



CONGRESO INTERNACIONAL DE LA CONSTRUCCIÓN CON ACERO

2019

Medellín, *Centro de Eventos El Tesoro*
Junio 19, 20 y 21

ICCA [®]
INSTITUTO COLOMBIANO DE
LA CONSTRUCCIÓN CON ACERO



Diseño de Edificios y Puentes de Acero con Aislamiento Sísmico

Telmo Andrés Sánchez, Ph.D.
ADSTREN Ingeniería Estructural





Nota del ICCA

El ICCA no ejerce control sobre el contenido de esta conferencia. Lo tratado en ella refleja sólo la opinión de su autor.

Los invitamos a poner sus teléfonos en silencio.

Gracias

Contenido



- Introducción
- Fundamentos de aislamiento sísmico
- Códigos, normativas y guías
- Ejemplos de implementación
- Conclusiones



Introducción



Introducción



Estructuras esenciales: Aquellas que están llamadas a operar al 100% de su capacidad después de ocurrir un terremoto

Ejemplos:

- Hospitales
- Puentes
- Estaciones de bomberos
- Estaciones de policía



Desastres causados por sismos en
estructuras esenciales

Introducción



Pacientes de hospital en la calle, México

Introducción



Pacientes de hospital en la calle, México

Introducción



Pacientes de hospital en la calle, México

Introducción



Pacientes de hospital en carpas, México

Introducción



Pacientes de hospital en carpas, México

Introducción



Ecuador

Introducción



Introducción



AP Photo/New Zealand Herald, Mark Mitchell

Nueva Zelanda

Introducción



Nueva Zelanda

Introducción



Chile

Introducción



China

Introducción



Hospital Original View, California, Estados Unidos

Introducción



Hospital Kaiser Permanente, California, Estados Unidos

Introducción



California, Estados Unidos

Introducción



California, Estados Unidos

Introducción



Chile

Introducción



Chile

Introducción



Japón

Introducción



China

Introducción



China

Introducción



Continuamente, en todas partes del mundo se observa daños devastadores en todo tipo de edificaciones, incluyendo aquellas llamadas a operar inmediatamente después del terremoto

Introducción



Daños estructurales y arquitectónicos
(en estructuras que no colapsaron)

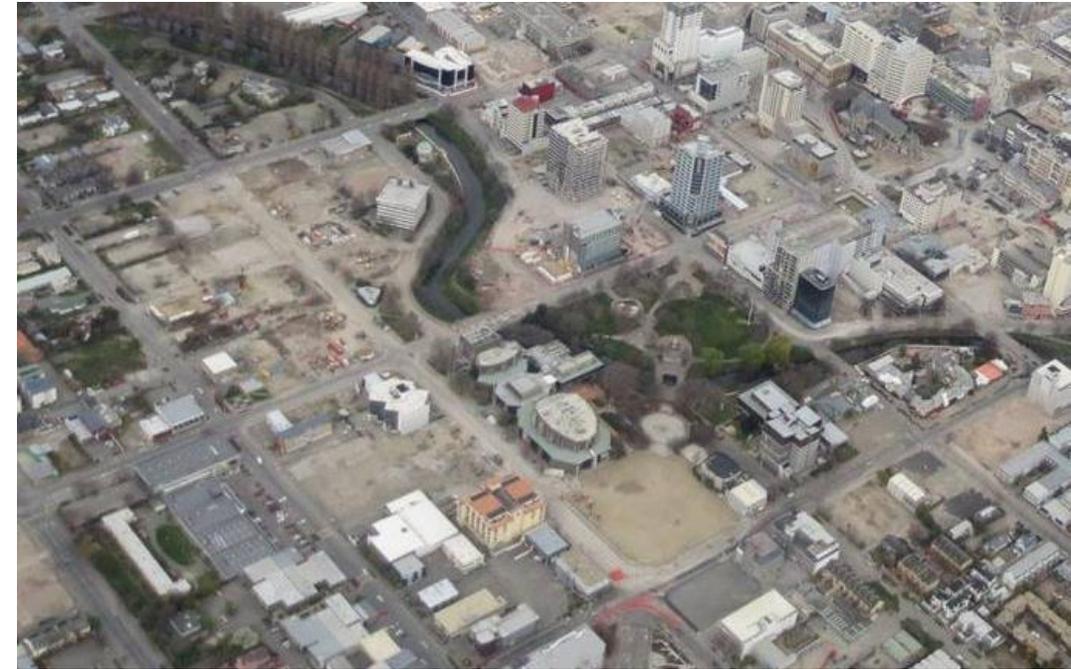
Introducción



Christchurch City Center



Tres días después del terremoto de magnitud 6.3, 2010



Tres años después del terremoto de magnitud 6.3, 2010.
70% de edificios fueron demolidos. Después de 5 años,
solo el 15% han sido reconstruidos. Mediana de pérdida
de uso de propiedad: 15 años.

Introducción



Bahía de Caráquez



Antes del terremoto de magnitud 7.8, 2016

100% de los edificios sufrieron daños por el terremoto. Varios edificios colapsaron. El costo de reparación varía entre 35% y 200% del costo de construir nueva estructura.

Introducción



Bahía de Caráquez

El costo de reparación es 35% del costo de construcción original. Pérdida de uso es de 20 meses.
Pérdida total es 50% del costo de construcción original.

Introducción



Hospital de Bahía de Caráquez

Evacuado el día del terremoto. Atención médica no disponible para los heridos. Costo de reparación: 40%. Pérdida de uso como edificio municipal mayor a 3 años. Pérdida total es 56% del costo de construcción original.

Una vez que los fondos estén disponibles un nuevo hospital será construido en otro sitio. El nuevo hospital será (o debería ser) diseñado y construido para tener Funcionalidad Continua.

Introducción



Puente Los Caras, Bahía de Caráquez

El puente mantuvo funcionalidad durante el terremoto de magnitud 7.8. El movimiento telúrico fue 20 veces mayor a la resistencia requerida por el código de diseño. El puente fue utilizado para evacuar cientos de personas de la devastada ciudad de Bahía de Caráquez.



Objetivos de desempeño

Introducción



¿Es suficiente con diseñar edificios de alta resistencia?

Introducción



Los edificios de alta resistencia generalmente sufren daños muy severos

- $R = 1$ sin aislamiento

Introducción



Hospital Olive View, California. Edificio de mayor resistencia del mundo.

