Análisis de riesgos y planificación de medidas[1]

Peter Tanner
Ing. tit. ETH/SIA, Ing. CCP
IETcc-CSIC
Madrid

[1] Ponencia presentada en el Seminario S6 *Fiabilidad Estructural. Tratamiento de las Acciones Especiales* del *Curso de Estudios Mayores de la Construcción. CEMCO 98,* celebrado los días 30 de marzo - 1 de abril de 1998 en el *Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, IETcc - CSIC.*

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Problemática

La sociedad espera que los habitantes de edificios, los usuarios de estructuras, así como terceras personas que se encuentren en su entorno o área de influencia puedan estar suficientemente seguros [1]. Las personas esperan, en definitiva, que la frecuencia de fallos estructurales sea extremadamente baja, confiando conscientemente en la experiencia y la profesionalidad de los expertos y técnicos involucrados en la concepción, planificación, construcción y el mantenimiento de las estructuras.

La contestación a la cuestión fundamental ¿qué es suficientemente seguro? [2] requiere la contestación a una serie de cuestiones preparatorias. En primer lugar, se asume que se hayan detectado todos los posibles peligros para una estructura. A estos efectos se debe abordar de manera objetiva la cuestión ¿Qué podría ocurrir y con qué frecuencia? [1]. A continuación surge una cuestión mucho más difícil de contestar: ¿Qué se puede permitir que ocurra, con qué frecuencia y en qué circunstancias? La contestación implica decisiones y juicios relacionados con responsabilidades.

Un ejemplo puede ilustrar, a modo de introducción al tema de la presente contribución, la amplitud de posibles causas que pueden conducir a fallos estructurales. Al mismo tiempo puede aportar algunas indicaciones y sugerencias relativas a las numerosas formas de posibles medidas de seguridad.

El colapso de un tramo del puente Songsu en Seúl, el 21 de octubre de 1994, causó la muerte de 32 personas. Tal y como se publicó [3], el motivo último del desastre reside en la fisuración por fatiga de una unión soldada en un montante a través del cual el tramo isostático central del vano accidentado se unía a la parte volada de la viga tipo Gerber mediante pasadores (Figura 1). Las cuestiones principales, sin embargo, residen por debajo de esta superficie: ¿Fue imprescindible concebir un puente con tramos isostáticos? ¿Por qué no se detectó que la ejecución de las uniones soldadas no se hizo acorde con el proyecto? ¿Es suficiente prever la primera inspección detallada de una obra de estas características al cabo de 20 años de su puesta en servicio? ¿Quién ordenó el cambio de uso del puente sin previa evaluación de las consecuencias? Estas cuestiones seguramente se plantearon en el juicio. Lo que nos interesa en el presente contexto es la cuestión: ¿Qué hay que hacer para que no se puedan repetir desastres de este tipo?.

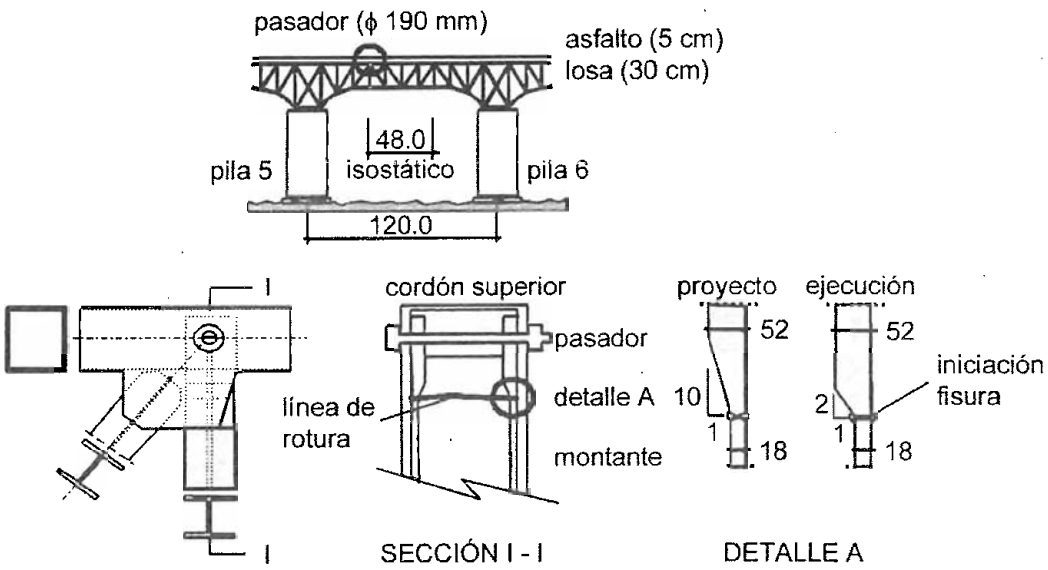

Fig. 1. Representación esquemática del puente Songsu y del detalle constructivo que causó el fallo (según [3]).

1.2. Algunas definiciones

En este apartado se pretende aclarar aquellos términos relacionados con la seguridad estructural y la fiabilidad cuya comprensión es imprescindible en el contexto del presente trabajo. A las definiciones que siguen se les da un enfoque más bien amplio [4].

1.2.1 Riesgo

La posibilidad de sufrir daños se califica como riesgo. Los riesgos se pueden cuantificar, ya que son función de la probabilidad de ocurrencia de un incidente, por ejemplo de la probabilidad de fallo de una estructura, p_f (un valor entre 0 y 1) así como el valor esperado, E, de un daño determinado, D, en el caso de ocurrencia de este mismo incidente, expresado por ejemplo en términos de víctimas o pesetas por incidente. La manera más sencilla de cuantificar un riesgo, RI, lleva a la siguiente relación:

$$RI = p_f \cdot E(D) \qquad (1)$$

1.2.2 Seguridad

Existe seguridad frente a un riesgo, si dicho riesgo está por debajo de un máximo aceptable. Una seguridad absoluta no se puede garantizar. La expresión "seguridad" en relación con las estructuras se refiere en primer lugar a las consecuencias que para las personas (usuarios o terceras personas) pueden derivarse de un fallo estructural [4]. La seguridad está relacionada con un sentimiento humano por lo que es cualitativa y, contrariamente al riesgo, no se puede cuantificar. En este sentido, el hundimiento de un puente sin usuarios que tampoco afecte a terceras personas, contrariamente al caso Songsu, no sería un problema de seguridad.

1.2.3 Fiabilidad

La fiabilidad es la capacidad de un objeto (que puede ser una estructura, pero también un electrodoméstico, etc.) de cumplir, con una probabilidad predefinida, una misión determinada en condiciones determinadas y durante un tiempo establecido [4]. La fiabilidad, F, corresponde en cierto modo a la probabilidad de ausencia de fallo, por lo que contrariamente a la seguridad se puede cuantificar:

$$F = 1 - p_f \qquad (2)$$

1.3 Estructuración del artículo

El objetivo del presente artículo no consiste en la cuantificación de riesgos en la construcción. Más bien se trata de establecer un concepto claro en el que se debe basar el proyecto de cualquier estructura con el fin

de garantizar su aptitud al servicio y seguridad estructural. A estos efectos se analiza en primer lugar lo que está ocurriendo en el sector de la construcción en cuanto a fallos, daños y posibles medidas para evitarlos (capítulo 2). Las lecciones de fallos estructurales permiten establecer un enfoque coherente para el tratamiento de los riesgos en el proyecto, la ejecución y la utilización de una estructura (capítulo 3), con el fin de aumentar su fiabilidad. Errores humanos constituyen la fuente principal de fallos y daños en estructuras [1]. La lucha contra estos errores es el tema del capítulo 4.

