

Pontificia Universidad Católica del Perú  
Escuela de Graduados



Tesis para optar al grado de Magister en Ingeniería Civil

“Evaluación del riesgo sísmico de edificaciones  
educativas peruanas”

Presentan

María Angela Astorga Mendizábal  
Rafael Aguilar Velez

LIMA - PERÚ  
ABRIL 2006

## AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer de una manera muy especial al ingeniero ALEJANDRO MUÑOZ PELAEZ por su tiempo, consejos, comprensión y apoyo incondicional. Su guía y aporte fueron indispensables para la realización de este trabajo.

Al Dr. Marcial Blondet por su asesoría y consejos. Él es un modelo de persona y profesional a seguir. Al ingeniero Daniel Quiun por brindarnos las facilidades necesarias y por su apoyo constante.

Al ingeniero Marcos Tinman en representación de la empresa Prisma Ingenieros. Trabajar junto a él y sus socios día a día enriquece nuestra experiencia profesional.

A todas las personas que hicieron valiosos aportes en este trabajo: Prof. Carlos Véliz (PUCP), Dr. Mario Ordaz (UNAM), Dr. Hernán Tavera (IGP) y a los expertos encuestados de diferentes instituciones a nivel nacional.



DEDICATORIA

*Dedico este trabajo, como todo lo  
que hago, a toda mi familia. Su amor  
incondicional y apoyo impulsa mi vida.  
Sin cada uno de ustedes nada  
hubiera sido posible.*

*A la memoria de las personas que se  
fueron pero que vivirán siempre en mi  
corazón.*

*Maria Angela*



### DEDICATORIA

*A mis padres, ellos me han enseñado el valor de la vida. Para mí son un modelo de vida y un modelo de profesionales.*

*A mis hermanas que son modelos que siempre querré superar.*

*A toda mi familia, que siempre confía en mí. Una vez más los sueños se vienen cumpliendo...*

*Rafael*

## RESÚMEN

En este trabajo se desarrollaron herramientas para estimar el desempeño sismorresistente y para cuantificar pérdidas en edificios educativos peruanos. Se identificaron cinco tipos estructurales como los más representativos. Un tipo corresponde a los edificios de adobe, tres tipos a los edificios de concreto y albañilería construidos antes de 1997 y un tipo a los edificios de concreto y albañilería muy robustos que se empezaron a construir después de 1997 y que representan el 2% del total de edificaciones. Para estimar pérdidas se construyeron funciones de distribución de daño para diferentes escenarios de sismicidad en base a las cuales se obtuvieron curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño.

En el país no existe información estadística sobre los daños de edificios escolares afectados por terremotos, ni tampoco sobre sus características estructurales. Por este motivo, se recurrió a la opinión de expertos en ingeniería estructural para estimar el comportamiento esperado. Para la presentación del tema y la recolección de información se empleó el método Delphi.

Los resultados indican que los edificios de adobe quedarían irreparables (daño mayor a 60%) para eventos con intensidades de VII MM o más. Para los edificios de concreto-albañilería construidos antes de 1997 y para los de reciente construcción se encontró que el daño irreparable se alcanzaría desde intensidades de IX MM y X MM respectivamente.

Se estudió el desempeño de los edificios ubicados en las zonas de mayor sismicidad en sismos frecuentes (50 años de periodo de retorno y 0.2g de aceleración pico del suelo) y en eventos mayores (500 años de periodo de retorno y 0.4g de aceleración pico). Los resultados indican que en sismos frecuentes los edificios de concreto-albañilería construidos después de 1997, tendrían daños menores al 5% y en sismos severos alcanzarían 40% de daño. Para los edificios de concreto-albañilería anteriores a 1997 y para los edificios de adobe los daños serían importantes en sismos frecuentes (20% y 45% respectivamente) y en sismos severos ambos tipos de edificios quedarían irreparables (65% y 95% de daño).

Para completar el desarrollo de un plan nacional de protección de la infraestructura educativa es necesario que el estado compile y organice la información necesaria para lograr una representación cuantitativa de la distribución geográfica y de las condiciones locales de la infraestructura educativa. En paralelo al desarrollo de este plan es necesario organizar programas de reducción de vulnerabilidad de bajo costo para las edificaciones en mayor riesgo.



# Evaluación del Riesgo Sísmico de Edificaciones Educativas Peruanas

Índice	2
<b>1. <u>Introducción</u></b>	<b>5</b>
1.1. Objetivo	6
1.2. Metodología de trabajo	6
1.3. Organización del documento	6
<b>2. <u>Los Sistemas Estructurales de la Infraestructura Educativa Peruana</u></b>	<b>8</b>
2.1. Los centros educativos en el país	8
2.2. Tipos de edificios educativos	8
2.2.1. Edificio 780 actual	9
2.2.2. Edificio 780 pre NDSR-1997	12
2.2.3. Edificio Gran Unidad Escolar	15
2.2.4. Edificio Adobe	17
2.2.5. Edificio de Educación Superior pre NDSR-1997	20
2.3. Distribución de la Infraestructura existente	22
2.3.1. Fuentes de información disponible	22
2.3.2. Distribución geográfica de la Infraestructura Educativa existente	22
2.3.3. Propuesta para la organización de la información	24
<b>3. <u>Estimación de Pérdidas por Sismo en Edificaciones</u></b>	<b>26</b>
3.1. Daño e intensidad	26
Factor de Daño (FD)	27
Intensidad	27
Distribución del daño	28



3.2.Representación de la relación intensidad-daño	29
Curvas de Fragilidad	29
Matrices de probabilidad de daño	30
3.3.Curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño	31
Obtención de Curvas de Fragilidad	31
Obtención de matrices de probabilidad de daño	34
3.4.Estimación de pérdidas por sismo	35
Cálculo del valor de la pérdida probable	38
3.5.Metodologías para obtener relaciones intensidad-daño	40
<b>4. <u>Método Delphi</u></b>	<b>42</b>
4.1.Historia del método Delphi	43
4.2.Características Generales	45
4.3.Recolección y síntesis de la información en el método Delphi	46
4.3.1. Grupo monitor	47
4.3.2. Formación del panel de expertos	47
4.3.3. Preparación del cuestionario	48
4.3.4. Envío de la información al panel de expertos	49
4.3.5. Análisis de las respuestas al cuestionario	49
4.3.6. Publicación de la información recolectada	50
<b>5. <u>Pérdidas por sismo en edificaciones educativas</u></b>	<b>51</b>
5.1.El método Delphi para obtener la opinión de expertos sobre los edificios educativos	51
5.1.1. La encuesta	51
5.1.2. Grupo de expertos	54
Interacción con el Grupo de Expertos	55
5.2.Desarrollo del modelo para la estimación de pérdidas	56
5.2.1. Modelo de distribución de Probabilidades	56
Distribución Beta	57
5.2.2. Obtención de la función de distribución de probabilidades	57
5.2.3. Obtención de curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño	59



5.3.Relación Intensidad daño y cálculo de pérdidas	60
5.3.1. Curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño	60
5.3.2. Daño irreparable y pérdidas en sismos raros y frecuentes	66
5.3.3. Pérdidas en sismos	68
<b>6. <u>Conclusiones y recomendaciones</u></b>	<b>70</b>
<b><u>Referencias</u></b>	<b>73</b>
<b><u>Bibliografía adicional</u></b>	<b>73</b>
<b><u>Anexos</u></b>	
Anexo 1: Pagina Web del Desempeño Sismorresistente de Edificaciones Peruanas	75
Anexo 2: Síntesis de las estimaciones de expertos sobre el daño esperado en la infraestructura educativa	80
Anexo 3: Parámetros $\lambda$ , $\nu$ que definen las funciones de distribución del daño	81
Anexo 4: Programa de cómputo desarrollado	82
Anexo 5: Panel de expertos y grupo monitor	86





# 1. Introducción

Actualmente en el Perú existen aproximadamente 41000 centros educativos públicos construidos en diferentes épocas, con diferente arquitectura y materiales.

La mayoría de las edificaciones educativas son vulnerables a los terremotos debido a que fueron construidas en décadas en que los códigos de construcción no consideraban de manera decidida la protección contra terremotos. Después de cada terremoto los edificios educativos peruanos quedan seriamente dañados en la zona epicentral y el estado tiene que invertir importantes sumas en recuperar la infraestructura de la zona.

En el Perú, después de un terremoto sólo los edificios dañados se refuerzan además de reparar sus daños y mejorar sus instalaciones. De este modo, el estado se ve obligado a invertir tanto en el reforzamiento como en la reparación de cada edificio que interviene. Sin embargo, si se pudieran reforzar los edificios vulnerables con la debida anticipación, los gastos de reparación post sismo, podrían eliminarse o reducirse significativamente. Por lo tanto, es necesario desarrollar un plan nacional de protección sísmica de la infraestructura educativa con el fin de racionalizar el uso de los recursos por parte del estado.

Para elaborar un plan de protección sísmica, se necesita identificar los sistemas estructurales más importantes, conocer la distribución geográfica de las edificaciones, disponer de herramientas para cuantificar el peligro sísmico y estimar la vulnerabilidad de grupos de edificaciones

A la comunidad de ingenieros e investigadores universitarios le corresponde la tarea de identificar los sistemas estructurales y desarrollar las herramientas para el análisis del peligro y estimación del riesgo del conjunto de edificios. Los organismos del estado deben a su vez organizar la información relativa a la distribución geográfica y a las características particulares de los edificios educativos en el territorio nacional.



## 1.1. Objetivo

El objetivo de este trabajo es identificar los principales sistemas estructurales de las edificaciones educativas peruanas, desarrollar las herramientas para estimar las pérdidas y cuantificar su desempeño en diferentes escenarios de sismicidad.

El trabajo se desarrolló para los edificios escolares públicos que son los más numerosos y los que requieren directa atención del gobierno; sin embargo, buena parte del trabajo es de aplicación directa a los centros escolares privados.

## 1.2. Metodología de trabajo

Para identificar los principales sistemas estructurales se acudió al Instituto Nacional de Infraestructura Educativa y Salud (INFES). Se recopiló información respecto a la arquitectura y estructura de las edificaciones educativas peruanas y se identificaron 5 sistemas estructurales como los más representativos en número.

En el país no existe información estadística sobre los daños de edificios educativos afectados por terremotos, ni tampoco sobre sus características estructurales. Por este motivo, se recurrió a la opinión de expertos en ingeniería para estimar el comportamiento sísmico esperado de estas edificaciones. Para la presentación del tema y la recolección de información se empleó el método Delphi con la ayuda de la página web desarrollada para este propósito: <http://www.pucp.edu.pe/secc/civil/dsrep/>.

Las estimaciones obtenidas de los expertos sirvieron para construir funciones de densidad de probabilidad en base a las cuales se obtuvieron curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño para cada tipo de edificio considerado. Usando estas herramientas se determinó el umbral de daño irreparable y el comportamiento esperado en diferentes escenarios sísmicos.

Los resultados de este trabajo junto a los detalles del proceso seguido se encuentran en la página web desarrollada.

## 1.3. Organización del documento

En el segundo capítulo se presentan los cinco sistemas estructurales más representativos y la distribución geográfica de las edificaciones educativas a nivel nacional según el material de construcción.



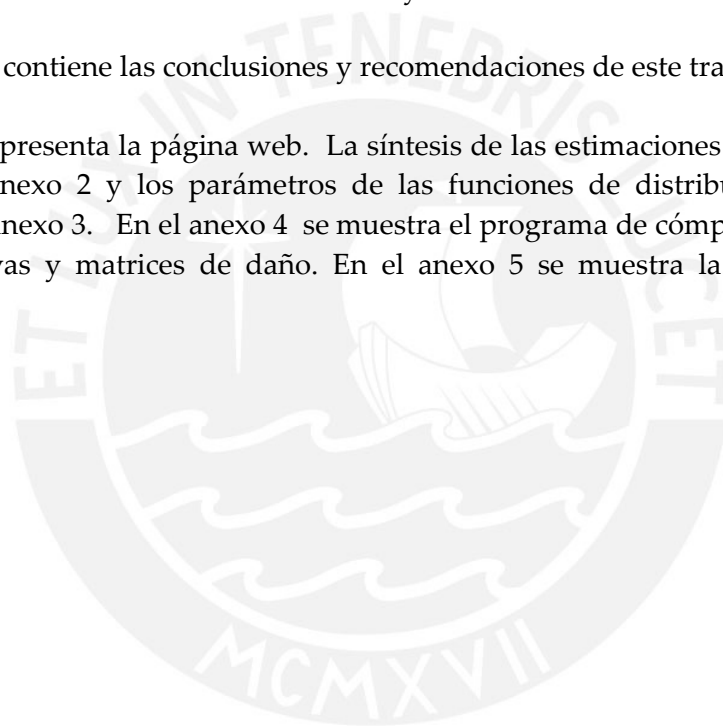
En el tercer capítulo se presenta la metodología general para estimar pérdidas por sismos en términos de probabilidades. Se presentan los procedimientos generales para la obtención de curvas de fragilidad y matrices de daño y se muestra su uso en la estimación de pérdidas.

La metodología empleada para recolectar y sintetizar la opinión de expertos se describe en el cuarto capítulo.

En el quinto capítulo se muestra el procedimiento usado para procesar la información del grupo de expertos junto a los detalles para la construcción de las curvas de fragilidad y las matrices de daño. El capítulo incluye el análisis del desempeño sísmico de los sistemas estructurales desarrollado en base a las curvas y matrices de daño.

El sexto capítulo contiene las conclusiones y recomendaciones de este trabajo.

En el anexo 1 se presenta la página web. La síntesis de las estimaciones de los expertos se muestra en el anexo 2 y los parámetros de las funciones de distribución de daño se presentan en el anexo 3. En el anexo 4 se muestra el programa de cómputo utilizado para generar las curvas y matrices de daño. En el anexo 5 se muestra la lista de expertos encuestados.





## 2. Los Sistemas Estructurales de la Infraestructura Educativa Peruana

### 2.1. Los centros educativos en el país

En el Perú existen centros educativos de nivel inicial, primario, secundario y centros educativos de nivel superior.

Generalmente en las zonas urbanas cada centro educativo primario y secundario está formado por dos o más pabellones de concreto armado o albañilería de uno o dos pisos. Estas edificaciones tienen plantas rectangulares con 2 o más aulas contiguas en cada nivel. Los ambientes para bibliotecas y oficinas administrativas generalmente se alojan también en este tipo de edificios con divisiones de tabiquería. En ciudades importantes en el interior del país existen centros educativos de similares características arquitectónicas pero con edificios construidos en barro, sillar o quincha.

En contraste, en las zonas rurales los centros educativos tienen por lo general un solo pabellón. Son de un piso en adobe o tapial y generalmente fueron construidos sin dirección técnica calificada.

Según el informe del 2003 del Ministerio de Educación (MINEDU, 2003) existen aproximadamente 52000 locales escolares, de los cuales 41000 son públicos y 11000 privados. El sistema educativo en el 2003, sin incluir a las universidades, atendió cerca de 8.6 millones de estudiantes, de los cuales el 83 por ciento se matriculó en centros de educación pública.

### 2.2. Tipos de edificios educativos

Los edificios educativos peruanos se construyen con diferentes materiales, existen edificaciones de concreto armado, albañilería, madera, quincha, adobe, tapial, sillar y hasta construcciones mixtas como las de albañilería de arcilla y sillar o quincha y adobe.

En particular los edificios educativos de concreto armado han ido cambiando tanto arquitectónica como estructuralmente. Así por ejemplo, los edificios actuales tienen un menor número de aulas y ya no cuentan con las columnas exteriores del corredor adyacente al patio (figura 2.1).

En cuanto a los edificios de adobe, tapial, quincha y sillar generalmente se construyen sin dirección técnica calificada, y sólo en los últimos años se han desarrollado técnicas para mejorar su desempeño sismorresistente.



**Figura 2.1** Edificio educativo moderno (izquierda) y gran unidad escolar (derecha)

A pesar de la gran diversidad de edificios educativos fue necesario identificar los tipos más representativos en número con el fin de desarrollar los procedimientos para estimar pérdidas por sismo. Se recurrió al Instituto Nacional de Infraestructura Educativa y de Salud (INFES) encargado de la infraestructura educativa entre los años 1993 y 2003, y se visitaron algunos locales. El INFES, actualmente adscrito al Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, cuenta con los planos de los edificios que construyó o de aquellos que reparó luego de los terremotos de 1996 y 2001.

Los tipos de edificios identificados como más representativos a nivel nacional en base a la información proporcionada por INFES son los 5 siguientes:

- Edificio 780 actual
- Edificio 780 pre NDSR-1997
- Edificio Gran Unidad Escolar
- Edificio Adobe
- Edificio Educación Superior pre NDSR-1997

### 2.2.1. Edificio 780 actual

En 1997 la norma peruana de diseño sismorresistente sufrió una actualización importante que trajo como consecuencia un cambio notorio en el sistema estructural de las edificaciones educativas. El aumento en los requerimientos de rigidez de esta norma ocasionó que en los nuevos edificios se incrementaran las dimensiones de las columnas y

vigas. A partir de 1997 el gobierno empezó a construir edificios educativos significativamente más robustos a los que denominaremos edificio 780 actual.

El edificio 780 actual es un edificio de concreto armado y albañilería que tiene una planta rectangular, con uno a tres niveles y 2 a 5 aulas por piso (figura 2.2). Las aulas son cuadradas de 7.80m de lado aproximadamente. Este edificio también se utiliza para oficinas, bibliotecas y laboratorios con tabiques divisorios.

Las ventanas y puertas se ubican en las fachadas longitudinales, la comunicación se da por un corredor longitudinal y el acceso al segundo y tercer nivel es por una caja de escaleras separada estructuralmente del edificio. Los alfeizares de las ventanas son tabiques separados de las columnas mediante juntas de aproximadamente 1".

El techo del edificio 780 actual en la costa es horizontal (figura 2.2) y en zonas lluviosas inclinado a dos aguas (figura 2.3). En la mayoría de los casos los techos son losas aligeradas.



Figura 2.2 Edificio 780 actual de 3 aulas por piso en la costa peruana





Figura 2.3 Edificio 780 actual de 3 aulas por piso en la sierra peruana

La figura 2.4 muestra un esquema con el sistema estructural del edificio. La losa de techo es una losa aligerada unidireccional de 0.20m de espesor, orientada en el sentido longitudinal de la edificación (X-X en la figura). Esta losa descansa en muros de albañilería confinada de 0.25m de ancho (ejes 1, 3, 5 y 7) y en vigas peraltadas generalmente de 0.30mx0.70m (ejes 2, 4 y 6). Las vigas en el sentido longitudinal (ejes A y B) son de 0.25mx0.55m. Las columnas son rectangulares de 0.25mx0.58m (P-1), 0.25mx0.90m (P-2) y en forma de T de 0.45mx0.90m (P-3), con su mayor dimensión en el sentido longitudinal. El detalle del refuerzo de vigas y columnas se muestra en la figura 2.5 y 2.6 respectivamente.

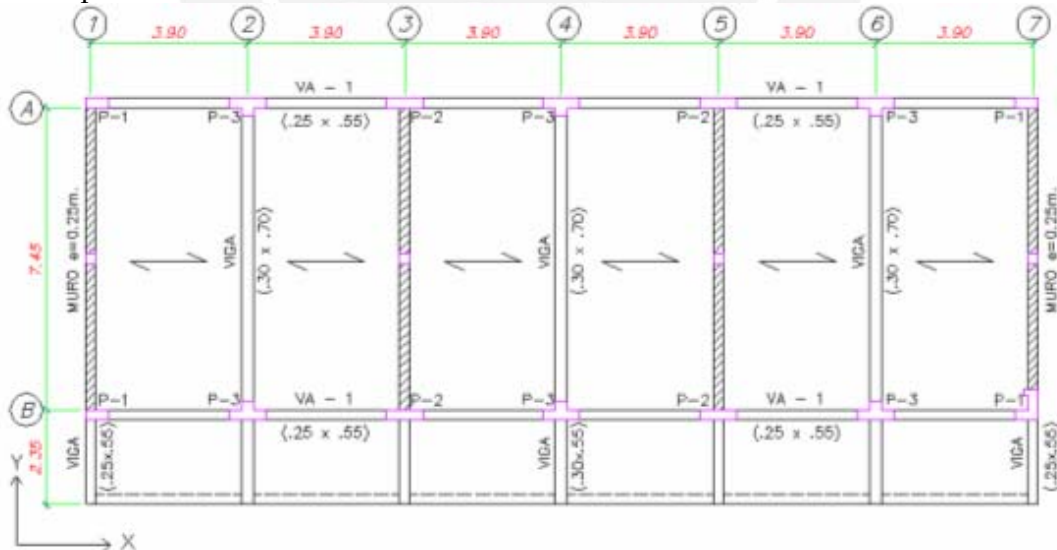


Figura 2.4 Planta del sistema estructural del edificio 780 actual

El sistema sismorresistente en el sentido longitudinal (X-X en la figura 2.4), consiste en 2 pórticos de concreto armado (ejes A y B) con columnas y vigas peraltadas. En el sentido

transversal (Y-Y) el sistema sismorresistente está constituido fundamentalmente por muros de albañilería confinada.

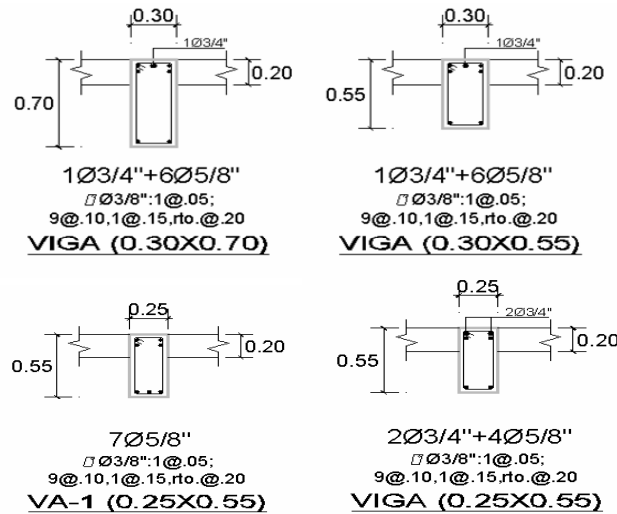


Figura 2.5 Detalle del refuerzo de las vigas (Edificio 780 actual)

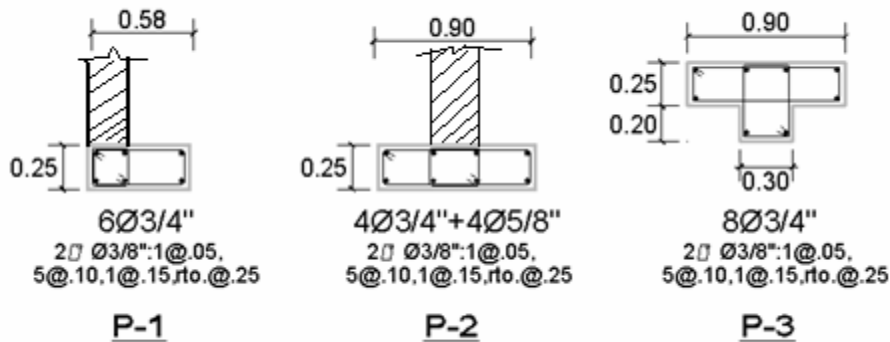


Figura 2.6 Detalle del refuerzo de las columnas (Edificio 780 actual)

Los edificios educativos hechos con la norma sismorresistente peruana de 1997 no reportaron daños después del terremoto de Arequipa (2001).

### 2.2.2. Edificio 780 pre NDSR-1997

Este tipo corresponde a los edificios educativos de concreto armado construidos en las décadas de 1980 y 1990 antes del cambio de la norma de diseño sismorresistente en 1997. También se consideran aquellas edificaciones que aún hoy se construyen empleando proyectos típicos de décadas pasadas.

La arquitectura del edificio 780 pre NDSR-1997 (figura 2.7 y 2.8) es similar a la del edificio 780 actual. Este edificio tiene una planta rectangular de 2 a 5 aulas adyacentes por nivel y



difiere del edificio 780 actual en que solo tiene 1 o 2 niveles, y fundamentalmente en que tiene columnas y vigas de menores dimensiones.



Figura 2.7 Edificio 780 pre NDSR-1997 de 3 aulas por piso en la costa peruana



Figura 2.8 Edificio 780 pre NDSR-1997 de 3 aulas por piso en la sierra peruana

La figura 2.9 muestra un esquema con el sistema estructural del edificio. La losa de techo es una losa aligerada unidireccional de 0.20m de espesor, orientada en el sentido longitudinal de la edificación (X-X en la figura). Esta losa descansa en muros de albañilería confinada de 0.25m de ancho (ejes 1, 3, 5 y 7 de la figura 2.9) y en vigas peraltadas generalmente de 0.30mx0.70m (ejes 2, 4 y 6). Las vigas en el sentido longitudinal (ejes A y B) son de 0.25mx0.40m. Las columnas son de 0.30mx0.40m (C-1) y 0.25mx0.40m(C-2), con su mayor dimensión en el sentido transversal. La figura 2.10 muestra el detalle de refuerzo de las vigas y la figura 2.11 de las columnas.

