

Foster+Partners | FR-EE

**NAICM**

## Bases del Sismo de Diseño - Español

REP/PBSD/BoD/1

Emisión 2 | 9 de Octubre de 2015

Este reporte considera las instrucciones y requisitos específicos de nuestro cliente.

Ningún tercero debe utilizar este reporte y no se asigna ninguna responsabilidad a ningún tercero.

Número de documento - 240234-00

**Arup Ingeniería y Consultoría México, S. de R.L. de C.V**  
77 Water Street  
New York  
10005  
United States of America  
[www.arup.com](http://www.arup.com)

2015-08-15 NMCIA PBSB BoD Issue 1 Spanish.docx

Emisión

Aug 14, 2015

**ARUP**

# Índice

---

	Página
<b>1</b>	<b>Introducción</b> <span style="float: right;"><b>1</b></span>
1.1	Diseño Sísmico Basado en Desempeño <span style="float: right;">1</span>
<b>2</b>	<b>Códigos y Referencias</b> <span style="float: right;"><b>3</b></span>
2.1	Códigos Reguladores <span style="float: right;">3</span>
2.2	Referencias <span style="float: right;">3</span>
2.3	Excepciones del Código <span style="float: right;">4</span>
<b>3</b>	<b>Peligro Sísmico</b> <span style="float: right;"><b>7</b></span>
3.1	Períodos de Retorno de Diseño <span style="float: right;">8</span>
3.2	Espectro del Diseño <span style="float: right;">8</span>
3.3	Peligro vertical <span style="float: right;">12</span>
<b>4</b>	<b>Resumen del Enfoque del Diseño y Análisis</b> <span style="float: right;"><b>13</b></span>
4.1	Objetivos Mínimos de Desempeño Sísmico <span style="float: right;">14</span>
4.2	Resumen de los Objetivos de Desempeño y Métodos de Cumplimiento <span style="float: right;">16</span>
<b>5</b>	<b>Evaluación a Nivel del Sismo de Diseño</b> <span style="float: right;"><b>21</b></span>
5.1	Demandas Sísmicas y Método de Análisis <span style="float: right;">21</span>
5.2	Amortiguamiento estructural <span style="float: right;">21</span>
5.3	Interacción suelo-estructura (SSI) <span style="float: right;">22</span>
5.4	Análisis del Espectro de Respuesta <span style="float: right;">22</span>
5.5	Suposiciones de Rigidez <span style="float: right;">24</span>
5.6	Modelos del Componente <span style="float: right;">24</span>
5.7	Criterios globales de aceptación <span style="float: right;">25</span>
5.8	Criterios de aceptación <span style="float: right;">25</span>
<b>6</b>	<b>Evaluación a Nivel del Sismo Máximo Considerado (MCE)</b> <span style="float: right;"><b>27</b></span>
6.1	Demanda Sísmica y Método de Análisis <span style="float: right;">27</span>
6.2	Interacción Suelo Estructura (SSI) <span style="float: right;">27</span>
6.3	Desarrollo de movimientos sísmicos de suelo <span style="float: right;">27</span>
6.4	Análisis de Historial de Respuesta No Lineal (NLRHA) <span style="float: right;">28</span>
6.5	Suposiciones de Rigidez <span style="float: right;">29</span>
6.6	Modelos de Componentes y Criterios de Aceptación <span style="float: right;">29</span>
6.7	Criterios Globales de Aceptación <span style="float: right;">31</span>

6.8	Fatiga por bajos ciclos	31
<b>7</b>	<b>Robustez y redundancia</b>	<b>32</b>
<b>8</b>	<b>Elementos No Estructurales</b>	<b>32</b>
	<b>Referencias Adicionales</b>	<b>33</b>

## Apéndices

### Apéndice A

Cargas y Propiedades del Material

### Apéndice B

Descripción de los Edificios

### Apéndice C

Diseño Gráfico y Evaluación de Componentes

### Appendix D

LS-DYNA Primary Material Models

# 1 Introducción

---

El propósito de este reporte es resumir las bases del Sismo de Diseño para el Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. El desarrollo es un aeropuerto completo, incluyendo una Terminal de Pasajeros, Torre de Control, varios edificios secundarios, nuevas pistas de aterrizaje, plataformas e instalaciones de servicios. Este reporte aborda los requisitos sísmicos de los siguientes componentes del aeropuerto:

- Terminal de Pasajeros
- Torre de Control y Centro de Operaciones
- Centro Regional de Operaciones
- Centro de Transportes Terrestre Intermodal

El Apéndice B incluye una descripción de cada edificio.

Este informe está destinado a evolucionar a medida que se desarrolle el diseño. Se actualizará durante el proceso de diseño para incorporar los cambios necesarios

## 1.1 Diseño Sísmico Basado en Desempeño

La referencia principal para el diseño estructural del aeropuerto es el código de construcción de la Ciudad de México, de conformidad con los requisitos del cliente.

Dada la complejidad del proyecto, se utiliza el enfoque del Diseño Sísmico Basado en Desempeño (PBSD) para justificar las excepciones adoptadas con el diseño normativo del código y para demostrar el desempeño de las estructuras primarias. Este enfoque se basa en las Directrices PEER para el Diseño sísmico por desempeño de edificios altos (PEER TBI, 2010) y Evaluación Sísmica y reequipamiento de edificios existentes (ASCE 41-13, 2013). Si bien el documento PEER fue desarrollado originalmente para edificios altos y ASCE 41 para reequipamiento, estos proporcionan orientación pertinente para la adopción de principios basados en el desempeño de los proyectos de construcción en general.

El Diseño sísmico por desempeño (PBSD) combina los datos de peligro específicos del sitio con una evaluación explícita del comportamiento estructural en múltiples niveles de movimientos sísmicos. En este proceso, el ingeniero debe cumplir con la aceptación local y global de tal forma que el desempeño general del edificio cumpla con las necesidades del cliente.

Durante las etapas preliminares de diseño, el equipo del cliente y el de diseño acordaron que simplemente cumplir con los requisitos prescriptivos del código no era suficiente para una instalación tan importante. Un enfoque PBSD permite al equipo de diseño orientar y evaluar de forma explícita el desempeño del aeropuerto para objetivos mejorados. También permite la evaluación de los componentes no estructurales (tales como sistemas mecánicos) en virtud de los eventos sísmicos.

Los conceptos clave de este proceso se describen a continuación:

**Período de retorno** – La longitud de tiempo promedio entre la intensidad de sismos que es igual a o mayor que un valor específico. El Diseño sísmico por desempeño típicamente considera períodos de retorno múltiples.

**Peligros específicos del sitio** – El movimiento sísmico por un período de retorno específico en el sitio del proyecto.

**Objetivo de desempeño** – La condición deseada de la estructura principal después de un sismo con un período de retorno dado.

**Criterio de aceptación** – Límites específicos del esfuerzo, la deformación, ductilidad y desplazamiento que deben cumplirse para mostrar que se cubrieron los objetivos de desempeño deseados. Los criterios varían dependiendo de los objetivos de desempeño.

**Diseño por capacidad** – diseño para concentrar el comportamiento inelástico en lugares específicos donde los elementos se han detallado para comportamiento no-lineal. Estos elementos limitan las demandas sobre otras partes de la estructura que están diseñadas para permanecer esencialmente elásticas durante un terremoto.

**Jerarquía de falla** – para sistemas sísmicos sujetos a demandas no lineales, elementos y conexiones que formen parte del sistema serán diseñados en una jerarquía que proteja los componentes que son esenciales para la estabilidad (por ejemplo, elementos que forman parte del sistema de resistencia a cargas de gravitatorias).

Aunque los períodos de retorno del diseño y el peligro específico del sitio son comunes para todos los componentes del aeropuerto, los requisitos sísmicos de cada uno son diferentes. Esto refleja su importancia relativa a la operación del aeropuerto. Consecuentemente, los objetivos de desempeño, la metodología de análisis y los criterios de aceptación están identificados por separado para los edificios individuales.

## 2 Códigos y Referencias

---

### 2.1 Códigos Reguladores

Actualmente existen dos documentos principales utilizados en México para el análisis y diseño sísmico de edificios e infraestructura: el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (MOC-CFE 2008) y las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (NTC-RCDF-2004). NTC-RCDF-2004 se considera como el código regulador para este proyecto.

No se considera prudente la aplicación normativa de estos códigos para el diseño de instalaciones críticas. Por ende, la comunidad de diseño internacional desarrolló enfoques de Diseño sísmico por desempeño (PBSD). Estos unen la investigación y experiencia internacional con los análisis de principios básicos para tener un mejor entendimiento del desempeño probable de la estructura.

Los códigos mexicanos serán complementados con los códigos más recientes de Estados Unidos y con las directrices del Diseño sísmico por desempeño que aparecen listadas a continuación. Donde haya conflicto entre el NTC-RCDF-2004 y otros códigos de referencia citados en el BoD, el NTC-RCDF-2004 gobierna, a no ser que se indique lo contrario. Cuando ocurran conflictos durante el diseño y no se adopte el NTC-RCDF-2004, el equipo de diseño tendrá que proporcionar a la autoridad vigente una justificación por escrito.