Capacidad a cortante basal: $1.2g$, $R = 1$ para MCE.

No presentó daño estructural durante el terremoto de magnitud 6.7 en 1994. Daño arquitectónico severo causó que el hospital sea evacuado el día del terremoto y que permanezca cerrado por tres meses. El hospital no pudo atender a los heridos por el terremoto.

Introducción



Interior de hospital después de terremoto, California

Introducción



Interior de hospital después de terremoto, California

Introducción



Edificio comercial cerrado después de terremoto, Chile

Introducción



Interior de edificio comercial después de terremoto, Chile

Introducción



Interior de edificio comercial después de terremoto, Chile



ASCE 7 Tabla C.1.3.1b Objetivos de Desempeño Sísmico

- Estructuras ordinarias deben tener una probabilidad de colapso menor a 10% ante la ocurrencia del máximo terremoto considerado (MCE).
 - Estructuras esenciales deben tener una probabilidad de colapso menor a 3% ante la ocurrencia del máximo terremoto considerado (MCE).
- Criterios de diseño ASCE 7 y por ende NEC no tienen como objetivo mantener funcionalidad después de un terremoto

Introducción



Objetivo de Desempeño Sísmico de Funcionalidad Continua

- Limitar daños a menos del 2% del costo de reemplazo
- Limitar la probabilidad de colapso a un 3% ante la ocurrencia del MCE

Criterios de Diseño de Funcionalidad Continua

- 1) Diseñar la estructura elásticamente usando $R = 1$
- 2) Derivas máximas de la estructura menores a 0.3%
- 3) Mediana de aceleración espectral por piso menor a 0.4g

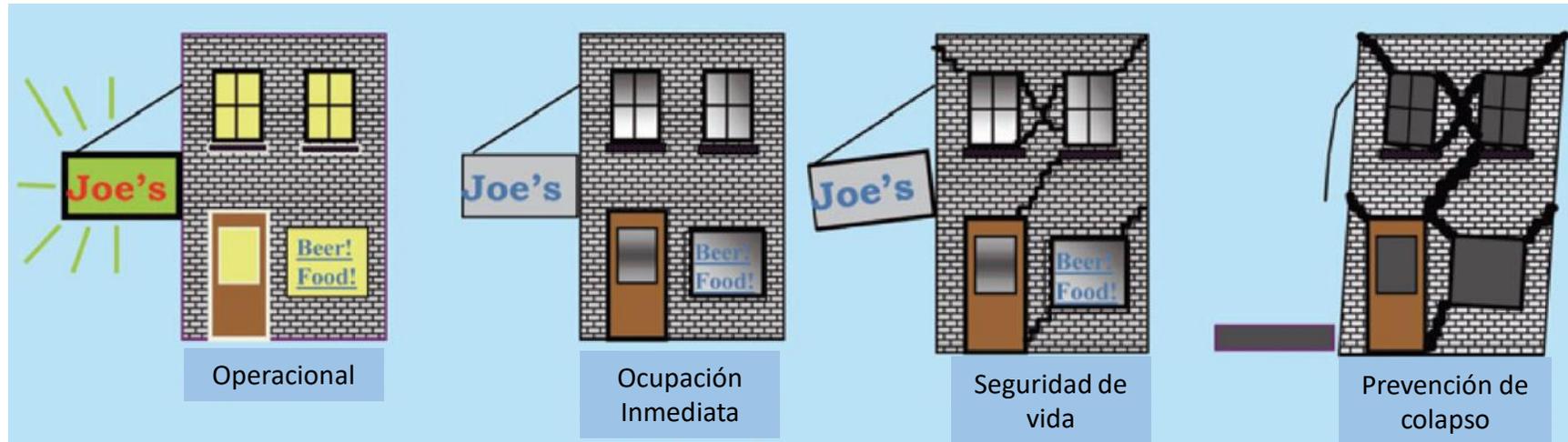
Introducción



Introducción



- Idea equivocada: que edificios basados en código son “a prueba de sismos”
- Los edificios son principalmente diseñados para ser dúctiles = ¡daño!



Referencia: Ron Hamburger

Fundamentos de Aislamiento Sísmico



Fundamentos de Aislamiento Sísmico



¿Qué es el aislamiento sísmico?

Una interfaz horizontal flexible, deslizante o rodante entre la estructura y el suelo.

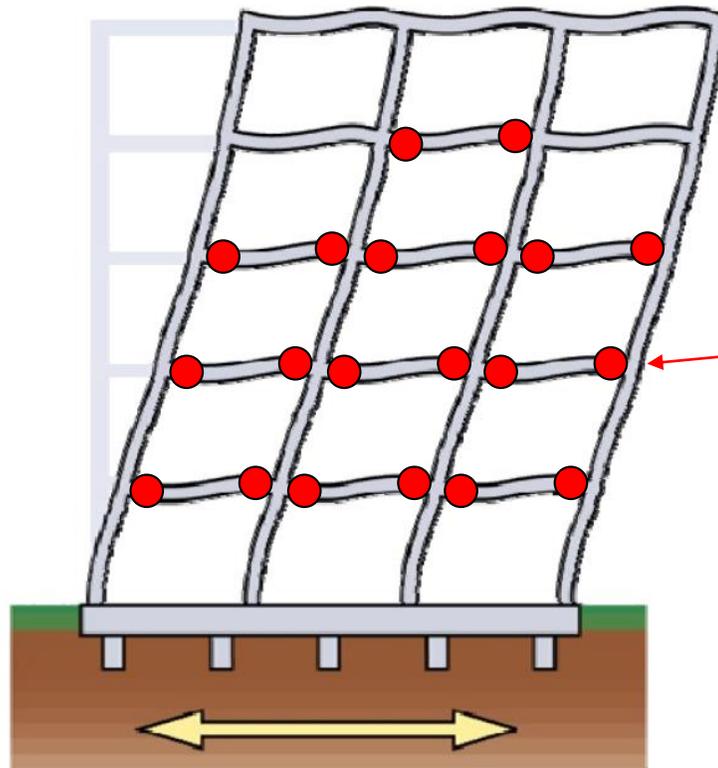
La interfaz alarga el periodo de la estructura, alejándolo de frecuencias sísmicas dominantes, y se complementa con su habilidad de absorber energía.

Fundamentos de Aislamiento Sísmico



¿Qué es el aislamiento sísmico?