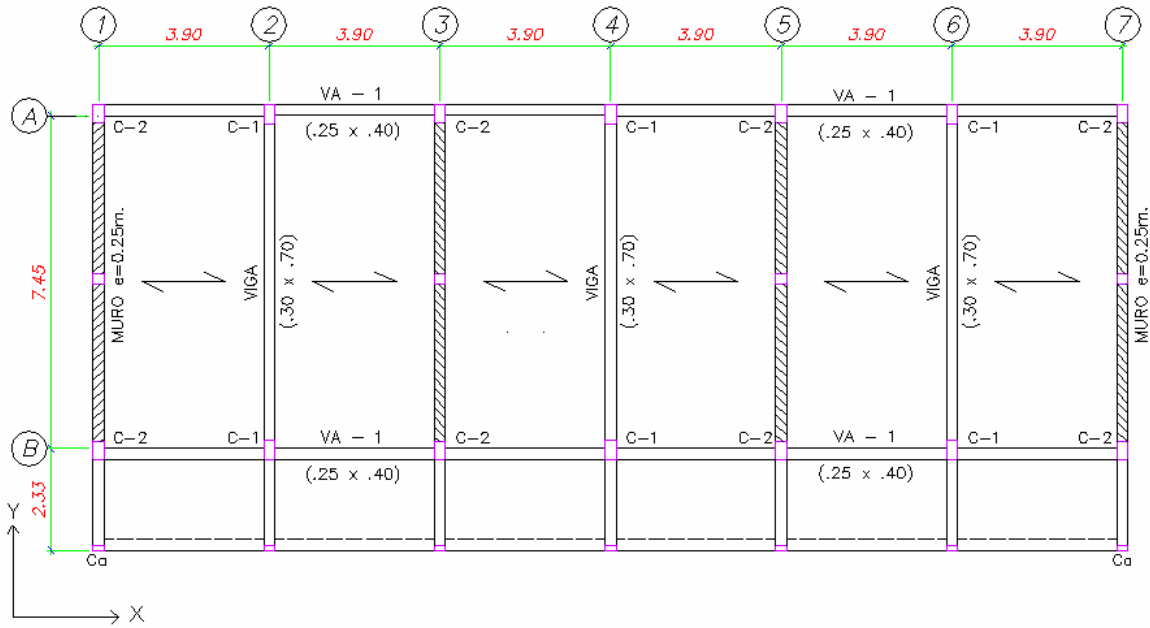


Figura 2.9 Vista en planta del sistema estructural del edificio 780 pre NDSR 1997

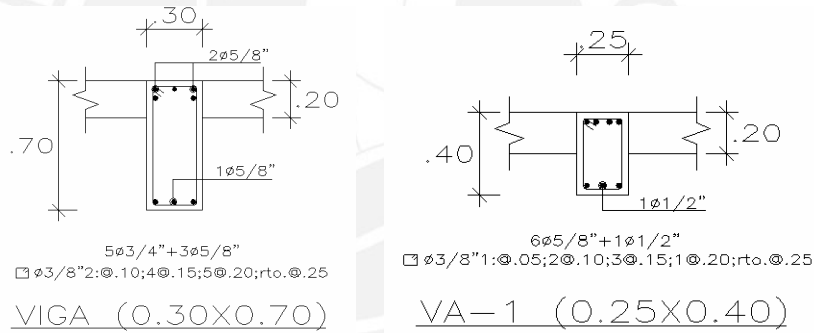


Figura 2.10 Detalle de vigas de concreto armado (Edificio 780 pre NDSR-1997)

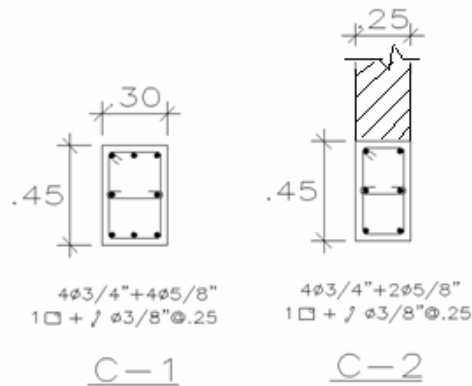


Figura 2.11 Detalle de columnas de concreto reforzado (Edificio 780 pre NDSR-1997)

El sistema sismorresistente en el sentido longitudinal (X-X en la figura 2.9), consiste en 2 pórticos de concreto armado (ejes A y B) con columnas y vigas de poco peralte. En la dirección transversal (Y-Y) el sistema sismorresistente está constituido fundamentalmente por muros de albañilería confinada.

Los edificios de este tipo han sufrido daño en sismos pasados debido al problema de columna corta (figura 2.12). Este problema se ocasiona por la excesiva flexibilidad en el sentido longitudinal y el mal aislamiento de los alfeizares de albañilería.



Figura 2.12 Falla por columna corta en edificios escolares tipo 780 pre NDSR-1997

### 2.2.3. Edificio Gran Unidad Escolar

Las Grandes Unidades Escolares son unas de las edificaciones educativas más antiguas en el Perú, construidas hace aproximadamente 50 años. Se diferencian de los edificios 780 en que las Grandes Unidades fueron hechas para albergar gran cantidad de estudiantes y por lo tanto son mucho más grandes, con más del doble de área en planta.

Estos edificios están hechos de concreto armado y albañilería, tienen una planta rectangular generalmente de dos o tres niveles y 4 a 6 aulas por piso (figura 2.13 y 2.14). Las aulas son rectangulares y presentan grandes dimensiones, generalmente 10.00m de largo por 6.70m de ancho.



Figura 2.13 Edificio Gran Unidad Escolar



Figura 2.14 Edificio Gran Unidad Escolar

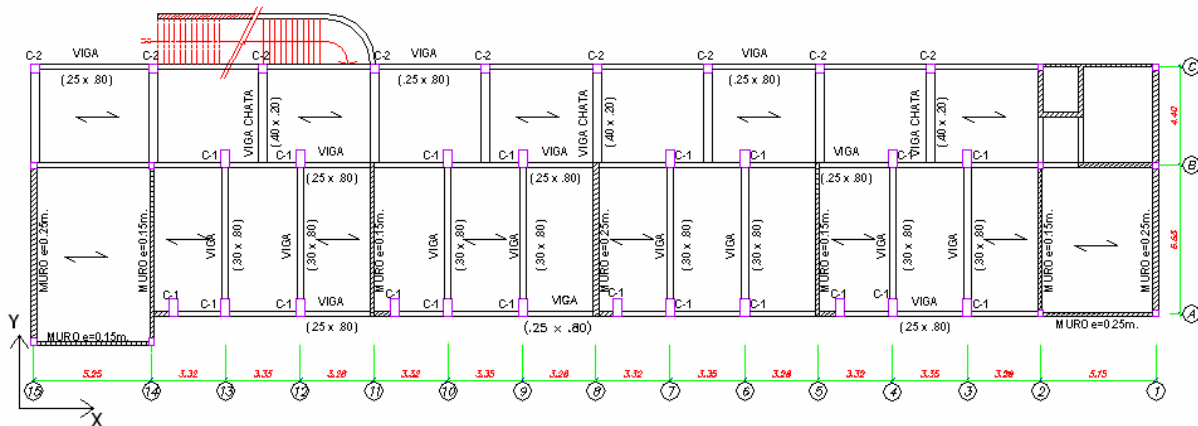


Figura 2.15 Planta del sistema estructural del Edificio Gran Unidad Escolar

La figura 2.15 muestra un esquema con el sistema estructural del edificio. La losa de techo es una losa aligerada unidireccional de 0.20m de espesor, orientada en el sentido



longitudinal de la edificación(X-X en la figura). Esta losa descansa en muros de albañilería confinada de 0.25m de ancho (ejes 1, 2, 5, 8, 11, 14 y 15 de la figura 2.15) y en vigas peraltadas generalmente de 0.30mx0.80m (ejes 3, 4, 6, 7, 9, 10, 12 y 13). Las vigas en el sentido longitudinal (ejes A, B y C) son de 0.25mx0.80m. Las columnas son de 0.40mx0.80m (C-1) con su mayor dimensión en el sentido transversal y de 0.40mx0.40m (C-2).

La figura 2.16 muestra el detalle de refuerzo de las vigas y la figura 2.17 de las columnas. No se muestran los diámetros de las varillas debido a que por la antigüedad de este tipo de edificios no se cuentan con planos donde se muestren los detalles del armado.

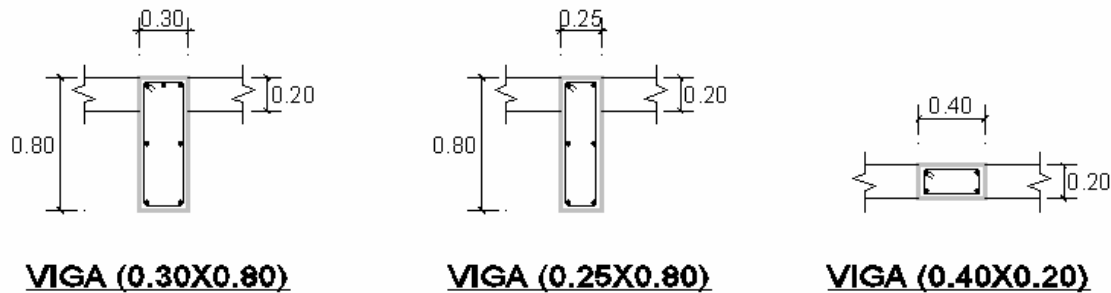


Figura 2.16 Detalle de vigas de concreto armado (Edificio Gran Unidad Escolar)

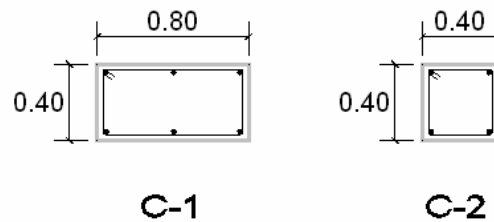


Figura 2.17 Detalle de columnas de concreto armado (Edificio Gran Unidad Escolar)

### 2.2.4. Edificio Adobe

Los edificios de adobe generalmente se construyen por las asociaciones de padres de familia de cada centro educativo, sin planificación ni dirección técnica calificada. Los organismos gubernamentales encargados de la planificación de infraestructura educativa no cuentan con datos exactos sobre el número de estos edificios.

Las edificaciones de adobe tienen una gran variabilidad debido a que se construyen de acuerdo a la inspiración local y a la diferencia de recursos entre comunidades. No se cuentan con planos de módulos prototipos. Sin embargo, para esta investigación, se consideró un edificio característico que tiene una planta rectangular con uno o dos niveles y 2 a 3 aulas por piso (figura 2.18). Las aulas son cuadradas con 7.50m de lado

aproximadamente. Las ventanas y puertas se ubican en las fachadas longitudinales. El techo es inclinado a una o dos aguas con cobertura liviana de calamina o torta de barro con tejas.



Figura 2.18 Edificio de adobe de un piso (Izq). Edificio de adobe de dos pisos (Der)

La figura 2.19 muestra el esquema del sistema estructural. Los muros de adobe son ortogonales entre sí y de 0.40m de espesor. El entrepiso en edificaciones de dos niveles es de madera. La cimentación son cimientos corridos de concreto ciclópeo o de barro con piedra grande.

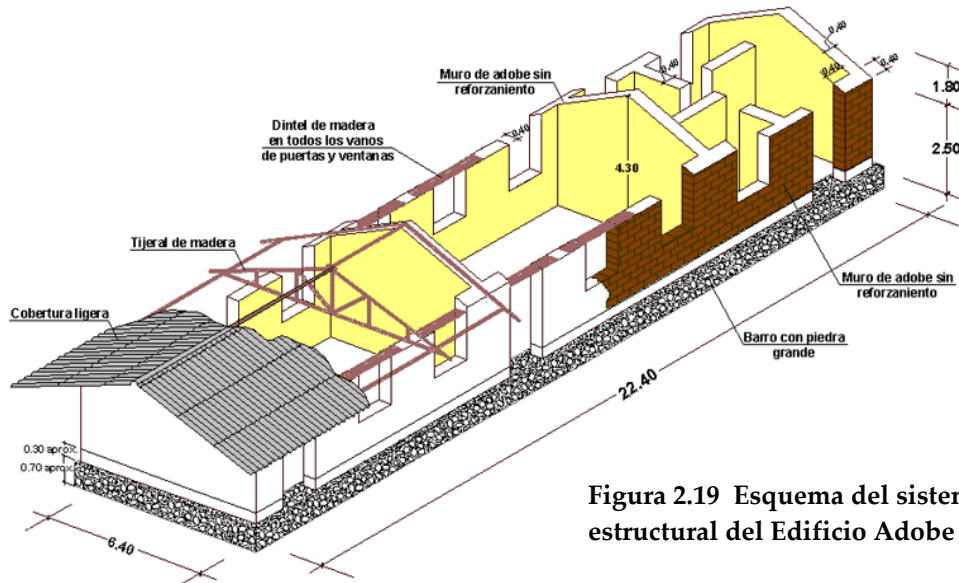


Figura 2.19 Esquema del sistema estructural del Edificio Adobe

Las experiencias en sismos pasados demuestran que las construcciones de adobe sin refuerzo son extremadamente vulnerables. En las figuras 2.20 a 2.22 se muestran las fallas que ocurren en los edificios de adobe luego de la ocurrencia de un sismo. En la figura 2.23 se muestra un colegio de adobe con la fachada colapsada.

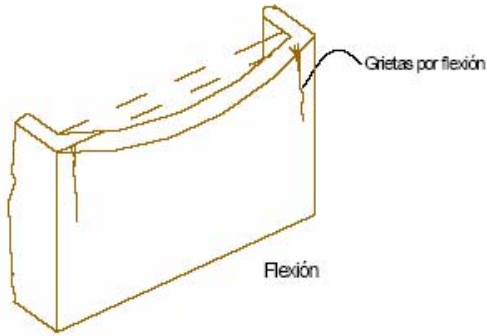


Figura 2.20 Falla por flexión en las esquinas (Izq.) Vivienda con fallas de flexión (Der.)  
(Fuente: A. San Bartolomé)

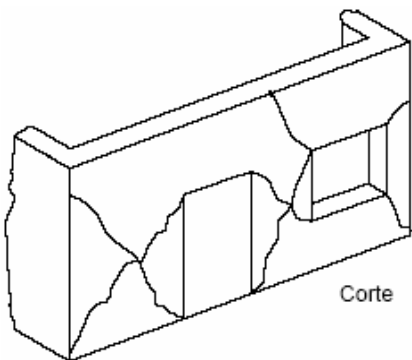


Figura 2.21 Falla por corte (Izq.) Daño registrado en una vivienda (Der.) (Fuente: D. Quiun)

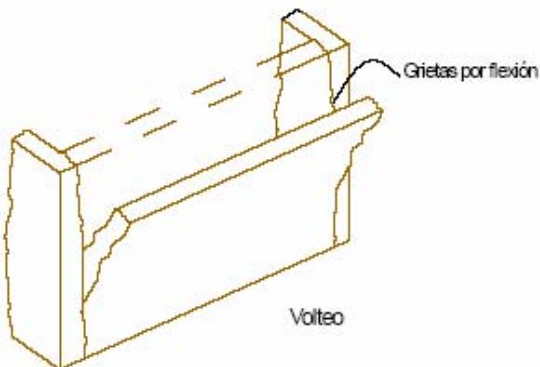


Figura 2.22 Falla por volteo (Izq.) Colapso de un muro por volteo (Der.) (Fuente: D. Quiun)



Figura 2.23 Edificio de adobe colapsado luego de la ocurrencia de un sismo



### 2.2.5. Edificio de Educación Superior pre NDSR-1997

Las edificaciones en los centros de educación superior tienen gran variabilidad en su arquitectura y en su sistema estructural debido a la diferencia de recursos de las instituciones públicas y privadas de educación superior a nivel nacional. Para esta investigación se ha considerado un edificio como característico a nivel nacional.

El edificio característico tiene una planta rectangular de tres a cinco niveles y 5 aulas por piso. Las aulas son rectangulares de 8.00 m de largo por 10.00 m de ancho. La circulación se da por una caja de escaleras ubicada exteriormente y por corredores que permiten el acceso a cada aula. Estos edificios están contruidos con un sistema mixto de albañilería estructural y pórticos de concreto armado (figura 2.24).



Figura 2.24 Edificio de educación superior pre NDSR-1997

La figura 2.25 muestra un esquema con el sistema estructural del edificio. La losa de techo es una losa aligerada unidireccional de 0.20m de espesor, orientada en el sentido longitudinal de la edificación (X-X en la figura). Esta losa descansa en vigas de 0.25mx0.75m y en muros de albañilería confinada. Las vigas en el sentido longitudinal (ejes B, D y E) son de 0.25mx0.40m. Las columnas son de 0.25mx0.90m (C-1) con su mayor dimensión en el sentido transversal y de 0.25mx0.45m (C-2) en el eje B de la edificación. La figura 2.26 muestra el detalle de refuerzo de las vigas y la figura 2.27 de las columnas.



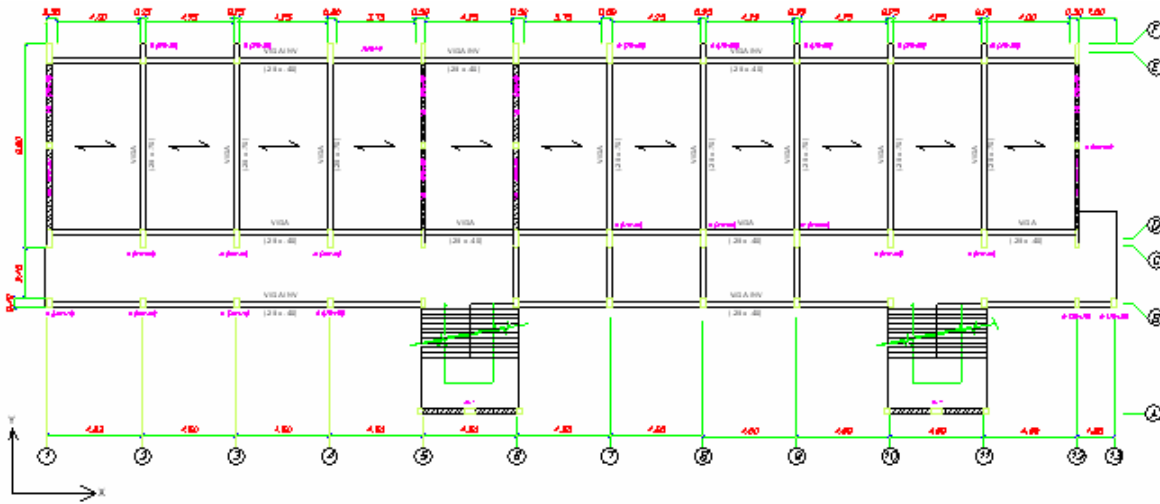


Figura 2.25 Planta del sistema estructural del Edificio de educación superior pre NDSR-1997

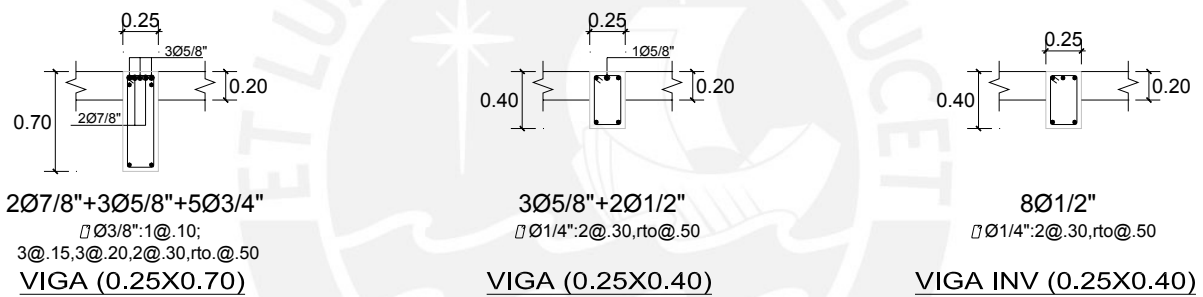


Figura 2.26 Detalle de vigas de concreto armado (Edificio de educación superior pre NDSR-1997)

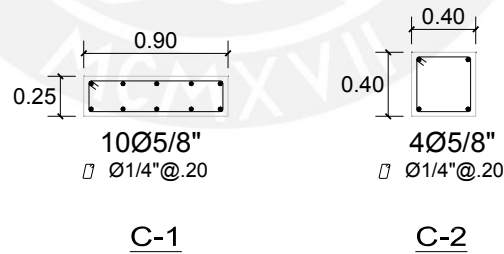


Figura 2.27 Detalle de columnas de concreto armado (Edificio de educación superior pre NDSR-1997)

El sistema sismorresistente en el sentido longitudinal (X-X en la figura 2.25), consiste en 3 pórticos de concreto armado (ejes E, D y B) con columnas y vigas de poco peralte. En la dirección transversal (Y-Y) el sistema sismorresistente está constituido fundamentalmente por pórticos de concreto armado en el interior y muros de albañilería confinada en el exterior.

## 2.3. Distribución de la Infraestructura existente

### 2.3.1. Fuentes de información disponible

El Instituto Nacional de Infraestructura Educativa y Salud (INFES) tuvo un papel importante en la planificación y construcción de la infraestructura educativa entre los años 1993 al 2003.

El INFES cuenta con planos de los edificios que construyó entre 1993 y 2003. Además cuenta con proyectos de reforzamiento de los edificios dañados en los terremotos de 1996 y 2001. Esta información se encuentra desorganizada y dispersa.

Actualmente la Oficina de Infraestructura Educativa (OINFE) del Ministerio de Educación (MINEDU) se encarga de la planificación, construcción y manejo de información de la infraestructura educativa a nivel nacional.

En el año 2003, la unidad de estadística del Ministerio de Educación (ESCALE) publica “Cifras de la Educación 1998-2003” (MINEDU 2003). En este informe se recopila información del quinquenio sobre la evolución de los diferentes factores y recursos que intervienen en el sistema educativo (alumnos, docentes, personal administrativo, centros y programas educativos, infraestructura y equipo escolar).

### 2.3.2. Distribución geográfica de la Infraestructura Educativa existente

En el informe MINEDU-2003 se consideraron 7 tipos de materiales predominantes en las paredes de los edificios educativos con el fin de obtener una clasificación estructural preliminar. Según este informe los materiales más usados en las paredes son el adobe, la madera y los ladrillos (de arcilla o bloques de concreto).

Cuando el informe MINEDU-2003 reporta “paredes de ladrillo” para un edificio casi siempre se trata de un edificio cuyo sistema estructural es de pórticos de concreto amado o albañilería.

Usando el informe del MINEDU-2003 se obtuvo una distribución aproximada de las edificaciones educativas según el material predominante de su sistema estructural; esta distribución se muestra en la figura 2.28.

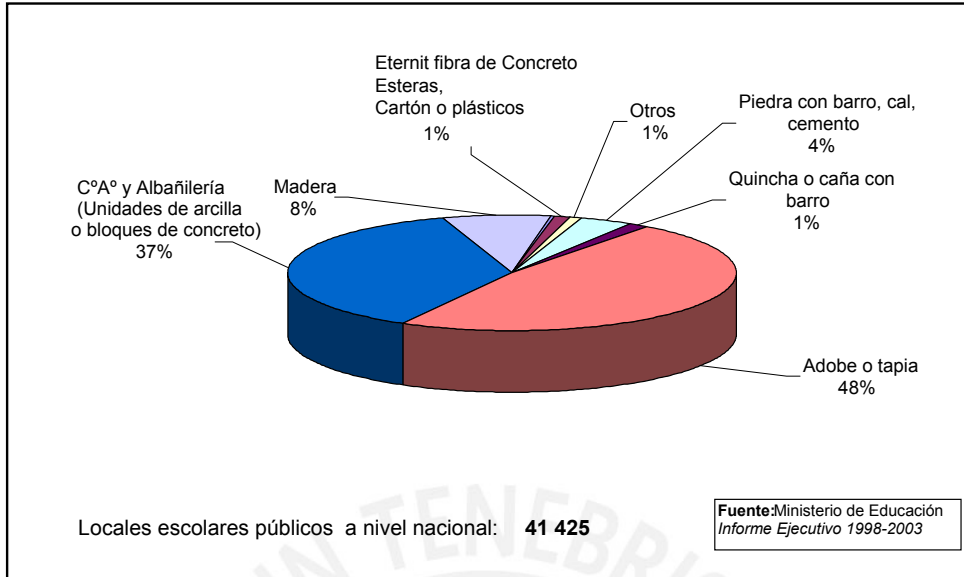


Figura 2.28 Distribución de la Infraestructura educativa según el material predominante

Se observa que el adobe es el material predominante de los centros educativos a nivel nacional seguido por el concreto armado-albañilería y luego por la madera. En conjunto estos 3 materiales acumulan el 93% de las edificaciones escolares.

La distribución de los centros educativos correspondientes a los tres materiales predominantes (el 93% del total) en las zonas sísmicas de la norma NTE 030 se muestra en la figura 2.29.