2. LECCIONES DE FALLOS ESTRUCTURALES

2.1. El accidente de Seúl

El puente Songsu es un puente mixto con celosías metálicas y una losa de hormigón, de 1.160 metros de longitud total y 19 metros de ancho. Las celosías metálicas están concebidas como vigas Gerber: para salvar los 120 metros de luz entre dos pilas, se unen los voladizos de 36 metros mediante una viga isostática de 48 metros. La losa de hormigón armado que forma el tablero tiene un espesor de 0,3 metros. En el momento del accidente, el puente sólo llevaba 15 años en servicio.

Según un informe de la Asociación Coreana de Ingeniería Civil del 4 de noviembre de 1994, el colapso habría sido debido a la rotura de una soldadura en un montante a través del cual la viga isostática central se unía a la parte volada de la viga Gerber mediante pasadores (Figura 1). El desastre se produjo por la combinación de diversas circunstancias, correspondientes a diferentes fases y actividades de proyecto, ejecución y explotación de la obra [5].

Concepción estructural

La estructura no es tolerante al daño: la rotura de la unión entre un montante y un cordón de la cercha puede llevar al derrumbamiento de la viga isostática central.

Ejecución

La soldadura crítica se proyectó como soldadura a tope con penetración total y preparación de bordes en X, ejecutada automáticamente. En obra, se efectuó una soldadura con penetración parcial y sin preparación de bordes, a partir de la cual se inició la fisuración por fatiga (Figura 1). La soldadura en cuestión unía dos chapas de diferentes espesores, 52 mm y 18 mm, respectivamente. Para evitar un cambio brusco de sección se proyectó una transición suave con una pendiente de 1:10 que no perturbara el flujo de tensiones. En obra se ejecutó una transición con una pendiente demasiado brusca de 1:2, aproximadamente, lo que llevó a una concentración adicional de tensiones, facilitando la fisuración por fatiga.

Control de calidad

El proceso de control de calidad debe abarcar todas las fases de proyecto y ejecución de una obra. En el presente caso, al parecer nadie avisó de la concepción estructural poco afortunada, ni tampoco de las diferencias obvias entre el proyecto y la ejecución.

Inspección

Según un reglamento interno de la administración competente, la primera inspección detallada para puentes de este tipo está prevista al cabo de 20 años de su puesta en servicio. En el momento del accidente el puente llevaba 15 años en servicio. Con ocasión de las inspecciones parciales efectuadas no se detectaron las fisuras presentes en las soldaduras.

Explotación

El puente se proyectó en el año 1977 para vehículos pesados cuya carga total no sobrepasara los 324 kN. En el año 1980, sin embargo, se reclasificó el puente admitiendo vehículos pesados de hasta 432 kN de carga total. Este cambio de uso se permitió sin previa reevaluación de la seguridad frente a la fatiga. Además, debido al crecimiento económico del país aumentó el volumen del tráfico pesado de manera espectacular: entre su puesta en servicio y la fecha del accidente se triplicó el número de vehículos pesados que pasaban por el puente. El aumento tanto del volumen como de las cargas de tráfico llevó a una aceleración de la propagación de las fisuras de fatiga.

A modo de conclusión se puede destacar que el colapso se debió a deficiencias a todos los niveles: en la concepción del puente, en la ejecución, en el control de calidad tanto del proyecto como de la obra, en la explotación, inspección y mantenimiento. El análisis de tanta negligencia se debe efectuar ciertamente también a la luz de los plazos muy reducidos de ejecución: el puente se inauguró seis meses antes de la fecha inicialmente prevista.

2.2. Análisis de 800 fallos estructurales

En [6] se analizaron 800 casos de daños en estructuras, buscando las causas así como las posibles medidas que se tenían que haber adoptado para evitarlos. A continuación se recopilan los aspectos más relevantes [1, 4].

La mayoría de los daños aparecen ya en la fase de ejecución de una obra. Eso significa que se pueden remontar a influencias que no tienen nada que ver con la utilización posterior de la estructura, en la cual se centra normalmente la atención de los autores de un proyecto. Este hecho debe incitarnos ciertamente a prestar más atención a las cuestiones y problemas relacionados con la ejecución [1].

Otros aspectos importantes están resumidos en la Tabla 1 [1, 4]. Las columnas contienen para las diferentes categorías los porcentajes respectivamente del número de casos con daños (N), del daño total en términos del coste (D), así como de los daños causados a personas (P).

Fallos en el sistema estructural, construcciones auxiliares, excavaciones y en instalaciones de obra constituyen la mayoría de los casos, y causan alrededor del 90% del coste de los daños. Más del 80% de los daños causados a personas están relacionados con estas componentes.

En muchos casos, una consideración deficiente de influencias está en el origen del fallo: se olvidan, ignoran o consideran inadecuadamente influencias que pueden ser determinantes. En determinados casos, el daño se debe a riesgos aceptados de manera consciente. Este hecho en sí no es preocupante, ya que construir sin correr y aceptar ciertos riesgos es imposible (1.2). Lo que preocupa es que el 15% de los daños a personas correspondan a esta categoría. Otro hecho que debe invitarnos a reflexionar consiste en que se desprecian influencias que pueden ser importantes, particularmente durante las fases de proyecto y de ejecución.

Considerando la fase del Proyecto en detalle, observamos que los errores en la concepción, así como en el análisis y en el

Tabla 1. Resumen del análisis de 800 casos con daños estructurales (según [1, 4, 6])

	N	D	P
Riesgo aceptado	25	10	15
Error humano	75	90	85
Componente decisiva			
• Excavación e instalaciones de obra	12	4	13
• Andamiaje, Construcciones auxiliares	9	11	22
• Estructura	44	72	48
En caso de errores humanos, éstos se producen en			
• Proyecto	37	40	20
• Ejecución	35	20	46
• Proyecto y Ejecución	18	22	20
En caso de errores humanos en el Proyecto, éstos se producen en			
• Concepción	34	18	15
• Análisis estructural	34	49	40
• Planos	19	9	8
• Preparación de la ejecución	9	5	20

dimensionamiento de las estructuras constituyen la causa más relevante de los casos con daños. También la mayoría de los daños materiales y más de la mitad de los daños a personas se deben a este concepto. Consecuentemente, la concepción estructural, el análisis y el dimensionamiento requieren una mayor atención por parte de los ingenieros.

Otras cifras significativas que se pueden deducir de [6] se refieren a las causas reales de los fallos [1, 4] que se deben a (los porcentajes indicados se refieren al número de casos investigados):

- 37% ignorancia, descuido y negligencia.
- 27% conocimientos insuficientes.
- 14% infravaloración de influencias.
- 10% olvido y equivocaciones.
- 6% confianza injustificada en otras personas involucradas en los procesos del proyecto o de la ejecución.
- 6% influencias objetivamente desconocidas.