- Enfoques de diseño sísmico moderno: Edificio con base fija



Se permite el daño en múltiples áreas controladas

Acción inelástica ocurre en la altura del edificio

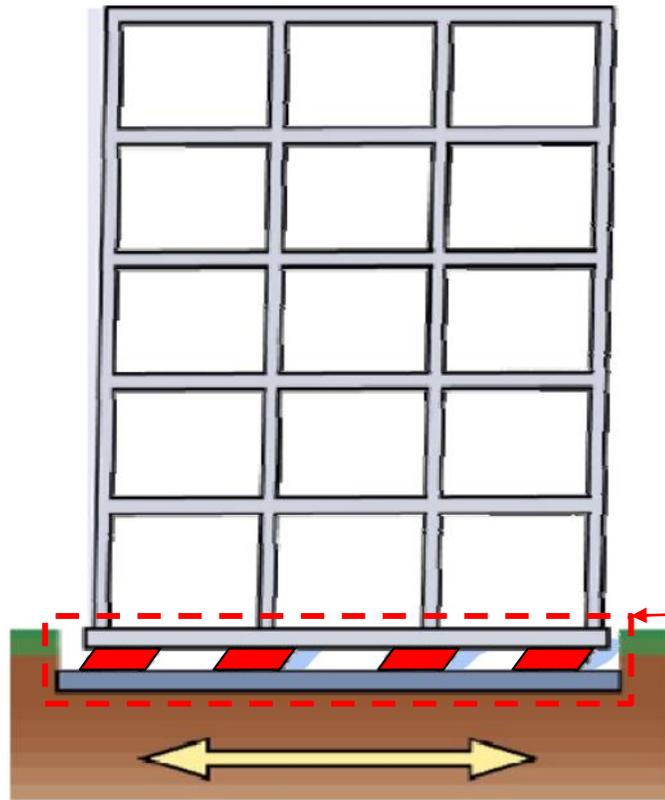
Referencia: DIS Inc. editado

Fundamentos de Aislamiento Sísmico



¿Qué es el aislamiento sísmico?

- Enfoques de diseño sísmico moderno: Edificio aislado



Se protege la estructura mediante el uso de un “piso blando diseñado”

Acción y desplazamiento inelástico concentrados en un solo nivel

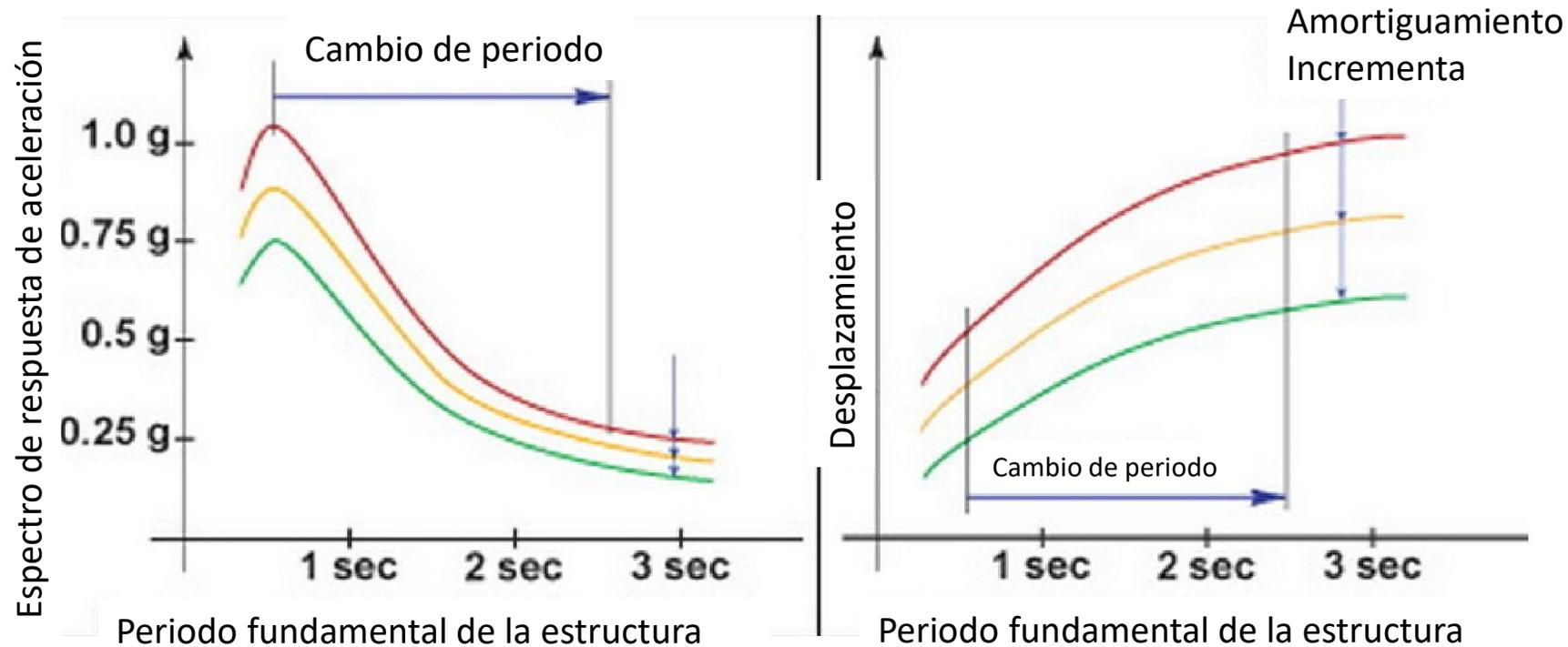
Referencia: DIS Inc. editado

Fundamentos de Aislamiento Sísmico



¿Qué es el aislamiento sísmico?

- Entonces, observando espectros de respuesta representativos, ¿cuál es la premisa del aislamiento sísmico?



Referencia: DIS Inc.

Fundamentos de Aislamiento Sísmico



¿Qué es el aislamiento sísmico?

1. La interfaz flexible, cuando es activada por un sismo, cambia el periodo de la estructura a un rango del espectro donde generalmente experimenta aceleraciones menores.
2. Aunque existe un incremento en los desplazamientos, esto es concentrado en la interfaz de aislamiento. La capacidad del aislador para absorber energía (amortiguamiento) reduce estos desplazamientos e incrementa la reducción de las aceleraciones.

Fundamentos de Aislamiento Sísmico



¿**Cómo** se aplica el aislamiento sísmico?