### 2.2 Referencias

#### **Códigos de construcción y estándares de referencia:**

- Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (NTC-RCDF-2004).
- Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (MOC-CFE 2008)
- Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE 7-10)

#### **Directrices del Sismo de Diseño por desempeño:**

- Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Tall Buildings (PEER Tall Building Initiative (PEER [TBI], 2010)
- Modeling and Acceptance Criteria for Seismic Design and Analysis of Tall Buildings (ATC-72-1, 2010)
- Development of Next Generation Performance-Based Seismic Design Procedures for New and Existing Buildings (ATC-58/FEMA- P58)
- Soil-Structure Interaction for Building Structures (NIST GCR 12-917-21)
- Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE 41-13 )

**Referencias de material:**

- Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (AISC 360-05)
- Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (AISC 341-10)
- Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary
- Structural Welding Code - Steel (AWS D1.1)

**Peligro sísmico:**

- NAICM – Probabilistic Seismic Hazard Assessment (Evaluación probabilística de peligro sísmico – PSHA en inglés) - Arup, 24 de julio 2015
- NAICM – Site Response Analysis (Análisis de respuesta de sitio) - Arup, 14 de agosto 2015

**Interacción suelo-estructura:**

- NAICM – Preliminary Seismic Soil-Structure Interaction Studies (Estudios preliminares de interacción suelo-estructura) - Arup, 14 de agosto 2015

## 2.3 Excepciones del Código

Se adoptarán los requisitos de los códigos mexicanos y estadounidenses listados arriba con las siguientes excepciones:

- **Desempeño sísmico:** Se evaluará usando un enfoque de diseño basado en desempeño (PBSD). Este evaluará los niveles de Sismo de Diseño (DE) y de Sismo Máximo Considerado (MCE). Se utilizarán datos específicos del sitio en lugar del espectro genérico presentado en el código mexicano.
- **Torsión accidental:** No se considerará la torsión accidental. Las fuentes potenciales de torsión accidental, tales como las enumeradas, serán evaluadas mientras se desarrolle el diseño y podrían ser evaluadas formalmente. Sin embargo, la superestructura de la terminal se compone de aprox. 19 edificios independientes, cada uno con su propio sistema de estabilidad por lo que se anticipa que la posibilidad de torsión accidental no será significativa.
- **Factores de modificación del código:** Se adopta un espectro específico del sitio para edificios diseñados a permanecer elásticos en el Sismo de Diseño. Esto no se modifica con irregularidades, sobre-resistencia o ductilidad.
- **Factores de importancia:** los edificios se evalúan de forma explícita a nivel MCE, en un periodo de retorno significativamente más largo que el requerido por el código. En consecuencia, no se aplican los factores de importancia del código

- **Procedimientos de movimiento sísmicos:** Los movimientos sísmicos desarrollados para los análisis a nivel DE y MCE están descritos en los informes de Análisis de peligro sísmico y Análisis de respuesta del sitio.
- **Sistemas de amortiguamiento y aislamiento:** Se debe verificar el diseño del sistema de amortiguamiento y aislamiento donde sea adoptado, utilizando análisis de historial de respuesta no lineal.
- **Vida útil:** el edificio está diseñado para una vida útil de 75 años, que es mayor a los 50 años típicamente exigidos por el código local.
- **Péndulos invertidos:** El 50% de la carga en dirección perpendicular debido a los movimientos sísmicos, según lo prescrito en la sección 10.1 NTC-RCDF-2004, no será considerada para la torre de control de tráfico aéreo ya que el desempeño se evaluará de forma explícita a nivel MCE. La sección 2004 NTC-RCDF 8.7 (30% de la carga en la dirección perpendicular) se aplicará, como se muestra en las combinaciones de carga en la Tabla 4.

### Próximo Código de Construcción de Ciudad de México

El equipo de diseño entiende que habrá una próxima revisión del Código de Construcción de la Ciudad de México. Aunque que el código todavía no tiene jurisdicción y no está formalmente disponible, el equipo de diseño ha tratado de entender las implicaciones del próximo código. Con el fin de hacer esto el equipo el diseño ha buscado la aportación del panel de expertos que participan en la elaboración del código. Las principales conclusiones de esto son:

- a. Los predios del NAICM no están incluidos explícitamente en el código Nuevo, ya que no se encuentra dentro del territorio de la Ciudad de México. Por lo tanto, el nuevo código no puede ser aplicado directamente.
- b. Nuevos espectros de peligro uniforme (UHS en inglés) codificados serán incluidos en el código. Sin embargo, Arup ha desarrollado UHS específicos al proyecto que se han acordado con el panel de expertos (la referencia se añadirá cuando se finalice la documentación)
- c. Mediciones H / V fueron hechas por la UNAM en varios lugares dentro del NAICM. Estas medidas pueden ayudar a informar el período y las amplificaciones del sitio y se considerarán.
- d. El panel señaló que para períodos de retorno de más de 250 años, el comportamiento no-lineal de la arcilla puede ser importante para eventos muy grandes.
- e. Los procedimientos no-lineales han sido utilizados por Arup en línea con esta expectativa. Estos han sido revisados por el panel de expertos independientes (la referencia se añadirá cuando se finalice la documentación).



- f. El código permite que los espectros de suelo firme para los terremotos de subducción y para eventos profundos, respectivamente, sean propagados a través de la estructura del suelo para obtener espectros de sitio específico incluyendo la respuesta del suelo y su comportamiento no lineal. Esto está en línea con el enfoque de Arup.

### 3 Peligro Sísmico

---

El peligro sísmico en el sitio del NAICM está influenciado por el lecho del lago de la Ciudad de México y ha sido el enfoque principal de muchas investigaciones desde el devastador sismo de 1985 en Michoacán, el cual causó daños severos y pérdida de vida extensa en la Ciudad de México aun cuando el epicentro del sismo se ubicó a más de 300 km de distancia.

La severidad del movimiento sísmico local está regida por la respuesta de los depósitos de suelo blando localizados en el lecho, que causan una amplificación del movimiento en el período de suelo predominante.

Los efectos únicos del movimiento del suelo que deben considerarse en el diseño y evaluación de las estructuras del NAICM incluyen:

- Amplificación significativa de respuesta del sitio que resulta en aceleraciones elevadas en el período de suelo predominante.
- Larga duración del movimiento sísmico.
- La respuesta del sitio que depende de la edad, como resultado del endurecimiento del suelo debido a una baja gradual del nivel de agua del acuífero. La rigidez del suelo cambiará en el transcurso de la vida de diseño del edificio (75 años), cambiando así el período predominante del suelo.
- Propagación de la onda sísmica sobre la huella del edificio terminal de gran tamaño. La información de movimiento sísmico está retrasada y no es instantánea entre diferentes puntos de la gran estructura, potencialmente excitando modos adicionales en el diafragma.
- Peligro sísmico vertical asociado con las ondas de compresión y de superficie y/o el asentamiento dinámico.

Detalles adicionales sobre los efectos de sitio están incluidas en NAICM - Informe de análisis de respuesta del sitio

### 3.1 Períodos de Retorno de Diseño

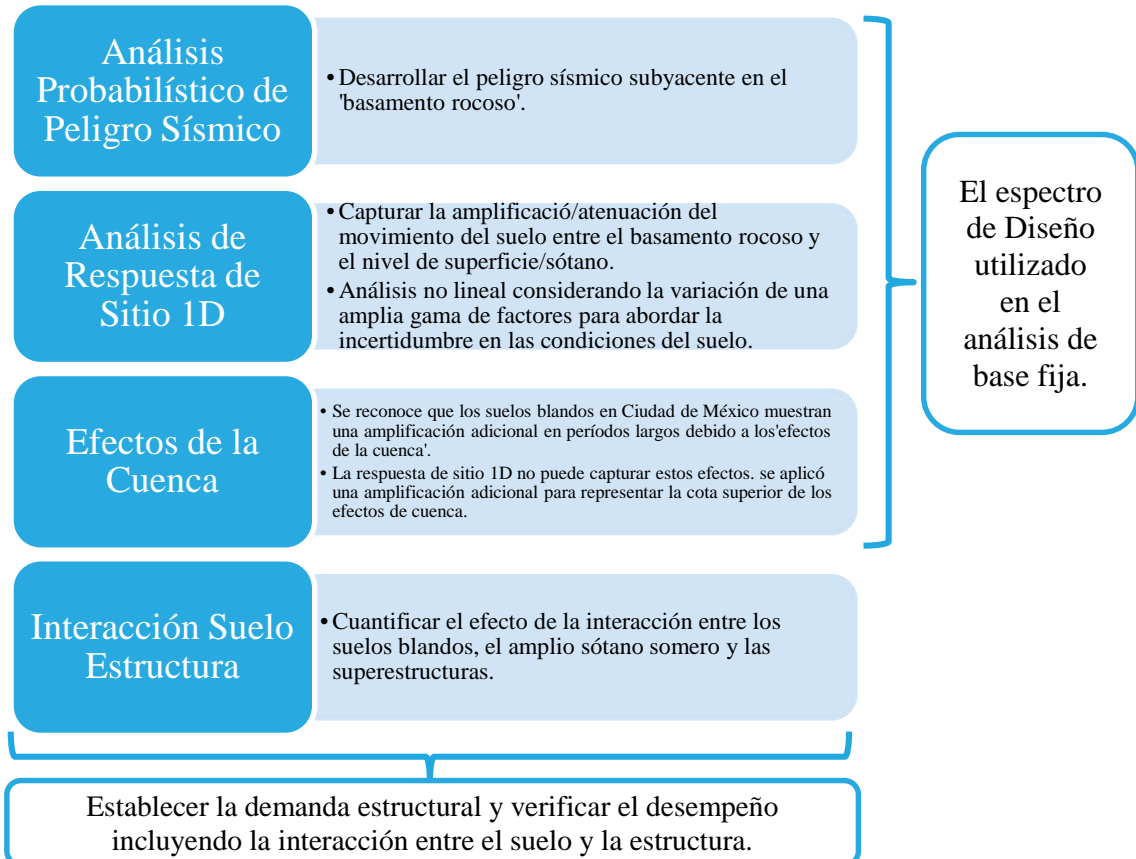
Se definieron dos períodos de retorno para evaluar el desempeño sísmico de diferentes estructuras del NAICM, con probabilidad de excedencia en términos de la vida de diseño de 75 años:

**Sismo de Diseño (DE):** El Sismo de Diseño se basa en el código mexicano por venir que especifica un período de retorno de 250 años para una vida de diseño de 50 años. El diseño se basará en el equivalente a la probabilidad anual de excedencia, pero para una vida de diseño de 75 años. Por consiguiente, el período de retorno del Sismo de Diseño es de 375 años. Esto equivale a un nivel de movimiento con 18% de probabilidad de excedencia en 75 años.

**Sismo máximo considerado (MCE):** Un nivel de movimiento con probabilidad de excedencia de 3% en 75 años o un período de retorno de 2475 años.