Además, se demuestra que los siguientes porcentajes de errores que causaron los fallos podían haber sido detectados a tiempo [6]:

- 32% a través de una revisión cuidadosa de los documentos por parte de la siguiente persona involucrada en los procesos de proyecto o ejecución.
- 55% a través de controles adicionales, basados en una estrategia adecuada.

En el primer caso se pone de manifiesto que resultan imprescindibles una buena cooperación entre las personas involucradas en los procesos relacionados con la construcción, así como una buena transmisión de la información. El segundo demuestra la necesidad de procedimientos adecuados de aseguramiento de la calidad, basados en una planificación cuidadosa.

A pesar de que, según [6], el 13% de todos los errores posiblemente no se podían haber detectado con anticipación, los resultados de este estudio deberían constituir un desafío para los ingenieros. Deberíamos aprender las lecciones y deducir las conclusiones necesarias para mejorar esta situación poco satisfactoria [1].

2.3 Conclusiones

Los errores humanos constituyen claramente la causa principal para los daños estructurales. Estos errores forman parte de diferentes categorías: errores de juicio, aspectos que se han olvidado, conocimientos insuficientes, adopción de medidas incorrectas u omisión de medidas, etc. Consecuentemente, los errores se pueden y deben combatir a diferentes niveles [1]:

- Contra *riesgos objetivamente desconocidos* se puede luchar, por ejemplo, fomentando la investigación (los fenómenos de las inestabilidades aeroelásticas de los puentes colgantes de grandes luces se empezaron a investigar a raíz del hundimiento del puente de Tacoma en 1943).
- Casos en los que se producen fallos debidos a *riesgos no detectados* se pueden combatir mejorando la formación a todos los niveles, incluida la formación continua a lo largo de toda la vida profesional, y también a través de la publicación detallada de las causas de malas experiencias.
- *Riesgos despreciados* sólo se pueden evitar si cada persona que interviene en el proyecto, ejecución y explotación de una obra tiene claramente asignadas sus competencias y responsabilidades. Cualquier forma de ignorancia, descuido y negligencia se debe combatir rigurosamente.
- *Medidas inadecuadas* se evitan a través de una mejora de los conocimientos de los expertos, así como una planificación y revisión cuidadosas de estas medidas.
- Contra *aplicaciones indebidas de las medidas* se puede luchar exigiendo programas, instrucciones y documentos básicos que las expliquen de manera clara e inequívoca. También se deben prever y mantener unos mecanismos de control eficaces.

Todas estas estrategias no podrán eliminar completamente los riesgos residuales, ya que la capacidad de las personas tiene sus limitaciones y la perfección no existe. Lo que sí se debe perseguir es la reducción de los riesgos residuales. Eso se puede conse-

guir tratando los riesgos de manera racional y consciente y, también, introduciendo un orden lógico en las actividades relacionadas con la planificación, concepción, dimensionamiento, ejecución, control de calidad, utilización, inspección y el mantenimiento de las estructuras [1]. Lo que finalmente se puede considerar como riesgo residual aceptable es más que nada una cuestión política, por lo que se sitúa fuera del ámbito del presente artículo.

3. TRATAR CON RIESGOS

3.1. Reconocimiento de riesgos

Cada estructura está expuesta a una multitud de riesgos, provenientes tanto del entorno natural (viento, temperatura, nieve, avalanchas, caídas de rocas, efectos del terreno, del agua y del agua freática, ataques químicos y físicos, etc.) como de las actividades humanas (utilización, incendio, explosión, ataques químicos y físicos, etc.), incluyendo los errores humanos debidos a ignorancia, negligencia y descuidos, cuya importancia puede ser decisiva (cap. 2). Proyectar y construir una estructura segura requiere la detección previa de todos los posibles riesgos. Aunque este objetivo finalmente sea utópico, el ingeniero debe perseguirlo. La detección de riesgos constituye en el fondo la tarea principal del ingeniero, ya que la posterior adopción de medidas suele ser relativamente sencilla. Ciertas técnicas creativas pueden ser de gran utilidad en esta tarea. Algunas de ellas se presentan de manera somera [1, 4].

Análisis cronológico

Se imagina, paso a paso, todo el proceso de construcción, explotación e incluso de reparación y/o sustitución de una obra: ¿Qué ocurre, dónde y en qué momento? Se trata de una estrategia, a menudo aplicada intuitivamente en la vida diaria, que se revela extraordinariamente útil en el contexto técnico.

Análisis de la utilización

Resulta esencial analizar con antelación la utilización de la futura estructura: ¿Qué situaciones pueden producirse? ¿Qué equipos e instalaciones están previstos? ¿Qué incidentes son posibles en las operaciones previstas? ¿Qué podría fallar y por ello constituir un riesgo? Esta técnica se conoce en la práctica como *Hazard and Operability Study (HAZOP).*

Análisis de influencias

¿Qué parámetros tienen una influencia sobre un problema determinado? A estos efectos se pueden considerar las influencias dañinas de las actividades humanas y negligencias, o del entorno natural. Es importante tener en mente que determinadas influencias consideradas aisladamente posiblemente no constituyan ningún peligro, mientras que ciertas combinaciones de estas mismas influencias resulten peligrosas.

Análisis energético

Se puede investigar el potencial energético: ¿Dónde pueden representar un peligro la fuerza de la gravedad, presiones, energías cinéticas, térmicas o químicas, los campos electromagnéticos, etc.? También la interrupción del suministro de energía puede constituir un peligro.

Escenarios de fallo

Se analizan posibles escenarios de fallo: ¿Qué pasa si falla un determinado elemento o una determinada componente de una obra? Es la cuestión clave que puede llevar a conclusiones de gran utilidad.

Características de los materiales

La detección de posibles riesgos se puede basar en las características de los materiales de construcción, pero también de los materiales que están presentes en la utilización: su carácter combustible, explosivo o tóxico, la susceptibilidad frente a la corrosión, etc. También las combinaciones de estas características pueden determinar un riesgo.

Diagramas causa-efecto

Diagramas causa-efecto pueden contribuir a introducir orden, lógica, claridad y consistencia en los análisis.

Análisis de interfaces

Puede resultar útil buscar los riesgos

donde se transmiten informaciones, responsabilidades, materiales, etc.

Pensamiento morfológico

El objetivo de esta manera de pensar consiste en el reconocimiento sin prejuicios de todos los posibles problemas y de sus soluciones. Posteriormente se procede a una reducción a los temas realmente esenciales [7].

Tormenta de ideas

A menudo resulta adecuado trabajar en un equipo interdisciplinario para buscar riesgos. La técnica más fructífera suele ser la llamada *tormenta de ideas (brainstorming).*

Experiencia

La búsqueda de riesgos debe basarse también en la experiencia, tanto en la propia como en la de colaboradores o de terceras personas. Una fuente prácticamente inagotable constituyen la literatura especializada, pero también las normas, recomendaciones o manuales de asociaciones profesionales nacionales e internacionales.

3.2. Situaciones de riesgo

3.2.1. Principios

En el caso de las estructuras, diferentes riesgos suelen coincidir en espacio y tiempo, produciendo situaciones cuyos riesgos inherentes pueden ser muy superiores a los correspondientes a cada riesgo individual. Situaciones de este tipo se llaman *situaciones de riesgo* (en inglés: *hazard scenario)*. En [4] se asimilan las situaciones de riesgo al guión de una película: una secuencia de la película con un personaje principal y personajes secundarios correspondería a la situación de riesgo considerada, caracterizada por un riesgo preponderante y riegos concomitantes.