Unidades de aislamiento (Aisladores):

- Tienen baja rigidez horizontal, capacidad de auto-centrado y buena disipación de energía (contradicción)
- Son verticalmente rígidos y estables bajo el peso del edificio y grandes desplazamientos
- Tienen propiedades mecánicas bien establecidas y repetibles con degradación limitada

Fundamentos de Aislamiento Sísmico



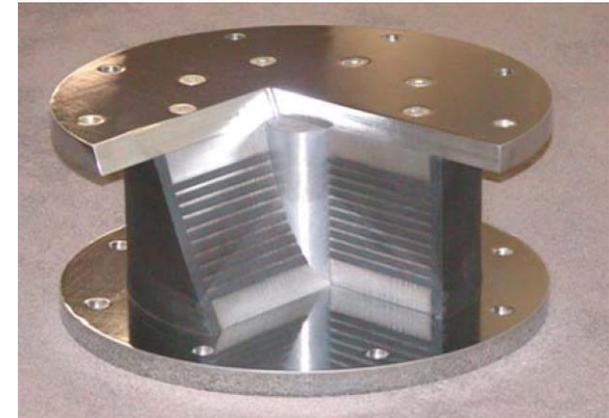
¿**Cómo** se aplica el aislamiento sísmico?

Dos de los tipos más comunes:

1. Aisladores elastoméricos

Consisten de capas alternantes de elastómero y cuñas de acero.

- _ Aisladores elastoméricos de alto o bajo amortiguamiento
- _ Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo



Referencia: MCEER-11-0004
SUNY, Buffalo, NY

Fundamentos de Aislamiento Sísmico



¿Cómo se aplica el aislamiento sísmico?

Dos de los tipos más comunes:

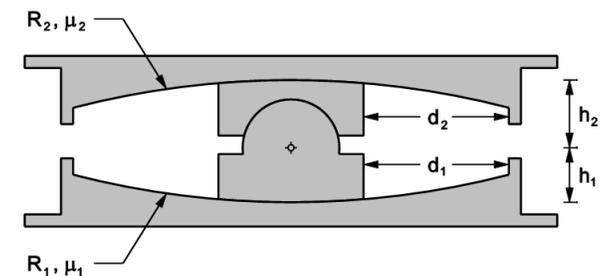
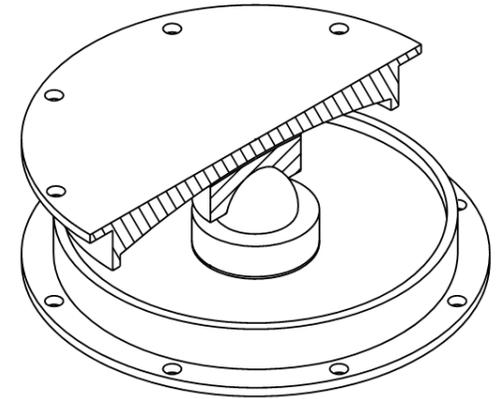
2. Aisladores friccionales

Utilizan una interfaz deslizante de baja fricción, comúnmente PTFE (Teflón) sobre acero inoxidable pulido.

_ Sistema de deslizamiento cóncavo

- Aislador de péndulo simple (una superficie cóncava)
- Aislador de péndulo doble (doble superficie cóncava)
- Aislador de péndulo triple TM

_ Aisladores de deslizamiento plano (usado con aisladores elastoméricos)



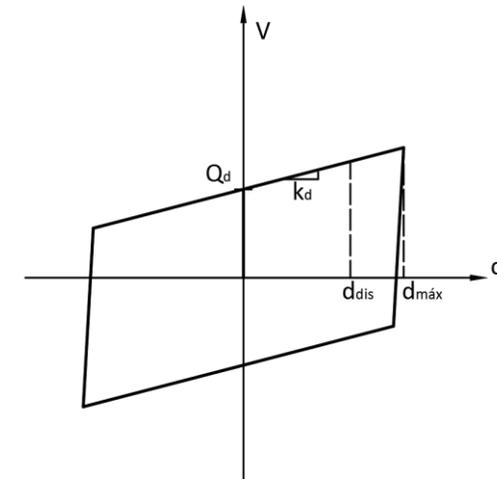
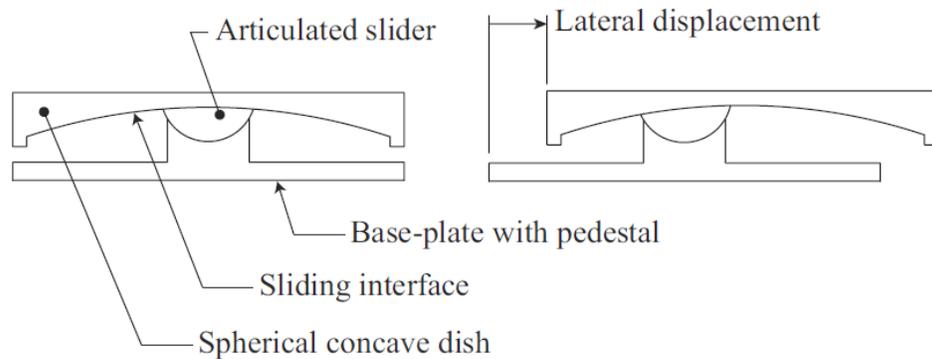
Referencia: MCEER-08-0007
SUNY, Buffalo, NY

Fundamentos de Aislamiento Sísmico



¿Cómo se aplica el aislamiento sísmico?

Comportamiento estructural de aisladores friccionales de péndulo



Fuerza de fricción: $Q_d = \mu W$

μ es el coeficiente de fricción existente entre la placa superior y el disco articulado

W es la carga axial (vertical) que actúa sobre el aislador

$$V = k_d \cdot d$$

k_d es la constante de rigidez, controlada por W y el radio de curvatura R de la superficie esférica del aislador ($k_d = W/R$)

$\uparrow R - \downarrow V$

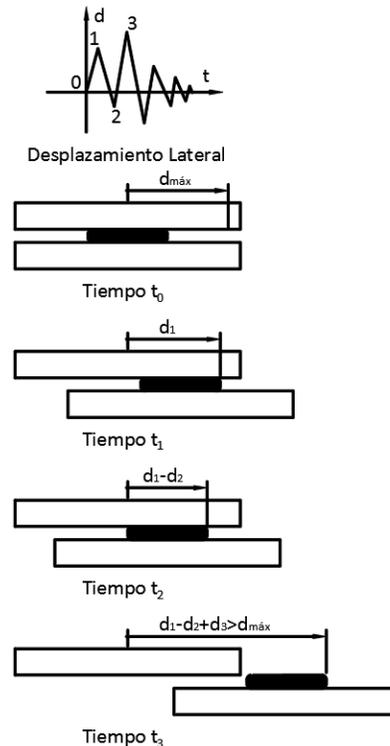
Fundamentos de Aislamiento Sísmico



¿Cómo se aplica el aislamiento sísmico?

