.
Se espera daño.	Se esperan datos.
Sin retroalimentación previa a eventos.	Retroalimentación e intervención constante.
Retroalimentación y reparación después del evento.	
Mejora de diseño particular.	Mejora de sistema.
Daños estimados.	Daños no estimados.
Estimación de los tiempos de intervención.	Intervención posible en todo momento.

Ambos conceptos pueden ser complementarios en un sentido secuencial o paralelo en los siguientes arreglos:

- Resiliente luego antifrágil.
- Antifrágil después resiliente.
- Simultáneamente antifrágil y resiliente.
- Solo resiliente o antifrágil.

Límites en conceptos:

- Resiliencia: lo limita eventos pasados.
- Antifrágil: se va definiendo conforme pasan los eventos.

Límites en tipologías:

- Resiliente: definida robusta.
- Antifrágil: en proceso constante de definición.

La diferencia en las posturas resiliente y antifrágil es que esperamos de un sistema resiliente una respuesta constante ante un evento extraordinario (no presente daño o este puede repararse fácilmente) y en un sistema antifrágil las respuestas serían no lineales en un sentido positivo (el sistema mejora con eventos ordinarios y extraordinarios). La investigación de Mohamed Bakhouya y Jaafar Gaber (2015) nos muestra cómo sistemas naturales con estas características se traducen en paradigmas de diseño en ingeniería para sistemas adaptativos en el campo de la ingeniería.

### **Resiliente contra antifragilidad**

La resiliencia es un paradigma que tiene una relación directa con los procesos de las estructuras y que se ve reflejado en nuevos paradigmas de diseño estructural como el diseño por desempeño. En cambio, el termino antifragilidad es un concepto emergente que no tiene un antecedente directo en términos estructurales y solo se especula que existirá la tecnología para alcanzar dicho estado. Sin un punto de partida resiliente, el sistema antifrágil tendría que someterse a muchos eventos para garantizar un comportamiento adecuado ante el evento máximo extraordinario, lo que probablemente tendría que inducirse mediante situaciones artificiales.

### **Resiliente *más* antifragilidad**

En términos básicos, un sistema antifrágil es un sistema basado en información continua que, partiendo de un sistema resiliente, garantizaría una respuesta favorable por lo menos ante un evento máximo probable. Este evento podría ser analizado por el sistema y predecirse en sitio, en caso de necesitar cambios en el mismo y adaptar el sistema para otro tipo de fallas no contempladas previamente. Además, podría darse el caso de que si el sistema cuenta con recursos y determina que el evento máximo de falla de diseño no puede ocurrir,

entonces también el sistema nos podría informar que hay recursos que no se utilizarían con la posibilidad de moverlos a un lugar donde sí se necesiten.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Para concluir podemos establecer que es posible generar tipologías constructivas resilientes o antifrágiles con un mínimo de intervención tecnológica, pero sí con un cambio de paradigma. En el sentido de la resiliencia se debe trabajar en tipologías de vivienda que se construyan en contextos donde la predicción de la demanda sea estimable con un nivel de confianza aceptable y la vulnerabilidad de la estructura sea medible. Que sean albañiles o auto-constructores los principales constructores de vivienda garantiza costos bajos, pero también incertidumbre en: los procesos constructivos, calidad de los materiales, consideración de riesgos por exposición, predicción de daño y cuidado al entorno. Si se suma a esto que los reglamentos de construcción actuales no consideran que los diseños de vivienda deban ser resilientes o antifrágiles se queda en una situación de desastre potencial muy alta como el fenómeno de Iran en el cual, en 1997, fueron destruidos más de 100 pueblos en el noreste del país con prácticas constructivas similares y ubicaciones en zonas de alto riesgo. Una postura antifrágil, en el sentido constructivo, ayuda aún desde una perspectiva metodológica, ya que, en este caso, en una primera fase se debe eliminar la fragilidad del sistema (antes que rehabilitar o reconstruir, se “refuerza” en una etapa preventiva) y en una etapa subsecuente se integrarían mecanismos o elementos que mejoren al sistema a partir de los eventos con potencial de generar daño en la estructura; los beneficios se pueden orientar de manera directa al entorno de la misma en términos ambientales, culturales, energéticos o económicos.

## Discusión

Identificamos que hay elementos de la resiliencia que se deben estar investigando ya que el concepto aquí expuesto se limita al daño. Pero en el sentido completo del concepto, deberíamos explorar la parte de la recuperación y previsión de un daño, cualquier daño. Buscar la manera de generar sistemas responsivos ante cualquier eventualidad y en cualquier sistema (sistemas esenciales no estructurales). Otra posibilidad es generar intervenciones activas y que evolucionen en forma positiva sistemáticamente (sistemas de alto mantenimiento) donde, de manera previsible, se puede mejorar el sistema a partir del daño sin un sobre costo no estimado. Ver cambios en la formación del profesionista para que sea un elemento activo durante su vida en los sistemas que diseña, no como alguien que solo entrega un producto y se olvida del mismo.