En analogía con el guionista de una película, el ingeniero debe analizar las posibles interacciones entre los personajes principales y secundarios. También debe analizar las posibles consecuencias del intercambio del protagonismo que puede crear nuevas situaciones de riesgo: ¿Pueden producirse situaciones más dramáticas que aquéllas que transcurren en los cauces previsibles?

El procedimiento descrito se llama *pensar en términos de situaciones de riesgo.* Esta manera de pensar puede ser muy útil no sólo en el contexto técnico, sino también en la vida diaria. A un personaje público, por ejemplo el poderoso presidente de un gran país democrático, que quiere tener una vida privada, le conviene pensar en estos términos, ya que de lo contrario determinados personajes secundarios, como por ejemplo una cierta clase de periodistas, se pueden convertir en personajes principales, dándole un giro dramático a su vida, o incluso a la de una nación.

Una vez detectadas y analizadas las diferentes combinaciones de riesgo descritas en las situaciones de riesgo, se deben establecer medidas adecuadas que permitan contrarrestarlos. El poderoso presidente podría, por ejemplo, renunciar a tener una vida privada evitando de esta forma cualquier tentación de los personajes secundarios de alzarse con el papel principal. También podría pensar en una medida menos drástica, como por ejemplo la de no utilizar su despacho oficial para desarrollar su vida privada, con tal de no excitar a la opinión pública de la que finalmente depende. De lo contrario, la combinación de esta excitación y de la ansiedad de los profesionales de la información de informar puede crear situaciones incontrolables. Un claro ejemplo de que la combinación de riesgos no significa simplemente sumar los riesgos individuales.

3.2.2 Un caso real

Históricamente hablando, el siguiente caso demostró la necesidad de *pensar en términos de situaciones de riesgo* frente a lo que hasta entonces solía ser la práctica habitual: la simple combinación de cargas, o la superposición de los efectos de las acciones con orígenes diferentes.

La Figura 2 representa la situación en la que se encontraba la cubierta de la estación de trenes de Einsiedeln (Suiza) antes de su colapso en invierno de 1970 [1, 4]. La cobertura de nieve era muy importante y debido al viento la nieve tenía una distribución desfavorable que introducía en los pilares un momento flector considerable. La nieve constituía el riesgo preponderante y el viento, actuando en una dirección desfavorable,

el riesgo concomitante. Las normas en vigor en la época en la que se dimensionó la estructura preveían el caso de una distribución antimétrica de la nieve. Sin embargo, al estipular la simple superposición de los esfuerzos debidos a la nieve y al viento considerados independientemente, no preveían que el viento actuaba sobre un área incrementada por la distribución desfavorable de la nieve. Y por supuesto que no preveían que la presencia de un tren podía alterar desfavorablemente el flujo del viento, tal y como ocurrió en el instante del accidente. La combinación de estas circunstancias está en el origen del colapso que, afortunadamente, no causó víctimas.

Al igual que el poderoso presidente del ejemplo anterior, el ingeniero autor del proyecto de Einsiedeln sabe ahora que la combinación de riesgos no significa simplemente sumar los riesgos individuales. Por este motivo y aprendiendo las lecciones de esta experiencia, a partir del accidente mencionado se abolió en las normas estructurales suizas el término *combinación de cargas*, para introducir en su lugar el concepto de las situaciones de riesgo [8].

El pensamiento morfológico (3.1) constituye una herramienta muy útil para detectar y establecer todos los riesgos a los que estará expuesta una estructura durante su construcción, explotación, renovación y demolición. La Tabla 2 corresponde al ejemplo anterior. En las columnas están recogidos los posibles riesgos, mientras que en las filas se reflejan diferentes fases y estados de la obra. Se representa la situación de riesgo *nieve* que causó el colapso, denominada según el riesgo preponderante. También están destacados los riesgos concomitantes, en este caso básicamente la acción del viento y la utilización de la estación (presencia del tren). En principio, cualquier punto de intersección en este esquema puede representar un riesgo preponderante, definiendo una situación de riesgo. En la fila correspondiente se encuentran los posibles riesgos concomitantes, de los que obviamente no todos son relevantes. Al igual que no todos los puntos de intersección representan una situación de riesgo relevante. En la planificación de las medidas para contrarrestar los riesgos, obviamente sólo se tendrán en cuenta las situaciones relevantes.

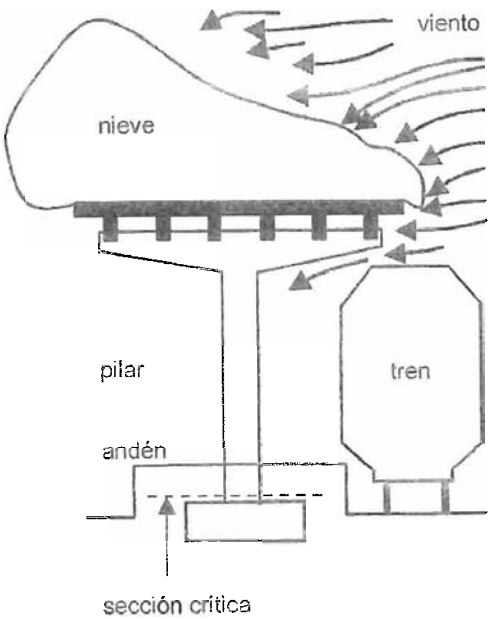

Fig. 2. Cubierta de la estación de FFCC de Einsiedeln antes del accidente (según [1, 4]).

3.3 Medidas

Los riesgos inherentes a las situaciones de riesgo previamente establecidas se pueden bien contrarrestar a través de unas medidas adecuadas, o bien aceptar conscientemente (riesgos aceptados). Las medidas pueden ser técnicas o administrativas y se pueden clasificar en cinco categorías [1, 4]:

- *Eliminación* de la causa del riesgo.
- *Evitación* del riesgo cambiando el concepto o los objetivos.
- *Control* de los riesgos mediante sistemas de alarma, vigilancia, inspecciones, etc.
- *Dominación* de los riesgos a través de reservas estructurales suficientes (dimensionamiento estructural).
- *Aceptación* de ciertos riesgos por ser inevitables o suficientemente pequeños.

Las posibles medidas se pueden y deben referir a todas las fases del proceso de realización de una construcción, es decir a la fase de los estudios del proyecto, a la ejecución y a la explotación de la obra terminada.

Tabla 2. Representación morfológica de los riesgos (adaptado de [1, 4]).

■ *riesgo preponderante*
□ *riesgos concomitantes*

		Riegos debidos a...																		
		entorno natural									actividades humanas									
		...	Viento	**Nieve**	Temperatura	Agua	Terreno	Ataque quim.	Avalanchas	Sismo	...	...	Utilización	Colisión	Explosión	Incendio	Ataque quim.	Error ejec.	Error manten.	Error explot.	...
Ejecución	Excavación																				
	Cimentación																				
	Transporte																				
	Montaje																				
	Hormigonado																				
	Pretensado																				
	...																				
Explotación	...																				
	normal		□	■						□		□									
	especial																				
	Inspección																				
	Mantenimiento																				
	...																				
Renov.	Refuerzo																				
	Rehabilitación																				
	Sustitución																				
Demolición																					

3.4 Documentos

3.4.1 Visión conjunta

En términos generales, el proceso de definición, dimensionamiento, ejecución, explotación, inspección y mantenimiento de una estructura debe responder a dos objetivos primordiales:

- Ofrecer al propietario de la obra una construcción que responda a las necesidades relativas a la utilización que quiere hacer de ella.
- Garantizar a los usuarios y a terceras personas un nivel de seguridad adecuado.