Comportamiento estructural de aisladores friccionales de péndulo

- Capacidad de Auto-Centrado (Fuerza de restitución)



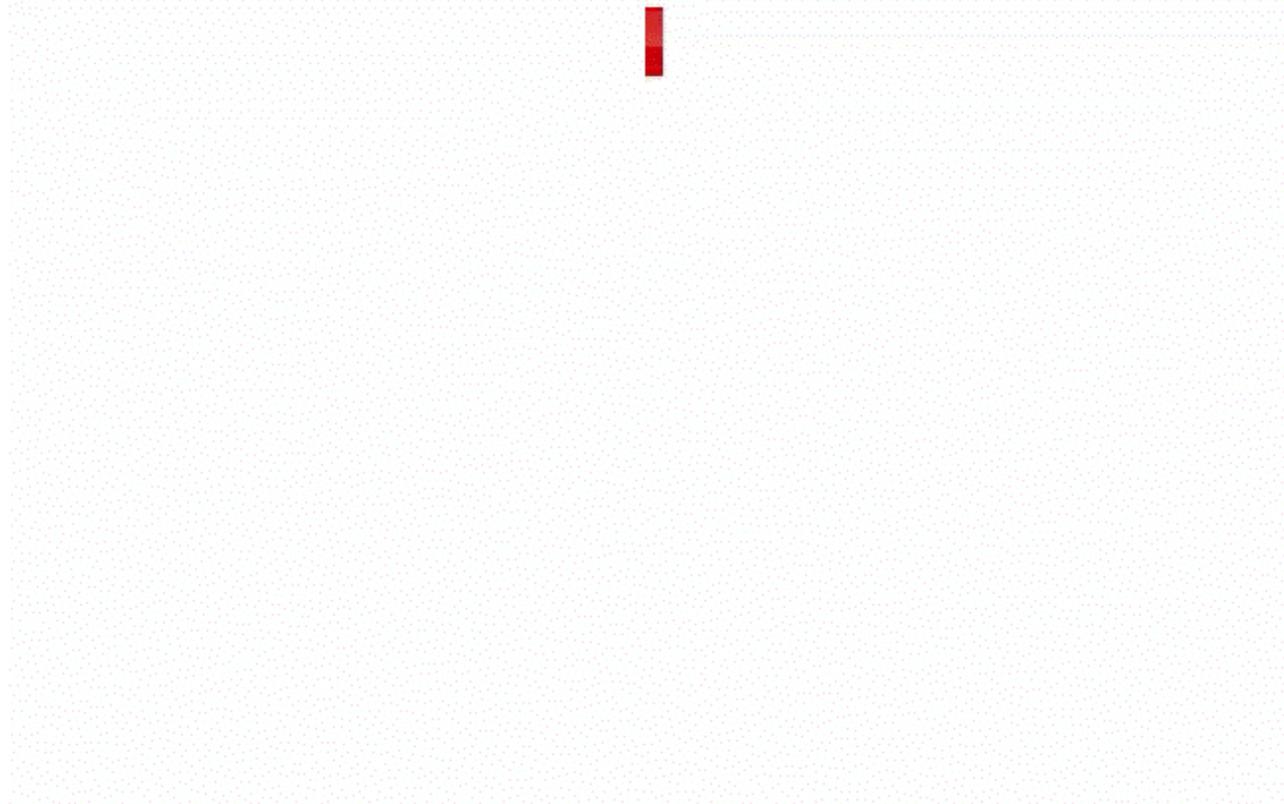
↓ R - ↑ *Fuerza de restitución*

Fundamentos de Aislamiento Sísmico



¿Cómo se aplica el aislamiento sísmico?

Comparación entre aisladores de péndulo simple/doble y aisladores de péndulo triple





¿Cómo se aplica el aislamiento sísmico?

Comparación entre aisladores de péndulo simple/doble y aisladores de péndulo triple

- Ventajas de los aisladores de péndulo triple (Resumen)
 - _ Capaz de alcanzar los dos objetivos: una baja rigidez (o una baja V) para desplazamientos ocasionados por el sismo de diseño y una fuerza de restitución alta.
 - _ Mayor amortiguamiento

Fundamentos de Aislamiento Sísmico



¿Cómo se aplica el aislamiento sísmico?

Aisladores de Péndulo Triple - Ensayos en mesa vibratoria



Fundamentos de Aislamiento Sísmico



¿Cómo se aplica el aislamiento sísmico?

Aisladores de Péndulo Triple - Ensayos en mesa vibratoria



Fundamentos de Aislamiento Sísmico



¿Cómo se aplica el aislamiento sísmico?

Aisladores de Péndulo Triple - Ensayos en mesa vibratoria



**Códigos, normativas y
guías**



A D S T R E N

Códigos, Normativas y Guías



Códigos, normativas y guías



- NEC
- EN 15129
- FEMA P-1050
- ASCE 7-16
- Seismic Isolation Standard for Continued Functionality
- FEMA P-58 (cálculo de costo pérdidas)
- FEMA P-695 (cálculo de probabilidad de colapso)

Códigos, normativas y guías



NEC (Norma Ecuatoriana de la Construcción)

NEC – SE – DS, Sección 8

Sistemas de control y aislamiento a la base

Las fuentes principales de esta sección son los Capítulos 13 y 15 del BSSC (2004) "NEHRP Recommended Provisions and Commentary for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures" (FEMA 450).





EN 15129 (Anti-seismic devices)

Estándar Europeo

Diseño de dispositivos en estructuras que tienen el objetivo de modificar su respuesta ante acciones sísmicas.

Nota: Europa no es una región de alta actividad sísmica como otros lugares del mundo

EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE
EUROPÄISCHE NORM

CSN EN 15129

English Version
Anti-seismic devices



EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION
EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG

Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels



EN 15129 (Anti-seismic devices)

Sección 8.3.1.2.3

“Los aisladores no deben incluir ningún elemento mecánico que sirva como dispositivo de fin de carrera, como anillos de retención, para evitar un eventual impacto entre los elementos mecánicos rígidos que les causen daños en caso de que ocurran desplazamientos mayores a $\gamma_b d_{Ed}$ (desplazamiento máximo)”

-> Peligroso!