### 3.2 Espectro del Diseño

Se han desarrollado espectros específicos del sitio para los niveles DE y MCE. El siguiente gráfico muestra el proceso utilizado para desarrollar el espectro de diseño. Como se mencionó, se desarrolló el espectro de diseño preliminar para su uso en un modelo estructural de base fija. Esto proporciona una forma práctica de generar el diseño estructural anticipadamente, en espera de un modelo de interacción suelo-estructura más detallado.



Los espectros suavizados de superficie ‘campo libre’ del predio de la terminal se incluyen a continuación. Estos espectros se han reducido a cuenta de los efectos cinemáticos por empotramiento. Los efectos cinemáticos se describen más detalladamente en el Informe de Análisis de respues de sitio. Nótese que se colocarán límites determinísticos sobre los efectos beneficiosos de SSI como el promediaje de la losa base. Donde corresponda, los límites se adoptarán de acuerdo con ASCE 41-13. Cualquier desviación de este será justificada y documentada.

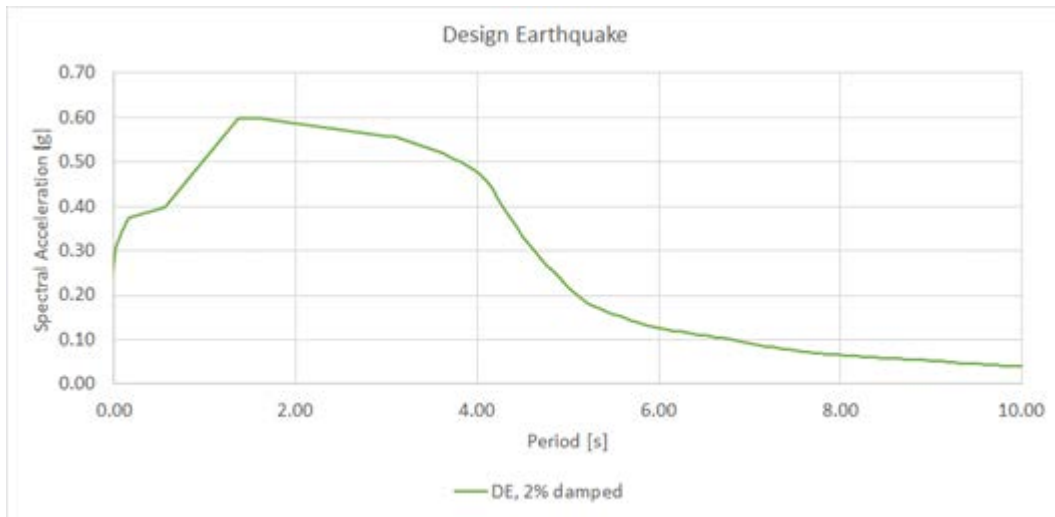


Figura 1 Sismo de diseño para la terminal – Período de retorno de 375 años.

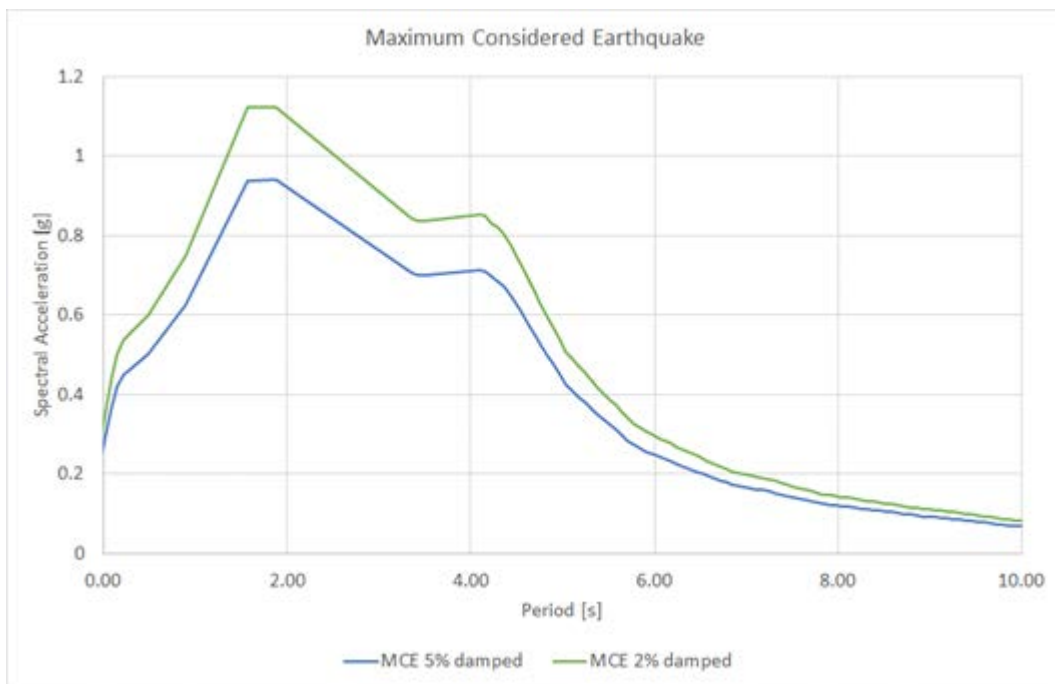


Figura 2 Espectros de respuesta MCE para la terminal (amortiguamiento 2%/5%)

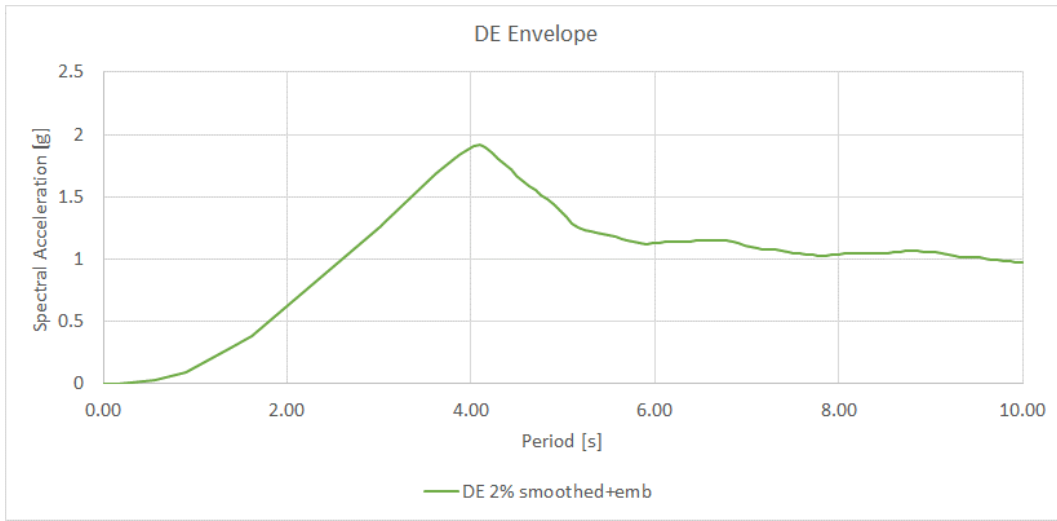


Figura 3 Espectro de desplazamiento para la terminal – period de retorno de 375 años

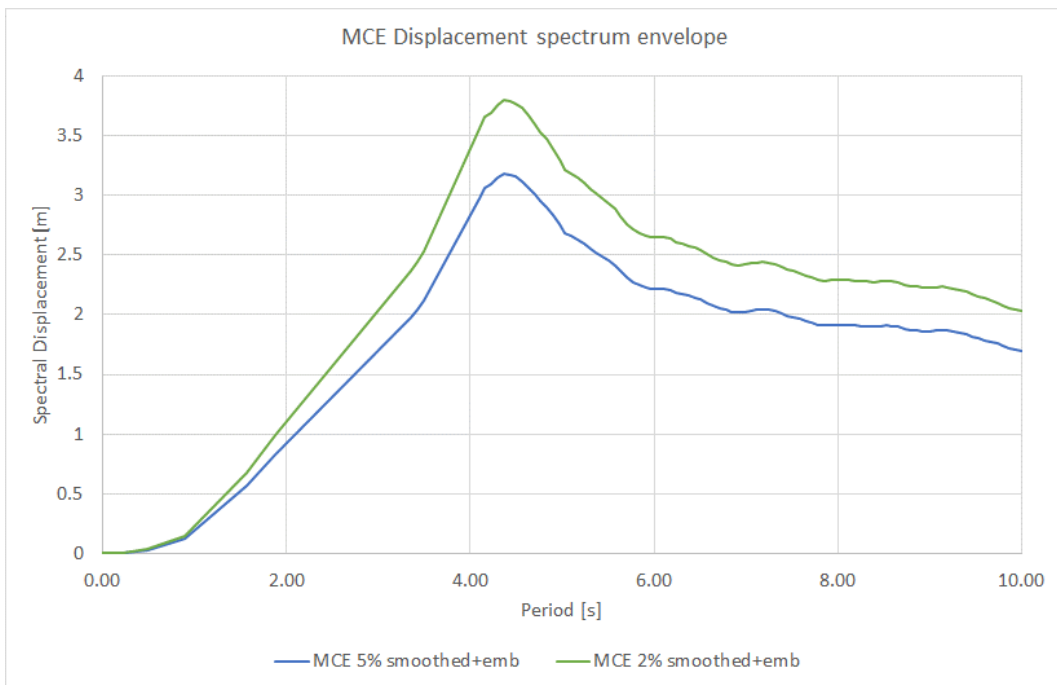


Figura 4 Espectro de desplazamiento MCE para la terminal (2%/5% amortiguamiento)

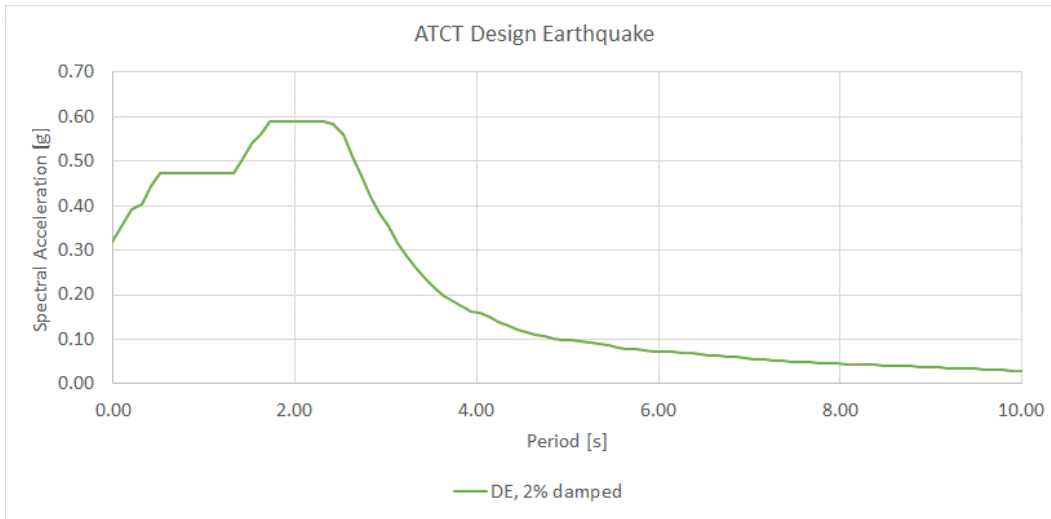


Figura 5 Sismo de diseño para la torre de control de tráfico aéreo – período de retorno de 375 años.