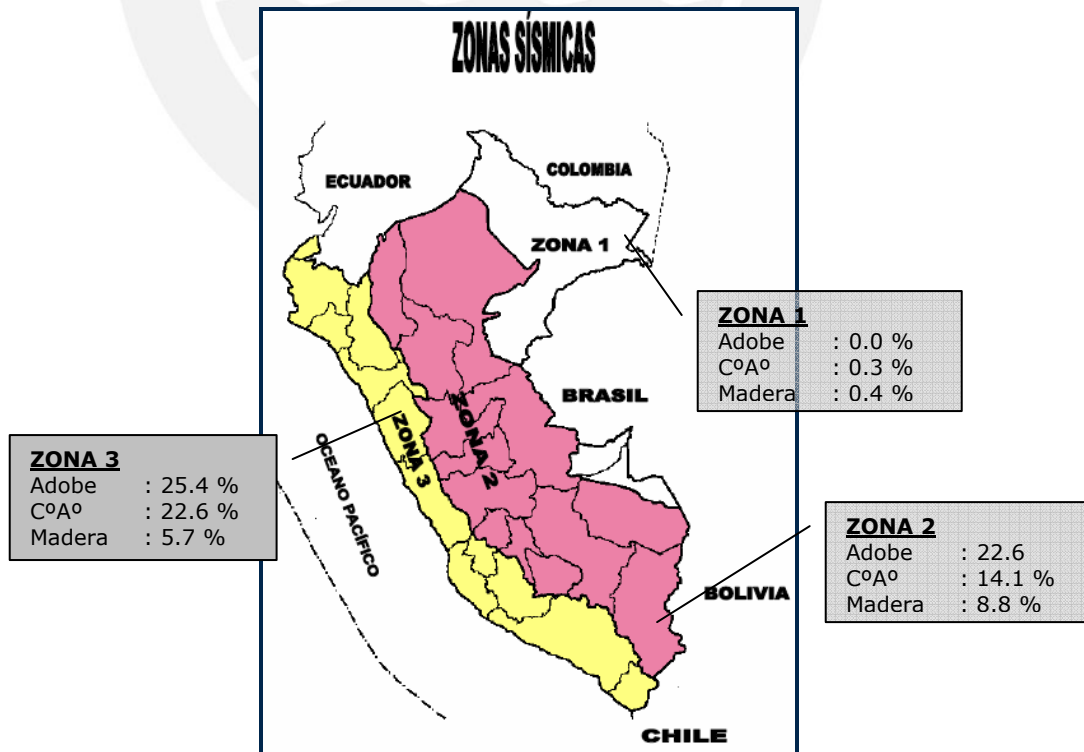


Figura 2.29 Distribución porcentual de edificaciones educativas por zonas sísmicas

Las edificaciones de adobe constituyen el 48% a nivel nacional y todas se encuentran ubicadas en las zonas de mayor sismicidad (zonas 2 y 3).

Los centros educativos de concreto armado o albañilería constituyen el 37% y la mayor parte de ellos se encuentran ubicados en las zonas sísmicas 2 y 3. Sólo el 0.3% se encuentran en la zona sísmica de menor sismicidad.

En 1997 la norma sísmica de diseño sismorresistente sufrió modificaciones importantes y a partir de ese año se proyectaron y construyeron edificaciones mucho más rígidas y resistentes a las acciones de los terremotos. En la tabla 2.1 se muestra un cuadro comparativo entre centros educativos construidos antes y después de 1997.

**Tabla 2.1 Centros educativos existentes antes y después de 1997**

Región	Número de centros educativos construidos antes de 1997	Número de centros educativos construidos después de 1997
COSTA	10262	340
SIERRA	22,954	411
SELVA	7101	357
<b>TOTAL</b>	<b>40,317</b>	<b>1,108</b>

Se observa que la mayoría de centros educativos han sido construidos antes de 1997. Esto significa que la mayoría de edificaciones no tiene las consideraciones de seguridad sísmica y resistencia exigidas en las normas recientes.

### 2.3.3. Propuesta para la organización de la información

El INFES cuenta con planos y expedientes técnicos de los edificios educativos que ha construido o reforzado en la última década. Esta información está desorganizada, no está sistematizada y su difusión está restringida.

La información del MINEDU no es precisa ya que se refiere al sistema educativo en general y no a las características constructivas o estructurales de los edificios educativos. El MINEDU solo cuenta con datos de la matrícula, docentes, personal administrativo e información general de la infraestructura educativa a nivel nacional.

Para la estimación de pérdidas por sismo de la infraestructura educativa se necesita tener una base de datos informática que especifique el sistema estructural, estado de conservación, suelo de cimentación y otras condiciones relacionadas al diseño y construcción de cada edificio educativo del país.



Los datos sobre infraestructura escolar son muy generales, no nos permiten desarrollar un modelo completo, solo nos sirvió para identificar las tipologías estructurales características de la infraestructura a nivel nacional y para tener una distribución global.

Es necesario que el estado ordene la información disponible y levante información mediante fichas de los aspectos constructivos y estructurales de cada edificio educativo para luego crear una base de datos informática. Se debe impulsar un censo vía profesores o directores de centros educativos donde se llenen estas fichas para así contar con datos precisos sobre la infraestructura educativa a nivel nacional.



## 3. Estimación de Pérdidas por Sismo en Edificaciones

### 3.1. Daño e intensidad

El daño que un sismo ocasiona en las estructuras varía con el tipo de suelo donde se encuentran, el sistema estructural, el estado de conservación, el diseño, la construcción, etc. A manera de ejemplo la figura 3.1 muestra el daño causado por el sismo de México de 1985 en edificaciones de similares características estructurales ubicadas en zonas aledañas.

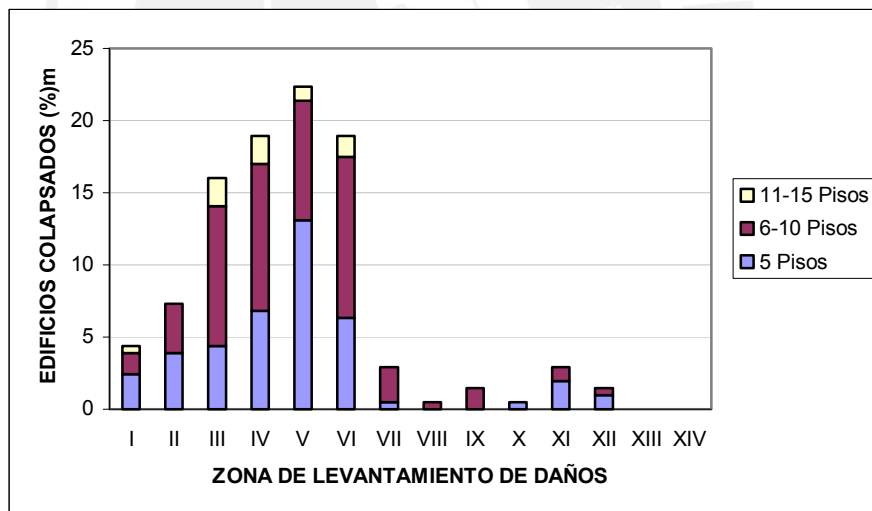


Figura 3.1 Distribución del daño en zonas aledañas luego del sismo de México de 1985

Existen fuertes variaciones en el daño que sufren edificaciones del mismo tipo estructural, en la misma ubicación geográfica y sobre el mismo tipo de suelo. Por esta razón la relación daño-intensidad sólo puede ser representada en términos de probabilidades

Para estudiar la relación daño-intensidad es necesario representar cuantitativamente el daño y la intensidad.



### *Factor de Daño (FD)*

Luego de un terremoto la intervención en un edificio afectado puede consistir en la simple reparación del daño ocasionado o puede significar la construcción de un nuevo edificio. El costo que significaría la reparación del edificio sin ninguna mejora se toma como una medida del valor de la pérdida (VP). Los costos de reemplazar el edificio dañado por uno igual (sin mejora de sus características) se denomina valor de reemplazo (VR).

Para cuantificar el daño de manera sencilla se usa el cociente entre el valor de la pérdida y el valor de reemplazo, valor al que se denomina Factor de Daño (FD).

$$\text{Factor de Daño (FD)} = \frac{\text{Valor de pérdida (VP)}}{\text{Valor de reemplazo (VR)}}$$

El factor de daño es una variable continua, y es necesario definir rangos de valores a cada uno de los cuales se denomina un estado de daño. El punto medio del rango se llama Factor de Daño Central (FDC). La tabla 3.1 muestra los estados de daño, y los valores sugeridos para el FD por el ATC (ATC 13, 1985).

**Tabla 3.1 Estados de daño considerados por el ATC**

Estado de daño (ED)	Rango factor de daño (FD)	Factor daño central (FDC)
Ninguno	0	0
Muy leve	0 – 0.01	0.005
Leve	0.01 – 0.10	0.05
Moderado	0.10 - 0.30	0.20
Alto	0.30 – 0.60	0.45
Severo	0.60 – 0.99	0.80
Colapso	1.00	1.00

### *Intensidad*

La severidad del movimiento producido por un sismo en una ubicación determinada se denomina Intensidad. La escala de intensidades más difundida es la de Mercalli Modificada (IMM) en la que los primeros grados dependen de la percepción de las personas, los grados intermedios del comportamiento de las estructuras y los últimos de los cambios originados en el paisaje.

También se puede expresar la severidad de un movimiento sísmico en términos de la aceleración máxima o aceleración pico que experimenta el suelo. Es conocido que un determinado valor de la aceleración pico no produce el mismo efecto (intensidad) en

regiones con condiciones sismotectónicas diferentes. Sin embargo para cada región sismotectónica en particular, se suele aceptar una correlación directa entre intensidad y aceleración.

Se han propuesto muchas relaciones entre la intensidad del movimiento y la aceleración pico del suelo. En la tabla 3.2 se muestra la correlación usada en este trabajo para la intensidad Mercalli Modificada y la aceleración pico del suelo (g).

Tabla 3.2 Correlación entre intensidad Mercalli Modificada y aceleración pico del suelo (Sauter, 1978)

Intensidad (IMM)	Rango Aceleraciones Pico del Suelo (g)	Aceleración Pico del Suelo (g)
I - V	< 0.05	0.05
VI	0.05 - 0.10	0.08
VII	0.10 - 0.20	0.15
VIII	0.20 - 0.35	0.28
IX	0.35 - 0.50	0.43
X -XII	> 0.50	0.50

**Distribución del daño**

Durante los terremotos severos se observa que edificaciones con las mismas características, sobre el mismo estrato de suelo y en la misma localidad sufren daños diferentes. La figura 3.2 muestra la distribución del FD para 500 estructuras, sometidas a una intensidad determinada.

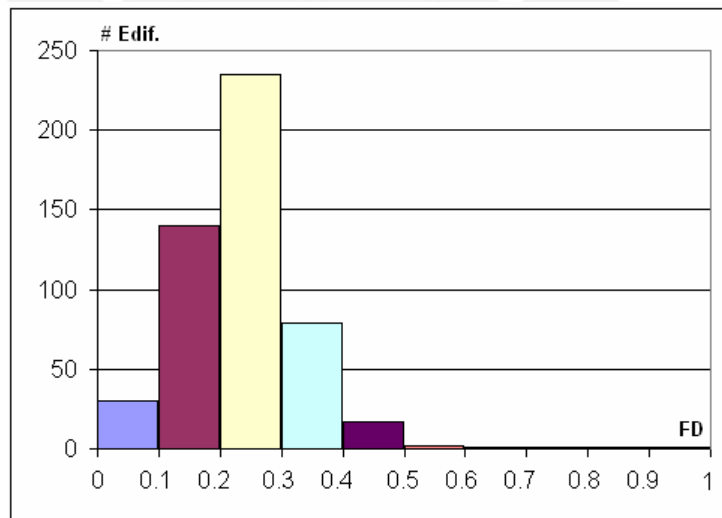


Figura 3.2 Distribución del daño en para 500 edificaciones sometidas a la misma intensidad

Se observa por ejemplo que 140 estructuras han tenido un factor de daño entre 0.10 y 0.20 y que para 235 estructuras el daño estuvo entre 0.20 y 0.30.



### 3.2. Representación de la relación intensidad-daño

El daño que puede sufrir una edificación ante la ocurrencia de eventos de diferente intensidad se representa en términos de probabilidades mediante funciones denominadas curvas de fragilidad o mediante arreglos denominados matrices de probabilidad de daño.

#### Curvas de Fragilidad

Cada curva corresponde a un FD determinado y relaciona la intensidad sísmica (eje horizontal) con la probabilidad (eje vertical) de que una estructura del tipo considerado exceda el factor de daño fijado para la curva.

El gráfico 3.3 muestra 5 curvas de fragilidad para edificios de muros de albañilería reforzada en el estado de California en Estados Unidos (ATC 13, 1985). En este caso la intensidad está expresada en la escala IMM y las curvas corresponden a los siguientes factores de daño: 0.99, 0.60, 0.30, 0.10 y 0.01. Estos valores del FD corresponden a las cotas superiores de los rangos de daño sugeridos en el ATC 13: severo, alto, moderado, leve y muy leve.

Estas curvas muestran por ejemplo que para una intensidad IX MM, la probabilidad de exceder el  $FD=0.10$  es 94.1%, mientras que para un  $FD=0.30$  la probabilidad de excedencia es de 19.4%

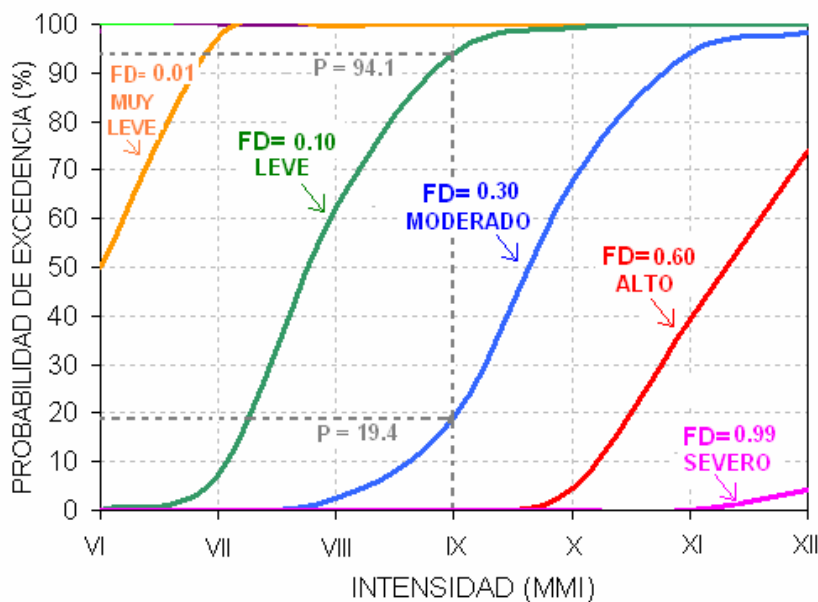


Figura 3.3 Curvas de fragilidad para edificios de muros de albañilería reforzada en California (ATC 13,1985)

De estas curvas también podemos deducir que de producirse un evento con intensidad IX MM, la probabilidad que el daño esté entre  $FD=0.10$  y  $FD=0.30$  será de  $94.1\%-19.4\%=74.7\%$ . Como los extremos del estado de daño moderado son justamente 0.10 y 0.30, entonces podemos decir que ante una intensidad IX la probabilidad de que una estructura quede con un daño moderado es de 74.7%.

En general para una intensidad determinada, la diferencia de probabilidades de excedencia corresponde a la probabilidad de que el daño ocurra dentro del rango de los extremos. Por esta razón las regiones limitadas por las curvas de fragilidad corresponden a la probabilidad de ocurrencia en cada rango de daño (figura 3.4).

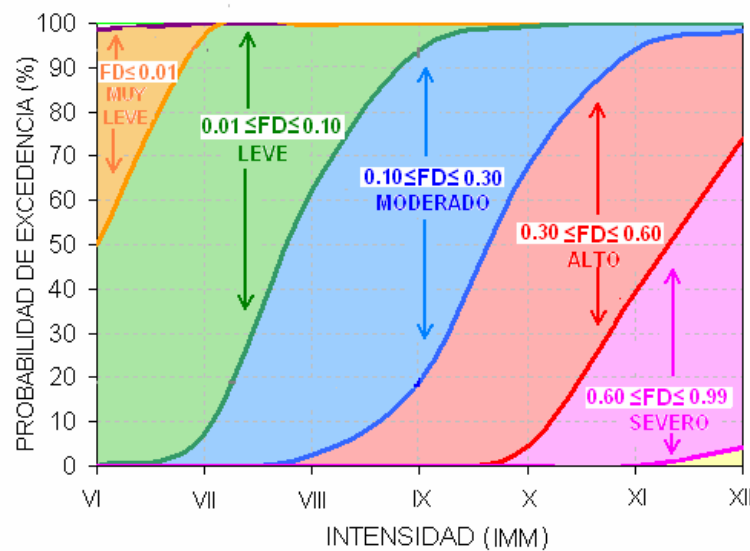


Figura 3.4 Probabilidad de ocurrencia de cada rango de daño para edificios de muros de albañilería en California (ATC 13,1985)

### Matrices de probabilidad de daño

Estos arreglos se construyen para cada sistema estructural. Cada una de las entradas del arreglo corresponde a la probabilidad de que un edificio del tipo estructural considerado tenga daño en un rango fijado (filas de la matriz) ante la ocurrencia de un evento con cierta intensidad sísmica (columnas de la matriz). La tabla 3.3 muestra la matriz de probabilidad para los mismos edificios de muros de albañilería reforzada en California (ATC 13,1985).



Tabla 3.3 Matriz de probabilidad de daño para edificios de muros albañilería reforzada en California (ATC 13, 1985)

Rango Factor de Daño / Estado de Daño	Factor Daño Central (FDC)	Probabilidad de Daño en Porcentaje (%)						
		VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0 / Ninguno	0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0 – 0.01 / Muy Leve	0.005	48.6	2.8	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
0.01 – 0.10 / Leve	0.05	49.9	89.8	37.6	5.9	0.7	0.0	0.0
0.10 – 0.30 / Moderado	0.20	0.0	7.4	59.6	74.7	31.6	5.9	1.9
0.30 – 0.60 / Alto	0.45	0.0	0.0	2.6	19.4	63.3	54.9	24.3
0.60 – 0.99 / Severo	0.80	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4	39.2	69.6
1.00 / Colapso	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2

Se observa que en la intersección de la fila correspondiente al rango de daño 0.10-0.30 y la columna para intensidad IX MM, está el valor 74.7. Esto significa que una estructura de este tipo bajo una intensidad IX MM tendrá 74.7% de probabilidad de tener un FD entre 0.10 y 0.30 es decir de tener un daño moderado.

### 3.3. Curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño

#### Obtención de Curvas de Fragilidad

Para obtener las curvas de fragilidad es necesario conocer la distribución del daño para diferentes valores de intensidad.

La figura 3.5 muestra la distribución porcentual de frecuencias para la variable FD en una población de 500 edificaciones sometidas a una intensidad IX MM. Para construir el gráfico de barras, el daño se ha agrupado en intervalos de 0.10.

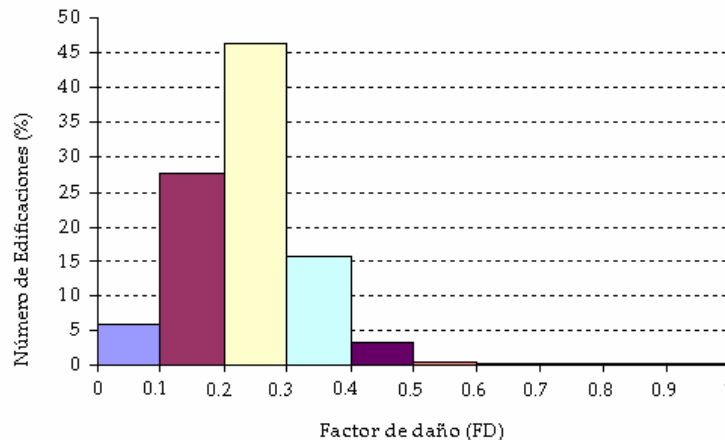


Figura 3.5 Distribución del FD en 500 edificaciones para un sismo de intensidad IX IMM

Es necesario manejar esta distribución del daño mediante una función de densidad de probabilidades a la que denotaremos por  $p$ . La figura 3.6 muestra la función de probabilidad usada para los edificios de muros de albañilería reforzada en California.



Figura 3.6 Función de probabilidad de daño para edificios de muros de albañilería reforzada en California (ATC-13)

Con esta función de probabilidades es posible calcular la probabilidad de que el daño en una estructura determinada no exceda un determinado valor del factor de daño  $FD=d_i$ . Esta función se denomina función de probabilidad acumulada o probabilidad de no excedencia, se representa por  $P$  y se obtiene integrando la función de densidades entre 0 y  $d_i$ , es decir:

$$P = \int_0^{d_i} p \, dFD$$

La probabilidad de que una estructura exceda un determinado valor de daño se denomina probabilidad de excedencia, se representa por  $P.E.$  y constituye el complemento a 1 de la probabilidad de no excedencia, por tanto:

$$P.E = 1 - P = 1 - \int_0^{d_i} p \, dFD$$

La relación entre la función de probabilidad ( $p$ ), la función de probabilidad acumulada ( $P$ ) y la función de probabilidad de excedencia ( $P.E.$ ), se muestra en la figura 3.7.

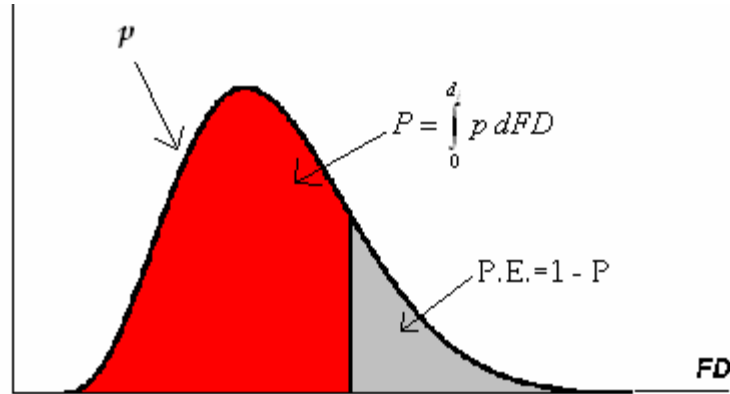


Figura 3.7 Función de probabilidad, probabilidad acumulada y probabilidad de excedencia

La figura 3.8 muestra las probabilidades de no excedencia y de excedencia (eje izquierdo y derecho respectivamente) correspondientes a la función de densidad asumida para las edificaciones ante una intensidad IX MM. Vemos que de producirse una intensidad IX, una estructura de albañilería armada en California tendría una probabilidad de 80.62% de no exceder el FD de 0.30 o dicho en otras palabras, tendría solo una probabilidad de 19.40% de exceder este valor de daño.

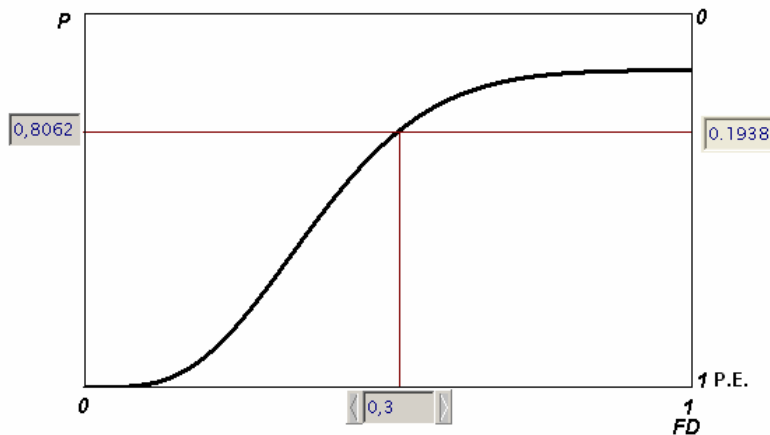


Figura 3.8 Probabilidades de no excedencia y de excedencia de daño ante un sismo de intensidad IX MM de los edificios de albañilería en California

Para poder construir la curva de fragilidad correspondiente a un factor de daño determinado (FD=0.30 en el ejemplo) es necesario contar con funciones de probabilidad de excedencia para diferentes intensidades. De cada una de estas funciones obtenemos la probabilidad de excedencia que corresponde al FD fijado para la curva. La figura 3.9 resume el algoritmo de cálculo.