Para alcanzar estos objetivos, y para garantizar que la estructura los satisfaga al menor coste posible durante todo el período de servicio previsto, es necesario desarrollar una serie de actividades, entre las cuales el cálculo estructural sólo es una. Una definición inequívoca de estas actividades así como una buena transmisión de información entre las personas que intervienen en ellas es imprescindible.

Según la norma suiza SIA 160 [8], que entró en vigor en 1989, todas las actividades necesarias para garantizar la aptitud al servicio y la seguridad estructural se rigen según unos documentos de organización, relacionados entre ellos, que a su vez contribuyen a asegurar la transmisión de la información (Figura 3). Estos documentos abarcan todas las fases del *ciclo de "vida"* de una estructura, desde su definición hasta la inutilización o demolición:

– Al principio de la fase de planificación de una obra es necesario definir la utilización que se le quiera dar a la futura estructura. A estos efectos se establece un *Plan de utilización* (3.4.2) en estrecha colaboración entre la propiedad y el ingeniero (autor del proyecto). La fase de la definición conceptual de la estructura se rige según el *Plan de utilización* y éste, además, constituye la base para la elaboración del *Plan de seguridad.*

– El ingeniero autor del proyecto es el responsable para la definición del *Plan de seguridad* (3.4.3), que también se elabora al principio de la fase de planificación. En éste se establecen y analizan los riesgos para la estructura en función de la utilización que se le quiera dar (3.2), definida en el *Plan de utilización*, y dependiendo también de la concepción estructural. Asimismo se incluyen las medidas que se consideran idóneas para contrarrestar dichos riesgos, y se definen los riesgos aceptados (3.3). El *Plan de seguridad*

es el documento de organización de la fase del dimensionamiento estructural.

– Basado en el *Plan de seguridad*, el ingeniero establece el *Plan de control* (3.4.4), que constituye la herramienta para asegurar que la obra finalmente esté conforme con las exigencias. El control debe abarcar todas las fases del proyecto, incluyendo el dimensionamiento, la ejecución y la puesta en servicio.

– Con ocasión de la recepción de la obra se le entrega a la propiedad el *Plan de explotación, inspección y mantenimiento* (3.4.4), elaborado por el ingeniero. De esta forma, la propiedad conoce las reglas necesarias de utilización de la obra para respetar las hipótesis de los planes de utilización y de seguridad, definidos previamente. También conoce los programas dedicados a la inspección y el mantenimiento, indispensables para alcanzar el período de servicio previsto.

3.4.2. Aptitud al servicio y plan de utilización

Para conocer las necesidades y exigencias del propietario, el autor del proyecto le entrega un cuestionario que deberá rellenar. El cuestionario constará de preguntas de diferente naturaleza, tanto técnico, de impacto medioambiental y económico. A partir de las exigencias de la propiedad, el autor del proyecto establece un inventario de los diferentes estados de utilización. También se deben prever posibles medidas para satisfacer las exigencias de la propiedad. El autor del proyecto y la propiedad valorarán conjuntamente si las exigencias y las medidas previstas resultan razonables y si el subsiguiente coste no es desproporcionado.

Todas las hipótesis y decisiones adoptadas se recogen en un documento llamado *Plan de utilización*. Este plan, que forma la base para todo lo que sigue en el proyecto, especifica en el lenguaje técnico de los expertos lo que quiere la propiedad.

3.4.3 Seguridad estructural y plan de seguridad

La seguridad –contrariamente a los requisitos reflejados en el *Plan de utilización*– no es objeto de un acuerdo entre la propiedad y el autor del proyecto. Garantizar la seguridad constituye una tarea que es de la responsabilidad exclusiva del ingeniero, y se engloba en el marco de normas generales.

Una herramienta esencial para garantizar la seguridad de una estructura es el *Plan de seguridad*, elaborado por el autor del proyecto y basado en el *Plan de utilización*. Ese documento contiene, en particular, las reflexiones relativas a las posibles *situaciones (escenarios) de riesgo* que resultan de la utilización prevista (3.2). También los peligros inherentes a la ejecución de las obras se deben identificar, lo que a su vez depende de la solución estructural adoptada (Figura 3).

Para cada uno de los riesgos que se identifique, y de los que se establecerá un inventario al imaginarse con todos los posibles detalles la ejecución de los trabajos y la explotación de la obra, se definen a la vez las medidas adecuadas para contrarrestarlos.

No todos los riesgos identificados son relevantes. Una evaluación de los riesgos permitirá limitarse a lo esencial para cada caso. Todos los riesgos que se puedan o deban aceptar como riesgo sin medida para contrarrestarlos, se recogerán en una lista de los *Riesgos aceptados*. Esta lista formará un documento independiente del *Plan de seguridad* ya que, contrariamente al *Plan de seguridad*, la propiedad tiene que tener conocimiento de los riesgos aceptados: en la mayoría de los casos, los motivos para aceptar ciertos riesgos son económicos; los subsiguientes beneficios corresponden a la propiedad, por lo que se debe hacer cargo –mediante su firma– del riesgo financiero inherente. Evidentemente, en la lista de los riesgos aceptados no se puede incluir ninguno que ponga en peligro la vida de los usuarios o de terceras personas.

Junto al *Plan de utilización*, el *Plan de seguridad* forma la base para el proceso de construcción. De él se derivan los otros documentos de organización según los que se rigen todas las actividades de dicho proceso, en particular el *Plan de control* y el *Plan de explotación, inspección y mantenimiento* (Figura 3).

3.4.4 Otros documentos de organización

Plan de control

En el *Plan de control* se definen todos los

controles, ensayos, etc., que se deben efectuar durante todas las fases de un proyecto, incluyendo el dimensionamiento, la ejecución y la puesta en servicio (Figura 4). A través de los controles se asegurará que las medidas para contrarrestar los riesgos a los que está expuesta la estructura, y que están definidas en el *Plan de seguridad*, se pongan correctamente en práctica. El *Plan de control* también establece las medidas a tomar en los casos en los que no se cumpla alguna de las exigencias establecidas en el *Plan de seguridad.*

El *Plan de control* constituye un documento independiente del *Plan de seguridad* ya que el destinatario principal no es el mismo. Su elaboración es de la responsabilidad del ingeniero autor del proyecto.

Plan de explotación, inspección y mantenimiento

Con ocasión de la entrega de la obra terminada a la propiedad, se le transmiten unas directrices relativas a su explotación, basadas en los *Planes de utilización y de seguridad* (Figura 4). Su función consiste en evitar que un uso no previsto en el Plan de utilización ponga en peligro la seguridad de los usuarios o de terceras personas. Las directrices para la explotación tienen una especial importancia en los casos de un posible cambio de utilización (como lo demuestra por ejemplo el caso del accidente de Seúl; 2.1) o de la propiedad.