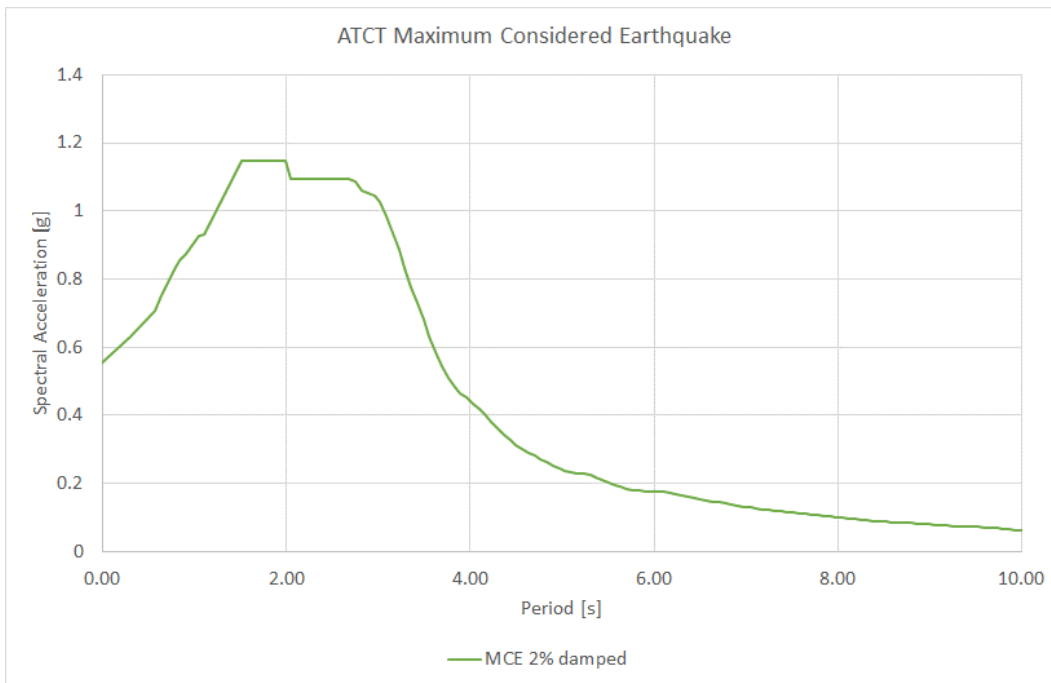
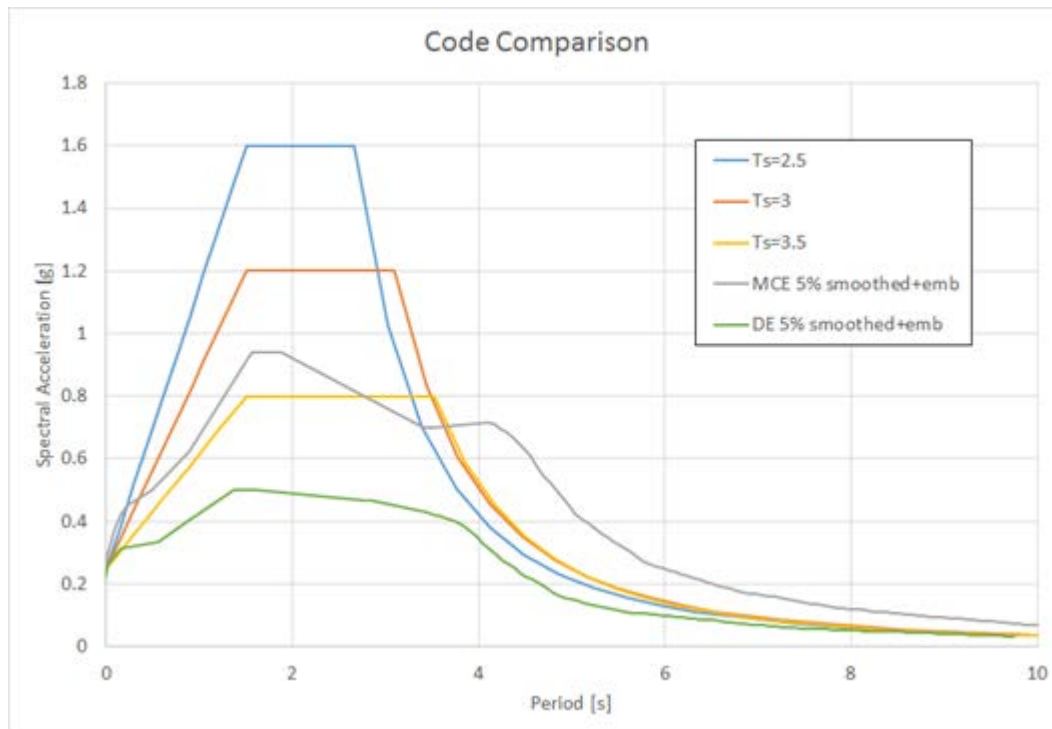


Figura 6 Espectro de respuesta MCE para la torre de control de tráfico aéreo (amortiguamiento 2%)

Los espectros de respuesta MCE y DE suavizados abarcan una gama de períodos del sitio para representar la consolidación del predio del aeropuerto durante la vida útil del edificio. Una comparación con los espectros elásticos NTC-RCDF-2004 de los tres períodos de sitio se muestra a continuación.



### 3.3 Peligro vertical

La aceleración vertical debido a los movimientos verticales se definen según la Sección 3.3.5.6 del código de MOC-CFE 2008. Dado que el sitio se encuentra en suelos blandos y a más de 80 km de la fuente de movimiento sísmico gobernante (la zona de subducción), por esta disposición el edificio no necesita incorporar aceleraciones verticales adicionales. Sin embargo, el edificio Terminal incluye un techo de tramo largo que puede ser sensible a los movimientos verticales. En consecuencia, el peligro sísmico vertical será considerado para este elemento.

Como se describe en el informe del análisis de respuesta del sitio, las proporciones H/V se han desarrollado para el predio del aeropuerto, éstos se muestran en xxx. Estas proporciones se utilizan para desarrollar espectros de respuesta vertical basados en las envolventes mostradas anteriormente (a través de una multiplicación sencilla en el dominio de la frecuencia).

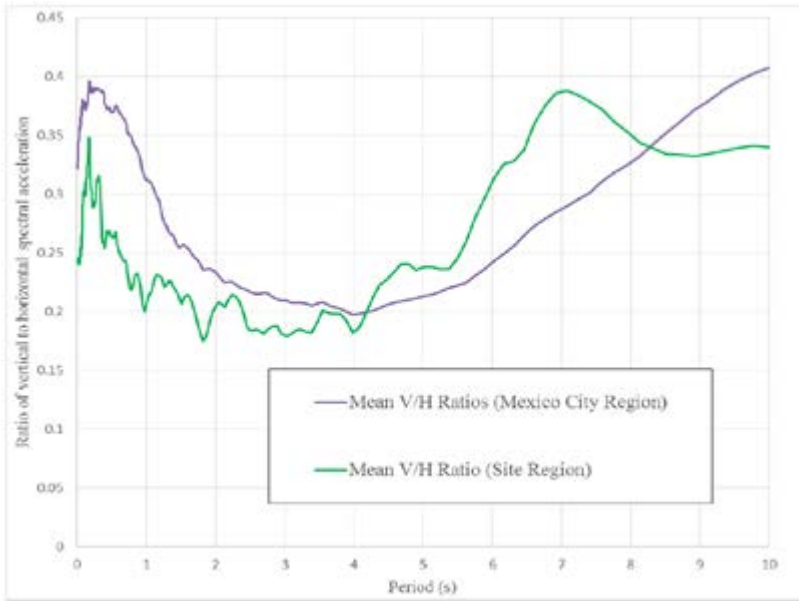


Figura 2 Proporción V/H

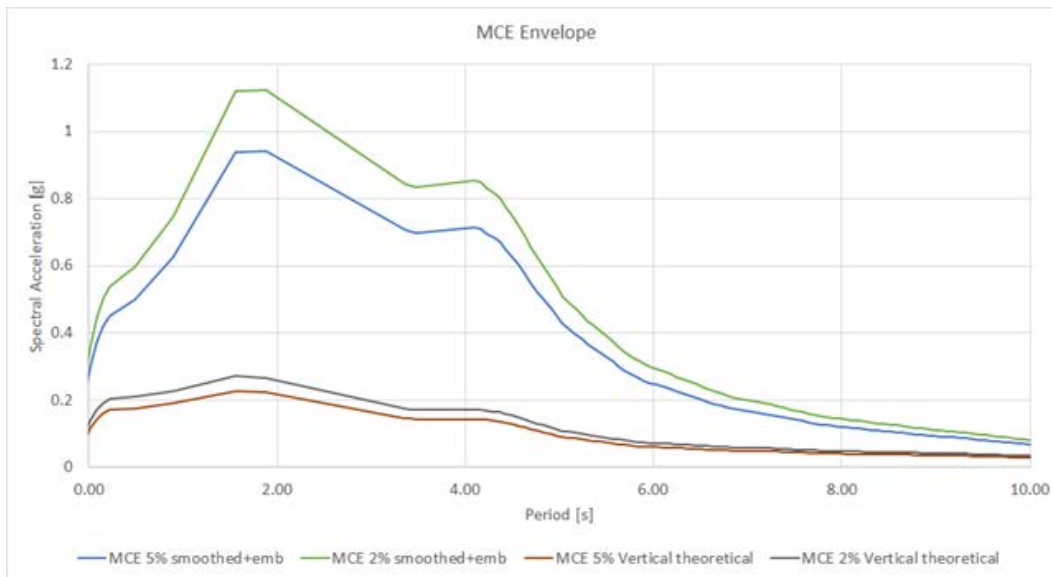


Figure 3 Espectros verticales MCE representativos del edificio de la terminal

## 4 Resumen del Enfoque del Diseño y Análisis

Esta sección describe el enfoque general del diseño sísmico, los objetivos de desempeño sísmico y los métodos para mostrar cumplimiento. Las secciones subsiguientes proporcionan detalles adicionales sobre los métodos de análisis, los supuestos del diseño, y el desempeño previsto para componentes específicos.