Códigos, normativas y guías



EN 15129 (Anti-seismic devices)



Códigos, normativas y guías



EN 15129 (Anti-seismic devices)



Códigos, normativas y guías



EN 15129 (Anti-seismic devices)



Códigos, normativas y guías



EN 15129 (Anti-seismic devices)



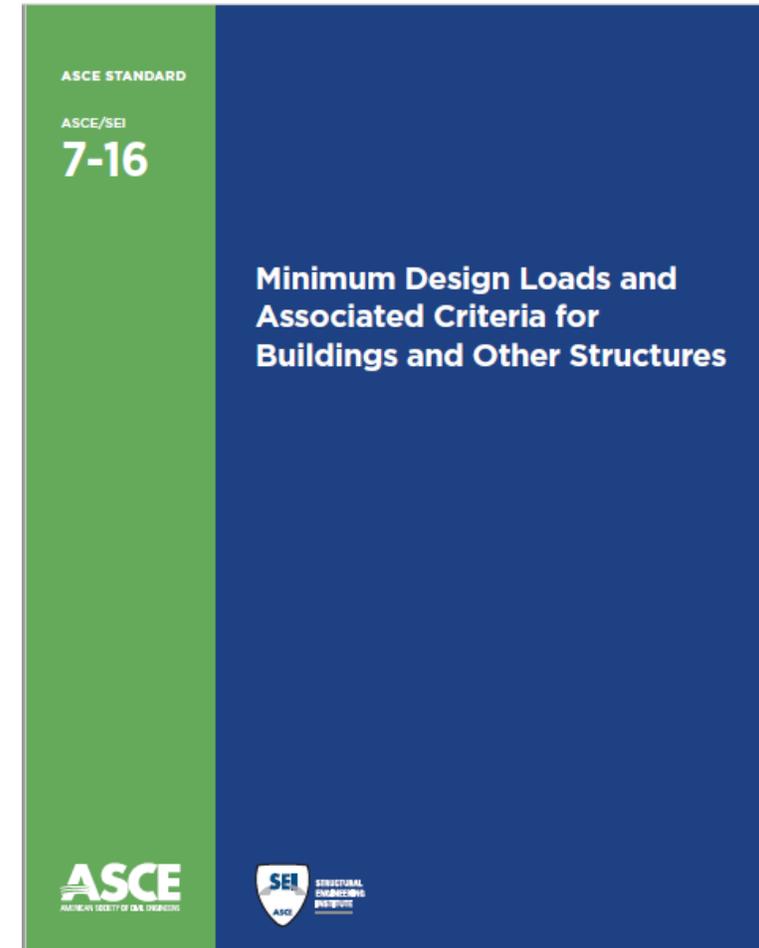
Códigos, normativas y guías



ASCE 7 -16 (Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures)

Capítulo 17. Requerimientos de diseño sísmico para estructuras aisladas

Capítulo 18. Requerimientos de diseño sísmico para estructuras con sistemas de amortiguamiento



Códigos, normativas y guías



ASCE 7 -16 (Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures)

Objetivos de Desempeño Sísmico

Estructuras esenciales deben tener una probabilidad de colapso menor a 3% ante la ocurrencia del máximo terremoto considerado (MCE).

Criterios de diseño ASCE 7 no tienen como objetivo mantener funcionalidad después de un terremoto



Seismic Isolation Standard for Continued Functionality

Abstract

- Establece requerimientos de desempeño para calidad de los materiales y la fabricación del aislador, ensayos, fabricantes, y factores de seguridad, requeridos para satisfacer los límites de riesgo de colapso de ASCE 7.
- Mejora los requerimientos del Capítulo 17 de ASCE 7 “Requerimientos de diseño sísmico para estructuras con aislamiento sísmico” mediante la implementación de criterios de seguridad contra colapso específicos para aisladores, y criterios de reducción de daños por sismo.

Seismic Isolation Standard for Continued Functionality

Victor Zayas ^{a)}



Structural Engineering, Mechanics and Materials
Department of Civil and Environmental Engineering
University of California, Berkeley
September 18, 2017

a) Senior Research Fellow, University of California, Berkeley
Academy of Distinguished Alumni, University of California, Berkeley
Doctorate in Structural Earthquake Engineering, University of California, Berkeley
Lifetime Achievement Award Winner, Structural Engineers Association of California
Hall of Fame Member, American Society of Civil Engineers
President and Founder, Earthquake Protection Systems
Inventor of Friction Pendulum Seismic Isolation
California Professional Engineer C35723
Victor@EarthquakeProtection.com



Seismic Isolation Standard for Continued Functionality

Requerimientos para satisfacer Criterios de Funcionalidad Continua (Estructuras Esenciales)

- 1) Diseñar la estructura elásticamente usando $R = 1$
- 2) Derivas máximas de la estructura menores a 0.3%
- 3) Mediana de aceleración espectral por piso menor a 0.4g

Esto limita el daño por sismo, calculado mediante FEMA P58, al 2% del costo de reemplazo, en promedio. Este valor debe ser calculado

Códigos, normativas y guías



FEMA P-58 (Seismic Performance Assessment of Buildings)

Evaluar el desempeño sísmico probable de un edificio. El desempeño se mide en términos de:

- _ Probabilidad de incurrir en pérdida de vidas
- _ Costos de reparación y reemplazo
- _ Tiempo de reparación
- _ Nivel de Seguridad



