

SEGURIDAD ESTRUCTURAL Y SOCIEDAD

Ing. Javier Fazio

Conferencia dictada en oportunidad de recibir el Premio "Ing. Enrique Butty" de la Academia Nacional de Ingeniería, correspondiente al bienio 2002-2003.

1. Acerca del tema de esta conferencia

En este tipo de conferencias debe intentarse captar el interés de un público con una composición muy especial: colegas de la misma especialidad que el disertante, quienes concurren a un acto académico, y sus amigos y parientes, que asisten a un evento social.

Lamentablemente, si imaginamos las cuestiones de interés para los ingenieros estructurales como un conjunto A, y las cuestiones de interés para el público en general como un conjunto B, y analizamos qué se encuentra en la intersección de dichos conjuntos, estamos tentados a concluir a primera vista que la tarea es imposible, ¡se trata de conjuntos disjuntos!. Cualquier intento de solución de compromiso seguramente resultaría en una charla trivial para los ingenieros y sin interés para los demás.

Se me ocurrió entonces cambiar aquel objetivo de buscar un tema en particular de la ingeniería estructural que pudiese resultar de cierto interés general (¿tarea imposible?), por el de plantear directamente este problema : ¿En que lugar se produce el encuentro entre la ingeniería estructural y la sociedad en general?, ¿en que campos nuestra actividad interesa ó afecta decisivamente a los demás?.

En la tarea de tratar de acercar aquellos conjuntos disjuntos, el primer paso entonces es entender que es ingeniería de proyecto o diseño, y dentro de ella, que es la ingeniería estructural...

2. ¿Que es ingeniería / que es ingeniería estructural ?

Ingeniería, en una definición bien amplia, es *"inventar, proyectar y realizar artefactos para lograr un objetivo, cumpliendo determinadas condiciones"*.

La conjunción del objetivo a lograr y de las condiciones a cumplir se suele llamar DEMANDA. Vemos que en esencia, ingeniería es lograr que el artefacto posea una CAPACIDAD DE RESPUESTA que no se vea superada por esa DEMANDA.

El artefacto del que se ocupa un ingeniero en general, puede ser cualquiera : los ingenieros estructurales proyectamos, construimos y estudiamos ESTRUCTURAS RESISTENTES, intentando que posean una capacidad de respuesta que satisfaga a la demanda.

ARTEFACTO:	ESTRUCTURAS RESISTENTES
DEMANDA:	COMPORTAMIENTO SEGUN USO Y SEGURIDAD FRENTE A ACCIONES NATURALES Y HUMANAS
CAP. DE RESPUESTA:	RIGIDEZ Y RESISTENCIA

Pero quizás esto no quede demasiado claro para quienes no tienen afinidad con estos temas, así que llegados a este punto, quizás conviene glosar una definición acuñada por la casi centenaria Institution of Structural Engineers (ISE), institución seria si la hay, pero que no por eso pierde el *british sense of humour* :

“La ingeniería estructural es el arte de moldear materiales, cuyo comportamiento no entendemos del todo, en determinadas formas que no podremos analizar con precisión, de manera que puedan soportar fuerzas que en realidad no podemos evaluar, de una forma tal que el público en general no tenga razones para sospechar los alcances de nuestra ignorancia”.

Poniéndose un poco más serios, hace ya algunos años optaron por esta definición, tipo incumbencia profesional:

“Ingeniería estructural es la ciencia y el arte de diseñar y construir con economía y elegancia edificios, puentes, y otras obras similares, de manera que sean capaces de resistir las fuerzas a las que pueden estar sometidas”.