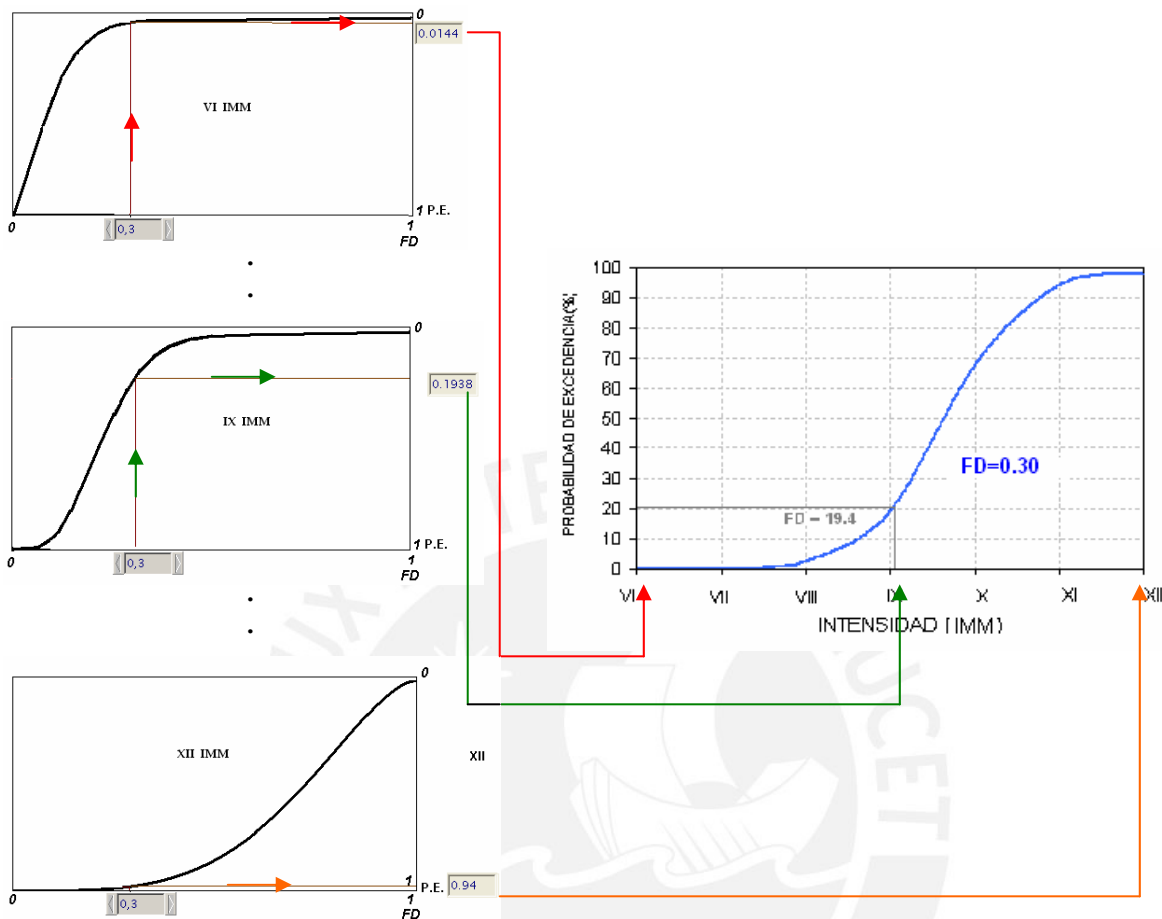


Figura 3.9 Algoritmo para la construcción de curvas de fragilidad

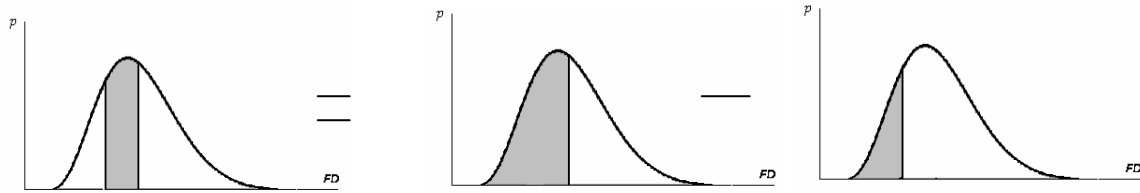
### Obtención de matrices de probabilidad de daño

Cada término de la matriz ( $q$ ) representa la probabilidad de que el daño quede entre cierto rango para una intensidad sísmica dada. Es posible hallar esta probabilidad de ocurrencia integrando la función de densidad de probabilidades entre los límites mínimo ( $d_{min}$ ) y máximo ( $d_{max}$ ) correspondientes al rango de daño elegido.

$$q = \int_{d_{min}}^{d_{max}} p \, dFD$$

Esta probabilidad de ocurrencia ( $q$ ), se puede expresar también en términos de las probabilidades de no excedencia correspondientes a los valores de  $d_{min}$  y  $d_{max}$  como:

$$q = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} p \, dFD = \int_0^{d_{\max}} p \, dFD - \int_0^{d_{\min}} p \, dFD = P_{d_{\max}} - P_{d_{\min}}$$



También es posible determinar cada término de la matriz de daño a partir de las curvas de fragilidad correspondientes a los FD máximos y mínimos de cada estado de daño.

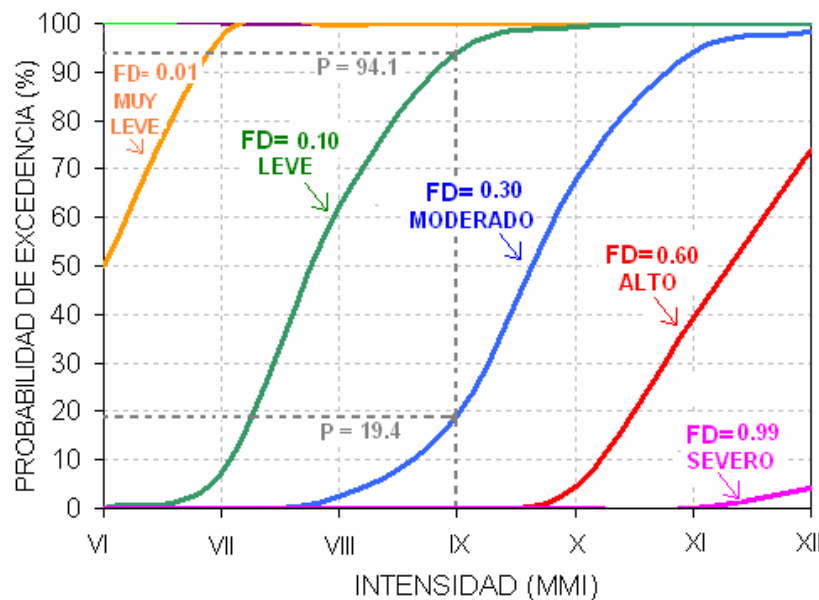


Figura 3.10 Curvas de fragilidad para edificios de albañilería reforzada en California (ATC-13, 1985)

Con relación a la figura 3.10, para determinar la probabilidad de ocurrencia de un daño moderado se restan los valores de las curvas de fragilidad correspondientes a los límites del rango (FD=0.10 y FD=0.30):

Este proceso se repite para obtener los demás términos de la matriz.

### 3.4. Estimación de pérdidas por sismo

Como la distribución del daño en las edificaciones es de naturaleza variable, la estimación de pérdidas por sismo solo se puede hacer en términos de probabilidades.



El daño en un grupo de edificaciones del mismo tipo sometidas a la misma intensidad no es ni constante ni completamente predecible. Por esta razón solo se puede hablar de un valor de pérdida probable y en su estimación se debe considerar la naturaleza aleatoria del problema.

Supongamos N edificios de un sistema estructural determinado, que luego de un evento de cierta intensidad quedan afectados de tal manera que la distribución del daño se representa por la función  $p$  mostrada en la figura.

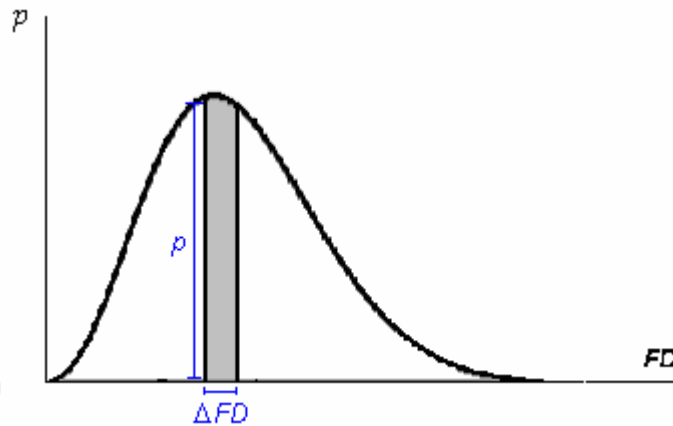


Figura 3.11 Representación de la distribución del daño mediante función  $p$

La probabilidad que el daño esté entre  $d$  y  $d+\Delta FD$  será:

$$p \cdot \Delta FD$$

y el número de edificaciones cuyo estado de daño cae en el intervalo  $d$  y  $d+\Delta FD$  será:

$$N \cdot p \cdot \Delta FD$$

Por tanto el valor de las pérdidas en este número de edificios se obtendrá multiplicando este número de edificios por el factor de daño central  $(d+\Delta FD/2)$  y por el valor de reemplazo de un edificio (VR).

$$N \cdot p \cdot \Delta FD \cdot \left(d + \frac{\Delta FD}{2}\right) \cdot VR$$

Despreciando términos de segundo orden, tendremos entonces que las pérdidas asociadas a un diferencial del factor se calculan como:

$$N \cdot p \cdot \Delta FD \cdot d \cdot VR$$

Luego para calcular el valor de la pérdida total probable integramos la expresión anterior: Como N y VR son constantes entonces:

$$\text{Valor Pérdida Probable} = \int N \cdot p \cdot d \cdot VR \cdot dFD$$



$$\text{Valor Pérdida Probable} = N.VR \int p.d.dFD$$

En función de la pérdida total se puede ahora determinar un factor equivalente de daño medio (FDM) como el cociente entre el valor de la pérdida probable y el costo total de reemplazo de las N edificaciones.

$$FDM = \frac{\text{Valor pérdida probable en } N \text{ edificios}}{\text{Valor de reemplazo de } N \text{ edificios}} = \frac{N.VR \cdot \int p.d.dFD}{N.VR}$$

$$FDM = \int p.d.dFD$$

Esta integral corresponde al momento estático respecto al eje vertical del área bajo la curva de densidad de probabilidades.

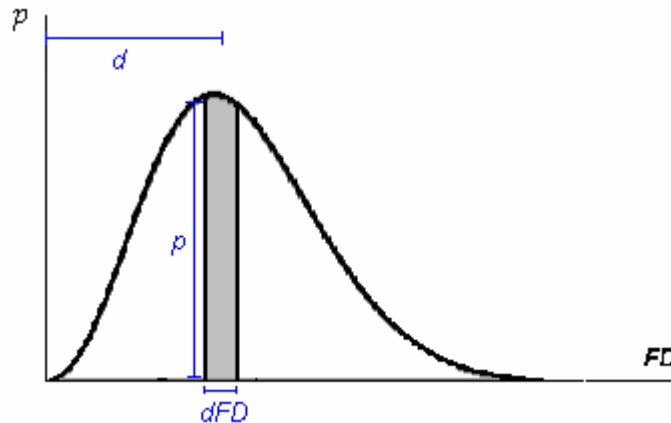


Figura 3.12 Representación del momento estático del área bajo la curva respecto al eje vertical

La distribución de probabilidades puede manejarse de manera discreta fraccionando el factor de daño en rangos que se representan por el factor de daño central (FDC) y al que corresponde un valor de la probabilidad de ocurrencia del daño (PD<sub>i</sub>).

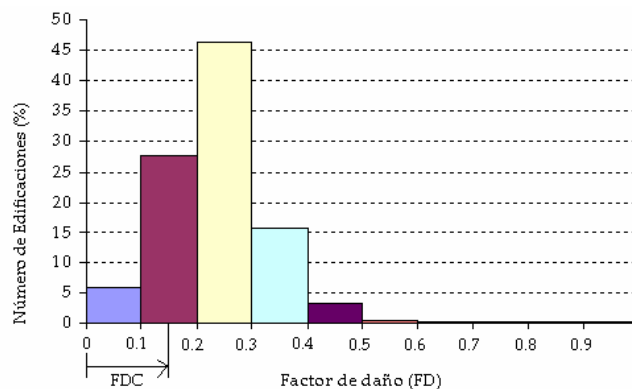


Figura 3.13 Representación discreta de la distribución de probabilidades

En este caso el FDM se calcula también como el momento estático bajo la distribución de probabilidades discreta:

$$FDM = \sum_{i=1}^{\#Est. Daño} (PD_i)(FDC_i)$$

Una vez obtenido el FDM, el valor de la pérdida probable del conjunto de edificios se calcula como:

$$VPP = FDM \cdot \text{Costo de reposición total}$$

**Cálculo del valor de la pérdida probable**

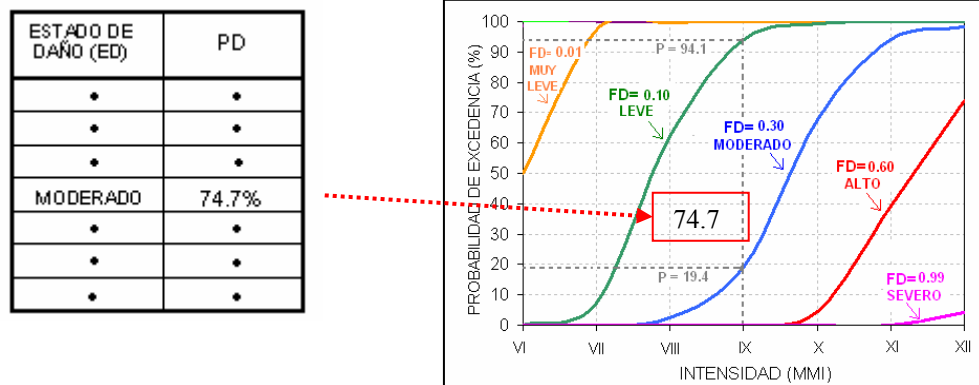
A manera de ejemplo se muestra la estimación de la pérdida probable en 2 escenarios sísmicos para un grupo de 50 edificios de albañilería con un área total construida de 80000 m<sup>2</sup> con un costo de reemplazo de \$ 200/m<sup>2</sup>.

Emplearemos los rangos de daño y factores mostrados en la tabla 3.4 :

**Tabla 3.4 Estados y rangos de factor de daño**

Estado de daño (ED)	Rango factor de daño	Factor daño central (FDC)
Ninguno	0	0
Muy leve	0 – 0.01	0.005
Leve	0.01 – 0.10	0.05
Moderado	0.10 - 0.30	0.20
Alto	0.30 – 0.60	0.45
Severo	0.60 – 0.99	0.80
Colapso	1.00	1.00

El primer escenario corresponde a una intensidad IX MM. Conociendo las curvas de fragilidad para los extremos de los rangos es posible obtener la probabilidad de ocurrencia de cada estado de daño (PD<sub>i</sub>) para la intensidad del escenario restando las correspondientes ordenadas de las curvas de fragilidad. La figura muestra el detalle del procedimiento para el estado de daño moderado cuyo rango de daño es 0.10 a 0.30.



**Figura 3.14 Obtención de la probabilidad de ocurrencia usando curvas de fragilidad**



Procediendo de manera similar se encuentran las demás probabilidades de ocurrencia siguientes:

**Tabla 3.5 Probabilidad de daño ante intensidad IX para edificios de albañilería armada (ATC 13,1985)**

Estado de daño (ED)	Factor daño central (FDC)	PD (%)
Ninguno	0	0.0
Muy leve	0.005	0.0
Leve	0.05	5.9
Moderado	0.20	74.7
Alto	0.45	19.4
Severo	0.80	0.0
Colapso	1.00	0.0

Luego el FDM será igual a  $\sum PD * FDC = 24\%$  y el valor probable de la pérdida será  $(24\%)(80000 \text{ m}^2) (\$200/\text{m}^2) = \$ 3\,840\,000$ .

Estimaremos las pérdidas en el segundo escenario usando las matrices de probabilidad de daño mostradas en la tabla 3.6.

**Tabla 3.6 Matriz de probabilidad de daño para edificios de albañilería armada (ATC 13,1985)**

Estado de daño (ED)	Probabilidad de Daño en Porcentaje (%)						
	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Ninguno	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Muy leve	48.6	2.8	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
Leve	49.9	89.8	37.6	5.9	0.7	0.0	0.0
Moderado	0.0	7.4	59.6	74.7	31.6	5.9	1.9
Alto	0.0	0.0	2.6	19.4	63.3	54.9	24.3
Severo	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4	39.2	69.6
Colapso	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2

Usando los factores de daño centrales (FDC) mostrados en la tabla 3.4 y las probabilidades de ocurrencia (PD) para la intensidad XII obtenemos:

$$FDM = \sum FDC * PD = 71\% \text{ y } VPP = 71\%(80000\text{m}^2)(\$200/\text{m}^2) = \$11\,360\,000$$

### 3.5. Metodologías para obtener relaciones intensidad-daño

Para obtener las funciones o arreglos que representan la relación intensidad-daño en un sistema estructural determinado es necesario conocer el desempeño que tuvieron los edificios del sistema estructural estudiado durante diversos terremotos.

Si se cuentan con registros históricos de los eventos sísmicos y sus consecuencias es posible obtener estadísticas para ajustar modelos de distribución del daño para un sistema estructural en particular. Si no se cuentan con registros históricos se puede recurrir a métodos analíticos o a la opinión de expertos.

Los métodos analíticos permiten simular el comportamiento de un gran número de edificaciones cuyas propiedades se manejan como variables aleatorias. Se generan muestras dando valores a estas variables, se calcula su respuesta ante diversos niveles de sismicidad y luego usando un indicador específico se cuantifica el daño.

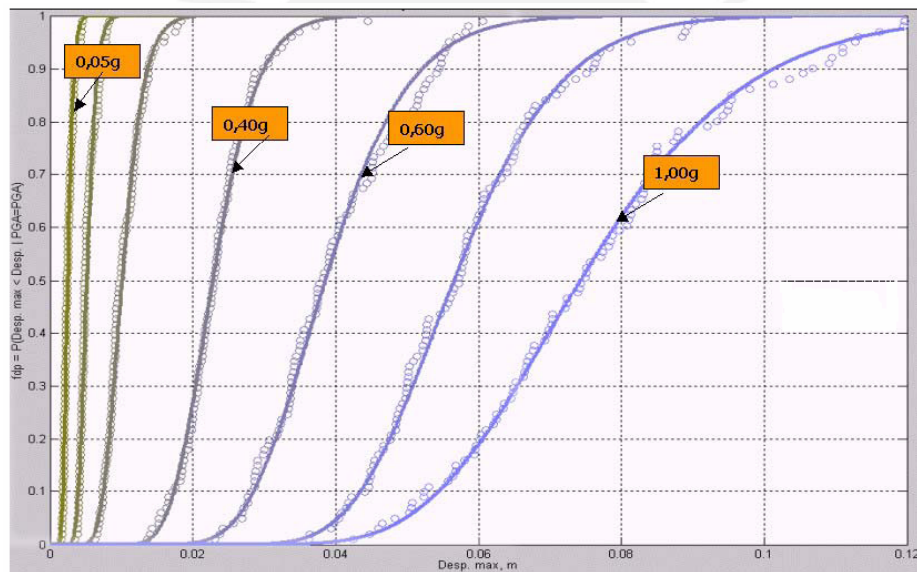


Figura 3.15 Función de distribución de probabilidad acumulada de los desplazamientos laterales máximos para un modelo de colegio típico peruano

Con los resultados se obtienen funciones de probabilidad acumulada (figura 3.15) a partir de las cuales se obtienen curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño.

Cuando no hay información suficiente sobre el sistema estructural en estudio o esta se encuentra dispersa, se recurre a la opinión de expertos en análisis, diseño y patología estructural con el fin de construir funciones de distribución del daño (figura 3.16).



Figura 3.16 Función de distribución de daño

Para recoger la opinión del grupo de expertos se prepara un cuestionario muy preciso dirigido a obtener los parámetros necesarios para construir las funciones de densidad de daño en diferentes escenarios de sismicidad (figura 3.16). Luego en base a estas funciones de densidad se obtienen las funciones de probabilidad acumulada y finalmente las curvas de fragilidad y las matrices de daño.



## 4. Método Delphi

El método Delphi está desarrollado para recabar información en aquellos casos en los cuales esta no se encuentra disponible en forma sistemática o refinada y cuando forma parte de la experiencia profesional de expertos. En la actualidad este método resulta de gran utilidad en muchas áreas del conocimiento y del ejercicio profesional, como es el caso de la ingeniería sismorresistente. En la figura 4.1 se aprecian diversas aplicaciones del método Delphi.

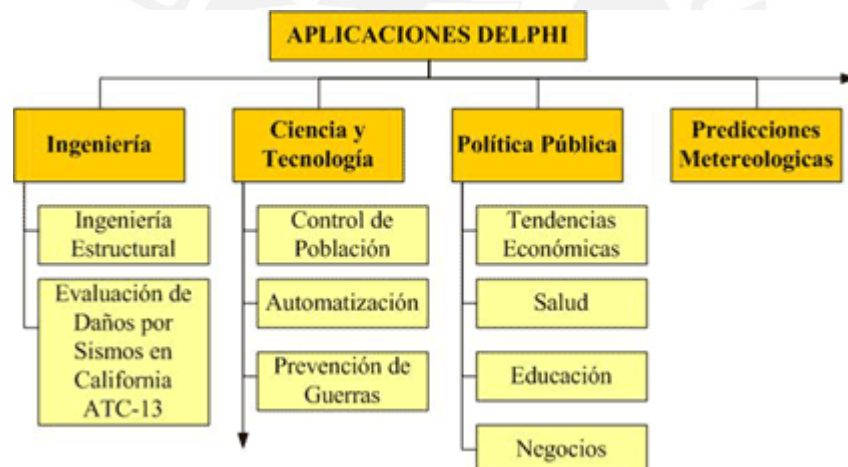


Figura 4.1 Aplicaciones del método Delphi

El método Delphi pretende conseguir el mayor acuerdo posible entre un grupo de expertos, cuya opinión grupal es considerada mejor que la opinión individual de cada especialista. Para conocer la opinión del grupo, el método emplea un cuestionario que es iterado dos o más veces hasta llegar a un consenso.

Al inicio del proceso Delphi se crea un grupo monitor que se encarga de formar el panel de expertos y de preparar y enviar los cuestionarios. Las respuestas de los cuestionarios son analizadas y enviadas a los expertos en cada iteración en forma de retroalimentación, de esta manera los expertos las pueden tener en consideración y si lo desean pueden variar su opinión en función a los resultados alcanzados. Se hacen iteraciones hasta alcanzar un



cierto grado de acuerdo; en la mayoría de los estudios esto sucede luego de la segunda iteración. Al final del proceso las respuestas son presentadas en forma estadística.

#### 4.1. Historia del método Delphi (ATC 13, 1985 - <http://www.rand.org/>)

El método Delphi recibe su nombre por el oráculo de Delfos de la antigua Grecia. El templo de Apolo en Delfos fue el centro religioso del mundo helénico, durante los siglos V, VI y VII A.C. los hombres de la antigüedad se dirigían al templo de Apolo en Delfos para averiguar lo que les deparaba el destino.



Figura 4.2 Templo de Apolo en Delfos

Los peregrinos realizaban sus consultas a las pitonisas, ellas transmitían las respuestas de los dioses que serían interpretadas luego por los sacerdotes del templo. Tal como las pitonisas ayudaban a predecir el futuro en el mundo antiguo, el método Delphi intenta ayudar al entendimiento y anticipación del comportamiento de muchos fenómenos en el mundo moderno.

Los estudios de predicciones tecnológicas, que eventualmente llevaron al desarrollo del método Delphi, se iniciaron en 1944. En ese periodo el general Arnold de la fuerza armada de E.E.U.U. solicitó a Theodor Von Karman que realice una predicción sobre la futura capacidad tecnológica de la fuerza militar.

Luego en 1946 el general Arnold logró que la compañía Douglas Aircraft creara el proyecto RAND (que sería el pilar de la formación de la RAND Corporation) encargado de analizar el tema de tecnología de guerra intercontinental. Durante estas investigaciones surgieron varios interrogantes sobre la manera más óptima de tratar los casos de predicciones mediante grupos de expertos.

Durante los años cincuenta y sesenta, en el seno del centro de investigación estadounidense RAND Corporation, Olaf Helmer-Hirschberg, Dalkey, Rescher, Theodore J. Gordon y otros investigadores de RAND desarrollaron las nociones básicas del método Delphi, las pautas teóricas, metodología y procedimientos a seguir.

En 1959 Helmer-Hirschberg y Rescher publicaron un informe titulado “La epistemología de las ciencias inexactas”, trabajo que defendía el testimonio de expertos como herramienta válida para las áreas en las cuales no existe una ley científica sólida.

Una de las primeras aplicaciones del método Delphi se llevó a cabo en el Centro de Investigación estadounidense RAND Corporation, este acontecimiento se ilustra en las publicaciones de Gordon y Helmer-



Hirschberg de 1964. El propósito de esta investigación fue el de evaluar la dirección de las tendencias a largo plazo y su efecto probable en la sociedad, con énfasis especial en las áreas de ciencias y tecnología.

El estudio de RAND cubrió seis rubros: descubrimientos científicos, control de población, automatización, progresos espaciales, prevención de guerras y tecnología de armas de guerra. Luego de todas las investigaciones realizadas a mediados de los años sesenta el método Delphi se volvió disponible al público.

Desde entonces se han desarrollado varios experimentos empleando Delphi. Ejemplos de estas experiencias incluyen el manejo a corto y largo plazo de los recursos de las lagunas Great Lakes realizado por el Michigan Sea Grant Program en 1975 y el desarrollo de cargas vivas para los estándares del ANSI A58 en 1981. Hay aplicaciones más recientes como la evaluación de la sismicidad del Este de E.E.U.U en 1985 y el estudio de daños por sismos en el estado de California, conocido como el ATC-13, realizado por la RAND Corporation en 1985.

Entre las principales aplicaciones del método de Delphi en ingeniería civil está el estudio de daños por sismos en el estado de California. En esa oportunidad, gracias a la participación de expertos en ingeniería estructural, se pudo correlacionar intensidades sísmicas y daños en 57 tipos de edificaciones. Se obtuvo una matriz de daños para cada sistema estructural representando la relación entre intensidades sísmicas y daño.

El Consejo de Tecnología Aplicada de Estados Unidos elaboró un informe con los resultados de este trabajo que lleva el nombre de informe ATC-13 "Evaluación de daños por sismo para el estado de California". La figura 4.3 muestra la matriz de probabilidad de daños para edificios de madera en el estado de California (ATC 13, 1985).