Para alcanzar el período de servicio previsto se debe poner en práctica un programa de inspección y mantenimiento (Figura 4). Este programa se basa en los Planes de utilización y de seguridad, en el documento de los riesgos aceptados, y dependerá también de diferentes hipótesis adoptadas en el marco del dimensionamiento estructural, así como de las directrices de explotación (Figura 3).

Las directrices de explotación y el programa de inspección y mantenimiento serán recogidos en el *Plan de explotación, inspección y mantenimiento*. Este plan será elaborado por el autor del proyecto y se dirige a la propiedad.

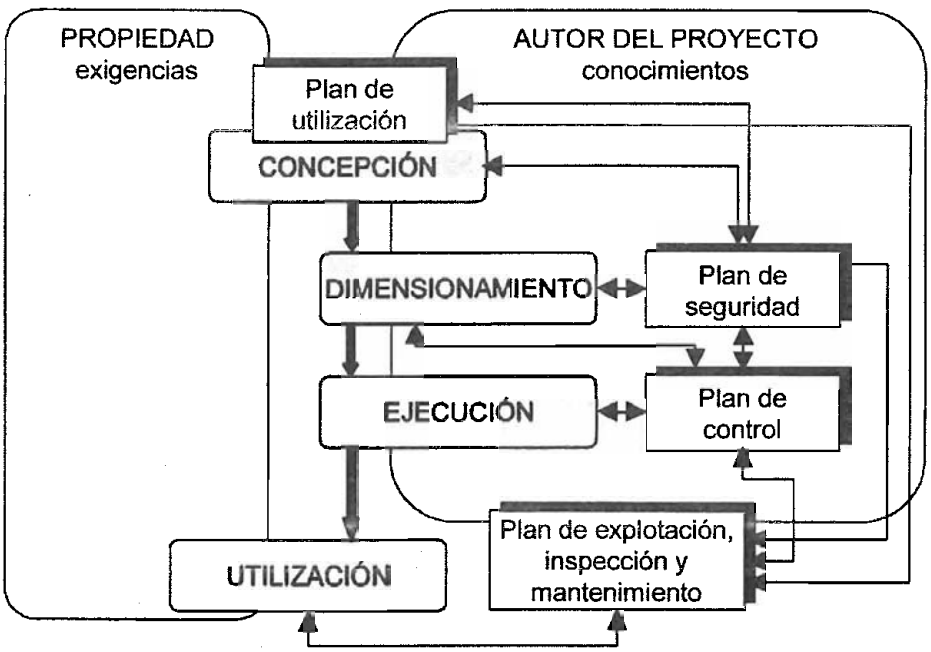

Fig. 3. Representación esquemática de las actividades de un proyecto y de los documentos de organización (adaptado de [9]).

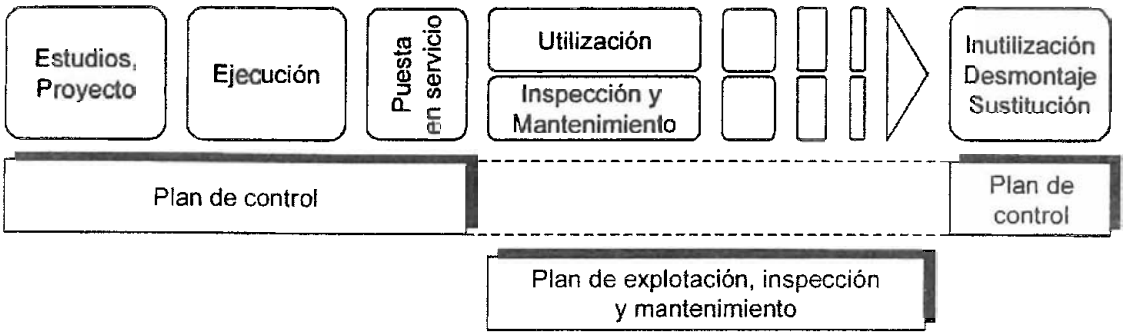

Fig. 4. Desarrollo de las operaciones de control, inspección y mantenimiento.

4. ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

4.1. Concepto

Existen dos diferentes percepciones del concepto del aseguramiento de la calidad. La primera se basa en la idea de que la *calidad* se puede entender como complemento de la *falta de calidad*, es decir el complemento de desperfecto o daño que básicamente se deben a errores de personas involucradas en el proceso de la construcción. En este sentido, el aseguramiento de la calidad tiene como *objetivo que todas las actividades que influyen en la calidad de una obra* [10]:

- estén basadas en exigencias básicas, claramente definidas, en relación con las condiciones de utilización y del medio ambiente.
- Se lleven correctamente a cabo por personal competente y adecuadamente formado, de acuerdo con los programas y planes previamente establecidos y con responsabilidades claramente definidas.
- Estén adecuadamente documentadas.

Esta definición contrasta con la otra percepción del concepto del aseguramiento de la calidad, introducida en el contexto de la construcción de las centrales nucleares. El *Committee on Nuclear Quality Assurance* de la *American Society of Mechanical Engineers* definió el aseguramiento de la calidad como [1] *...todas aquellas actividades planificadas y sistemáticas que sean necesarias para proporcionar una confianza adecuada que un producto o un servicio cumpla con las exigencias establecidas.* Obviamente, esta definición no busca la calidad propiamente dicha, sino únicamente la confianza de que se alcance esta calidad. Proporcionar confianza implica proporcionar una demostración, lo cual a su vez implica mucho papeleo. La percepción del concepto según esta segunda definición, con la cual muchos ingenieros se muestran comprensivos, es más bien formal, por lo que está estrechamente relacionada con formularios, sellos y firmas [1]. Parece obvio que proporcionar confianza en algo no es suficiente: lo que se debe proporcionar es calidad. Se trata básicamente de una cuestión de contenido frente a forma, y lo que aquí importa es claramente el contenido, no la forma.

Definiciones muy parecidas a esta segunda definición del aseguramiento de la calidad están detrás de *ISO 9000* [1]. Esta serie de normas se ha desarrollado para la fabricación en masa de productos o servicios, por lo que pueden resultar poco adecuadas para asegurar la calidad en la industria de la construcción, tal y como apuntan diferentes autores [11, 12].

Si se requiere calidad, ésta se debe cuantificar de una forma u otra. Como ya se ha mencionado, la manera más adecuada consiste en medir la calidad como complemento de desperfectos o daños: cuanto menos haya que invertir en reparaciones de desperfectos y daños, mejor es la calidad. El objetivo del aseguramiento de la calidad consiste en mantener –con un coste razonable– la *falta de calidad* (desperfectos o daños) dentro de unos límites aceptables. Las cuestiones son ahora [1]: ¿Cómo se puede conseguir este objetivo? ¿Dónde atacar el problema? ¿Quién debe hacerlo?