Y últimamente, por esta más moderna y “políticamente correcta”:

“¿Qué es la ingeniería estructural? Es la ciencia y el arte de planear, proyectar, construir, operar, monitorear, inspeccionar, mantener, rehabilitar, preservar, demoler, y desmantelar estructuras, tomando en consideración aspectos técnicos, económicos, medio-ambientales, estéticos y sociales”

Espero que con lo antedicho hayamos podido acercarnos a entender un poco más la esencia de nuestra especialidad, aunque sabemos que este objetivo no es fácil. En general (después veremos que en algunas oportunidades sucede lo contrario) los ingenieros estructurales no estamos precisamente en el candelero. Como comprobación de esta aseveración, podemos preguntar a cualquier estudiante, aún de países desarrollados, que tienen en común la Estatua de la Libertad ubicada en el puerto de Nueva York y la Torre Eiffel de París. Probablemente se obtenga como respuesta que ambos son grandes símbolos de naciones orgullosas, o alguna otra expresión general por el estilo. Lo que probablemente no se escuchará decir es que Alexander Gustave Eiffel diseñó ambos monumentos, la torre que lleva su nombre y la estructura que sostiene en pie a la estatua. Y más raro aún sería escuchar que Eiffel fue un ingeniero estructural.

3. Que es seguridad / Que es seguridad estructural ?

Si recordamos la expresión fundamental de la ingeniería :

CAPACIDAD DE RESPUESTA \geq DEMANDA

podemos decir que la esencia de la seguridad es tratar de minimizar la posibilidad de que suceda lo contrario. El “evento no deseado” será entonces:

DEMANDA $>$ CAPACIDAD DE RESPUESTA

No existe especialidad de la ingeniería en la cual se posea un conocimiento determinista, sin incertidumbre, ni de la CAPACIDAD de RESPUESTA del ARTEFACTO que se está diseñando o verificando, ni de las CONDICIONES A CUMPLIR en el entorno donde operará, ni del OBJETIVO BUSCADO. Cualquiera sea la rama de la ingeniería, deberemos afinar el paradigma de la seguridad de la siguiente manera :

$P(D > R) = P_f < P_f \text{ aceptable}$

que se lee así: la probabilidad de la ocurrencia del evento no deseado “D supera a R”, que llamamos falla, deberá mantenerse en valores aceptables, o bien, la probabilidad

de que la demanda sea mayor que la respuesta deberá ser menor que la probabilidad de falla admitida.

Dice Henry Petroski, conocido autor especializado en seguridad estructural :

“El concepto de falla es central para entender la ingeniería. Ella tiene como su primer y más importante objetivo el evitar la falla. El diseño es un emprendimiento humano y por lo tanto está sujeto al error. Debido a esto, algunos diseños están destinados a fallar. Esto puede conducir a pérdidas de vidas, lo que de por sí es trágico, pero una tragedia más profunda e imperdonable existe cuando se conocen las lecciones de las fallas acaecidas y se permite que ocurran nuevamente”.

Los avances en el conocimiento general de la fenomenología de los sistemas y el afinamiento de los métodos físico-matemáticos que reproducen cada vez más fielmente los procesos implicados en las realizaciones humanas, están permitiendo determinar con rigor el conjunto de condiciones que rigen los riesgos de una actividad determinada, erradicando los conceptos de azar y de corrección empírica.

En cada actividad el problema consistirá entonces en evaluar cuanto vale la acción o demanda esperable, cuanto vale la capacidad de respuesta ó resistencia disponible, y el más difícil, que trataremos inmediatamente : ¿cual es la probabilidad de falla admitida? ¿cuánta seguridad es suficiente seguridad? Esta última pregunta resume un dilema que es inherente a todas las actividades humanas, desde la más trivial hasta la más trascendente: la solución de compromiso entre la seguridad y sus costos.

4. ¿Como es la percepción social del problema de la seguridad estructural?