RANGO FACTOR DE DAÑO (%)	FACTOR DE DAÑO CENTRAL	PROBABILIDAD DE DAÑO EN PORCENTAJE							
		VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
0	0	3.7	-	-	-	-	-	-	
0-1	0.5	68.5	26.8	1.6	-	-	-	-	
1-10	5	27.8	73.2	94.9	62.4	11.5	1.8	-	
10-30	20	-	-	3.5	37.6	76	75.1	24.8	
30-60	45	-	-	-	-	12.5	23.1	73.5	
60-100	80	-	-	-	-	-	-	1.7	
100	100	-	-	-	-	-	-	-	

Figura 4.3 Matriz de Daño para edificios de madera en California (ATC 13, 1985)

## 4.2. Características Generales

Los métodos de expertos, entre los cuales se encuentra el método Delphi, utilizan como fuente de información un grupo de personas que cuentan con un elevado conocimiento en la materia a tratar. Estos métodos se emplean en los casos en los cuales no existen datos históricos con los que trabajar.

Los métodos de expertos cuentan con varias ventajas y desventajas. Las principales ventajas que tienen los métodos de expertos están ligadas con la popular idea que varias cabezas son mejor que una. La información recolectada por medio del método de expertos es más apegada a la realidad y toma en cuenta un mayor número de factores de los que podría considerar una encuesta al experto más versado en el tema.

Por otro lado, la principal desventaja de los métodos de expertos radica en la presión social que el grupo ejerce sobre sus participantes, provocando acuerdos con la mayoría aunque la opinión de esta sea errónea. Los grupos son vulnerables a la posición y personalidad de algunos de sus individuos, de esta manera un gran orador puede convencer al resto de participantes aunque su opinión no sea la más acertada.

El método Delphi en particular pretende maximizar las ventajas y minimizar los inconvenientes de los métodos generales de encuestas a expertos. Espera obtener un consenso que sea lo más fiable posible al aprovechar el aspecto positivo del debate en conjunto y al eliminar las interacciones sociales indeseables que existen en todo grupo. Para lograr este objetivo el método Delphi presenta tres características fundamentales: anonimato, iteración y retroalimentación controlada, y presentación de las respuestas en forma estadística.

El anonimato se podría considerar como la característica clave en este método. Las opiniones se obtienen mediante cuestionarios formales en los cuales se excluye la identidad del encuestado. Así mismo, durante este proceso ningún experto debe conocer la identidad de las otras personas que componen el grupo de debate. Esto impide la posibilidad de que un miembro sea influenciado por la reputación de otro de los miembros o por el conflicto que significa oponerse a la mayoría.

Por otro lado, el anonimato también permite que un experto cambie de opinión sin que eso suponga una pérdida de imagen. Por último, les da a los expertos la tranquilidad de defender sus ideas aunque estas resultaran ser erróneas.

La iteración se consigue al presentar el mismo cuestionario en diversas rondas. Junto con el nuevo cuestionario se presentan los resultados del cuestionario anterior, sirviendo como retroalimentación para este proceso. De esta manera, los expertos conocen los demás puntos de vista, dándoles la oportunidad de modificar sus respuestas si los resultados presentados les parecen más apropiados que los suyos.

La opinión del grupo siempre es definida de manera estadística. Durante cada iteración se presentan todas las opiniones indicando el grado de acuerdo que cada una ha obtenido. Así mismo, el resultado final de la secuencia Delphi está dado por el conjunto de opiniones más reiteradas, acompañadas de la medida de dispersión que se obtuvo en cada respuesta.

Otra característica interesante de Delphi es que este emplea un sistema de resguardo contra la falta de conocimientos que algunos expertos pueden tener en una pregunta específica, dándole así un peso al nivel de confianza y experiencia de cada experto, tema que será explicado más adelante.

### 4.3. Recolección y síntesis de la información en el método Delphi

Dentro del procedimiento del método Delphi se pueden distinguir seis etapas, la formación del grupo monitor, la selección del panel de expertos, la preparación del cuestionario, el envío de la información al panel de expertos, el análisis de las respuestas al cuestionario y la publicación de la información recolectada. Estas etapas se detallan en la figura 4.4.

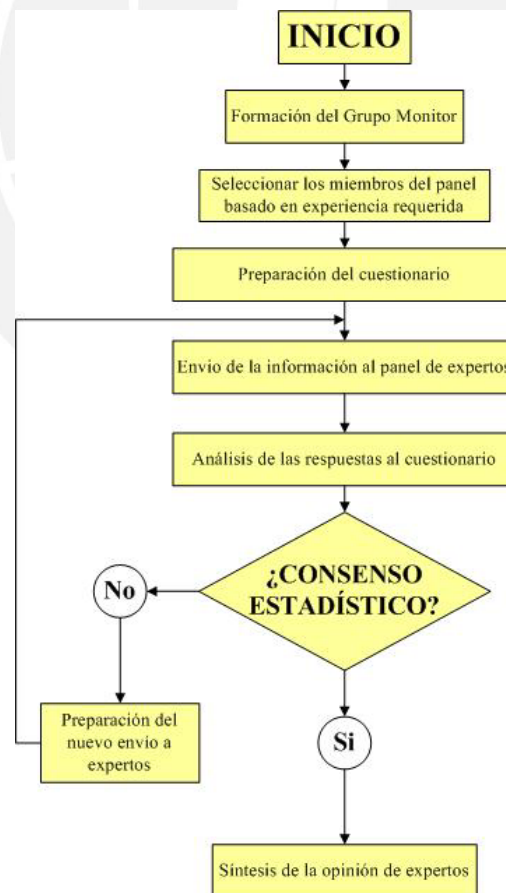


Figura 4.4 Etapas de procedimiento Delphi





### 4.3.1. Grupo monitor

La primera etapa que se debe realizar en un estudio Delphi es la constitución del grupo encargado del diseño del ejercicio en todas sus fases, que en la literatura se define como grupo monitor. El grupo monitor es un conjunto reducido de personas encargadas de definir los alcances del trabajo, preparar y analizar los cuestionarios, realizar las iteraciones y conducir el proceso.

Las funciones principales del grupo monitor incluyen fijar los objetivos que se persiguen con el método Delphi, reunir la información inicial para el estudio del tema a tratar, fijar los criterios de selección de los panelistas (número y composición) y realizar el estudio del tema de acuerdo al objetivo planteado. También se busca elaborar un cronograma detallado del tiempo que tomará realizar el proyecto especificando la duración de cada una de las etapas y diseñar los cuestionarios y los métodos de tabulación y evaluación de la información obtenida. Finalmente el grupo se encarga de la distribución y recolección de los cuestionarios así como de la presentación de la información final.

El grupo monitor debe tener un coordinador, encargado del funcionamiento eficiente y ordenado del grupo monitor. El coordinador debe dirigir al equipo de trabajo así como administrar los recursos necesarios, supervisar el cumplimiento de los plazos, servir de vínculo con el panel de expertos y atender las consultas de los panelistas. Esta persona puede ser elegida entre los integrantes del grupo monitor, por sus características personales de liderazgo, por su capacidad organizativa o conocimiento sobre el tema.

### 4.3.2. Formación del panel de expertos

Un experto es una persona con un alto conocimiento del tema, debido a su propia experiencia profesional o a sus trabajos de investigación. La selección adecuada del panel de expertos y la obtención de su compromiso de participación es una de las tareas de mayor cuidado. El panel de expertos se encarga de proporcionar la información que se requiere para el estudio, es por eso que su selección es tan importante.

Las personas elegidas deben ser grandes conocedoras del tema en estudio y deben presentar una pluralidad en sus conocimientos para evitar así la aparición de sesgos en la información disponible. Deben ser personas proactivas con ganas de colaborar y deben tener un particular interés en el tema a tratar. Así mismo, se debe asegurar diversidad en los puntos de vista, por lo tanto es recomendable que en el panel de expertos estén representadas todas las instituciones vinculadas al tema.

El número óptimo de panelistas depende del tema a tratar, de los objetivos del estudio y de los recursos con los que se cuenta. El número de panelistas esta directamente relacionado con el objetivo final del análisis, de lo que se quiera dar a conocer en términos

de difusión y del efecto que los resultados puedan tener en la toma de decisiones. La limitación de recursos tanto humanos como financieros determinan en algún grado el número de panelistas. Por último, hay que tener en cuenta los abandonos y las no respuestas, por lo que es recomendable que el número de expertos no sea muy pequeño. La cantidad de panelistas será determinada por el grupo monitor.

Es importante que los panelistas entiendan en que consiste el método Delphi, así para cada etapa del proyecto ellos sabrán cual es el objetivo de cada procesos que requiere la metodología. Antes de iniciar la sesión se les debe detallar a los expertos la finalidad y el espíritu de Delphi, así como las condiciones prácticas del desarrollo de la encuesta, plazo de respuestas y garantía de anonimato.

### 4.3.3. Preparación del cuestionario

Otra etapa del ejercicio Delphi es el diseño y elaboración de los cuestionarios que contienen las preguntas y la información sobre el tema de investigación. La confección de las preguntas y formas de seleccionar y representar la información son aspectos determinantes ya que pueden afectar los resultados del ejercicio. Las preguntas de un ejercicio Delphi, no son las típicas preguntas de una encuesta común y corriente, aunque igual que ellas, deben ser cuidadosamente elaboradas y cumplir ciertos requisitos.

Uno de los principales requisitos es la claridad de conceptos, un diseño cuidadoso exige precisión y claridad de los conceptos vertidos en cada pregunta. La cantidad de conceptos que deben ser definidos dependerá de las características y composición del panel. Así por ejemplo para una encuesta sobre la contaminación del agua con petróleo, si todos los panelistas son químicos no es necesario definir los conceptos técnicos de la composición molecular del agua y del petróleo.

La extensión y presentación también son muy importantes. Dado que por lo general las preguntas reflejan la cultura, el conocimiento y los sesgos de quienes las formulan, están sujetas a diferentes interpretaciones por parte de los panelistas. Una pregunta demasiado concisa conduce a una excesiva variedad de interpretaciones, y una demasiado larga, requiere asimilar demasiados elementos de una sola vez. Por lo tanto, es necesario encontrar una extensión adecuada que conduzca al más amplio acuerdo de interpretaciones. El mayor consenso se obtiene en aquellas preguntas de mediana longitud.

Así mismo, se debe mantener el interés de los panelistas. Para lograr esto, se deben preparar cuestionarios concisos y presentados en forma atractiva y amena. Una forma de lograr esto es, reduciendo al mínimo el número de hojas, de tal modo, que el panelista no se desanime al ver el cuestionario demasiado voluminoso.





Dado que un panelista no siempre domina todos los aspectos de un tema, las preguntas que se formulen en un ejercicio Delphi, deben incluir el grado de certeza de la respuesta y el grado de experiencia del encuestado. Para cada pregunta, los expertos deben dar un valor del 0 al 10 tanto a su nivel de experiencia como a su nivel de confiabilidad en su respuesta, donde cero significa una falta de experiencia o confianza en ese tema y 10 significa una amplia experiencia o certeza absoluta. Este valor indica el grado de certeza que cada experto tiene en su respuesta. Así un valor de confianza en la respuesta de 9 implicaría que hay 10% de probabilidades de que la respuesta que se haya dado sea incorrecta y un 90% de que sea correcta.

Con los valores de experiencia y confianza se obtiene un peso para la respuesta de cada participante, de manera tal que una respuesta con mayor experiencia y confiabilidad pesará más que una con poca experiencia y confiabilidad.

#### 4.3.4. Envío de la información al panel de expertos

Una vez terminado y corregido el cuestionario, este es enviado a los expertos (primer envío). En muchos casos el cuestionario es enviado con información complementaria para aclarar temas y conceptos. Los panelistas tienen un tiempo determinado para contestar y enviar sus respuestas luego del cuál, el equipo monitor se encarga de analizarlas.

Al terminar de analizar las respuestas y formular el documento de retroalimentación que contiene las respuestas de la primera encuesta en forma estadística, el equipo monitor, vuelve a enviar otra encuesta incluyendo el documento de retroalimentación. La iteración de encuestas continúa hasta que el grupo monitor considere que se alcanzó un consenso estadístico.

#### 4.3.5. Análisis de las respuestas al cuestionario

El procesamiento de datos empieza con un resumen claro y detallado de toda la información. Cada respuesta es ponderada de acuerdo al nivel de confianza y grado de experiencia del experto. El análisis estadístico se centra en el cálculo de la mediana (lo que consideran el 50% de los expertos), el primer cuartil o el cuartil inferior (lo que consideran el 25% de los expertos) y el tercer cuartil o cuartil superior (lo que consideran el 75% de los expertos).

Los resultados deben presentarse en cuadros estadísticos, en la forma de medias, frecuencias, medianas, histogramas de distribución, etc. Con esta representación se procede a identificar los puntos donde se han logrado consensos y discrepancias.



En la mayoría de los casos se entiende como consenso estadístico cuando una alternativa acumula al menos el 50% de los votos ponderados por nivel de confianza y grado de experiencia y cuando la variabilidad no excede de 25%. Sin embargo, la definición de consenso puede variar según el uso de Delphi y deberá ser determinada por el equipo monitor. Una vez que se llegue al consenso estadístico el procedimiento Delphi habrá concluido.

#### 4.3.6. Publicación de la información recolectada

Al final del proceso de iteraciones de Delphi queda sólo la elaboración del informe final en el cual se incluyen todas las conclusiones del análisis de las respuestas de los expertos y los comentarios realizados por los panelistas. Es preciso que la información que se presente al final también se encuentre en forma estadística. En la figura 4.5 se presenta un ejemplo de representación de las respuestas en esta forma.

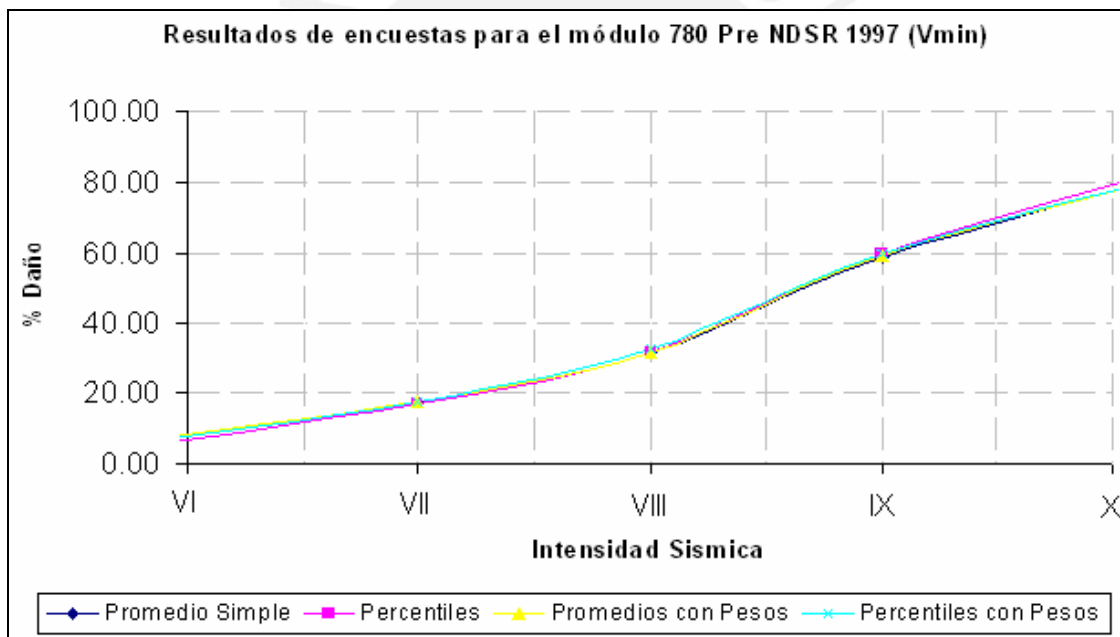


Figura 4.5 Representación de las respuestas en forma estadística

## 5. PÉRDIDAS POR SISMO EN EDIFICACIONES EDUCATIVAS

Para estimar las pérdidas económicas producidas por los terremotos en la infraestructura educativa es necesario conocer el daño que sufrirían los diferentes tipos de edificación ante diferentes niveles de severidad sísmica. Por esta razón el trabajo se orientó a cuantificar la relación intensidad-daño.

Dada la naturaleza aleatoria del comportamiento de las edificaciones y del movimiento del suelo, la relación intensidad-daño se expresó en términos de probabilidades.

Debido a la falta de datos estadísticos respecto del comportamiento sísmico los edificios educativos peruanos, el trabajo recogió en primer término la opinión de expertos acerca del comportamiento esperado y luego desarrolló un modelo numérico para la estimación del comportamiento probable.

### 5.1. El método Delphi para obtener la opinión de expertos sobre los edificios educativos

Se empleó el método Delphi como marco de trabajo para la recolección y síntesis de la opinión de los expertos. El trabajo se orientó a la obtención de una herramienta numérica para manejar la relación intensidad-daño en los edificios de educativos peruanos.

Se hicieron ajustes al método Delphi para adecuarlo a los intereses del proyecto, como se precisa a continuación.

#### 5.1.1. La encuesta

La encuesta fue diseñada para obtener las funciones de distribución de daños de los edificios educativos correspondientes a diferentes valores de severidad.

Para representar la severidad sísmica se utilizó la intensidad de Mercalli Modificada (IMM) y también la aceleración pico del suelo (APS). La tabla 5.1 muestra la correlación IMM-APS empleada (Sauter, 1978).



**Tabla 5.1 Relación ente Intensidad Mercalli Modificada y Aceleración Pico del Suelo**

Intensidad (MM)	Aceleración Pico del Suelo (g)	Descripción
	< 0,05	Sentido sólo por algunas personas en condiciones sumamente favorables.
		Percibido por personas en descanso, especialmente en los pisos altos de edificios. Objetos suspendidos delicadamente pueden oscilar.
		Percibido en el interior de los edificios pero sin reconocerse como sismo.
		Percibido en el interior de edificios y por algunas personas en las calles. Objetos colgantes que oscilan. Vibración perceptible en puertas, ventanas y vajilla. Los vehículos detenidos oscilan.
		Percibido por la mayoría de personas. Algunas personas despiertan. Objetos inestables se vuelcan. Es posible estimar la dirección del movimiento.
	0,05 - 0,10	Sentido por todos. Personas huyen al exterior. Caminar inestable. Se rompen vidrios, caen objetos. Muebles desplazados. Grietas en revestimientos. Árboles sacudidos visiblemente. Daño leve.
	0,10 - 0,20	Dificultad para mantenerse en pie. Percibido hasta por conductores de automóviles en marcha. Daño significativo en edificios de buen diseño y construcción; leve a moderado en estructuras corrientes bien construidas; considerable en estructuras pobremente construidas o mal diseñadas; se rompen algunas chimeneas.
	0,20 - 0,35	Manejo inseguro de vehículos. Daño leve en estructuras diseñadas adecuadamente; considerable en edificios corrientes bien construidos; grande en estructuras de construcción pobre. Tabiques separados de la estructura. Caída de chimeneas, columnas, monumentos y paredes. Se quiebran las ramas de los árboles. Cambios en las corrientes de agua.
	0,35 - 0,50	Pánico general. Daño considerable en estructuras de diseño especial; estructuras con armaduras bien diseñadas pierden la verticalidad. Los edificios se desplazan de los cimientos. Grietas visibles en el suelo. Tuberías subterráneas rotas.
	> 0,50	Gran destrucción de edificaciones. Grandes daños en malecones, represas, diques y terraplenes. Rieles de vías férreas deformados. Grandes desplazamientos de tierra en taludes y orillas de los ríos. Agua de canales, ríos y lagos sale hacia las playas.
		Pocas edificaciones quedan en pie. Puentes destruidos. Anchas grietas en el suelo. Tuberías subterráneas completamente fuera de servicio. Hundimientos y desplazamientos en terrenos blandos. Rieles de vías férreas muy retorcidos.
		Destrucción total. Se ven ondas sobre la superficie del suelo. Desplazamiento de grandes masas de roca. Líneas de mira y de nivel deformadas. Objetos lanzados al aire.

Para discretizar la variable daño, se establecieron rangos de valores, en base a los cuales quedaron definidos los estados de daño (ED) que se muestran en la tabla 5.2 .

Tabla 5.2 Estados de daño utilizados

Estados de daño (ED)	Rangos del Factor de Daño	Descripción
1. Ninguno	0	Sin daño.
2. Muy Leve	0 - 0.01	Daño menor, limitado y localizado, no requiere reparación.
3. Leve	0.01 - 0.1	Daño significativo localizado (algunos elementos), no requiere reparación.
4. Moderado	0.1 - 0.3	Daño significativo localizado (varios elementos), requiere reparación.
5. Alto	0.3 - 0.6	Daño extensivo que requiere mayor reparación.
6. Severo	0.6 - 0.99	Daño mayor extensivo, requiere demoler y reparar la estructura.
7. Colapso	1	Total destrucción de la mayor parte de la estructura.

Para cada rango de intensidad sísmica, la encuesta preguntó por el estado de daño (ED) que alcanzaría el sistema estructural y por los valores del daño medio probable (VMP), del daño mínimo (Vmin) y del daño máximo (Vmax). Por razones de simplicidad, los valores del daño se requirieron en porcentaje.

La encuesta preguntó además sobre la confianza que cada experto tiene en sus valores. Para cada rango de intensidad se pidió al experto calificar sus respuestas usando números entre 0 y 10, donde 10 indica certeza absoluta. Para este estudio no se consideró el parámetro de nivel de experiencia razón por la cual no se incluyó en la encuesta.

Se decidió usar cinco tablas independientes para cada una de las tipos de edificios educativos considerados dentro de un mismo formato (figura 5.1).

**Porcentaje de Daños en Edificaciones Educativas Peruanas**

Por favor anote los valores que en su opinión describen la relación Daño-Intensidad para las edificaciones educativas peruanas.

Gran Unidad Escolar																				
Intensidades	V - VI				VII				VIII				IX				X - XI			
Daño	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)
Confiabilidad																				
Módulo 780 pre Norma de 1997																				
Intensidades	V - VI				VII				VIII				IX				X - XI			
Daño	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)
Confiabilidad																				
Módulo 780 actual																				
Intensidades	V - VI				VII				VIII				IX				X - XI			
Daño	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)
Confiabilidad																				
Edificio de Educación Superior																				
Intensidades	V - VI				VII				VIII				IX				X - XI			
Daño	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)
Confiabilidad																				
Módulo de adobe																				
Intensidades	V - VI				VII				VIII				IX				X - XI			
Daño	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)
Confiabilidad																				

Figura 5.1 Formato de encuesta utilizado





Para conservar el anonimato entre los miembros del panel ningún experto conoció la identidad de los otros encuestados. En el formato de respuesta no se incluyó la identidad del encuestado.

### 5.1.2. Grupo de expertos

Luego de elaborar la encuesta se conformó el panel de expertos en ingeniería estructural con miembros de importantes instituciones de la ingeniería nacional, como las mostradas en la tabla 5.3.

Tabla 5.3 Algunas de las empresas, centros de estudios, instituciones y personalidades participantes

Pontificia Universidad Católica del Perú	
Universidad Nacional de Ingeniería	
Instituto Nacional de Defensa Civil - INDECI	
SENCICO	
Colegio de Ingenieros del Perú	
Prisma Ingenieros	
CESEL S.A.	
Gallegos Casabonne Arango	

El anexo 5 contiene la relación completa del grupo de expertos encuestados.



### Interacción con el Grupo de Expertos

La comunicación con el grupo de expertos se hizo por medio de una página de internet y con envíos de información, impresa y en formato digital.

Se creó el portal de Desempeño Sismorresistente de Edificaciones Peruanas (<http://www.pucp.edu.pe/secc/civil/dsrep/>) para alojar el presente proyecto. El portal se creó para informar del método Delphi, de las características principales de las edificaciones educativas y de la encuesta elaborada. En este proyecto se encuentra además la información correspondiente a los edificios de muros de ductilidad limitada (figura 5.2).



Figura 5.2 Página Web Delphi

El contenido de la página web se presenta en el anexo 1.

Se envió una carta formal por correo electrónico a todos los panelistas, explicando el proyecto e invitándolos a visitar el portal.

Para facilitar el manejo de la información, se repartió a todos los panelistas la carta impresa de invitación formal, un CD con la información contenida en la página web y la versión impresa de la encuesta.

Las encuestas fueron recogidas personalmente en las oficinas de los expertos (formulario impreso) y en algunos casos fueron recibidas vía correo electrónico ([delphi@pucp.edu.pe](mailto:delphi@pucp.edu.pe)).

Una vez recolectadas las encuestas se procedió al procesamiento de la información.

Para el presente proyecto sólo se realizó una iteración del proceso de encuestado. La publicación de los resultados de la primera iteración se hizo por medio de la página web manteniendo el anonimato en las respuestas del grupo de expertos.

## 5.2. Desarrollo del modelo para la estimación de pérdidas

A continuación se presenta el modelo empleado para manejar la distribución del daño, los detalles del procesamiento de la información del grupo de expertos y el procedimiento numérico seguido para obtener las curvas y matrices de daño.

### 5.2.1. Modelo de distribución de Probabilidades

El daño que sufren las estructuras es una variable aleatoria con una determinada distribución en cada nivel de intensidad sísmica. Así para intensidades intermedias la distribución del daño suele ser simétrica respecto a un valor central mientras que para intensidades altas o bajas la distribución deja de ser simétrica respecto al valor central, el mismo que además se desplaza a la izquierda o derecha del eje de daños como se muestra en la figura 5.3.