Seismic Performance Assessment of Buildings

Volume 1 – Methodology

FEMA P-58-1 / September 2012



Códigos, normativas y guías



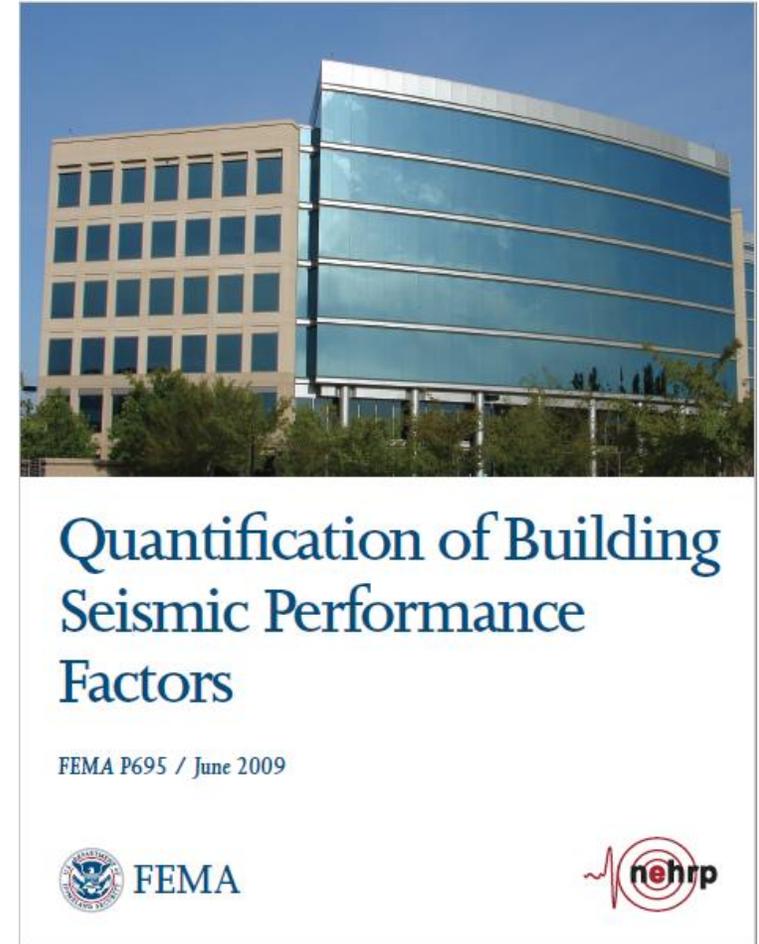
FEMA P-695 (Quantification of Seismic Performance Factors)

Cuantificar el desempeño de sistemas estructurales y parámetros de respuesta para uso en diseño sísmico.

_ Peligro sísmico basado en registros de nivel máximo considerado (MCE)

_ Seguridad expresada por margen de colapso (CMR)

_ Desempeño cuantificado por simulación no-lineal de colapso en modelos analíticos



Ejemplos de Implementación



Ejemplos de implementación

- Hospital Luis Moscoso Zambrano, Piñas, El Oro
- Puente Villorita, Quito, Pichincha
- Otros

Ejemplos de implementación



Hospital Luis Moscoso Zambrano, Piñas, El Oro



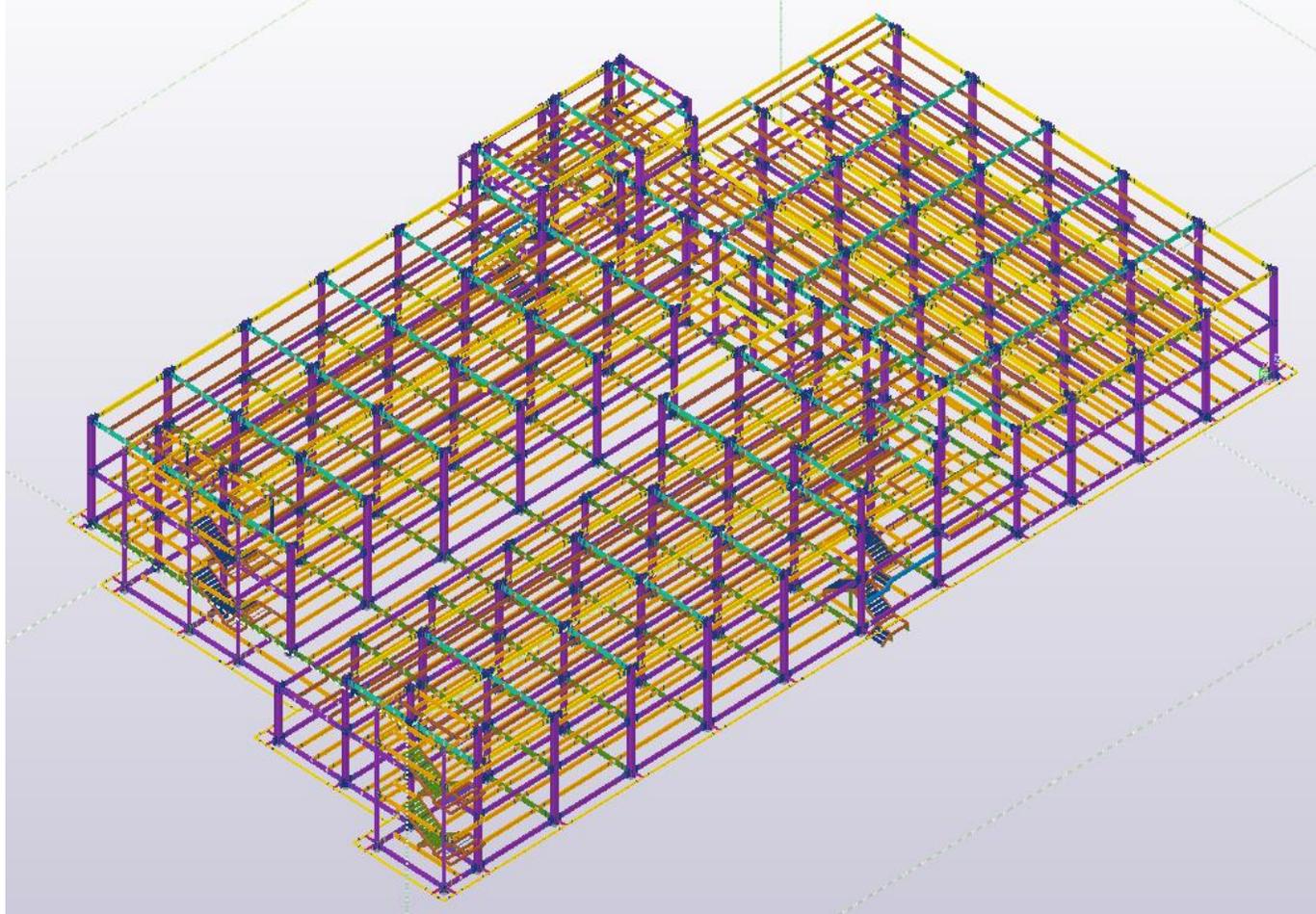
Capacidad:
30 camas

Área de construcción:
5925 m²

Ejemplos de implementación



Hospital Luis Moscoso Zambrano, Piñas, El Oro



Estructura de acero aislada

Ejemplos de implementación



Hospital Luis Moscoso Zambrano, Piñas, El Oro



Ejemplos de implementación



Hospital Luis Moscoso Zambrano, Piñas, El Oro

Características del Proyecto

- 99 aisladores de Péndulo Triple
 - FPT8827/7-5R/5-3.5
- Ensayo de Capacidad en 2 aisladores de prueba
- Ensayo de Propiedades Dinámicas en 2 aisladores
- Ensayo de Control de Calidad en 100% de aisladores
- Total ensayado: 101 aisladores