La idea de este tramo de la charla es tratar de esbozar algunas respuestas a las siguientes inquietudes:

- ✓ ¿La sociedad sabe que la probabilidad de falla de una estructura (en condiciones normales de diseño, construcción y uso) no es nula?
- ✓ ¿Qué probabilidad de falla es socialmente admisible? ¿Quien y como puede fijarla?
- ✓ ¿Cual es el papel de los medios en la percepción social de estos temas?

a) La probabilidad de falla estructural nunca es nula

Supongamos que alguno de ustedes tiene un campo, en ese campo hay un arroyo, y sus chicos quieren poner un tablón que encontraron en el galpón de los tractores para jugar cruzando de una orilla a la otra. Usted no tiene nada que ver con ingeniería o construcciones, pero es inteligente (o miedoso) y se pregunta si el tablón resistirá o si sus chicos se van a caer al agua en pleno invierno. Alguien le recomienda consultar a un ingeniero estructural.

Los datos básicos del problema son claros, y usted se los transmite al estructuralista. El tablón tiene 2.20 m de largo, 40 cm de ancho, 2 pulgadas de espesor, y lo van a usar mis tres chicos de 7, 9 y 10 años. Con toda esta información, se esperaría una respuesta inmediata y tajante (El tablón se va a romper o no se va a romper) del profesional especializado.

El sabe muy bien como trabaja el tablón como puente, que cosas debe chequear y que cálculos debe efectuar, pero debe decidir por la salud de los chicos y en realidad tiene todas estas dudas :

- Si usted midió bien el tablón ...
(INCERTIDUMBRE EN LA GEOMETRÍA)
- De que madera está hecho ...
(INCERTIDUMBRE EN EL COMPORTAMIENTO MECANICO-RESISTENTE DEL MATERIAL)
- Como es el terreno en las orillas en las que lo va a apoyar...
(INCERTIDUMBRE EN LOS VINCULOS)
- Cuanto pesarán sus hijos, si siempre estarán solo los 3, o tienen amigos en la zona, si usted que es mucho más pesado se va a poner a jugar con ellos, y si quienes crucen van a pasar caminando, corriendo o saltando ...
(INCERTIDUMBRE EN LAS ACCIONES A SOPORTAR)

Una respuesta correcta a su pregunta sería: “puede quedarse tranquilo, la probabilidad de que sus hijos se caigan y sufran una pulmonía es de solo 1.3×10^{-7} ”. Seguramente no es esta la respuesta que usted esperaba, pero podemos recordar ahora, entendiéndola mejor, la primera definición de ingeniería estructural de la ISE británica:

...“es el arte de moldear materiales, cuyo comportamiento no entendemos del todo, en determinadas formas que no podremos analizar con precisión, de manera que puedan soportar fuerzas que en realidad no podemos evaluar, de una forma tal que el público en general no tenga razones para sospechar los alcances de nuestra ignorancia”

b) La probabilidad de falla socialmente admisible queda fijada en forma colectiva por medio de mecanismos complejos, que incluyen motivaciones psicológicas y sociológicas y que exceden la mera lectura de datos estadísticos y los análisis de probabilidades

Según señala Henry Petroski, los debates públicos sobre riesgos y seguridad pueden incluir una gran cantidad de datos numéricos, gráficos y presupuestos, pero las decisiones generalmente se basan más en la esferas emocionales y políticas y frecuentemente con una lógica confusa.

Ciertas consideraciones cualitativas prevalecen en general sobre evaluaciones de riesgo cuantitativas. Aún cuando parece que las decisiones de seguridad se han basado estrictamente en números, siempre existen otros principios que ayudan a definir la opción. Los números y las fórmulas que los producen no son suficientes para la toma de decisión.

RESPUESTA EMOCIONAL

Las víctimas anuales de accidentes aéreos en vuelos de línea programados es de un orden 100 veces menor que las que se producen viajando en automóviles.

Mucha gente prefiere unir dos ciudades manejando de noche y cansado antes que hacerlo en avión. (SENTIMIENTO DE CONTROL)

RESPUESTA IRRACIONAL

Aviones de muy alta confiabilidad se someten a exhaustivos protocolos de control mecánico, y las azafatas revisan

si todos los pasajeros han ajustado el cinturón de seguridad.