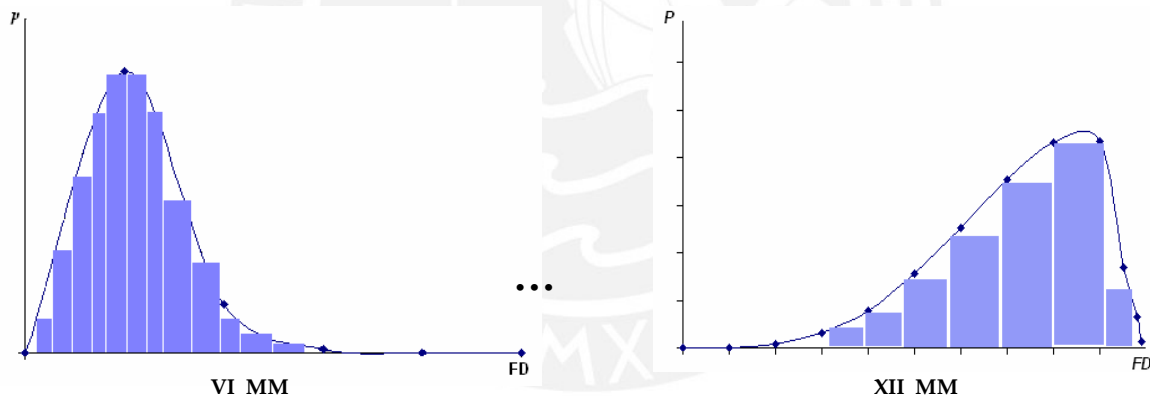


Figura 5.3 Funciones de distribución de probabilidad de daño para diferentes niveles de intensidad sísmica

Esta característica en la distribución del daño en los edificios por causa de los sismos se puede representar con modelos de distribución Normal, Log normal y Beta.

En este trabajo se usó la distribución Beta por su sencillez y adaptabilidad a la información obtenida del grupo de expertos respecto a los valores del daño mínimo ( $V_{min}$ ), medio probable ( $V_{MP}$ ) y máximo ( $V_{máx}$ ). Se asumió que la estimación del daño medio probable ( $V_{MP}$ ) corresponde al valor medio de la distribución Beta y que el 90% de probabilidad de ocurrencia del daño esté entre los valores extremos  $V_{máx}$  y  $V_{min}$  (figura 5.4).

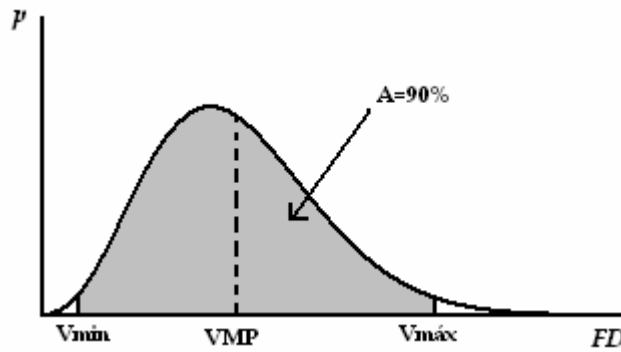


Figura 5.4 Suposiciones asumidas en el presente trabajo

### Distribución Beta

La distribución Beta,  $p(x)$ , se define por medio de los parámetros  $\lambda, \nu$  por la siguiente ecuación:

$$p(x) = \frac{1}{B(\lambda, \nu)} \cdot x^{\lambda-1} \cdot (1-x)^{\nu-1} \quad \text{Para } 0 < x < 1$$

Donde:

$$B(\lambda, \nu) = \frac{\Gamma(\nu)\Gamma(\lambda)}{\Gamma(\lambda + \nu)}, \quad \Gamma: \text{Función Gamma.}$$

El valor medio  $\mu$ , la varianza  $\sigma^2$  y el coeficiente de variación  $V$  del factor de daño quedan expresados como:

$$\mu = \frac{\lambda}{\lambda + \nu}$$

$$\sigma^2 = \frac{\lambda \nu}{(\lambda + \nu)^2 (\lambda + \nu + 1)}$$

$$V^2 = \frac{\sigma^2}{\mu^2} = \frac{\nu}{\lambda(\lambda + \nu + 1)}$$

### 5.2.2. Obtención de la función de distribución de probabilidades

A partir de las estimaciones individuales de los expertos se determinaron las respuestas que representan al grupo. Usando estos datos se generaron luego las funciones de distribución de probabilidad del daño para cada tipo de edificio y para cada intensidad sísmica. A continuación se detalla el procedimiento seguido para sintetizar la opinión del grupo de expertos y luego se presenta el esquema de obtención de las funciones Beta de distribución del daño.

Para sintetizar la opinión de los expertos en cada intensidad se consideraron inicialmente cuatro procedimientos. El primero correspondió al promedio simple, el segundo al promedio ponderado de las respuestas donde los pesos se asociaron a la experiencia de los expertos.

Para el tercer método se consideraron solo los datos en una franja específica. Se calcularon los valores asociados a percentiles 25 y 75 y con su diferencia,  $d$ , se definió un rango de validez de ancho  $4d$  como se muestra en la figura 5.5.

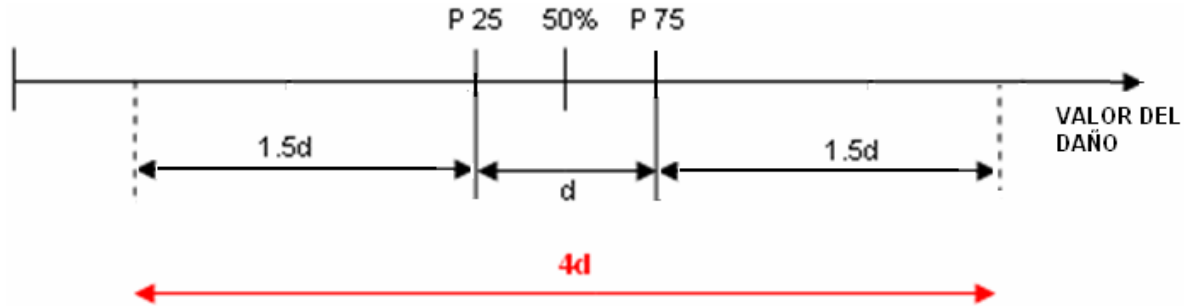


Figura 5.5 Rango de valores que se consideran para calcular los valores de las estimaciones representativas

El cuarto método es similar al anterior sólo que en las respuestas se consideraron pesos relacionados a la experiencia del experto.

La figura 5.6 muestra los resultados de los cuatro procedimientos para el valor medio probable del daño correspondiente al módulo 780 actual en intensidades V a XI. Como se aprecia los resultados de los cuatro procedimientos son muy similares.

**Módulo 780 actual (VMP)**

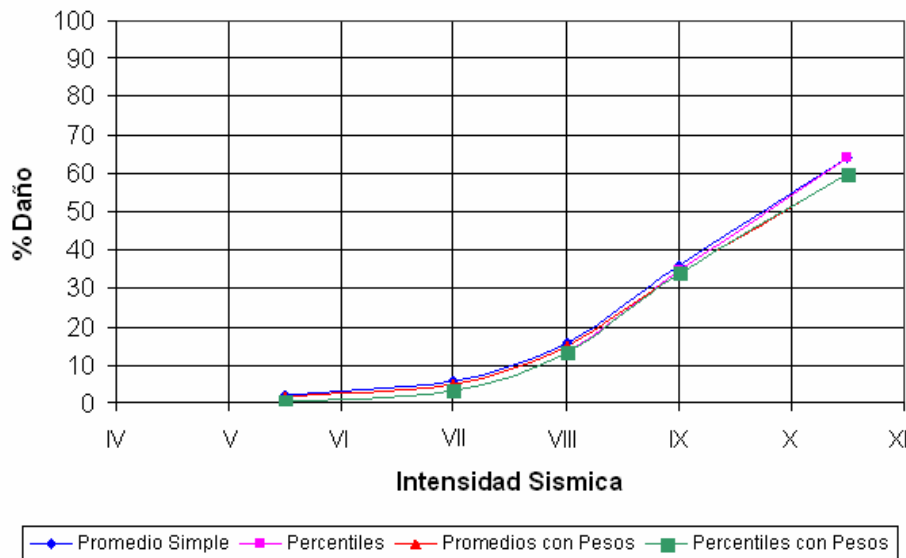


Figura 5.6 Comparación de resultados para calcular las estimaciones más representativas del factor de daño



Para determinar los valores que representen al grupo de expertos se escogió el tercer procedimiento debido a lo subjetivo que resultó estimar pesos para cada experto y además porque este procedimiento permite filtrar los valores extremos que podrían discrepar de las observaciones de campo.

Los resultados de las estimaciones mínimas, media y máxima empleados para todos los sistemas estructurales en todos los niveles de intensidad se presentan en el anexo 2.

Los parámetros  $\lambda$  y  $\nu$  que definen las funciones de distribución del daño se obtuvieron resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$VMP = \mu = \frac{\lambda}{\lambda + \nu} \quad \dots(1)$$

$$0.90 = \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} p(FD) du = \frac{(B_{V_{\max}}(\lambda, \nu) - B_{V_{\min}}(\lambda, \nu))}{B(\lambda, \nu)} \quad \dots(2)$$

Para el cálculo de los valores de  $\lambda$  y  $\nu$  se desarrolló un programa de computación basado en el procedimiento iterativo propuesto por el ATC (ATC 13, 1985). En el anexo 3 se presentan los parámetros obtenidos para cada una de las tipologías educativas en cada una de las intensidades sísmicas consideradas.

### 5.2.3. Obtención de curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño

Una vez conocidas las funciones de distribución de daño ( $p$ ) para cada intensidad sísmica y para cada una de las tipologías estructurales en estudio se generaron las curvas de fragilidad y las matrices de probabilidad de daño.

Los estados de daño se definieron usando los rangos de valores del factor de daño propuestos por el ATC (ATC 13, 1985) y son mostrados en la tabla 5.4.

**Tabla 5.4 Estados de daño considerados en el reporte ATC 13**

Estado de daño (ED)	Rango factor de daño	Factor daño central (FDC)
Ninguno	0	0
Muy leve	0 - 0.01	0.005
Leve	0.01 - 0.10	0.05
Moderado	0.10 - 0.30	0.20
Alto	0.30 - 0.60	0.45
Severo	0.60 - 0.99	0.80
Colapso	1.00	1.00

Para generar las curvas de fragilidad se determinaron las probabilidades de excedencia (P.E) correspondientes al valor extremo de cada rango de daño en cada intensidad sísmica:

$$P.E = 1 - P = 1 - \int_0^{d_i} p dFD$$

De manera similar, para generar las matrices de probabilidad de daño (MPD) fue necesario determinar las probabilidades de ocurrencia ( $q$ ) de cada uno de los estados de daño para cada intensidad:

$$q = \int_{d \min}^{d \max} p \, dFD$$

Para obtener los valores de las probabilidades de excedencia y ocurrencia (P.E. y  $q$ ) se desarrolló el programa de computación que se muestra en el anexo 4 y cuya salida parcial se presenta en la figura 5.7.

```

C:\MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL\TESIS\Programa para generar CF y MPD\780nuevoPR.sal
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
-----
1
2
3
4 Pontificia Universidad Católica del Perú-Maestría en Ingeniería Civil
5 PROGRAMA QUE GENERA CURVAS DE FRAGILIDAD Y MATRICES DE PROBABILIDAD DE DAÑO-version 1.0
6 Hecho por : Rafael Aguilar Velez
7 Maria Angela Astorga Mendizabal
8
9
10 RESULTADOS DE ESTIMACIONES
11
12
13
14
15 **** CALCULO DE PARAMETROS LAMBDA Y NU ****
16
17 INTENSIDAD LAMBDA NU ENCONTRO
18 6 1.9651 933.8100 1
19 7 4.2813 132.5000 1
20 8 7.7945 50.3300 1
21 9 23.7379 44.3570 1
22 10 60.3481 33.9900 1
23
24
25
26
27
28
29
30 **** MATRIZ DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE DAÑO****
31
32 VI VII VIII IX X
33 100.0000 100.0000 100.0000 100.0000 100.0000
34 75.0360 99.9996 100.0000 100.0000 100.0000
35 0.0812 96.6636 100.0000 100.0000 100.0000
36 0.0000 0.0639 76.6915 100.0000 100.0000
37 0.0000 0.0000 0.1141 79.7827 100.0000
38 0.0000 0.0000 0.0000 0.0014 79.0964
39 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
40
41
42
43 Analisis concluido en 2.093 segundos
44 GRACIAS POR HABER UTILIZADO EL PROGRAMA AACFMD
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
    
```

Figura 5.7 Archivo de salida del programa desarrollado para el cálculo de la probabilidad de daño

Finalmente con los valores puntuales de probabilidad obtenidos, se construyeron curvas que luego se ajustaron mediante procedimientos gráficos sencillos.

### 5.3. Relación Intensidad daño y cálculo de pérdidas

Para facilitar la estimación de pérdidas por sismo la relación intensidad-daño se representó por curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño. En ambos casos la intensidad sísmica se expresó por medio de la aceleración pico del suelo y de la intensidad de Mercalli Modificada.

#### 5.3.1. Curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño

Como resultado de este trabajo se obtuvieron las curvas de fragilidad y las matrices de probabilidad de daño correspondientes a cinco tipos de edificios escolares peruanos. A continuación en las figuras 5.8 a 5.12 se presentan estos resultados.

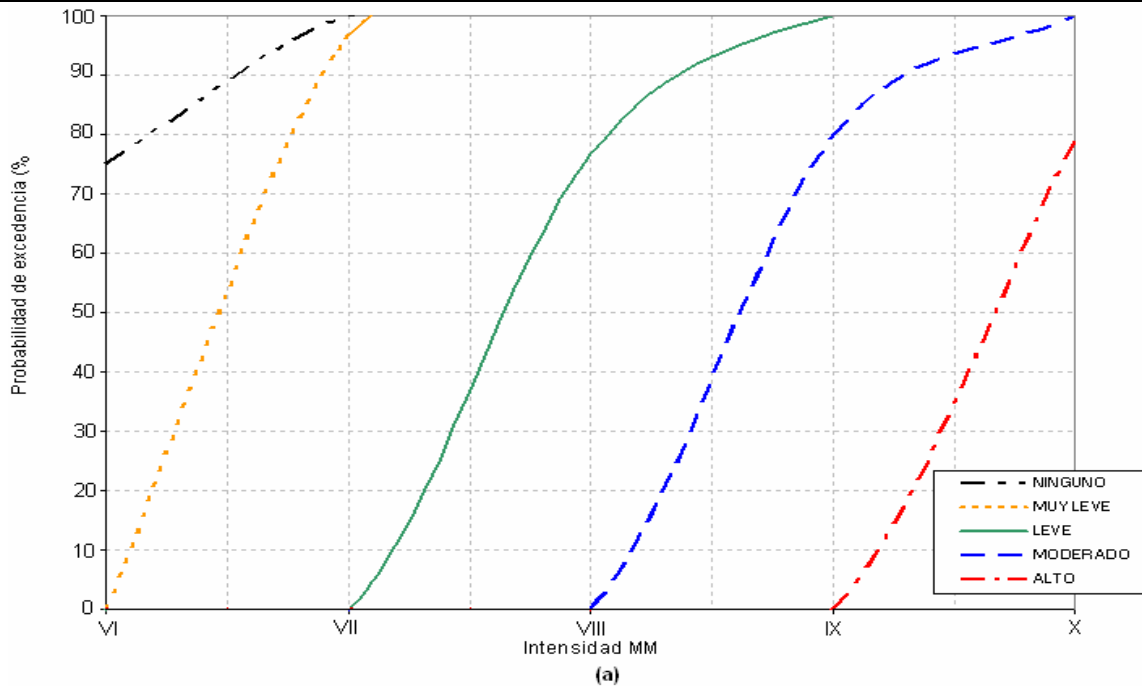




Pontificia Universidad Católica del Perú

Desempeño Sismorresistente de Edificaciones Educativas Peruanas

EDIFICIO TIPO  
780 Actual



Estado de daño	Factor de daño central (FDC)	Probabilidad de daño (%)				
		VI	VII	VIII	IX	X
Ninguno	0	25.0	0	0	0	0
Muy leve	0.005	75.0	3.3	0	0	0
Leve	0.05	0.1	96.6	23.3	0	0
Moderado	0.20	0	0.1	76.6	20.2	0
Alto	0.45	0	0	0.1	79.8	20.9
Severo	0.80	0	0	0	0	79.1
Colapso	1.00	0	0	0	0	0
Factor de daño medio (FDM)		0.38	4.86	16.53	39.95	72.69
Valor medio probable (VMP)		0.21	3.13	13.41	34.86	63.97

(b)

IMM	VI	VII	VIII	IX	X
APS (g)	0.05 - 0.10	0.10 - 0.20	0.20 - 0.35	0.35 - 0.50	>0.50

(c)

Figura 5.8 Relación intensidad-daño para los edificios tipo 780 actual

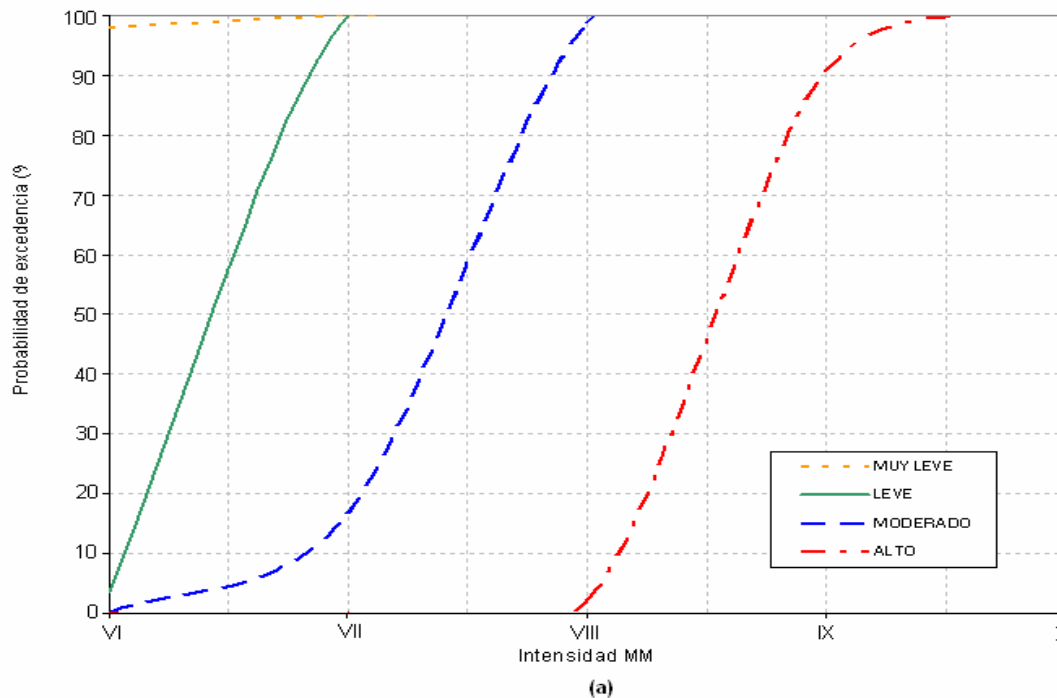
a) Curvas de fragilidad b) Matrices de probabilidad de daño c) Correlación IMM-APS empleada



Pontificia Universidad Católica del Perú

Desempeño Sismorresistente de Edificaciones Educativas Peruanas

EDIFICIO TIPO  
780 pre NDSR-1997



Estado de daño	Factor de daño central (FDC)	Probabilidad de daño (%)				
		VI	VII	VIII	IX	X
Ninguno	0	0	0	0	0	0
Muy leve	0.005	2.0	0	0	0	0
Leve	0.05	94.5	0	0	0	0
Moderado	0.20	3.5	83.4	1.5	0	0
Alto	0.45	0	16.6	96.5	9.2	0
Severo	0.80	0	0	2.0	90.8	99.6
Colapso	1.00	0	0	0	0	0.4
Factor de daño medio (FDM)		5.44	24.15	45.34	76.77	80.08
Valor medio probable (VMP)		4.66	24.97	45.20	71.52	93.24

(b)

IMM	VI	VII	VIII	IX	X
APS (g)	0.05 - 0.10	0.10 - 0.20	0.20 - 0.35	0.35 - 0.50	>0.50

(c)

Figura 5.9 Relación intensidad-daño para los edificios tipo 780 pre NDSR-1997

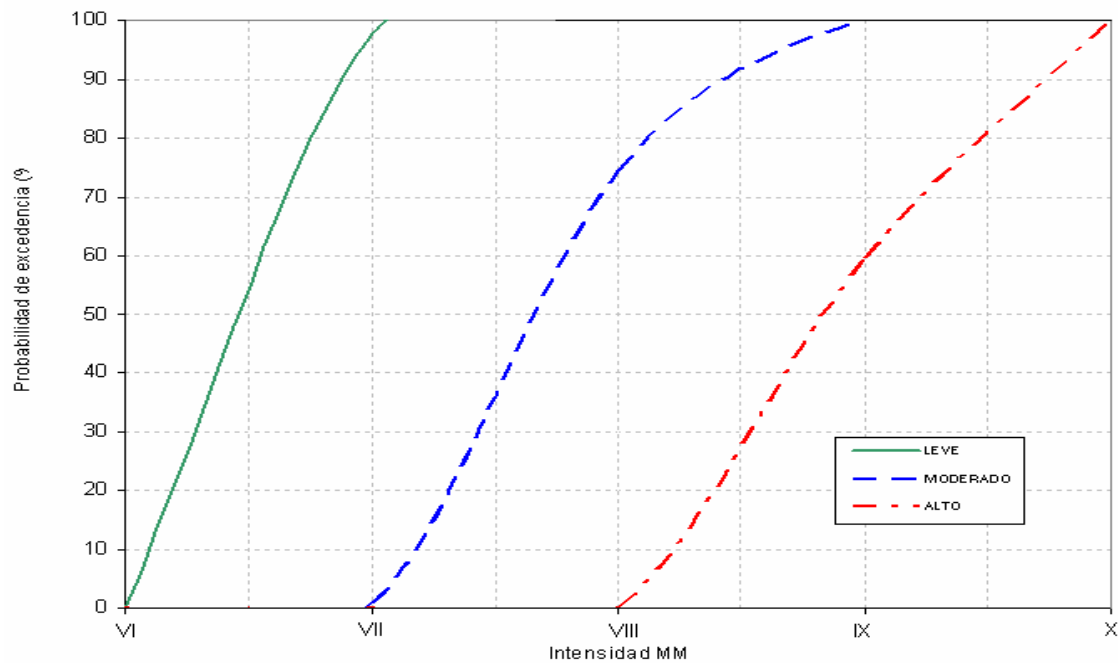
a) Curvas de fragilidad b) Matrices de probabilidad de daño c) Correlación IMM-APS empleada



Pontificia Universidad Católica del Perú

Desempeño Sismorresistente de Edificaciones Educativas Peruanas

EDIFICIO TIPO  
*Gran Unidad Escolar*



(a)

Estado de daño	Factor de daño central (FDC)	Probabilidad de daño (%)				
		VI	VII	VIII	IX	X
Ninguno	0	0	0	0	0	0
Muy leve	0.005	0	0	0	0	0
Leve	0.05	100.0	2.3	0	0	0
Moderado	0.20	0	96.9	25.8	0	0
Alto	0.45	0	0.8	74.2	40.4	0
Severo	0.80	0	0	0	59.6	100.0
Colapso	1.00	0	0	0	0	0
Factor de daño medio (FDM)		5.00	19.84	38.54	65.87	80.00
Valor medio probable (VMP)		4.47	17.92	34.03	61.91	82.12

(b)

IMM	VI	VII	VIII	IX	X
APS (g)	0.05 - 0.10	0.10 - 0.20	0.20 - 0.35	0.35 - 0.50	>0.50

(c)

Figura 5.10 Relación intensidad-daño para los edificios tipo Gran Unidad Escolar

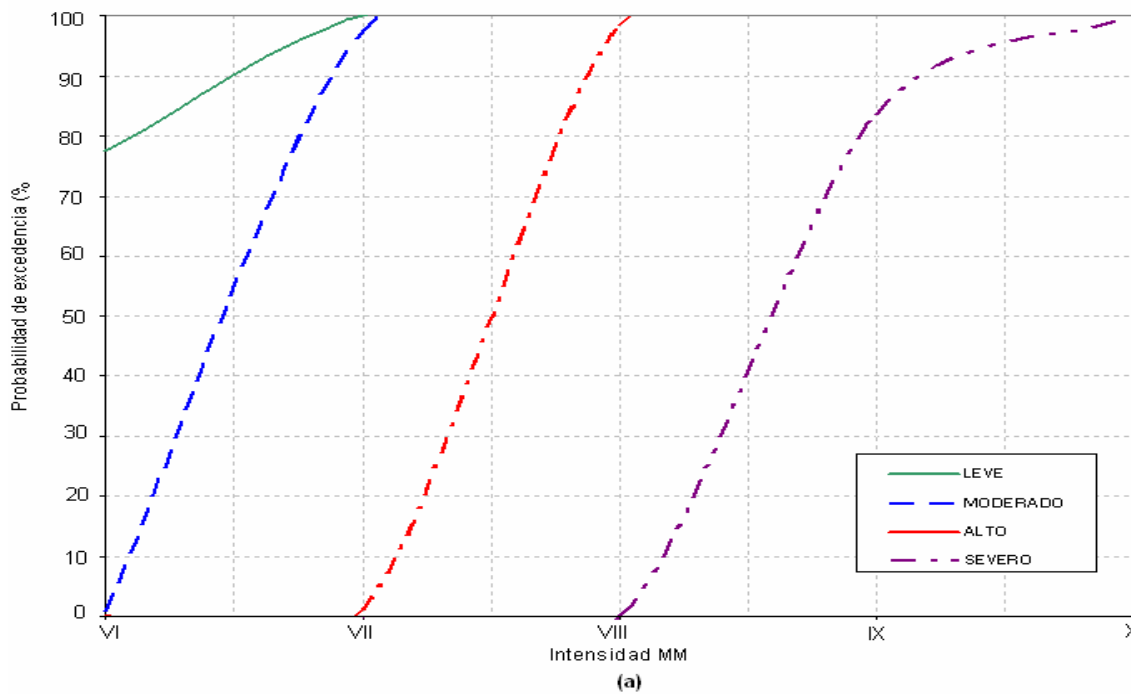
a) Curvas de fragilidad b) Matrices de probabilidad de daño c) Correlación IMM-APS empleada