Los objetivos de desempeño estructural y los métodos de cumplimiento para cada edificio se muestran desde la Tabla 2 a la Tabla 6. El desempeño no-estructural se muestra en XXX

## 4.1 Objetivos Mínimos de Desempeño Sísmico

Los edificios del NAICM albergarán diferentes funciones, algunas necesarias para que el aeropuerto proporcione servicios esenciales de emergencia después de un sismo mayor y algunas de los cuales están asociados principalmente con el servicio de aviación comercial y no requieren de funcionalidad inmediata. Se identificaron niveles de desempeño diferentes para cada edificio del NAICM en la Tabla 1. Los niveles de desempeño son congruentes con las definiciones que se encuentran en la Tabla C2-3 del ASCE 41-13 y se definen como:

**Operacional (1-A):** El edificio permanece operacional por completo después de un sismo y las operaciones pueden continuar sin mayor interrupción.

**Ocupación inmediata (1-B):** El edificio puede proporcionar operaciones de emergencia inmediatamente después de un sismo, pero las operaciones no esenciales pueden estar afectadas. Daños menores o insignificantes a los elementos estructurales y los elementos no estructurales, no esenciales pueden estar dañados.

**Medidas de seguridad personal (3-C):** El edificio no estará funcional después de un sismo y se espera que haya daños mayores a los elementos estructurales y no estructurales, los cuales pueden no ser financieramente reparables.

Tabla 1 Objetivos de desempeño y enfoque de análisis para los edificios del NAICM.

Edificio	Nivel de peligro	Objetivo de desempeño	Enfoque de análisis
Edificio Terminal de Pasajeros	Sismo de Diseño	Operacional (1-A)	Análisis lineal del espectro de respuesta (RSA)
	Sismo máximo considerado	Ocupación inmediata (1-B)	Análisis de respuesta temporal no lineal (NLRHA)
Torre de Control y Centro de Operaciones	Sismo de Diseño	Operacional (1-A)	Análisis lineal del espectro de respuesta (RSA)
	Sismo máximo considerado	Ocupación inmediata (1-B)	Análisis de respuesta temporal no lineal (NLRHA)
Centro Regional de Operaciones	Sismo de Diseño	Operacional (1-A)	Análisis lineal del espectro de respuesta (RSA)
	Sismo máximo considerado	Ocupación inmediata (1-B)	Análisis de respuesta temporal no lineal (NLRHA)
Centro de Transportes Terrestre Intermodal	Sismo de Diseño	Ocupación inmediata (1-B)	Análisis lineal del espectro de respuesta (RSA)/ Análisis estático no lineal (NLSA)
	Sismo máximo considerado	Medidas de seguridad personal (3-C)	RSA/NLSA o NLRHA si es adoptado

La Tabla 1 indica los niveles de análisis propuestos para los edificios del NAICM. Los procedimientos de análisis variarán dependiendo de la complejidad y los

requisitos de desempeño de cada edificio. Se utilizan las siguientes abreviaturas: RSA – Análisis lineal del espectro de respuesta, NLRHA – Análisis de respuesta temporal no lineal, NLSA – Análisis estático no lineal.

## 4.2 Resumen de los Objetivos de Desempeño y Métodos de Cumplimiento

Tabla 2 Resumen de los objetivos de desempeño sísmico del techo de la Terminal de Pasajeros y métodos de cumplimiento

Nivel de evaluación	Objetivos de desempeño	Desempeño del componente estructural	Método para demostrar cumplimiento estructural
<p><b>Sismo de Diseño (DE):</b> Un nivel de movimiento con probabilidad de excedencia de 18% en 75 años o un período de retorno de 375 años.</p>	<p><b>Operacional</b> El edificio permanece operacional por completo después de un sismo y las operaciones pueden continuar sin mayor interrupción.</p>	<p><b>Todos los elementos:</b> Elástico (La proporción de demanda a capacidad no debe exceder 1.0).</p>	<p><b>Demanda del análisis del espectro de respuesta elástica</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Combinaciones de carga:  <math>0.9[D+W_a] + 1.1[\pm 1.0E_{dx} \pm 0.3E_{dy} \pm 0.4E_{dz}]</math>  <math>0.9[D+W_a] + 1.1[\pm 0.3E_{dx} \pm 1.0E_{dy} \pm 0.4E_{dz}]</math>  <math>0.9[D+W_a] + 1.1[E_{dz}]</math>  <math>1.1[D+W_a+T_{inst}] + 1.1[\pm 1.0E_{dx} \pm 0.3E_{dy} \pm 0.4E_{dz}]</math>  <math>1.1[D+W_a+T_{inst}] + 1.1[\pm 0.3E_{dx} \pm 1.0E_{dy} \pm 0.4E_{dz}]</math>  <math>1.1[D+W_a+T_{inst}] + 1.1[E_{dz}]</math></li> <li>Se evaluará el peligro vertical</li> <li>Amortiguamiento asumido de 2.0%.</li> <li>Los principios de diseño por capacidad se adoptarán para los elementos con deformaciones plásticas</li> <li>La capacidad se basa en la fuerza esperada del material y los factores de reducción de fuerza del código (<math>\phi</math>)</li> <li>La proporción entre demanda a capacidad no debe exceder 1.0.</li> </ul>
<p><b>Sismo máximo considerado (MCE):</b> Un nivel de movimiento con probabilidad de excedencia de 3% en 75 años o un período de retorno de 2475 años.</p>	<p><b>Ocupación inmediata</b> El edificio puede proporcionar operaciones de emergencia inmediatamente después de un sismo, pero las operaciones no esenciales pueden tener una afectación. Daños menores o insignificantes a los elementos estructurales.</p>	<p><b>Estructura espacial:</b> Elástica (Proporción de demanda a capacidad que no exceda 1.0)</p> <p><b>Columna de soporte de la cubierta: elementos de gravedad - elástico</b> (Proporción de demanda a capacidad que no exceda 1.0).</p> <p><b>Columna de soporte de la cubierta: refuerzos que no son parte de la trayectoria de la carga de gravedad</b> dentro de ASCE 41-13 límites de tensión para ocupación inmediata.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Demanda de diseño preliminar de 2% de amortiguamiento, Análisis del espectro de respuesta <i>elástico</i> (RSA) y combinaciones de carga en el Apéndice A.</li> <li>Verificación final de las demandas de diseño del análisis de respuesta temporal no lineal (NLRHA).</li> <li>Se asume que el amortiguamiento intrínseco es de 2.0%; el análisis de respuesta temporal no lineal evaluó explícitamente la contribución de las compuertas complementarias.</li> <li>La capacidad se basa en la fuerza esperada y los factores <math>\phi</math> específicos del código para acciones controladas por fuerza <i>críticas</i> y esperadas, y fuerza esperada y <math>\phi = 1.0</math> para acciones controladas por fuerza <i>no-críticas</i>.</li> <li>La capacidad debe exceder la media de 1.5x para la demandas del sismo máximo considerado (de cada grupo de movimientos de tierra) para acciones controladas por fuerza <i>críticas</i> sin un mecanismo de rendimiento bien definido y más que la media de <math>1.0x + 1.3\sigma</math> Sismo Máximo Considerado o demandas de sismo máximo considerado con una media de 1.2x con un mecanismo de rendimiento bien definido.</li> <li>Clasificación de los elementos para capacidad y criterios de deformación incluidos en el Apéndice C1.</li> <li>La fatiga a bajos ciclos se verificará</li> </ul>

Tabla 3 Resumen de los objetivos de desempeño sísmico de la Terminal de Pasajeros y métodos de cumplimiento.