Los niños de jardín de infantes que van en ómnibus a un paseo, están protegidos solo por la pintura naranja y blanca

del vehículo, sin cinturones y con escasa revisión mecánica.

Cuando se trata de riesgos, los números no dicen por sí solos que es aceptable y que inaceptable. Esa determinación involucra un juicio que se basa también en emociones. Con respecto a lo que nos interesa en esta charla, la percepción social en relación a la falla estructural, se combinan dos elementos en cierta medida contradictorios:

- Las personas no suelen pensar en (no tienen presente) la posibilidad de un colapso estructural. Esto siempre sucede con los eventos raros, de baja probabilidad de ocurrencia.
- Si se trata el tema, se observa que los seres humanos son excepcionalmente sensitivos al miedo a la falla estructural

Un ejemplo clásico es el de Pugsley: *“Durante la segunda guerra mundial, los diseñadores de aviones tuvieron la opción, hasta cierto punto, de intercambiar seguridad estructural por otras cualidades de las naves. Las pérdidas de bombarderos por acciones del enemigo eran muy altas, algo así como uno de cada veinte en cada salida. Comparado con esto, las pérdidas por fallas estructurales eran muy bajas, mucho menores a un avión cada diez mil. La estructura de un avión pesa prácticamente un tercio del total, y hubiera sido racional afinar las partes estructurales para obtener otras ventajas. Hubiera habido un pequeño incremento en la tasa de accidentes estructurales, pero el peso ahorrado podría haber sido usado en más armas defensivas o una protección más gruesa. Sin duda se hubiera producido una significativa reducción de la tasa de bajas total. Pero los aviadores no quisieron saber nada de estas cosas. prefirieron el gran riesgo de ser derribados por el enemigo al pequeño riesgo de que el avión se partiera en el aire por razones estructurales.”*

c) Los medios de comunicación condicionan y modifican la percepción social sobre riesgos y seguridad

La repercusión de una falla de seguridad determinada puede ser desproporcionada, por razones que exceden lo técnico, en relación con las consecuencias reales del desastre. De hecho, aún en una catástrofe tecnológica a gran escala, como la acaecida en el accidente de la central nuclear de Chernobyl, los resultados concretos son prácticamente invisibles expuestos contra el fondo de los riesgos naturales.

Según un informe de la *Revista Science* , en la falla de Chernobyl :

- ✓ 237 personas recibieron dosis masivas de radiación, y 31 murieron por esa causa.
- ✓ 4,000 personas se expusieron a dosis un poco menores en un radio de 18 millas de la planta, incrementando en 2.5 veces la posibilidad de morir de leucemia, 20 de ellas ya fallecieron.

¿Que pasó fuera del área más cercana a la planta? *Science* estima que de la población que vive en el camino de la pérdida por el hemisferio norte, 513.000.000 morirán de alguna forma de cáncer, 17.000 de esos cánceres podrían vincularse con Chernobyl.

La difusión que alcanza una falla de seguridad en los medios, también depende de algunas variables imprevisiblemente alejadas no solo de las consecuencias, sino

directamente de cualquier consideración técnica. Esto puede verse claramente en un ejemplo ahora directamente vinculado a la ingeniería estructural, las pasarelas vibrantes Millenium y Solferino.

La pasarela del Milenio en Londres, frente a la nueva Tate Gallery, diseñada por el reconocido arquitecto inglés Sir Norman Foster, es el primero de los cruces tendidos sobre el Támesis desde 1894. Su proyecto y construcción fueron seguidos con atención por el público en general, y fue inaugurado en junio del 2000 convocando a cien mil personas a cruzarlo por primera vez. La pasarela debió ser cerrada dos días después, cuando se comprobó que oscilaba lateralmente al paso de la multitud; la falla tuvo repercusión inmediata y generalizada. Quizás resulte sorprendente conocer el hecho de que la pasarela Solferino de París, que cruza el Sena en un lugar tan emblemático como el de Londres, había sufrido algunos meses antes problemas similares, sin que los medios lo reflejaran adecuadamente a nivel internacional. La exposición mediática de los autores de los dos proyectos arquitectónicos no es ajena en absoluto a la diferente difusión de ambas fallas.