Pontificia Universidad Católica del Perú

Desempeño Sismorresistente de Edificaciones Educativas Peruanas

EDIFICIO TIPO  
*Adobe*



Estado de daño	Factor de daño central (FDC)	Probabilidad de daño (%)				
		VI	VII	VIII	IX	X
Ninguno	0	0	0	0	0	0
Muy leve	0.005	0	0	0	0	0
Leve	0.05	22.4	0	0	0	0
Moderado	0.20	76.9	2.6	0	0	0
Alto	0.45	0.7	96.1	1.5	0	0
Severo	0.80	0	1.3	98.5	16.7	0
Colapso	1.00	0	0	0	83.3	100.0
Factor de daño medio (FDM)		16.82	44.80	79.48	96.67	100.00
Valor medio probable (VMP)		14.29	43.71	76.71	99.26	100.00

(b)

IMM	VI	VII	VIII	IX	X
APS (g)	0.05 - 0.10	0.10 - 0.20	0.20 - 0.35	0.35 - 0.50	>0.50

(c)

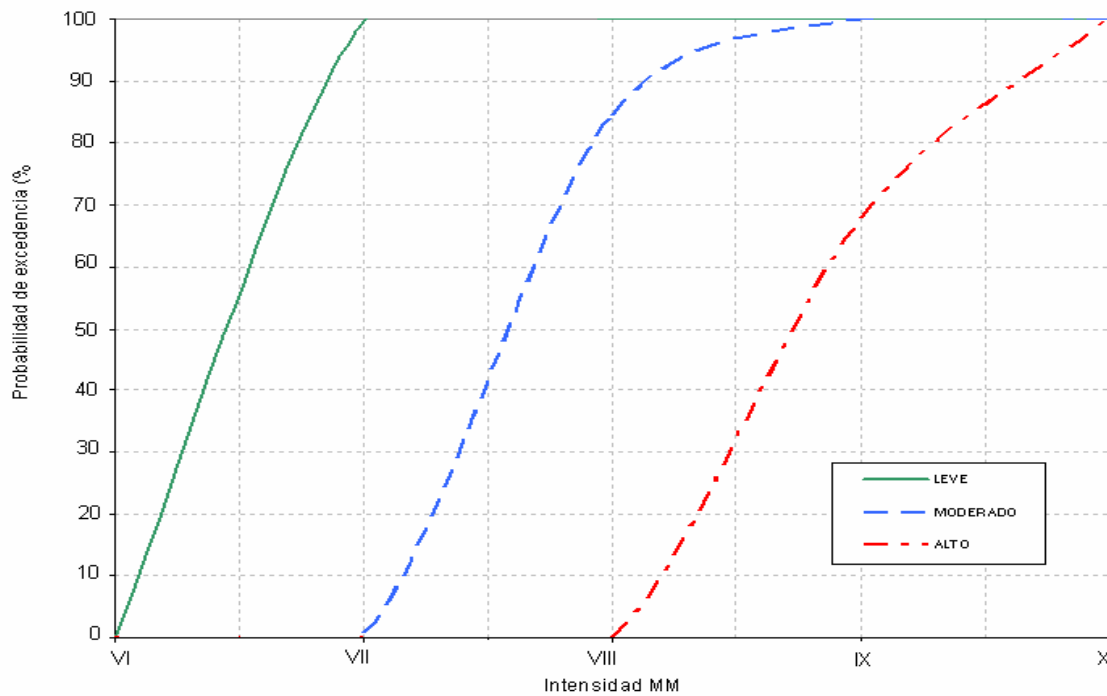
Figura 5.11 Relación intensidad-daño para los edificios tipo adobe  
Curvas de fragilidad b) Matrices de probabilidad de daño c) Correlación IMM-APS empleada



Pontificia Universidad Católica del Perú

Desempeño Sismorresistente de Edificaciones Educativas Peruanas

EDIFICIO TIPO  
*Educación Superior pre NDSR-1997*



(a)

Estado de daño	Factor de daño central (FDC)	Probabilidad de daño (%)				
		VI	VII	VIII	IX	X
Ninguno	0	0	0	0	0	0
Muy leve	0.005	0	0	0	0	0
Leve	0.05	100.0	0.3	0	0	0
Moderado	0.20	0	99.0	15.7	0	0
Alto	0.45	0	0.7	84.2	32.1	0
Severo	0.80	0	0	0.1	67.9	100.0
Colapso	1.00	0	0	0	0	0
Factor de daño medio (FDM)		5.00	20.13	41.10	68.75	80.00
Valor medio probable (VMP)		3.10	19.33	37.09	63.53	86.03

(b)

IMM	VI	VII	VIII	IX	X
APS (g)	0.05 - 0.10	0.10 - 0.20	0.20 - 0.35	0.35 - 0.50	>0.50

(c)

Figura 5.12 Relación intensidad-daño para los edificios de educación superior pre NDSR-1997  
Curvas de fragilidad b) Matrices de probabilidad de daño c) Correlación IMM-APS empleada

### 5.3.2. Daño irreparable y pérdidas en sismos raros y frecuentes

Usando las curvas y matrices de daño es posible construir para cada sistema estructural una relación directa entre la intensidad y el valor medio probable del daño. La figura 5.13 muestra esta relación para las edificaciones del tipo 780 pre NDSR-1997.

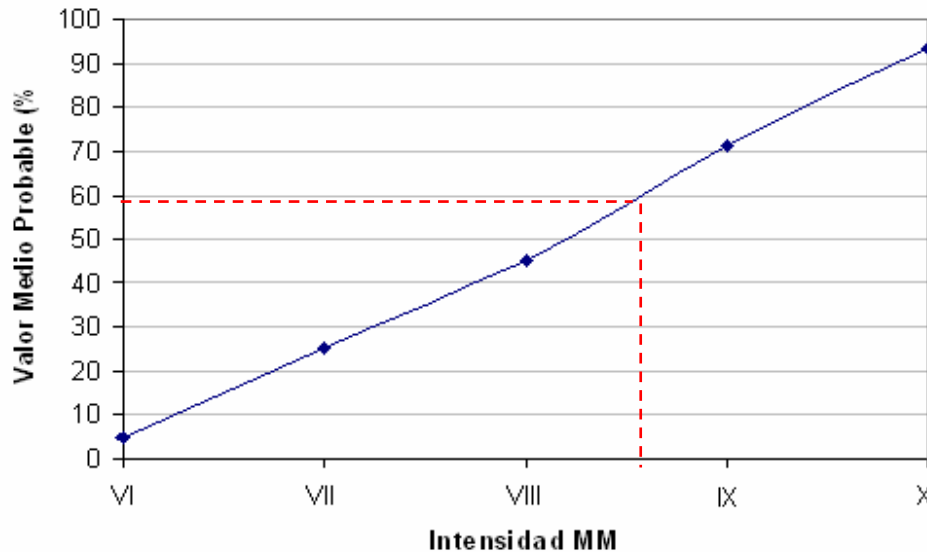


Figura 5.13 Relación IMM-VMP del daño para edificios tipo 780 pre NDSR-1997

No siempre resulta técnica y económicamente aconsejable reparar una edificación dañada seriamente por un terremoto. Se suele considerar que una edificación es irreparable cuando el daño excede el 60% (FEMA 154, 1988). Usando la relación valor medio probable-intensidad puede obtenerse la intensidad a partir de la cual un tipo de edificio determinado quedaría con daño irreparable.

Los resultados de este estudio indican que para edificios 780 pre NDSR-1997 (figura 5.14) quedarían con un daño irreparable a partir de una intensidad VIII+, lo que corresponde aproximadamente a 0.4 g (Sauter, 1978).

Para los 5 tipos de edificios escolares usados en este trabajo se encontraron las intensidades de daño irreparable mostradas en la figura 5.14.



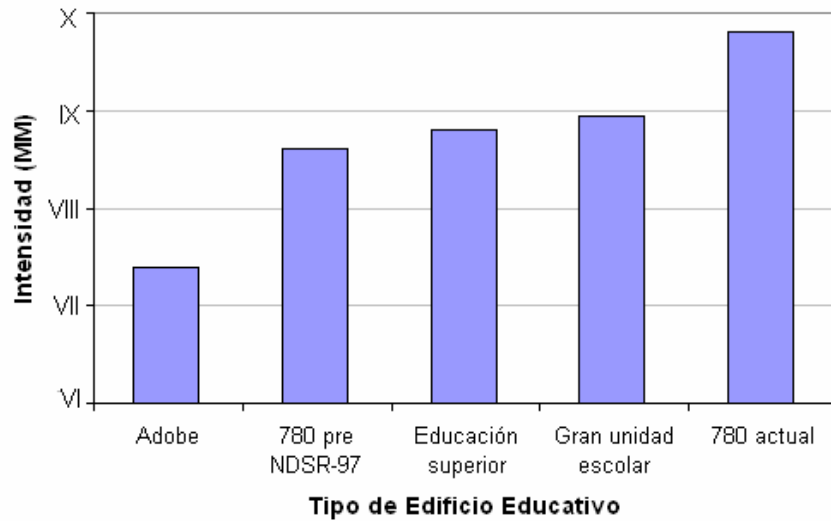


Figura 5.14 Intensidad asociada al daño irreparable para cinco tipos de edificios educativos peruanos

Dentro de los objetivos del diseño sismorresistente está la protección de las edificaciones frente a eventos con periodicidad de 500 años (10% de probabilidad de excedencia en 50 años de exposición). Para la costa peruana los valores de aceleración pico e intensidad asociados a estos eventos extremos son 0.4 g y IX MM respectivamente (Alva, 1993).

Usando las matrices de daño se obtienen los valores del daño medio que sufrirían las edificaciones escolares ante un evento con 500 años de periodo de retorno. La figura 5.15 muestra estos resultados.

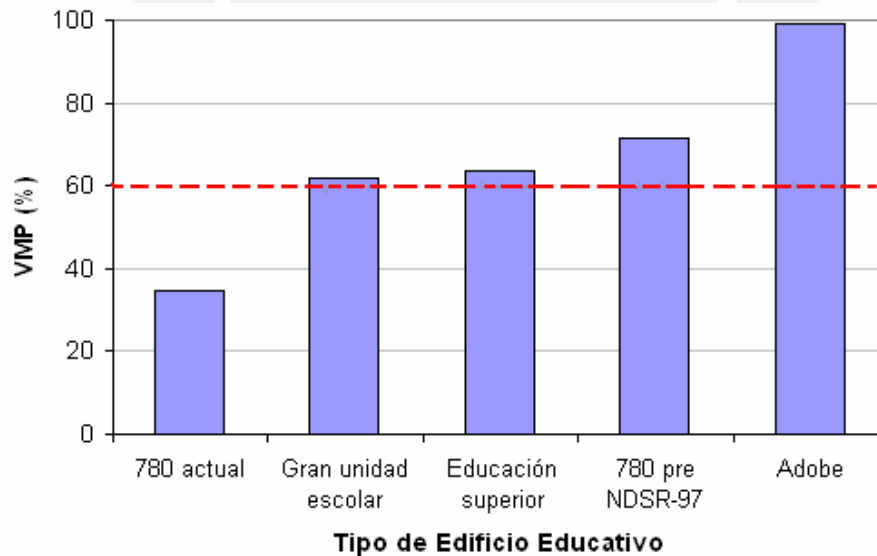


Figura 5.15 Daño que sufrirían los edificios educativos en un sismo raro

Los resultados sugieren que ante un evento de 500 años de periodo de retorno solo el sistema 780 actual tendría un daño medio de 40% aproximadamente; por tanto, sería el único sistema con posibilidad de reparación.

En la costa peruana los sismos frecuentes (50 años de periodo de retorno ó 50% de probabilidad de excedencia en 50 años de exposición) tienen asociada una aceleración pico de 0.25g y una intensidad de VII MM. (Muñoz et. al, 1999). La figura 5.16 muestra los valores del daño medio que sufrirían las edificaciones escolares ante estos eventos menores.

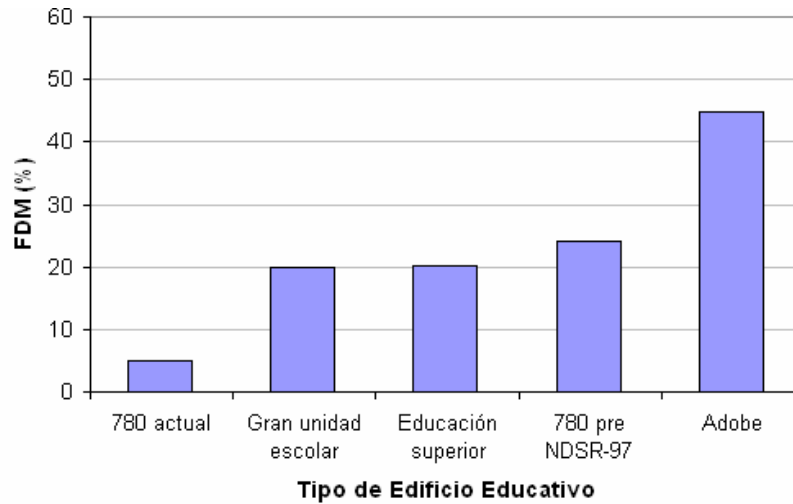


Figura 5.16 Daño que sufrirían los edificios educativos en un sismo frecuente

Se observa que ante un evento frecuente los cinco tipos de edificios educativos tendrían daño reparable siendo, el adobe el de mayor daño (45%).

### 5.3.3. Pérdidas en sismos

Usando las curvas de fragilidad y las matrices de probabilidad de daño obtenidas en este trabajo, se construyó la relación factor de daño medio-intensidad sísmica para los cinco tipos de edificios educativos que se muestran en la figura 5.17.

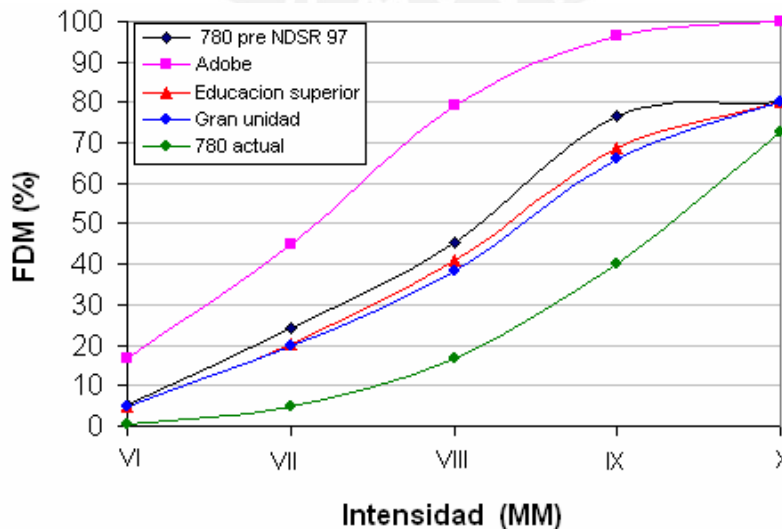


Figura 5.17 FDM de los edificios educativos en diferentes intensidades sísmicas

A manera de ejemplo, se estiman las pérdidas en diversos escenarios de sismicidad para un grupo de 50 edificaciones del tipo 780 pre NDSR-1997. Estos edificios tienen un total 24000m<sup>2</sup> de área construida, un costo de \$200 por metro cuadrado y por tanto un costo total de 24000 m<sup>2</sup> x US \$ 200 /m<sup>2</sup> = US \$ 4 800000.

Las pérdidas se calcularon como el producto del factor de daño medio por el costo total (US \$ 4 800 000). Como los resultados muestran que para una intensidad de VIII+ los edificios tendrían un daño irreparable (FDM >60%), el monto de las pérdidas para intensidades mayores a VIII+ corresponden al costo total. La figura 5.18 muestra los resultados finales obtenidos.

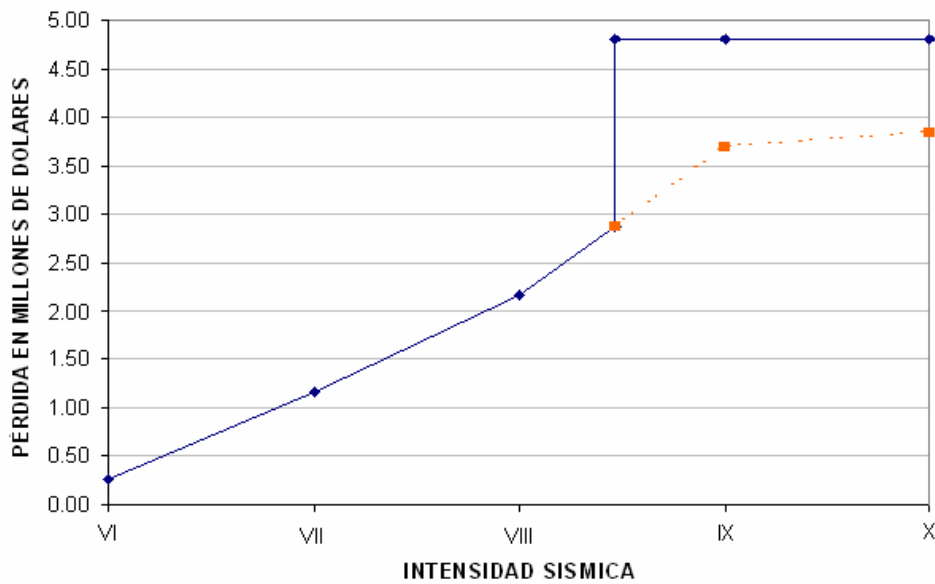


Figura 5.18 Pérdida probable para diferentes escenarios de sismicidad de 50 colegios tipo 780 pre NDSR-1997

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### *Sistema estructural de la infraestructura educativa*

- Existen actualmente alrededor de 41000 centros educativos en el país construidos en diferentes épocas, con diferente arquitectura, material y sistema estructural. El 48% de los edificios escolares son construcciones de tierra y sólo el 37% son de concreto armado y albañilería. Las construcciones de madera representan el 8%.
- En la zona peruana de mayor sismicidad (departamentos de la costa y algunas provincias de la sierra) las construcciones predominantes son las de concreto armado, albañilería y tierra, correspondiendo el 50% a las de tierra.
- Para las dos zonas de mayor sismicidad (costa y sierra) se identificaron cinco tipos de edificios educativos como los más representativos. Un tipo corresponde a los edificios de adobe, tres tipos a los edificios de concreto y albañilería construidos antes de 1997 y un tipo a los edificios de concreto y albañilería muy robustos que se empezaron a construir después de 1997.

### *Relación intensidad-daño para edificaciones educativas*

- Este trabajo se enfocó en la obtención de un modelo numérico para la estimación de pérdidas por sismos en edificaciones educativas peruanas.
- Para un determinado tipo de edificaciones la relación intensidad-daño se puede obtener empleando información estadística del desempeño de estas edificaciones en sismos pasados, o usando simulación numérica sobre muestras con propiedades aleatorias o recurriendo a la opinión de expertos.



- En el país no existe información estadística sobre el daño sufrido por edificaciones educativas en terremotos pasados, tampoco sobre las características de los materiales componentes y menos aún respecto a su variabilidad. Por tanto para obtener la relación intensidad-daño se recurrió a la opinión de expertos en ingeniería estructural conocedores del desempeño de las edificaciones educativas en terremotos peruanos.
- Como resultado de este trabajo se lograron herramientas para estimar el desempeño sismorresistente y las correspondientes pérdidas económicas de edificios educativos peruanos. Se obtuvieron curvas de fragilidad y matrices de daño para los 5 tipos de edificios identificados en este estudio.

#### *Pérdidas por sismo en edificaciones educativas*

- Si se considera que el daño es irreparable cuando el factor de daño medio (FDM) es mayor al 60%, los resultados de este trabajo indican que las edificaciones de adobe quedarían con daño irreparable a partir de una intensidad VII<sup>+</sup> MM, mientras que los edificios de concreto-albañilería construidos antes de 1997 serían irreparables a partir de IX<sup>-</sup> MM. Para los edificios de concreto-albañilería recientes, se obtuvo como umbral inferior de daño irreparable una intensidad X<sup>-</sup> MM.
- Los resultados muestran que para un sismo frecuente, 50 años de periodo de retorno, el FDM en los edificios de adobe sería de 45%, en los edificios de concreto-albañilería construidos antes de 1997 alrededor de 20% y en los edificios recientes de concreto-albañilería de sólo 5%.
- En un sismo raro, periodo de retorno de 500 años, los resultados muestran que el FDM para los edificios de adobe sería de 95%, alrededor de 65% para los de concreto-albañilería anteriores a 1997 y de 38% para los edificios de concreto-albañilería posteriores a 1997.
- Las edificaciones educativas de concreto-albañilería construidas según la norma de diseño sismorresistente de 1997 representan solo el 2% del total de edificios educativos existentes. Los resultados indican que estos edificios serían los únicos que podrían ser reparados luego de un evento severo.





### *Plan nacional de protección de la infraestructura educativa*

- Para desarrollar un plan nacional de protección de la infraestructura educativa, es necesario contar con herramientas para cuantificar la relación intensidad-daño y con información precisa respecto a la distribución geográfica de las edificaciones en el país, así como de las condiciones propias de cada edificación (estado de conservación, sismicidad local, etc.).
- El estado no cuenta con información organizada respecto a la distribución geográfica de la infraestructura educativa; sólo existe información básica muy dispersa y desorganizada, que debería ser compilada y procesada por organismos del estado encargados del sector educación.
- En este trabajo se obtuvieron curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño para su uso como herramientas de estimación de pérdidas por sismo.
- A futuro se podrá desarrollar un modelo nacional de pérdidas, uniendo las herramientas numéricas desarrolladas en este trabajo con una representación formal de la distribución geográfica de la infraestructura educativa.
- Elaborar el plan nacional de protección de la infraestructura educativa es una tarea de mediano plazo que necesita de la concurrencia del estado y de la comunidad de ingenieros e investigadores peruanos.
- Existen muchas edificaciones educativas sísmicamente vulnerables cuya intervención no debería supeditarse a la existencia del plan nacional de protección. Para estos edificios es necesario desarrollar programas específicos de reducción de vulnerabilidad a bajo costo.

## REFERENCIAS

- Alva, J. 1993. *Distribución de Isoaceleraciones*. UNI – CISMID Lima, Perú.
- ATC 13 (Applied Technology Council). 1985. *Earthquake Damage Evaluation Data For California*. Redwood City, California, USA.
- Federal Emergency Management Agency. 1988. *FEMA 154 Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook*. Washington, USA.
- Muñoz A, Quiun D, Tinman M. 1999. *Riesgo sísmico de edificios peruanos*. Departamento de Ingeniería PUCP. Lima, Perú.
- Ministerio de educación del Perú, 2003. *Cifras de la educación 1998-2003*. Lima, Perú.
- Sauter, F. 1978 . *Estudio de Seguro Contra Terremoto*. Instituto Nacional de Seguros, San José, Costa Rica.
- <http://www.rand.org/>
- <http://www.pucp.edu.pe/secc/civil/dsrep/>.

## BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL

- Aguiar R. 2003. *Análisis Sísmico por Desempeño*. Centro de investigaciones científicas.
- Barbat A.H. 1998. *El riesgo sísmico en el diseño de edificios*. Calidad Siderúrgica, Madrid.
- Bonett R, Barbat A, Pujades Ll. 2002. *Seismic fragility curves for traditional unreinforced masonry buildings of Barcelona, Spain*. Technical University of Catalonia, Barcelona.
- Bonett R. 2003. *Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Federal Emergency Management Agency .1988. *FEMA 155: Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: Supporting Documentation*. Washington.
- Federal Emergency Management Agency .1998. *FEMA 310: Handbook for seismic evaluation of buildings*. Washington.
- Federal Emergency Management Agency .1999. *Earthquake loss estimation methodology- HAZUS 99 Technical Manual*. Washington.



Kerstin L. 2002. *Seismic vulnerability of existing buildings*. Institute of Structural Engineering Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.

Rwey-Hua Cherng. 2001 *Preliminary Study on the Fragility Curves for Steel Structures in Taipei*. National Taiwan University of Science and Technology, Taipei.

Meneses J, Aguilar Z, Pinto L, Sanchez M. 2003. *Seismic vulnerability of school buildings in Chorrillos and Barranco districts, Lima, Perú*. University of California Pacific Rim Research Program.

Saxena V, Deodatis G, Feng M. 2002. Development of fragility curves for multi-span reinforced concrete bridges. Princeton University, Princeton.

Sunil S, Candia G. 1991. *Análisis de peligro sísmico en el Perú*. Universidad de Idaho.



## ANEXO 1

### Página Web del Desempeño Sismorresistente de Edificaciones Peruanas

Se creó una página web en coordinación con la dirección de informática de la PUCP para mantener informado al panel de expertos y mostrar los resultados del estudio de desempeño sismorresistente de las edificaciones peruanas.

#### *Página Principal*

En esta página principal se ofrece información del método Delphi y del desempeño de los edificios peruanos.