4.2 Un cambio de actitud

Tradicionalmente se controla lo que resulte fácil de controlar: números, la conformidad con normas y recomendaciones, la resistencia de millones de probetas de hormigón, las firmas en los planos, etc. A través de un uso irreflexivo y poco adecuado, la eficacia de la herramienta *control* se está desgastando. Se ha convertido en un asunto burocrático, un formalismo que resulta contraproducente para la iniciativa de los ingenieros. Llegado a este punto, lo que se requiere es un cambio de actitud. En [1, 4], se proponen cuatro palabras clave en las que se puede orientar un enfoque nuevo para el aseguramiento de la calidad en la industria de la construcción:

Motivación

Es necesario motivar más y mejor a todos los implicados en los procesos de planificación y construcción. Eso se puede conseguir, por ejemplo, a través de una mayor libertad de acción individual. Esta libertad deberá naturalmente ajustarse a un área de responsabilidad claramente definida. Para la motivación de las personas también resulta primordial el reconocimiento de sus méritos. En este sentido, la tradicional tendencia hacia ciertos cultos a la persona no es de gran ayuda: los éxitos se deben a la iluminación del jefe, mientras que los fracasos se deben a la incompetencia de su equipo... parece ser el lema.

Simplificación

Se deben evitar conceptos estructurales, sistemas, geometrías, métodos de verificación, etc. que sean susceptibles de conducir a errores. También en el campo de la organización de los trabajos se deben introducir cambios en el sentido de una simplificación de los esquemas de organización: no es el organigrama quien debe mandar, sino las personas [13].

Relajación

Restricciones innecesarias en relación con los programas y plazos de ejecución, así como los presupuestos se deben evitar, o al menos reducir. La planificación de una obra requiere tiempo: en las fases tempranas del proceso se cometen los errores cuyas consecuencias suelen ser las más graves. También la tendencia de la propiedad de adjudicar los trabajos en función de la oferta más barata conduce a restricciones que ciertamente no favorecen la calidad.

Control

Controles resultan evidentemente necesarios. Pero para que los controles sean eficaces, debemos aprender a aplicarlos de manera inteligente y estratégica.

4.3 ¿Una nueva carga para la industria de la construcción?

Entre los ingenieros está bastante extendida la opinión de que el aseguramiento de la calidad constituye únicamente una nueva carga para la industria de la construcción, ya que cuesta demasiado y que su eficacia es dudosa. Esta opinión puede estar acertada si el aseguramiento de la calidad se lleva a cabo de manera burocrática (4.2). Si al contrario las medidas del aseguramiento de la calidad se ajustan a las características del proceso de construcción, esta opinión sin duda resulta errónea, tal y como lo demuestra la siguiente reflexión [1].

El arreglo de desperfectos y daños y la eliminación de errores absorbe cada año entre el 5 y el 10% de la inversión total en la construcción [14]. Las consideraciones que siguen están basadas en la hipótesis de un 5% para el coste por falta de calidad. Investigaciones demuestran que aproximadamente el 35% de los gastos originados por falta de calidad podrían evitarse sin ninguna actividad adicional excepto la prestación de la atención adecuada por parte de la siguiente persona involucrada en los procesos de proyecto o ejecución [1], es decir, a través de una buena cooperación. El 15%, aproximadamente, de los gastos por falta de calidad se pueden clasificar como prácticamente inevitables. El 50% restante de los errores que conducen a desperfectos y daños podrían detectarse a través de medidas adicionales.

Por otra parte, el análisis de 800 fallos estructurales (2.2) puso de manifiesto que el 60% de los costes por falta de calidad son evitables. El 60% del 5%, correspondiente

al coste total por falta de calidad, resulta en un 3% del coste total de una obra que podría ahorrarse solamente a través de una aplicación consciente de las medidas del aseguramiento de la calidad, así como una atención adecuada por parte de las personas involucradas en los procesos de la construcción.

Si se amplía un equipo de 7 personas dedicadas a la elaboración de un proyecto a un equipo de 8 personas, se puede esperar una mejora de la calidad. Una persona adicional incrementa el coste relacionado con el equipo en un 15%. Asumiendo que el coste de un proyecto (definición, dimensionamiento, administración de la ejecución) se sitúe en el entorno del 10% del coste total de una obra, la persona adicional mencionada incrementaría el coste total en, aproximadamente, el 15% del 10%, es decir, el 1,5%.

Una reflexión análoga se puede llevar a cabo para la ejecución. Añadiendo en la obra a un equipo de 25 personas una persona adicional contribuye a mejorar la calidad. Esta persona adicional incrementaría el coste de la mano de obra en un 4%. La mano de obra, por otra parte, supone aproximadamente el 40% del coste total de una obra, por lo que el refuerzo mencionado del equipo resultaría en un incremento del coste total de 1,5% (4% del 40%).

Una persona adicional por cada 7 involucradas en la planificación y una persona adicional por cada 25 en la ejecución tienen un coste del 3%, aproximadamente, del coste total de una obra. Eso corresponde exactamente al beneficio económico, previamente estimado, de una aplicación consciente de las medidas del aseguramiento de la calidad. En este cálculo no están incluidos los beneficios adicionales debidos a una relajación de las tensiones a todos los niveles, lo que a su vez puede conducir a una reducción adicional de las fuentes de error.

Las reflexiones anteriores demuestran que no solamente es de sentido común emplear personal para tareas de aseguramiento de la calidad, sino también resulta que esta inversión no constituye una carga adicional para la industria de la construcción. Al contrario, en muchos casos puede incluso contribuir a ahorrar dinero [4]. A la misma conclusión llegan también otros autores [15]. Basándose en la norma ISO correspondiente [16], el coste de la calidad se compone de los costes de prevención, control y del daño. La Figura 5 representa esquemáticamente estos costes en términos de su porcentaje del coste total de la obra, en función del porcentaje de las obras sin desperfecto alguno. Obviamente no es posible que todas las obras estén en esta categoría, pero tam-

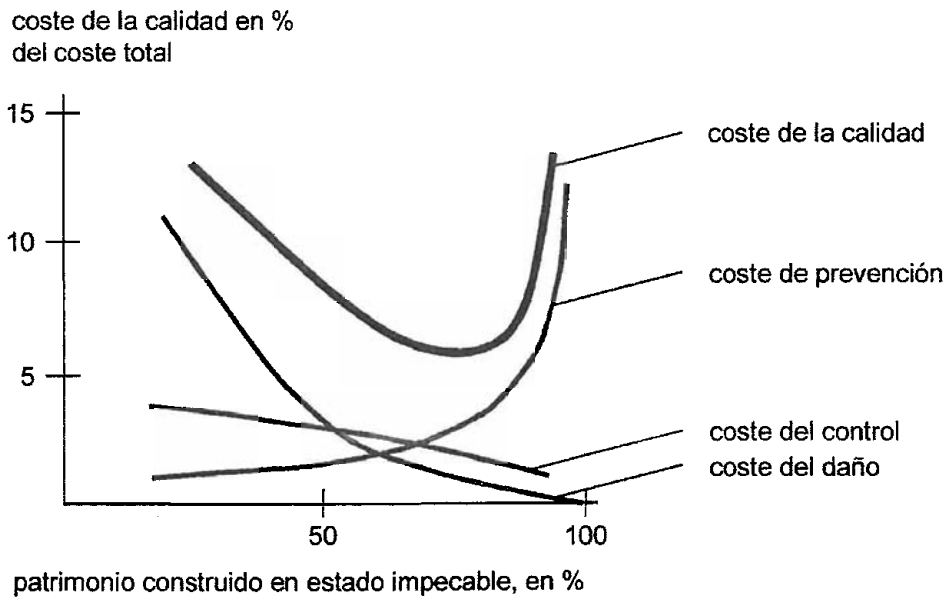

Fig. 5. Representación esquemática del coste de la calidad (según [15]).

bién resulta intuitivo que debe existir un óptimo para el que el coste de la calidad es mínimo. No está claro dónde se sitúa este óptimo. Los valores numéricos de la Figura 5 corresponden únicamente a estimaciones.