Resulta del caso también remarcar la tendencia de los medios de comunicación a intentar establecer rápidamente conclusiones definitivas, en base a determinadas declaraciones y opiniones más o menos superficiales. Existe una propensión a la toma de posición instantánea dejando de lado el análisis profundo de la multiplicidad de factores que gravitan en cualquier accidente. Esta tendencia simplificativa, en algunos casos conduce a una asignación de responsabilidades injusta; en otros, se llega a conclusiones sobre la culpabilidad francamente insólitas, como lo muestran estos títulos periodísticos:

- ◆ VIGA MATA 2 OBREROS DURANTE UN MONTAJE
- ◆ EL MAL ESTADO DE LA ESTRUCTURA DE LA TRIBUNA FUE EL RESPONSABLE DE LA SUSPENSION DEL PARTIDO
- ◆ SE CULPA A LAS SOLDADURAS POR EL ACCIDENTE EN LA PLANTA

5. 9/11: Una nueva demanda impensada

Un método que los ingenieros de seguridad usan para crear diseños suficientemente seguros o para mitigar los daños si ocurre la falla, es el de diagramar los acontecimientos y situaciones que conducen a la falla, en lo que se conoce como “árbol de eventos”

En el amanecer del 11 de Septiembre, una nueva rama comenzó a crecer en ese árbol. En los meses transcurridos desde que los terroristas condujeron medios de transporte públicos y los transformaron en armas de destrucción masiva, los ingenieros debimos comenzar a resolver rápidamente como debería acomodarse en el esquema de diseño, tanto en proyectos civiles como militares, la perspectiva de ataques terroristas suicidas.

Una primera consecuencia de los ataques, luego de que millones de personas observaran en directo el colapso de las estructuras, fue que los reflectores de los medios se dirigieran como nunca antes en la historia a iluminar la profesión de los ingenieros estructurales, para preguntarles que había sucedido. En forma opuesta al habitual desinterés comentado en párrafos precedentes, ya no interesaban tanto el proyecto arquitectónico, la funcionalidad o la belleza de las torres, sino porque habían colapsado y si ello era previsible.

Pero desde un punto de vista más conceptual ¿como afectaron los hechos del 9/11 a las tareas profesionales de diseño y de evaluación de riesgos?. Gerenciar ries-

gos seguirá consistiendo en balancear adecuadamente la seguridad, la productividad, la funcionalidad y los costos; sin embargo, una serie de paradigmas admitidos en este campo dejaron de ser válidos y deben ser descartados, a saber:

LA COMUNIDAD TECNICA EN TEMAS DE SEGURIDAD ES UNA COMUNIDAD INTERNACIONALMENTE ABIERTA Y COOPERATIVA : Los ingenieros y los científicos son presionados para ser más cuidadosos en la distribución de información. En junio de 2002, la United States Energy Association, en un documento llamado "Seguridad Energética Nacional post 9/11", sugiere "excepciones limitadas y específicas a la Freedom Information Act para cierta información sensible compartida por el sector privado y el gobierno federal", de manera de asegurar que la misma "no se vea comprometida o se permita que caiga en las manos equivocadas (sic)"

Inmediatamente después del ataque, numerosa información sobre puentes, gasoductos, centrales eléctricas y otros elementos de infraestructura de los Estados Unidos, que había sido colocada en la World Wide Web con propósitos educativos por varias agencias gubernamentales, desapareció de Internet y no se espera que reaparezca en el futuro.