Figura A1 Página principal del proyecto de desempeño sismorresistente de edificaciones peruanas



*Página del método Delphi*

Se ofrecen cinco boletines que sirvieron para informar al panel de expertos acerca de la historia y aplicación del método Delphi. Se muestra la relación intensidad–aceleración usada en el trabajo y se incluyen mapas de intensidades de los principales terremotos peruanos.

A continuación se muestra la página del método Delphi y algunas capturas de pantalla de la información presentada en ella.


**Pontificia Universidad Católica del Perú**  
DESEMPEÑO SIMORRESISTENTE DE EDIFICACIONES PERUANAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

MÉTODO DELPHI   
  INFRAESTRUCTURA EDUCATIVA   
  EDIFICIOS DE MUROS DE DUCTILIDAD LIMITADA   
 VOLVER A LA PÁGINA PRINCIPAL

### El Método Delphi

El Método Delphi sirve para recolectar información dispersa que muchas veces sólo se encuentra en manos de un grupo de expertos. Usaremos este método para estimar el desempeño sismorresistente de algunos tipos de edificios peruanos. Presentamos brevemente este método en los siguientes 5 boletines muy cortos (1 página cada uno).



Versión PDF

1. El Oráculo de Delfos y La Ingeniería Civil
2. El Método de Delphi y La Ingeniería Civil
3. Delphi y la Evaluación de Daños por Sismo
4. Delphi y los Edificios Peruanos
5. Intensidades, Daño y Confiabilidad

Los anexos que siguen contienen información de intensidades y aceleraciones en algunos sismos peruanos

- Relación Intensidad - Aceleración
- Distribución de Intensidades de terremotos peruanos

PUCP PRINCIPAL    Consultas: [delphi@pucp.edu.pe](mailto:delphi@pucp.edu.pe)    DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

Figura A2 Página del método Delphi





Pontificia Universidad Católica del Perú  
DESEMPEÑO SISMORRESISTENTE DE EDIFICACIONES PERUANAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

MÉTODO DELPHI | INFRAESTRUCTURA EDUCATIVA | EDIFICIOS DE MURDE DE DUCTILIDAD LIMITADA | VOLVER A LA PÁGINA PRINCIPAL

### 1 El Oráculo de Delfos y La Ingeniería Civil

El hombre siempre ha intentado conocer el futuro. Los hombres de la antigüedad se dirigían al templo de Apolo en Delfos para averiguar lo que les deparaba el destino.



Temple of Apollo in Delphi  
El primer templo data de fines del II milenio antes de nuestra era.

En los años 50, en el seno del Centro de Investigación estadounidense RAND Corporation, Olaf Helmer y Theodore J. Gordon desarrollaron el Método Delphi (el nombre se inspira en el oráculo de Delfos), con el propósito de obtener información de un grupo de expertos en



Figura A3 Boletín 1

Pontificia Universidad Católica del Perú  
DESEMPEÑO SISMORRESISTENTE DE EDIFICACIONES PERUANAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

MÉTODO DELPHI | INFRAESTRUCTURA EDUCATIVA | EDIFICIOS DE MURDE DE DUCTILIDAD LIMITADA | VOLVER A LA PÁGINA PRINCIPAL

### 3 Delphi y la Evaluación de Daños por Sismo

Delphi aplicado en la Ingeniería

Entre las aplicaciones del Método de Delphi en ingeniería civil está el estudio de daños por sismos en el estado de California. En esta oportunidad, gracias a la participación de expertos en ingeniería estructural, se pudo correlacionar intensidades sísmicas y daños en edificaciones. El Consejo de Tecnología Aplicada de Estados Unidos elaboró un informe con los resultados de este trabajo (ATC-13).



Intensidad (MM)	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Rango del Factor de Daño	0	A	B	C	D	E	F
0							
0.1							
1							
10							

¿Que se obtuvo gracias a este trabajo?  
Una matriz de daños para cada sistema estructural, que presenta la relación entre diferentes intensidades sísmicas y el rango de variación de los daños.

Figura A4 Boletín 3

Pontificia Universidad Católica del Perú  
DESEMPEÑO SISMORRESISTENTE DE EDIFICACIONES PERUANAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

MÉTODO DELPHI | INFRAESTRUCTURA EDUCATIVA | EDIFICIOS DE MURDE DE DUCTILIDAD LIMITADA | VOLVER A LA PÁGINA PRINCIPAL

### Anexo 1

#### Relación Intensidad - Aceleración

Intensidad (MM)	Aceleración Pico del Suelo (g)	Descripción
I 		Sentido sólo por algunas personas en condiciones sumamente favorables.
II 		Percibido por personas en descanso, especialmente en los pisos altos de edificios. Objetos suspendidos delicadamente pueden oscilar.
III 	< 0,05	Percibido en el interior de los edificios pero sin reconocerse como sismo.

Figura A5 Anexo 1  
Relación intensidad – aceleración

Pontificia Universidad Católica del Perú  
DESEMPEÑO SISMORRESISTENTE DE EDIFICACIONES PERUANAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

MÉTODO DELPHI | INFRAESTRUCTURA EDUCATIVA | EDIFICIOS DE MURDE DE DUCTILIDAD LIMITADA | VOLVER A LA PÁGINA PRINCIPAL

### Anexo 2

#### Distribución de Intensidades de Terremotos Peruanos

A continuación se presentan los mapas de isonistas de terremotos peruanos. Fuentes: Instituto Geofísico del Perú (IGP), Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID).

- 28 de octubre de 1746
- 13 de agosto de 1868
- 24 de Mayo de 1940
- 17 de octubre de 1966
- 31 de mayo de 1970
- 3 de octubre de 1974
- 5 de abril de 1986
- 12 de noviembre de 1996
- 23 de junio de 2001

Figura A6 Anexo 2  
Mapas de Intensidades de los principales terremotos peruanos

### *Página de las edificaciones educativas peruanas*

En esta página se presenta de manera concisa la información acerca de las edificaciones educativas para permitir al panel de expertos tener un concepto claro del tipo de edificación que se está evaluando. A través de esta página se entregó la encuesta al grupo de expertos y se muestran los resultados.

A continuación se muestran algunas capturas de pantalla de la página de las edificaciones educativas.



Pontificia Universidad Católica del Perú  
DESEMPEÑO SISMORRESISTENTE DE EDIFICACIONES PERUANAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

MÉTODO DELPHI   
  INFRAESTRUCTURA EDUCATIVA   
  EDIFICIOS DE MUROS DE DUCTILIDAD LIMITADA   
 [VOLVER A LA PÁGINA PRINCIPAL](#)

### Infraestructura Educativa

Los daños que ocasionan los terremotos en los edificios educativos peruanos generalmente son de consideración y varían de acuerdo a las condiciones locales y al sistema estructural empleado.

A continuación encontrará una descripción de los sistemas estructurales más representativos de la infraestructura educativa peruana, una galería de imágenes y una corta encuesta para recoger su opinión respecto al desempeño sismorresistente de estos edificios.

- [Sistemas Estructurales](#)
- [Galería de Imágenes](#)
- [Encuesta](#)
- [Resultados de la encuesta](#)

PUCP PRINCIPAL    Consultas: [delphi@pucp.edu.pe](mailto:delphi@pucp.edu.pe)    DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

Figura A7 Página de la infraestructura educativa peruana



Figura A8 Sistemas estructurales característicos de las edificaciones educativas

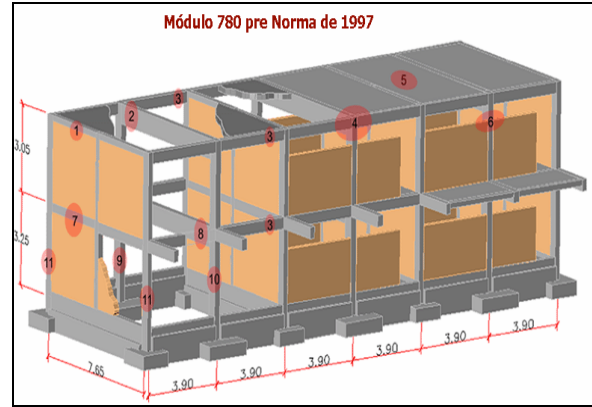


Figura A9 Características estructurales del edificio 780 pre NDSR-1997



Figura A10 Galería de imágenes



Figura A11 Página de la Encuesta

## ANEXO 2

## SÍNTESIS DE LAS ESTIMACIONES DE EXPERTOS SOBRE EL DAÑO ESPERADO EN LA INFRAESTRUCTURA EDUCATIVA

Se presentan los valores finales de las estimaciones mínimas, media y máxima de los edificios educativos característicos en diferentes niveles de severidad sísmica.

		Edificio 780 pre NDSR-1997														
Intensidades		V - VI			VII			VIII			IX			X - XI		
Daño	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	
		1.42	4.66	9.42	16.97	24.97	34.03	31.67	45.20	55.72	60.00	71.52	88.75	88.68	93.24	100.00

		Edificio 780 actual														
Intensidades		V - VI			VII			VIII			IX			X - XI		
Daño	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	
		0.00	0.21	0.41	0.33	3.13	5.13	7.41	13.41	22.70	25.11	34.86	43.97	55.71	63.97	71.89

		Edificio Gran Unidad Escolar														
Intensidades		V - VI			VII			VIII			IX			X - XI		
Daño	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	
		0.60	4.47	5.94	10.69	17.92	25.12	22.74	34.03	42.85	47.27	61.91	75.76	76.67	82.12	90.65

		Edificio Educación Superior pre NDSR-1997														
Intensidades		V - VI			VII			VIII			IX			X - XI		
Daño	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	
		2.15	3.10	5.23	12.49	19.33	25.47	23.15	37.09	47.03	48.86	63.53	75.29	78.43	86.03	91.03

		Edificio Adobe														
Intensidades		V - VI			VII			VIII			IX			X - XI		
Daño	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	
		6.68	14.29	24.32	31.91	43.71	55.66	65.14	76.71	87.71	98.89	99.26	100.00	100.00	100.00	100.00

### ANEXO 3

#### Parámetros $\lambda$ , $\nu$ que definen las funciones de distribución del daño

Se presentan los parámetros  $\lambda$  y  $\nu$  obtenidos para cada una de las tipologías educativas en cada una de las intensidades sísmicas consideradas.

Edificio 780 pre NDSR-1997										
Intensidades	V - VI		VII		VIII		IX		X - XI	
Parámetros Beta	$\lambda$	$\nu$	$\lambda$	$\nu$	$\lambda$	$\nu$	$\lambda$	$\nu$	$\lambda$	$\nu$
	3.28	67.18	17.18	51.62	21.45	26.01	20.29	8.08	50.61	3.67

Edificio 780 actual										
Intensidades	V - VI		VII		VIII		IX		X - XI	
Parámetros Beta	$\lambda$	$\nu$	$\lambda$	$\nu$	$\lambda$	$\nu$	$\lambda$	$\nu$	$\lambda$	$\nu$
	1.97	933.81	4.28	132.50	7.80	50.33	23.74	44.36	60.35	33.99

Edificio Gran Unidad Escolar										
Intensidades	V - VI		VII		VIII		IX		X - XI	
Parámetros Beta	$\lambda$	$\nu$	$\lambda$	$\nu$	$\lambda$	$\nu$	$\lambda$	$\nu$	$\lambda$	$\nu$
	15.42	329.51	13.18	60.39	20.86	40.43	18.87	11.61	74.97	16.32

Edificio Educación Superior pre NDSR-1997										
Intensidades	V - VI		VII		VIII		IX		X - XI	
Parámetros Beta	$\lambda$	$\nu$	$\lambda$	$\nu$	$\lambda$	$\nu$	$\lambda$	$\nu$	$\lambda$	$\nu$
	16.23	507.35	18.97	79.17	17.34	29.42	22.95	13.18	77.09	12.52

Edificio Adobe										
Intensidades	V - VI		VII		VIII		IX		X - XI	
Parámetros Beta	$\lambda$	$\nu$	$\lambda$	$\nu$	$\lambda$	$\nu$	$\lambda$	$\nu$	$\lambda$	$\nu$
	5.94	35.62	20.24	26.06	27.64	8.39	948.47	7.07	50514.90	10.11



## ANEXO 4

## Programa de cómputo desarrollado

A continuación se presenta el programa FragilidadAA desarrollado para generar curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño.

```
% PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
% Tesis para optar al grado de Magíster en Ingeniería Civil
% Proyecto Riesgo INFES
% Programa hecho por:
% - Aguilar Velez, Rafael
% - Astorga Mendizábal, Maria Angela
% Diciembre 2005
% INICIO
clear;          % limpia la memoria y la pantalla
clc;
fprintf('%s\n\n','');
fprintf('Pontificia Universidad Católica del Perú-Maestría en Ingeniería Civil\n');
fprintf('PROGRAMA QUE GENERA MATRICES DE PROBABILIDAD DE DAÑO Y CURVAS DE FRAGILIDAD-v1.0\n');
fprintf('Hecho por : MAAM\n');
fprintf('      RAV\n');
fprintf('%s\n\n','');
%Archivos de entrada y salida
fdat = input('Archivo de datos "entre tildes":');
fsal = input('Archivo de resultados "entre tildes":');
fid = fopen(fdat,'r'); %Abrimos archivos de datos para lectura
fis = fopen(fsal,'w'); %Abrimos archivo de resultados para escritura
inicio=clock;        % tiempo inicial
% Inicializa arreglos
est = 0;
datos = [];
ebaja = zeros(5,1);
emedias = zeros(5,1);
ealta = zeros(5,1);
mlambda = zeros(5,1);
mnu = zeros(5,1);
% LECTURA DE DATOS
% Modulo de lectura de datos de las estimaciones de expertos en
% ingenieria estructural
lin=0;              %Contador de líneas
while ~feof(fid);  %mientras no lleguemos al final del archivo...
    linea = fgetl(fid); %Lee una linea
    lin = lin + 1;
    if linea(1) == '*'; %Empieza con simbolo de comando?
        comando = linea(2:3); %si:comando, usamos los dos primeros caracteres
    else
        switch comando %Examinamos cada linea que sigue a un comando
            case 'TI' %Titulo
                titulo=linea; %guarda el titulo
            case 'DA' %Estimaciones de expertos
                a=sscanf(linea,'%d %f %f %f %f'); %Pone 6 numeros en arreglo a
                est=a(1);
                MMI(est,1)=a(2); % Genera el vector de intensidades
                datos(est,1)=a(3);datos(est,2)=a(4);datos(est,3)=a(5); %Genera la matriz de estimaciones de expertos
            otherwise
                fprintf('No entiendo este comando:%s en linea %3d\n',linea,lin);
        end
    end
end
end
```

```

ebaja(:,1) = datos(:,1);      %Vector de estimaciones bajas
emedia(:,1) = datos(:,2);    %Vector de estimaciones medias
ealta(:,1) = datos(:,3);     %Vector de estimaciones altas
estimaciones(:,5)=datos(:,5); %Matriz de estimaciones
st=fopen(fid);               %Cierra el archivo de datos
% PARAMETROS LAMBDA Y NU
% Modulo que calcula los valores de lambda (lbd) y nu (nu), dada la media de la
% funcion beta (uy) y las estimaciones baja (low) y alta (high). Se asume 90% de probabilidad
% entre los valores low y high.
% Inicializamos variables
mencontro = zeros(5,1);
for j=1:5
minnuini = 0.01;
deltanuini = 1;
maxnuini = 10000;
%
error = 0.00001;
prob = 0.90;
%
minnu = minnuini;
deltanu = deltanuini;
maxnu = maxnuini;
encontro=mencontro(j,1);
while ~encontro
%
for i = minnu : deltanu : maxnu
nu = i;
lambda = nu*emedia(j,1) / (100-emedia(j,1));
pr = betainc(ealta(j,1)/100,lambda,nu)-betainc(ebaja(j,1)/100,lambda,nu);
if pr>prob
if abs(pr-prob)<error
% Se encontro el valor de nu buscado
encontro = 1;
mlambda(j,1)= lambda;
mnu(j,1)= nu;
mencontro(j,1)=encontro;
break;
else
minnu = nu-deltanu;
maxnu = nu;
deltanu = deltanu/10;
break;
end
end
end
% Evaluar si encontro el nu buscado
if encontro
mlambda(j,1)= lambda;
mnu(j,1)= nu;
mencontro(j,1)=encontro;
break;
end
end
end
% CURVAS DE FRAGILIDAD
% Modulo que calcula los valores de la matriz de probabilidad de excedencia,
% dados los valores de lambda y nu para cada intensidad MM.
ldf = [0; 0.1; 1; 10; 30; 60; 99; 100]; %limites estados de daño
cdf = [0; 0.5; 5; 20; 45; 80; 100]; %factores centrales
% Calculo de la probabilidad de excedencia en cada caso
Frag = zeros(7,5);
for k=1:5
prob = betainc(ldf/100,mlambda(k,1),mnu(k,1));
predf = zeros(5,1);
for a = 1:7
pred = 1-prob(a);
predf(a,:) = pred;
end
Frag(:,k) = [predf];
end
end

```



```

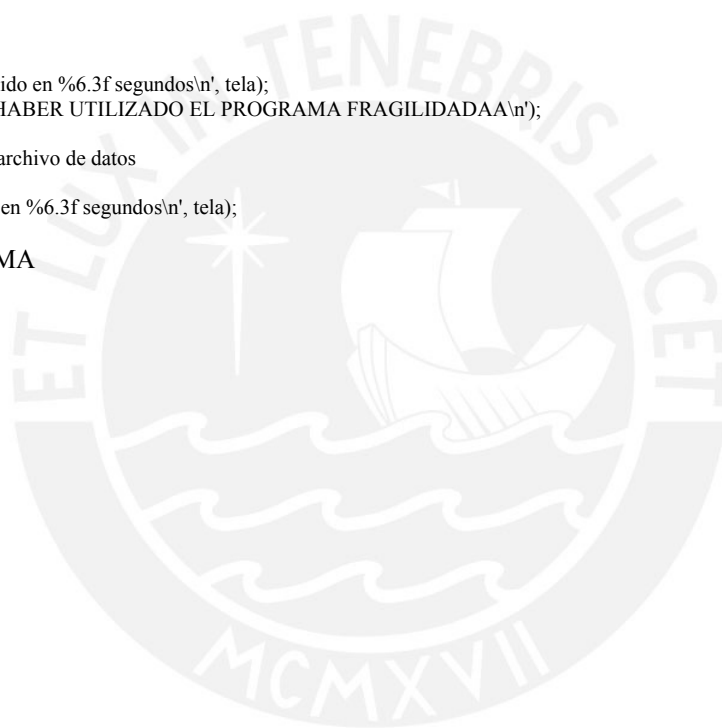
FragF = 100*Frag;
%
% MATRIZ DE PROBABILIDAD DE DAÑO
% Modulo que calcula los valores de la matriz de probabilidad de daño,
% dados los valores de lambda y nu para cada intensidad MM.

ldf = [0; 0.1; 1; 10; 30; 60; 99; 100]; %limites estados de daño
cdf = [0; 0.5; 5; 20; 45; 80; 100]; %factores centrales
% CALCULO de la probabilidad de ocurrencia en cada caso
MPD = zeros(7,5);
for k=1:5
pr = betainc(ldf/100,mlambda(k,1),mnu(k,1));
prdf = zeros(5,1);
for a = 1:7
    prd = pr(a+1)-pr(a);
    prdf(a,:) = prd;
end
MPD(:,k) = [prdf];
end
%
MPD1 =100*MPD;
%
% IMPRESION DE RESULTADOS
fprintf('%s\n\n','');
fprintf('%s\n\n','**** CALCULO DE PARAMETROS LAMBDA Y NU ****');
fprintf('%s %s' , LAMBDA NU ENCONTRO');
for i= 1:5
fprintf('\n%10.4f %10.4f %10.4f ',mlambda(i,:),mnu(i,:), mencontro(i,:));
end
fprintf('%s\n\n','');
fprintf('%s\n\n','**** CALCULO DE LA MATRIZ DE PROBABILIDAD DE DAÑO ****');
fprintf('%s %s' , VI VII VIII IX X');
for i= 1:7
fprintf('\n%10.4f %10.4f %10.4f %10.4f %10.4f %10.4f %10.4f',MPD1(i,:));
end
fprintf('%s\n\n','');
fprintf('%s\n\n','**** MATRIZ DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE DAÑO****');
fprintf('%s %s' , VI VII VIII IX X');
for i= 1:7
fprintf('\n%10.4f %10.4f %10.4f %10.4f %10.4f %10.4f %10.4f',FragF(i,:));
end
% GRAFICA DE CURVAS DE FRAGILIDAD
T=FragF';
plot(MMI,T,'LineWidth',2)
title ('CURVAS DE FRAGILIDAD SIN AJUSTAR','FontName','Palatino','FontWeight','bold');
xlabel('Intensidad (MM)','FontName','Palatino','FontWeight','bold');
ylabel('Probabilidad de Excedencia(%)','FontName','Palatino','FontWeight','bold');
set(gca,'FontName','Palatino','FontSize',8)
h=legend('ninguno','muy leve', 'leve','moderado','alto','severo','colapso',-2);
axis([6,10,0,100])
grid
set(gcf,'Renderer','OpenGL');
set(gcf,'Color',[1,1,1])
% IMPRESION EN ARCHIVO DE TEXTO
% Imprime a un archivo de texto de salida los resultados que se han
% obtenido con las estimaciones ingresadas
%
fprintf(fis,'\n
*****\n');
fprintf(fis,'\n');
fprintf(fis,'Pontificia Universidad Catolica del Peru-Maestria en Ingenieria Civil\n');
fprintf(fis,'PROGRAMA QUE GENERA CURVAS DE FRAGILIDAD Y MATRICES DE PROBABILIDAD DE DAÑO-version 1.0\n');
fprintf(fis,'Hecho por : MAAM\n');
fprintf(fis,' RAV\n');
fprintf(fis,'\n');
fprintf(fis,'\n RESULTADOS DE ESTIMACIONES\n');
fprintf(fis,'\n
*****\n');
fprintf(fis,'%s\n\n','');
fprintf(fis,'%s\n\n','**** CALCULO DE PARAMETROS LAMBDA Y NU ****');

```



```
fprintf(fis,'%s %s',' INTENSIDAD LAMBDA NU ENCONTRO');
for i= 1:5
fprintf(fis,'\n%6.0f %14.4f%14.4f %8.0f ',MMI(i,:), mlambda(i,:),mnu(i,:), mencontro(i,:));
end
fprintf(fis,'\n\n');
fprintf(fis,'\n\n');
fprintf(fis,'\n\n','**** MATRIZ DE PROBABILIDAD DE DAÑO ****');
fprintf(fis,'%s %s',' VI VII VIII IX X');
for i= 1:7
fprintf(fis,'\n%10.4f%10.4f %10.4f %10.4f %10.4f',MPD1(i,:));
end
fprintf(fis,'\n\n');
fprintf(fis,'\n\n');
fprintf(fis,'\n\n','**** MATRIZ DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE DAÑO****');
fprintf(fis,'%s %s',' VI VII VIII IX X');
for i= 1:7
fprintf(fis,'\n%10.4f %10.4f %10.4f %10.4f %10.4f',FragF(i,:));
end
%
fprintf(fis,'\n\n');
tfin = clock;
tela = etime(tfin,tinicio);
fprintf(fis,'\n Analisis concluido en %6.3f segundos\n', tela);
fprintf(fis,'GRACIAS POR HABER UTILIZADO EL PROGRAMA FRAGILIDADAA\n');
fprintf(fis,'\n');
st=fclose(fis); %Cierra el archivo de datos
fprintf('\n\n');
fprintf('\n Analisis concluido en %6.3f segundos\n', tela);
%%
%FIN DEL PROGRAMA
```



## ANEXO 5

### Panel de expertos y grupo monitor

#### Panel de Expertos:

- Ing. Jesús Abugattas Abuid
- Ing. Ruth Aguado Semino
- Ing. José Luis Amado Travezaño
- Ing. Jorge Alva Hurtado
- Ing. Antonio Blanco Blasco
- Ing. Iván Bragagnini
- Ing. Luis Briceño
- Ing. José Castillo
- Ing. Jorge Chávez - Tafur
- Ing. Carlos Cassabonne
- Ing. Gabriela Esparza Requejo
- Ing. Joseph Gómez
- Ing. Jorge González
- Ing. Cesar Gutiérrez
- Ing. Teodoro Harmsen Gómez de la Torre
- Ing. Julio Higashi
- Ing. Pedro Horna Calderón
- Ing. Carlos Irala
- Ing. Iván Izquierdo
- Ing. Carmen Kuroiwa Horiuchi
- Ing. Julio Kuroiwa Horiuchi
- Ing. Pablo Medina Quispe
- Ing. Jorge Meneses
- Ing. Oscar Miranda
- Ing. Gianfranco Ottazzi Pasino
- Ing. Javier Piqué del Pozo
- Ing. Julio Rivera Feijóo
- Ing. Marcio Rodríguez
- Ing. Angel San Bartolomé
- Ing. Víctor Sánchez Moya
- Ing. Jesús Solano
- Ing. Luis Tipian
- Ing. Daniel Torrealva
- Ing. Luís Yeckle
- Ing. Luís Zegarra
- Alfredo Zegarra

#### Grupo Monitor:

- Mag. Alejandro Muñoz Peláez
- Dr. Marcial Blondet
- Ing. Rafael Aguilar Velez
- Ing. María Ángela Astorga Mendizábal
- Raúl Javier Delgado Ehni
- Catalina Peña Rodríguez-Larraín