5. CONCLUSIONES

Se conoce desde hace tiempo el papel decisivo que desempeñan los errores humanos en el contexto de los desperfectos y daños en estructuras [17]. La probabilidad de fallo de sistemas técnicos en general, y de estructuras en particular, p_f, depende en gran medida de la probabilidad de que se hayan cometido errores groseros, p_{gr}. Por regla general, esta probabilidad es sensiblemente superior (por ejemplo 10 a 100 veces [18]) a la probabilidad teórica de fallo, p_{tf}, que representa la probabilidad que normalmente se determina aplicando métodos probabilistas de cálculo. Consecuentemente, se puede escribir:

$$p_f = p_{gr} + p_{tf} \approx p_{gr} \qquad (3)$$

Consecuentemente, la probabilidad teórica de fallo, p_{tf}, se presta para resolver cuestiones racionales en un entorno racional [4]. Por otro lado, la importancia relativa de la probabilidad de que se hayan cometido errores groseros, p_{gr}, apunta a que las medidas más eficaces destinadas a evitar desperfectos y daños son aquéllas que se traducen en estrategias que permitan evitar errores humanos.

Para poder reducir riesgos es imprescindible, en primer lugar, ser consciente de ellos. El tratamiento racional de los riesgos a través de la introducción de un orden lógico en las actividades relacionadas con la planificación, concepción, dimensionamiento, ejecución, control de calidad, utilización, inspección y el mantenimiento de las estructuras contribuye de manera decisiva a reducir los riesgos en el sector de la construcción.

AGRADECIMIENTOS

Parte del trabajo presentado se ha llevado a cabo en el marco de la elaboración de un Pliego de condiciones generales para obras de hormigón de aplicación en obras marítimas e instalaciones portuarias, promocionado por Puertos del Estado del Ministerio de Fomento.

BIBLIOGRAFÍA

1. Schneider, J. Introduction to safety and reliability of structures. Structural Engineering Documents, n.° 5. International Association for Bridge and Structural Engineering IABSE, Zürich, 1997.

2. Starr, C. Social benefit versus technological risk. *Science,* Vol. 165, n.° 19, 1969, p. 1.232.

3. Ein Brückeneinsturz in Seul / Korea. Stahlbau, Berlín, Vol. 64, Heft 1, 1995, p. 24-25.

4. Schneider, J. Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen - Grundwissen für Ingenieure. Verlag der Fachvereine AG, Zürich und Teubner Verlag, Stuttgart, 1994. ISBN 3-519-05040-4 (Teubner).

5. Tanner, P. Los materiales también se cansan. La fatiga en los puentes mixtos. En: Puentes mixtos. Estado actual de su tecnología y análisis (Martínez Calzón, Ed.), Madrid, 1996, p. 515-542.

6. Matousek, M. und Schneider, J. Untersuchungen zur Struktur des Sicherheitsproblems bei Bauwerken. Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, Bericht n.° 59, ETH Zürich, 1976.

7. Zwicky, F. Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild. Baeschlin Verlag, Glarus, 1989 (2. Auflage).

8. SIA Norm 160. Einwirkungen auf Tragwerke. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, SIA, Zürich, 1989.

9. Hirt, M.A. et Bez, R. Construction métallique - Notions fondamentales et méthodes de dimensionnement. Traité de Génie Civil, Vol. 10, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1994, ISBN 2-88074-249-8.

10. IABSE. Quality assurance within the building process. Proceedings: Workshop

Rigi 1983, International Association for Bridge and Structural Engineering IABSE, Report n.° 47, Zürich, 1983.

11. Jensen, T. ISO 9000 in Consulting Engineering. Structural Engineering International (SEI), Volume 4, n.° 1, International Association for Bridge and Structural Engineering IABSE, Zürich, 1994.

12. Tang, S.L., et al. ISO 9001, The Hong Kong Experience for Engineering Firms. Structural Engineering International (SEI), Volume 7, n.° 1, IABSE Zürich, 1997.

13. Knoll, F. Checking Techniques. In: Modelling Human Error in Structural Design and Construction (Nowak, Ed.), 1986.

14. Gorisse, F. et Declerck, R. Gestion de la qualité dans l'entreprise - Application au chantier. In: Volume 1 of the Proceedings of the 4th European Congress on Construction Quality Management, Brussels, 1985.

15. van den Beukel, N.L. Quality cost. In: United Nations, Economic and Social Council, Committee on Housing, Building and Planning, Working Party on Building, Report 227, 1989.

16. ISO 8402. Qualität - Begriffe. ISO, 1988.

17. Knoll, F. Grundsätzliches zur Sicherheit der Tragwerke. Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik, Heft 4, 1961.

18. Ditlevsen, O. Formal and real structural safety - the influence of gross errors. IABSE Periodica, Proceedings P-36/80, International Association for Bridge and Structural Engineering IABSE, Zürich, 1980.

RESUMEN

Proyectar y construir estructuras seguras requiere la detección previa de todos los peligros a los que pueden estar expuestas. Para poder luchar de manera eficaz contra estos peligros es necesario conocer su origen. El análisis de un gran número de casos reales demuestra claramente que los errores humanos constituyen la causa principal de los daños estructurales. Estos errores se pueden producir en todas las fases del proceso de la planificación, realización y explotación de una obra, y se deben en gran medida a la ignorancia y la negligencia, a la falta de conocimientos, así como a la infravaloración de influencias por parte de las personas involucradas en los procesos de realización y explotación de una obra. Se presentan posibles estrategias para primero, detectar y, posteriormente, eliminar los riesgos a los que están expuestas las estructuras. A estos efectos se introduce un orden lógico en las actividades relacionadas con la planificación, la ejecución y la explotación de las estructuras, basado en la elaboración de unos documentos de organización. Por último, se analiza el enfoque habitual del aseguramiento de la calidad, destinado a eliminar los errores humanos. Se pone de manifiesto que sólo un cambio de actitud puede evitar que el aseguramiento de la calidad se convierta en un asunto burocrático de dudosa eficacia.

SUMMARY

A safe solution for a structure only can be found if all relevant hazards have been recognised previously. The successful reduction of the harmful effects of hazards requires a careful look at error-prone areas and phases of the building process. The analysis of a large number of failure cases clearly shows that human errors are the main source of damage. These errors, which are mainly due to mistakes, ignorance and negligence, are committed at all stages of the process from the beginning of the planning phase through the execution phase, up to the utilisation and maintenance phases. In the present paper, possible strategies are presented for the recognition of hazards and the subsequent reduction of their effects. For these purposes, some order is introduced into the basis of design, execution, utilisation and maintenance of structures, based on a series of documents, which guide the whole building process. The most common weapon against errors is "checking". The traditional perception of the concept for Quality Assurance, however, clearly leads to an advance of bureaucracy. A new perception of the concept is therefore needed, and Quality Assurance measures should be considered in a way that is thoroughly attuned to the characteristics of the building process.