LA FALLA ES UN EVENTO NO DESEADO. Existe un nuevo actor en los acontecimientos que conducen al colapso, quien no solo desea que el mismo acontezca, sino que actúa de manera de lograr que se vayan encadenando las situaciones necesarias para que se maximicen los efectos negativos. El terrorismo suicida es un nuevo elemento con el potencial de afectar todos los otros elementos del *management* de riesgos; por lo que la idea misma de riesgo es diferente a lo que era previamente.

AL VERIFICAR ARTEFACTOS EXISTENTES BASTA CON ASEGURAR LA CONFIABILIDAD (BAJA PROBABILIDAD DE FALLA) : El objetivo del análisis de riesgo ha virado, dirigiéndose a chequear una combinación de alta confiabilidad y baja vulnerabilidad (consecuencias negativas desproporcionadas respecto de la magnitud de las acciones), y a investigar especialmente cuales son los eslabones débiles del sistema frente a demandas especiales.

6. El futuro y algunos objetivos deseables

Como vimos, hay dos tipos de riesgos: el riesgo real, que se basa en probabilidades, y el riesgo emocional, o percibido. Luego del 9/11, es posible que el riesgo real no haya cambiado, pero la percepción de riesgo de todos nosotros seguramente sí lo ha hecho. Está en la esencia humana el alterar esa percepción del riesgo luego de que algo que se pensaba era una posibilidad remota se convierte en un evento cierto. Es por lo tanto probable que en las próximas décadas tanto la aversión al peligro como la preocupación por la reducción de los riesgos percibidos se incrementen en la sociedad.

Si bien, el hombre moderno está viviendo una vida más larga y saludable que nunca antes en la historia, crece la sensación de que nuestra salud y nuestra seguridad están cada vez más en peligro. El equilibrio no será posible hasta que se difunda ampliamente el concepto de que la existencia de riesgos difíciles de mensurar siempre fueron el precio del progreso y de mayor prosperidad, pero también se conozcan y entiendan las herramientas con las que se cuenta para aumentar la seguridad.

La gente quiere sentirse tan segura en los lugares públicos como lo hace en su propia casa, pero comienza a reconocer que en sus lugares de trabajo y otros sitios significativos pueden darse condiciones de riesgo que exceden los criterios básicos de diseño. Teniendo en cuenta esta consideración, es esperable que se acepte un mayor peso de los aspectos relativos a la ingeniería estructural en relación con el confort y la

seguridad de los edificios y estructuras relevantes. No cabe duda que la interdependencia entre lo estructural y los otros sistemas de la construcción se entenderá como más importante a medida que el rango y la variedad de peligros aumenta

Por último, es dable esperar que la combinación de las expectativas sociales respecto a la seguridad y los nuevos riesgos que conllevan los ataques terroristas requieran un cierto manejo de las herramientas de evaluación de riesgos por parte de los políticos y dirigentes sociales. Dice al respecto Henry Petroski:

“En los próximos meses y años, las preguntas sobre riesgo continuarán aumentando. La respuesta a esas preguntas probablemente dependerá de la interpretación de los números, más que de los números en sí. El ordenar los riesgos en definitiva dependerá de decisiones políticas y emocionales. Es imperativo que, sin importar cual sea su educación matemática, nuestros líderes electos y los tomadores de decisiones estén bien preparados para lidiar con los componentes de la evaluación de riesgos”

Si para finalizar volvemos al principio de esta charla, podemos apreciar que aquellos diagrams de Venn que parecían tan alejados no lo están en absoluto. La intersección de los intereses de la ingeniería y los de la sociedad en general no es vacía, existen allí elementos de crucial importancia colectiva. Entre ellos, los temas de seguridad estructural que hemos tratado aparecen en los primeros puestos de la lista.

También hemos hablado de paradigmas a cambiar. En el caso de nuestro país, creo que no caben dudas con respecto a que el objetivo de un futuro más seguro requiere, como condición previa *sine qua non*, la instalación del paradigma de la prevalencia de la construcción social del bien común por sobre el interés individual.