En el caso de las estructuras resilientes hay que prever que los gastos, en algo que no se ve, no forman parte de nuestra cultura. ¿Cómo se justifica gastar en algo que no está dañado y que no cambiaría su funcionalidad esencial para evitar que se afecte la economía de una región o nación en el futuro? En el caso de las estructuras antifrágiles, la pregunta anterior se puede contestar con la posibilidad de mejora de la estructura en términos de valor ya que estas se podrían vender a un costo más alto después de un evento extraordinario pues en la práctica una estructura antifrágil, después de sobrevivir a este evento, podría sobrevivir a uno mayor o beneficiarse en otro sentido con el mismo.

## Avances actuales

La iniciativa REDi<sup>TM</sup> es un avance que pudiera detonar cambios importantes en filosofías de diseño en proyectos de grandes magnitudes. Sin embargo, hace falta incorporar propuestos para pequeñas escalas ya que no hay linealidad en los requerimientos. La introducción del concepto antifragilidad ya es un gran avance que nos enfoca en que necesitamos pensar que debemos aprovechar todos los recursos de la

naturaleza aun los que nos parecen desfavorables. Materiales que se pueden autoreparar como el concreto flexible ya están en el mercado (Li, 2016).

Materiales y sistemas que exponen fallas potenciales o que muestran dónde pudiera presentarse un daño. Sistemas de monitoreo de múltiples parámetros y en todos los puntos del sistema. Interacciones ganar-ganar con el ambiente que le rodea al sistema estructural. Las anteriores podrían ser líneas de investigación en uno u otro paradigma.

La resiliencia y la antifragilidad en el contexto urbano representan nuevos paradigmas de diseño que provocan conciencia sobre el ambiente, sus estresores y lo que significa reestablecer o mejorar la funcionalidad específica de un sistema artificial. Con ello, podríamos aprovechar para implementar estrategias para que los sistemas no solo se beneficien de sucesos extremos sino que mejoren el ambiente que la rodea como consecuencia de su construcción.

## REFERENCIAS

- Almufti, I. & Willford, M. (2013, octubre). *REDi™ Rating System. Resilience-based earthquake design initiative for the next generation of buildings*. Arup.
- Bakhouya, M. & Gaber, J. (2015, diciembre). Approaches for engineering adaptive systems in ubiquitous and pervasive environments. *Journal of Reliable Intelligent Environments*. 1(2-4), 75-86. Recuperado de: doi:10.1007/s40860-015-0010-6
- Benyus, J. (2002). *Biomimicry: Innovation inspired by nature*. Nueva York: Perennial.
- Ble-i-, I. & Cecchini, A. (2017). On the antifragility of cities and of their buildings. *City. Territory and architecture, an interdisciplinary debate on project perspectives*, No. 4, 3. Recuperado de: <http://doi.org/10.1186/s40410-016-0059-4>
- Clayton, P., Dowden, D., Li, CH-H., Berman J., Bruneau, M., et al. (2016, septiembre). Self-centering steel plate shear walls for improving

- seismic resilience. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 10(3), 283–290. Recuperado de: doi:10.1007/s11709-016-0344-z
- Chroust, G. & Aumayr, G. (2017, junio). Resilience 2.0: Computer-aided Disaster Management. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 26(3), 321–335. Recuperado de: doi:10.1007/s11518-017-5335-7
- De Florio, V. (2014). Antifragility = Elasticity + Resilience + Machine Learning Models and Algorithms for Open System Fidelity. *Procedia Computer Science*, Vol. 32, 834–841. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.499>.
- De Florio, V. (2015, julio). On resilient behaviors in computational systems and environments. *Journal of Reliable Intelligent Environments*, 1(1), 33–46. Recuperado de: doi:10.1007/s40860-015-0002-6
- Dolšek, M. (2015). Analytic fragility and limit states [P(EDP|IM)]: Nonlinear Static Procedures. En M. Beer, I. Kougioumtzoglou, E. Patelli & S.-K. Au (Eds.), *Encyclopedia of Earthquake Engineering* (pp. 94–110). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-35344-4\\_246](https://doi.org/10.1007/978-3-642-35344-4_246)
- Engel, H. (2003). *Sistemas de estructuras*. España: Gustavo Gili.
- Fortunato, M. (2017). Advancing educational diversity: antifragility, standardization, democracy, and a multitude of education options. *Cultural Studies of Science Education*, 12(1), 177–187. Recuperado de: doi:10.1007/s11422-016-9754-4
- Gkoumas, K. Petrini, F. & Bontempi, F. (2016). Design for Robustness, Resilience and anti-fragility in the built and urban environment: Considerations from a civil engineering point of view. En S.-H. Hsieh & S.-C. Kang (Eds.), *Proceedings of the 4th International Workshop on Design in Civil and Environmental Engineering. October 30th–31st, Taipei City, Taiwan*. Taiwan: National Taiwan University / Ministry of Science and Technology R.O.C.
- Gobierno del Distrito Federal (2008). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo*. Recuperado el 30 de agosto de 2017, de <http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/739.pdf>