Nivel de evaluación	Objetivos de desempeño	Desempeño del componente	Método para demostrar cumplimiento estructural
<p><b>Sismo de Diseño (DE):</b> Un nivel de movimiento con probabilidad de excedencia de 18% en 75 años o un período de retorno de 375 años.</p>	<p><b>Operacional</b> El edificio permanece operacional por completo después de un sismo y las operaciones pueden continuar sin mayor interrupción.</p>	<p><b>Marcos de acero reforzado:</b> elástico (Proporción de demanda a capacidad que no exceda 1.0). <b>Concreto del sótano:</b> rompimiento menor. <b>Contraviento restringido contra pandeo:</b> elástico (Proporción de demanda a capacidad que no exceda 1.0).</p>	<p><b>Demandas del análisis de espectro de respuesta elástico</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Combinación de cargas:  <math>0.9[D+Wa] + 1.1[\pm 1.0Edx \pm 0.3E_dy]</math>  <math>0.9[D+Wa] + 1.1[\pm 0.3Edx \pm 1.0E_dy]</math>  <math>1.1[D+Wa+T_{inst}] + 1.1[\pm 1.0Edx \pm 0.3E_dy]</math>  <math>1.1[D+Wa+T_{inst}] + 1.1[\pm 0.3Edx \pm 1.0E_dy]</math> </li> <li>Se asume un amortiguamiento de 2.0%.</li> <li>Los principios de diseño por capacidad se adoptarán para los elementos con deformaciones plásticas</li> <li>La capacidad se basa en una fuerza de material esperada y factores de reducción de fuerza de código (<math>\phi</math>)</li> <li>Proporción de demanda a capacidad que no exceda 1.0.</li> <li>Desplazamiento de piso del Sismo de Diseño &lt; 0.5%.</li> </ul>
<p><b>Sismo máximo considerado (MCE):</b> Un nivel de movimiento con probabilidad de excedencia de 3% en 75 años o un período de retorno de 2475 años.</p>	<p><b>Ocupación Inmediata</b> El edificio puede proporcionar operaciones de emergencia inmediatamente después de un sismo, pero las operaciones no esenciales pueden tener una afectación. Daños menores o insignificantes a los elementos estructurales.</p>	<p><b>Marcos de acero reforzado:</b> dentro de ASCE 41-13 límites de tensión para ocupación inmediata. <b>Concreto del sótano:</b> dentro de ASCE 41-13 límites de tensión para ocupación inmediata. <b>Contraviento restringido contra pandeo:</b> dentro de ASCE 41-13 límites de tensión para ocupación inmediata.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Demanda de diseño preliminar de 2% de amortiguamiento, Análisis del espectro de respuesta <i>elástico</i> (RSA) y combinaciones de carga en el Apéndice A.</li> <li>Verificación final de las demandas de diseño del análisis de historial de respuesta no lineal (NLRHA).</li> <li>Se asume que el amortiguamiento intrínseco es de 2.0%; el análisis de respuesta temporal no lineal evaluó explícitamente la contribución de las compuertas complementarias.</li> <li>La capacidad se basa en la fuerza esperada y los factores <math>\phi</math> específicos del código para acciones controladas por fuerza <i>críticas</i> y esperadas, y fuerza esperada y <math>\phi = 1.0</math> para acciones controladas por fuerza <i>no-críticas</i>.</li> <li>La capacidad debe exceder la media de 1.5x para la demandas del sismo máximo considerado (de cada grupo de movimientos de tierra) para acciones controladas por fuerza <i>críticas</i> sin un mecanismo de rendimiento bien definido y más que la media de 1.0x + 1.3<math>\sigma</math> Sismo Máximo Considerado o demandas de sismo máximo considerado con una media de 1.2x con un mecanismo de rendimiento bien definido.</li> <li>Clasificación de los elementos para capacidad y criterios de deformación incluidos en el Apéndice 0.</li> <li>Desplazamiento promedio de piso (del grupo de movimientos) &lt;1.0%.</li> <li>Desplazamiento medio residual (del grupo de movimientos) &lt;0.25%.</li> <li>La fatiga a bajos ciclos se verificará</li> </ul>

Tabla 4 Resumen de los objetivos de desempeño sísmico de la Torre de Control y del Centro de Operaciones y métodos de cumplimiento

Nivel de evaluación	Objetivos de desempeño	Desempeño del componente	Método para demostrar cumplimiento estructural
<p><b>Sismo de Diseño (DE):</b> Un nivel de movimiento con probabilidad de excedencia de 18% en 75 años o un período de retorno de 375 años.</p>	<p><b>Operacional</b> El edificio permanece operacional por completo después de un sismo y las operaciones pueden continuar sin mayor interrupción</p>	<p><b>Marcos de acero reforzado:</b> elástico (Proporción de demanda a capacidad que no exceda 1.0). <b>Concreto del sótano:</b> rompimiento menor.</p>	<p><b>Demanda del análisis del espectro de respuesta elástica:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Combinaciones de carga:  <math>0.9[D+Wa] + 1.1[\pm 1.0Edx \pm 0.3E dy]</math>  <math>0.9[D+Wa] + 1.1[\pm 0.3Edx \pm 1.0E dy]</math>  <math>1.1[D+Wa+Tinst] + 1.1[\pm 1.0Edx \pm 0.3E dy]</math>  <math>1.1[D+Wa+Tinst] + 1.1[\pm 0.3Edx \pm 1.0E dy]</math> </li> <li>Amortiguamiento asumido de 2.0%.</li> <li>Los principios de diseño por capacidad se adoptarán para los elementos con deformaciones plásticas</li> <li>La capacidad se basa en la fuerza esperada del material y los factores de reducción de fuerza del código (<math>\phi</math>).</li> <li>La proporción entre demanda y capacidad no debe exceder 1.0.</li> <li>Desplazamiento de piso del Sismo de Diseño &lt; 0.5%.</li> <li>Se deben establecer límites de aceleración con el cliente.</li> </ul>
<p><b>Sismo máximo considerado (MCE):</b> Un nivel de movimiento con probabilidad de excedencia de 3% en 75 años o un período de retorno de 2475 años.</p>	<p><b>Ocupación Inmediata</b> El edificio puede proporcionar operaciones de emergencia inmediatamente después de un sismo, pero las operaciones no esenciales pueden tener una afectación. Daños menores o insignificantes a los elementos estructurales.</p>	<p><b>Marcos de acero reforzado:</b> dentro de ASCE 41-13 límites de tensión para ocupación inmediata <b>Concreto del sótano:</b> dentro de ASCE 41-13 límites de tensión para ocupación inmediata. <b>Armadura de transferencia:</b> Permanece esencialmente elástica.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Demanda de diseño preliminar de 2% de amortiguamiento, Análisis del espectro de respuesta <i>elástico</i> (RSA) y combinaciones de carga en el Apéndice A.</li> <li>Verificación final de las demandas de diseño del análisis de respuesta temporal no lineal (NLRHA).</li> <li>Se asume que el amortiguamiento intrínseco es de 2.0%; el análisis de respuesta temporal no lineal evaluó explícitamente la contribución de las compuertas complementarias.</li> <li>La capacidad se basa en la fuerza esperada y los factores <math>\phi</math> específicos del código para acciones controladas por fuerza <i>críticas</i> y esperadas, y fuerza esperada y <math>\phi = 1.0</math> para acciones controladas por fuerza <i>no-críticas</i>.</li> <li>La capacidad debe exceder la media de 1.5x para la demandas del sismo máximo considerado (de cada grupo de movimientos de tierra) para acciones controladas por fuerza <i>críticas</i> sin un mecanismo de rendimiento bien definido y más que la media de <math>1.0x + 1.3\sigma</math> Sismo Máximo Considerado o demandas de sismo máximo considerado con una media de 1.2x con un mecanismo de rendimiento bien definido.</li> <li>Clasificación de los elementos para capacidad y criterios de deformación incluidos en el Apéndice 0.</li> <li>Se deben establecer límites de aceleración con el cliente.</li> <li>Desplazamiento medio de piso (del grupo de movimientos) &lt; 1.0%.</li> <li>Desplazamiento medio residual (del grupo de movimientos) &lt; 0.25%.</li> <li>La fatiga a bajos ciclos se verificará</li> </ul>

Tabla 5 Resumen de los objetivos de desempeño sísmico del Centro Regional de Operaciones y métodos de cumplimiento.

Nivel de evaluación	Objetivos de desempeño	Desempeño del componente	Método para demostrar cumplimiento estructural
<b>Sismo de Diseño (DE):</b> Un nivel de movimiento con probabilidad de excedencia de 18% en 75 años o un período de retorno de 375 años.	<b>Operacional</b> El edificio permanece operacional por completo después de un sismo y las operaciones pueden continuar sin mayor interrupción	Esperando definición	Esperando definición
<b>Sismo máximo considerado (MCE):</b> Un nivel de movimiento con probabilidad de excedencia de 3% en 75 años o un período de retorno de 2475 años.	<b>Ocupación Inmediata</b> El edificio puede proporcionar operaciones de emergencia inmediatamente después de un sismo, pero las operaciones no esenciales pueden tener una afectación. Daños menores o insignificantes a los elementos estructurales.	Esperando definición	Esperando definición

Tabla 6 Resumen de los objetivos de desempeño sísmico del Centro de Transportes Terrestre Intermodal y métodos de cumplimiento.