Ejemplos de implementación



Hospital Luis Moscoso Zambrano, Piñas, El Oro

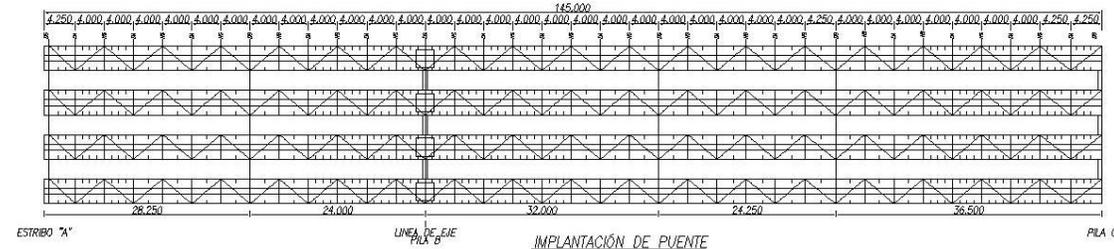
Resumen de Capacidad y Propiedades de Aisladores de Péndulo Triple

Propiedad	Aislador de Triple Péndulo (Ensayo)	Aislador genérico (Requerido por diseño)	Funcionalidad Continua (SCF)
Capacidad de desplazamiento lateral	600mm	415mm	467mm
Capacidad a cortante lateral	0.35 H/V	0.10 H/V	0.33 H/V
Radio de curvatura	4320mm	7310mm	-
Probabilidad de colapso (FEMA P695)	0.3%	58%	3%

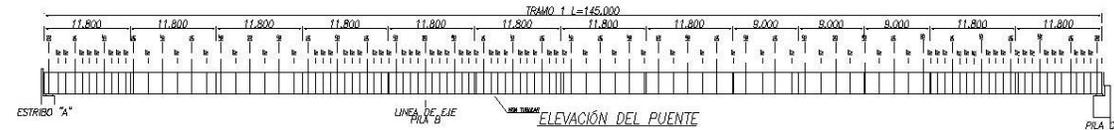
Ejemplos de implementación



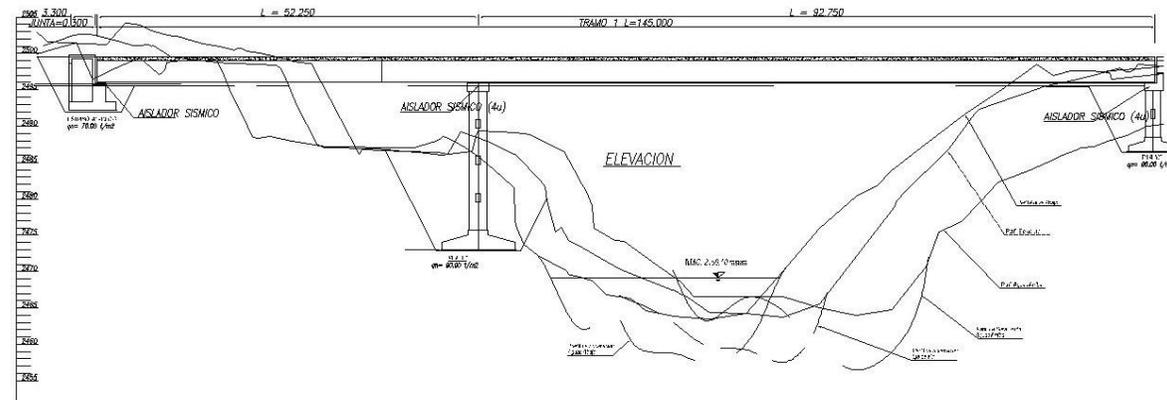
Puente Villorita, Quito, Pichincha



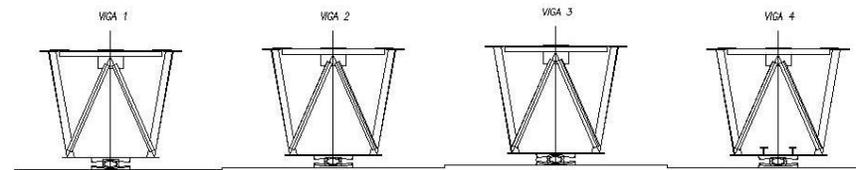
Longitud total:
145m



Mayor luz:
92m



4 Vigas Tubulares de Acero



SECCIÓN TRANSVERSAL

Ejemplos de implementación



Puente Villorita, Quito, Pichincha



Ejemplos de implementación



Puente Villorita, Quito, Pichincha



Ejemplos de implementación



Puente Villorita, Quito, Pichincha

Características del Proyecto

- 12 aisladores de Péndulo Triple
 - 4 FPT15663/24-20R/18-11
 - 8 FPT15651/12-10R/9-6
- Ensayo de Capacidad en dos aisladores de prueba de cada tipo
- Ensayo de Propiedades Dinámicas en dos aisladores de cada tipo
- Ensayo de Control de Calidad en 100% de aisladores
- Total ensayado: 16 aisladores

Conclusiones



Conclusiones



- Se puede satisfacer los criterios del Estándar de Funcionalidad Continua, sea con aislamiento sísmico, disipación sísmica, una combinación de ellos, o incluso, ¡sin ninguno de ellos!
- El uso de aislamiento o disipación tiene sentido, solo si se cumple con los criterios de funcionalidad continua. Cumplir con requisitos mínimos de código no es suficiente
- Estructuras con sistemas de aislamiento o disipación sísmica podrían tener una probabilidad de colapso mayor que los sistemas no aislados si no se utilizan estándares adecuados
- En Ecuador, la utilización de este tipo de sistemas, de acuerdo al Estándar de Funcionalidad Continua debería ser mandatorio para al menos, las estructuras esenciales



ADSTREN

INGENIERÍA ESTRUCTURAL

PREGUNTAS