- Haider, S., Abbas, L., Ali, A., Iqbal, M., Raza, I., et al. (2016, abril). Taxonomy and issues for antifragile-based multimedia cloud computing. *Journal of Reliable Intelligent Environments*, 2(1), 37-49. Recuperado de: doi:10.1007/s40860-016-0017-7
- Inegi (2015a). *Encuesta Nacional de Vivienda 2014. Tabulados básicos, 2015*. Recuperado el 21 de septiembre de 2017, de [http://www3.inegi.org.mx/contenidos/proyectos/enchogares/especiales/envi/tabulados/envi\\_2014\\_vp\\_53.xlsx](http://www3.inegi.org.mx/contenidos/proyectos/enchogares/especiales/envi/tabulados/envi_2014_vp_53.xlsx)
- Inegi (2015b). *Viviendas particulaes habitadas por clase*. Recuperado el 21 de septiembre de 2017, de <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/enchogares/especiales/envi/default.html>
- Jones, K. (2014). Engineering antifragile systems: A change In design philosophy. *Procedia Computer Science*, Vol. 32, 870-875. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.504>.
- Kennedy, R., Cornell, C., Campbell, R., Kaplan, S. & Perla, H. (1980, agosto). Probabilistic seismic safety study of an existing nuclear power plant. *Nuclear Engineering and Design*, 59(2), 315-338. Recuperado de: [http://dx.doi.org/10.1016/0029-5493\(80\)90203-4](http://dx.doi.org/10.1016/0029-5493(80)90203-4).
- Leon, R. & Gao, Y. (2016). Resiliency of steel and composite structures. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 10(3), 239-253. Recuperado de: doi:10.1007/s11709-016-0349-7
- Li, H.-N., Ren, L., Jia, Z.-G., Yi, T.-H. & Li, D.-S. (2016, febrero). State-of-the-art in structural health monitoring of large and complex civil infrastructures. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6(1), 3-16. Recuperado de: doi:10.1007/s13349-015-0108-9
- Li, V. (2016). Bendable concrete, Innovation in Construction (iCon). *Research Journal*, 11-15.
- Moreno-González, R. & Bairán, J. (2011, octubre-diciembre). Análisis del comportamiento sísmico de los edificios de obra de fábrica, típicos del distrito Eixample de Barcelona. *Informes de la Construcción*, 63(524), 21-32.
- Taleb, N. (2012). *Antifragile: Things that gain from disorder*. Londres: Penguin.

- Taleb, N. & Douady, R. (2013). Mathematical definition, mapping, and detection of (anti)fragility. *Quantitative Finance*, 13(11), 1677-1689. Recuperado de: <http://doi.org/10.1080/14697688.2013.800219>
- Tatar, A., Niousha, A. & Rofooei, F. (2017, febrero). Damage detection in existing reinforced concrete building using forced vibration test based on mode shape data. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 7(1), 123-135. Recuperado de: [doi:10.1007/s13349-017-0209-8](https://doi.org/10.1007/s13349-017-0209-8)
- Schwake, G. (2016, abril). Antifragile urban renewal: The regeneration of Tel Aviv's central Slumns. *Conference Paper, Conference: CPUD 16, International city planning and urban design conference, At Istanbul, Turkey*. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/304368013\\_ANTIFRAGILE\\_URBAN\\_RENEWAL\\_THE\\_REGENERATION\\_OF\\_TEL\\_AVIV'S\\_CENTRAL\\_SLUMS](https://www.researchgate.net/publication/304368013_ANTIFRAGILE_URBAN_RENEWAL_THE_REGENERATION_OF_TEL_AVIV'S_CENTRAL_SLUMS)
- Verhulst, E., Spath, B. & Van Schaik, P. (2015, diciembre). Antifragility: systems engineering at its best. *Journal of Reliable Intelligent Environments*, 1(2-4), 101-121. Recuperado de: <http://doi.org/10.1007/s40860-015-0013-3>