Nivel de evaluación	Objetivos de desempeño	Desempeño del componente	Método para demostrar cumplimiento estructural
<p><b>Sismo de Diseño (DE):</b> Un nivel de movimiento con probabilidad de excedencia de 18% en 75 años o un período de retorno de 375 años.</p>	<p><b>Ocupación Inmediata</b> El edificio puede proporcionar operaciones de emergencia inmediatamente después de un sismo, pero las operaciones no esenciales pueden tener una afectación. Daños menores o insignificantes a los elementos estructurales.</p>	<p><b>Marcos de acero reforzado:</b> Fuerzas no excederán capacidades de componentes usando procedimientos lineales de ASCE 41-13. Componentes debajo de límites de deformación de ASCE 41 para procedimientos no lineales <b>Concreto de sótano:</b> Fuerzas no excederán capacidades de componentes usando procedimientos lineales de ASCE 41-13. Componentes debajo de límites de deformación de ASCE 41 para procedimientos no lineales <b>BRB:</b> Fuerzas no excederán capacidades de componentes usando procedimientos lineales de ASCE 41-13. Componentes debajo de límites de deformación de ASCE 41 para procedimientos no lineales <b>Armadura de transferencia:</b> Permanece esencialmente elástica.</p>	<p><b>Demanda del análisis del espectro de respuesta</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Combinaciones de carga:  <math>0.9[D+Wa] + 1.1[\pm 1.0Edx \pm 0.3E_dy]</math>  <math>0.9[D+Wa] + 1.1[\pm 0.3Edx \pm 1.0E_dy]</math>  <math>1.1[D+Wa+T_{inst}] + 1.1[\pm 1.0Edx \pm 0.3E_dy]</math>  <math>1.1[D+Wa+T_{inst}] + 1.1[\pm 0.3Edx \pm 1.0E_dy]</math></li> <li>Amortiguamiento asumido de 2.0%.</li> <li>Los principios de diseño por capacidad se adoptarán para los elementos con deformaciones plásticas</li> <li>La capacidad se basa en la fuerza esperada del material y los factores de reducción de fuerza del código (<math>\phi</math>).</li> <li>La proporción entre demanda y capacidad no debe exceder 1.0 cuando se someta a la combinación de carga mostrada arriba. Las demandas se basarán en un espectro específico del sitio incluyendo factores de modificación (Q, R, etc) según el código de Ciudad de México (NTC-RCDF-2004).</li> <li>El diseño será verificado usando un espectro de sitio específico, incluyendo factores de modificación (Q, R, etc.) por código de la Ciudad de México (NTC-RCDF-2004) para demostrar el cumplimiento. La proporción entre demanda a capacidad no debe exceder 1.0</li> <li>Desplazamiento de piso del Sismo de Diseño &lt; 1.0%.</li> <li>La verificación del desempeño podría evaluarse utilizando análisis estático no lineal o análisis de respuesta temporal no lineal.</li> </ul>
<p><b>Sismo máximo considerado (MCE):</b> Un nivel de movimiento con probabilidad de excedencia de 3% en 75 años o un período de retorno de 2475 años.</p>	<p><b>Medidas de seguridad personal:</b> El edificio no estará funcional después de un sismo y se espera que haya daños mayores a los elementos estructurales y no estructurales, los cuales pueden no ser financieramente reparables</p>	<p><b>Marcos de acero reforzado:</b> Fuerzas no excederán capacidades de componentes usando procedimientos lineales de ASCE 41-13. Componentes debajo de límites de deformación de ASCE 41 para procedimientos no lineales <b>Concreto de sótano:</b> Fuerzas no excederán capacidades de componentes usando procedimientos lineales de ASCE 41-13. Componentes debajo de límites de deformación de ASCE 41 para procedimientos no lineales <b>BRB:</b> Fuerzas no excederán capacidades de componentes usando procedimientos lineales de ASCE 41-13. Componentes debajo de límites de deformación de ASCE 41 para procedimientos no lineales <b>Armadura de transferencia:</b> Permanece esencialmente elástica.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Demanda de diseño preliminar de 5% de amortiguamiento, Análisis del espectro de respuesta <i>elástico</i> (RSA) y combinaciones de carga en el Apéndice A.</li> <li>Verificación final de las demandas de diseño del análisis de respuesta temporal no lineal (NLRHA) o procedimientos no lineales alternativos prescritos en ASCE 41-13</li> <li>Se asume que el amortiguamiento intrínseco es de 5.0%; la contribución de los amortiguadores complementarios se evaluará explícitamente usando análisis estático no lineal, o análisis de respuesta temporal no lineal si es adoptado.</li> <li>La capacidad se basa en la fuerza esperada y los factores <math>\phi</math> específicos del código para acciones controladas por fuerza <i>críticas</i> y esperadas, y fuerza esperada y <math>\phi = 1.0</math> para acciones controladas por fuerza <i>no-críticas</i>.</li> <li>La fatiga a bajos ciclos se verificará</li> </ul> <p>Donde se adopte un procedimiento de historial de respuesta no lineal:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>La capacidad debe exceder la media de 1.5x para la demandas del sismo máximo considerado (de cada grupo de movimientos de tierra) para acciones controladas por fuerza <i>críticas</i> sin un mecanismo de rendimiento bien definido y más que la media de <math>1.0x + 1.3\sigma</math> Sismo Máximo Considerado o demandas de sismo máximo considerado con una media de 1.2x con un mecanismo de rendimiento bien definido.</li> <li>Desplazamiento medio de piso (del grupo de movimientos) &lt;2%.</li> <li>Desplazamiento medio residual (del grupo de movimientos) &lt;1%.</li> <li>Clasificación de los elementos para capacidad y criterios de deformación incluidos en el Apéndice C1.</li> </ul>

## 5 Evaluación a Nivel del Sismo de Diseño

La siguiente sección describe el método de análisis, las suposiciones del diseño gráfico y los peligros sísmicos para la evaluación de sistemas estructurales a nivel del Sismo de Diseño (DE).

### 5.1 Demandas Sísmicas y Método de Análisis

Para los edificios destinados a permanecer operacionales a nivel del Sismo de Diseño, la evaluación se basará principalmente en las demandas de un análisis de espectro de respuesta elástico ( $Q, R = 1,0$ ) usando espectros de sitio específico. El peligro del Sismo de Diseño representa un nivel de movimiento de 18% de probabilidad de excedencia en 75 años o un período de retorno de 375 años.

El Centro de Transporte Terrestre Intermodal está diseñado para cumplir con los criterios de ocupación inmediata al nivel del Sismo de Diseño. Las demandas sísmicas para este edificio se basarán en un espectro de respuesta de sitio específico, y la capacidad de los componentes estará basada en los procedimientos de ASCE 41-13. El diseño se verificará usando un espectro de sitio específico modificado por la ductilidad, la sobre-resistencia y los factores de irregularidad contenidos en el código de la Ciudad de México. Nótese que el código de la Ciudad de México utiliza factores de ductilidad que varían con período; éstos se adoptarán para el diseño. Análisis estático no lineal o análisis de historial de respuesta no lineal (NLRHA) podría ser utilizado para verificar el desempeño de este edificio a nivel del Sismo de Diseño, véase la sección 6 para detalles del NLRHA.

Los espectros se desarrollan para la superficie de campo libre. Ver el informe preliminar de interacción sísmica suelo-estructura y los informes de análisis de respuesta del sitio para obtener más detalles.

### 5.2 Amortiguamiento estructural

Los espectros de diseño incluirán los siguientes niveles de amortiguamiento estructural. Amortiguamiento adicional puede ser incluido para capturar los efectos de la interacción suelo-estructura:

Tabla 7 Amortiguamiento para edificios a nivel DE

Edificio	Amortiguamiento del espectro de respuesta del Sismo de Diseño
Techo de la Terminal	2%
Terminal excluyendo el Techo	2%
Torre de Control y Centro de Operaciones	2%
Centro Regional de Operaciones	2%
Centro de Transportes Terrestre Intermodal	2%



El terminal, ATCT, y el centro regional de operaciones están diseñados para ocupación inmediata en MCE. El marco espacial del techo está destinado a tener un rendimiento casi elástico a nivel MCE. El ATC-72-1, secciones 2.4.2.2 y 2.4.5 sugieren que los valores de amortiguamiento viscoso equivalente de 2% son apropiados para estructuras de marco de acero en estos casos. Según ATC-72-1 sección 2.4.2.2, 2% del amortiguamiento crítico para edificios de acero está de acuerdo con informes de la práctica internacional, así como estudios de investigación a gran escala, como SAC Joint Venture (Ref: SAC, 1996 ) y el grupo de trabajo de diseño sísmico de la CTBUH (CTBUH, 2008).

### 5.3 Interacción suelo-estructura (SSI)

Se utilizan modelos preliminares de interacción suelo-estructura para determinar la sensibilidad de diferentes edificios a los efectos del suelo. Estos modelos se realizan utilizando LS-DYNA e incorporan un modelo simplificado en 3D del sótano, el suelo histerético y osciladores de 1DOF para representar las superestructuras. Detalles del análisis SSI se encuentran en informe de Interacción suelo-estructura, incluyendo las recomendaciones para inclusión en el análisis estructural.

Para aquellos edificios identificados como sensibles a la interacción suelo estructura, la evaluación del sismo máximo considerado (MCE) se realizará en un modelo que incorpore efectos de interacción suelo-estructura a través de dos métodos:

- Análisis lateral equivalente que distribuye el cortante basal pico de la superestructura calculado a partir del método indirecto descrito en el informe de SSI, incluyendo la variabilidad que resulta de la complicidad de la cimentación asumida.
- Análisis de espectro de respuesta usando un espectro de respuesta de los movimientos de entrada con mayor amortiguamiento. El coeficiente de amortiguamiento para el cálculo del espectro de respuesta debe variar de acuerdo con el sistema estructural que se diseñe, y debe ser calibrado basado en el análisis descrito en el informe SSI.

### 5.4 Análisis del Espectro de Respuesta

El análisis del espectro de respuesta capturará más del 90% de la masa sísmica de la superestructura del edificio.

Los efectos P-delta se incluyen donde sean significativos.

#### 5.4.1 Software

Se utilizará el software de análisis de elementos finitos internos de Arup, GSA; y ETABS para el diseño de los niveles de Sismo Frecuente y de Sismo de Diseño.

### 5.4.2 Combinaciones de Carga para el nivel de Sismo de Diseño (excepto el techo de la terminal)

Según el código de Ciudad de México:

$$0.9[D+W_a] + 1.1[\pm 1.0E_{dx} \pm 0.3E_{dy}]$$

$$0.9[D+W_a] + 1.1[\pm 0.3E_{dx} \pm 1.0E_{dy}]$$

$$1.1[D+W_a+T_{inst}] + 1.1[\pm 1.0E_{dx} \pm 0.3E_{dy}]$$

$$1.1[D+W_a+T_{inst}] + 1.1[\pm 0.3E_{dx} \pm 1.0E_{dy}]$$

Donde:

D – Peso propio y carga muerta sobreimpuesta

W<sub>a</sub> – Carga viva sísmica (por NTC-RCDF-2004)

E<sub>dx/dy</sub> – Carga a nivel de Sismo de Diseño en x/y

T<sub>inst</sub> – Cargas por temperatura (según NTC-RCDF-2004)

### 5.4.3 Combinaciones de Carga para el nivel de Sismo de Diseño (techo de la terminal)

La aceleración vertical por movimientos verticales está definida en la Sección 3.3.5.6 del código MOC-CFE 2008. Debido a que el sitio está ubicado en suelos blandos y a más de 80 km de la fuente regidora de movimiento sísmico (la zona de subducción), según esta disposición, el edificio no necesita incorporar aceleraciones verticales adicionales. Sin embargo, el edificio de la terminal incluye un techo de tramo largo que puede ser sensible a movimientos verticales. En consecuencia, el peligro sísmico vertical será considerado para este elemento. Por lo tanto, las siguientes combinaciones de carga se considerarán para el techo de terminal:

$$0.9[D+W_a] + 1.1[\pm 1.0E_{dx} \pm 0.3E_{dy} \pm 0.4E_{dz}]$$

$$0.9[D+W_a] + 1.1[\pm 0.3E_{dx} \pm 1.0E_{dy} \pm 0.4E_{dz}]$$

$$0.9[D+W_a] + 1.1[E_{dz}]$$

$$1.1[D+W_a+T_{inst}] + 1.1[\pm 1.0E_{dx} \pm 0.3E_{dy} \pm 0.4E_{dz}]$$

$$1.1[D+W_a+T_{inst}] + 1.1[\pm 0.3E_{dx} \pm 1.0E_{dy} \pm 0.4E_{dz}]$$

$$1.1[D+W_a+T_{inst}] + 1.1[E_{dz}]$$

Donde:

D – Peso propio y carga muerta sobreimpuesta

W<sub>a</sub> – Carga viva sísmica (por NTC-RCDF-2004)

E<sub>dx/dy</sub> – Carga a nivel de Sismo de Diseño en x/y

$T_{inst}$  – Cargas por temperatura (según NTC-RCDF-2004)

#### 5.4.4 Fortaleza del Material

Se utilizarán las propiedades esperadas del material para todos los elementos, según se define en AISC/ACI. En el Apéndice 2 se incluye una lista de estas propiedades. Factores de reducción de fuerza ( $\phi$ ) se aplican a todos los materiales.

#### 5.5 Suposiciones de Rigidez

Se asume que los componentes de acero tendrán módulo de elasticidad,  $E = 205$  GPa

La tabla presentada a continuación proporciona las suposiciones de rigidez para los componentes de concreto conforme con PEER TBI sección 7.5.2, donde el módulo de elasticidad,  $E$ , se basa en las propiedades de fuerza esperadas y las relaciones adecuadas para concreto de peso normal y de peso ligero. El módulo de elasticidad transversal,  $G$ , se considera como  $E/(2(1+\nu))$ , donde se asume que  $\nu$  es 0.2.

Tabla 7 Suposiciones de rigidez de concreto para análisis de Sismo de Diseño.

Componente	Rigidez
Paredes del sótano	Flexión = $0.75EI_g$ Elasticidad transversal = $0.7GA$
Diafragmas	Diseñado como membrana (sin rigidez de flexión) Elasticidad transversal = $0.7GA$
Diafragmas de sótano	Flexión = $0.5EI_g$ Elasticidad transversal = $0.7GA$
Vigas de acoplamiento	Flexión = $0.5EI_g$ Elasticidad transversal = $0.5GA$

#### 5.6 Modelos del Componente

En general, los componentes en el análisis del Sismo de Diseño están diseñados como vigas o elementos 2D elásticos con las propiedades de rigidez adecuadas, como se describe arriba.

Para los análisis no lineales en el Centro de Transporte Terrestre, los contravientos se modelarán de manera no-lineal para permitir comportamiento inelástico.

### 5.6.1 Evaluación de la rigidez de los amortiguadores

La rigidez de los resortes de amortiguadores Maxwell se derivará de pruebas físicas en amortiguadores similares. La rigidez general equivalente (es decir, resortes estáticos equivalentes en lugar de un elemento de amortiguamiento) se derivará por los medios adecuados y se documentarán en los cálculos del diseño.

### 5.6.2 Elementos del marco especial

Los procedimientos de análisis detallados para las funnels tubulares están en desarrollo. Los documentos de diseño contendrán una especificación de desempeño para marcos espaciales. Esto requerirá un régimen de pruebas antes de y durante la construcción. El régimen de pruebas podrá atenuarse, si hay previo acuerdo con Arup, si el contratista puede mostrar pruebas anteriores, cálculos y proyectos completados con éxito utilizando el mismo sistema.

### 5.7 Criterios globales de aceptación

La distorsión del piso se limitará a 0.5% de la altura del piso, excepto el GTC que se limitará a 1.0% de la altura del piso.

### 5.8 Criterios de aceptación

Tabla 9 Criterios de aceptación para los edificios

Edificio	Tipo de análisis	Objetivo de desempeño	Criterios de aceptación
Edificio Terminal de Pasajeros	Todos	Operacional (1-A)	Proporción de demanda a capacidad que no exceda 1.0 (demandas elásticas)
Torre de Control and Centro de Operaciones			
Centro Regional de Operaciones			
Centro de Transportes Terrestre Intermodal	Análisis de respuesta de sitio	Ocupación inmediata (1-B)	Proporción de demanda a capacidad que no exceda 1.0. La demanda estará basada en un espectro de sitio específico y las capacidades estarán basadas en criterios de aceptación de ASCE 41-13.
	Análisis estático no lineal o análisis de historial de respuesta (si se adopta)	Ocupación inmediata (1-B)	Dentro de los límites de ocupación inmediata de ASCE 41-13.



## 6 Evaluación a Nivel del Sismo Máximo Considerado (MCE)

---

### 6.1 Demanda Sísmica y Método de Análisis

El diseño preliminar de los componentes estructurales que puedan estar regidos por las demandas del sismo máximo concentrado, se basará en el análisis del espectro de respuesta. El análisis de espectro de respuesta a nivel de MCE se basará en los modelos desarrollados para la evaluación a nivel del Sismo de Diseño. Estos serán sometidos a los espectros de sitio específico MCE.

El análisis de historial de respuesta no lineal (NLRHA), o análisis estático no lineal (para el GTC), se utilizará para determinar las demandas  *finales*  en los componentes del edificio. Un resumen general del enfoque NLRHA se muestra a continuación.

La propagación de onda se evaluará y podría considerarse explícitamente en el NLRHA.

### 6.2 Interacción Suelo Estructura (SSI)

Se utilizan modelos preliminares de interacción suelo-estructura para determinar la sensibilidad de los diferentes edificios a los efectos del suelo. Estos modelos se realizan utilizando LS-DYNA e incorporan un modelo simplificado en 3D del sótano, el suelo histerético y osciladores 1DOF para representar las superestructuras. Detalles del análisis SSI se encuentran en informe de Interacción suelo-estructura, incluyendo las recomendaciones para inclusión en el análisis estructural.

Para aquellos edificios identificados como sensibles a la interacción suelo estructura, la evaluación del sismo máximo considerado (MCE) se realizará en un modelo que incorpore efectos de interacción suelo-estructura a través de dos métodos:

- **Método directo:** se utiliza un análisis SSI 3D completo, como se describe en el informe SSI, con una representación detallada del sótano (con la geometría real) y la superestructura (incluyendo o excluyendo la cubierta)
- **Método de subestructura:** se utiliza un análisis SSI 3D completo incluyendo una representación detallada del sótano solo para obtener la respuesta cinemática. Se usan las aceleraciones cinemáticas como entrada en otro modelo detallado de la superestructura y la cubierta, con resortes y amortiguadores en los nodos de la base (y posiblemente los costados del sótano) para representar la interacción suelo-estructura.

### 6.3 Desarrollo de movimientos sísmicos de suelo

Cada edificio estará sujeto a un mínimo de 7 pares de movimiento sísmicos espectralmente ajustados. El efecto del peligro sísmico vertical, será estudiado y los

movimientos de tierra verticales se podrían incluir para el análisis del techo de tramo largo en el edificio de la terminal.

El desarrollo de los movimientos sísmicos de sitio específico se describe en el informe Análisis de respuesta de sitio de Arup.

## 6.4 Análisis de Historial de Respuesta No Lineal (NLRHA)

### 6.4.1 Software

El análisis de historial de respuesta no lineal se realiza utilizando LS-DYNA, el cual utiliza un solucionador explícito para capturar la geometría no lineal y la no linealidad de los materiales.

### 6.4.2 Cargas

Las siguientes cargas de gravedad serán aplicadas como condiciones iniciales en el análisis:

1.0D + Lexp

Lexp se toma del código mexicano NTC-RCDF-2004.

### 6.4.3 Amortiguamiento

El análisis de cada edificio asume un amortiguamiento inherente como se menciona a continuación. Este se implanta utilizando la clave DAMPING\_FREQUENCY\_RANGE\_DEFORM en LS-DYNA, la cual proporciona un amortiguamiento constante en todo el período del rango de interés. El amortiguamiento se basa en la rigidez tangencial (instantánea). El movimiento de cuerpo rígido no se amortigua.

Edificio	Amortiguamiento inherente en el análisis de sismo máximo considerado
Techo de la Terminal	2%
Terminal excluyendo el Techo	2%
Torre de Control and Centro de Operaciones	2%
Centro Regional de Operaciones	2%
Centro de Transportes Terrestre Intermodal	5%

### 6.4.4 Fortaleza del Material

Se utilizarán propiedades esperadas del material para todos los elementos, según se define en AISC/ACI. Se incluye una lista de estas en el 0.

## 6.5 Suposiciones de Rigidez

Se asume que los componentes de acero tienen módulo de elasticidad,  $E = 205\text{GPa}$ .

La tabla presentada a continuación proporciona las suposiciones de rigidez para los componentes de concreto, donde el módulo de elasticidad,  $E$ , se basa en las propiedades de fuerza esperada y las relaciones adecuadas para el concreto de peso normal y de peso ligero. El módulo de elasticidad transversal  $G$  se considera como  $E/(2(1+\nu))$ , donde se asume que  $\nu$  es 0.2.

Tabla 8 Suposiciones de rigidez de concreto para análisis de Sismo de Diseño.

Componente	Rigidez
Paredes del sótano	Flexión = $0.75EI_g$ Elasticidad transversal = $0.7GA$
Diafragmas	Diseñado como membrana (sin rigidez de flexión) Elasticidad transversal = $0.7GA$
Diafragmas de sótano	Flexión = $0.5EI_g$ Elasticidad transversal = $0.7GA$
Vigas de acoplamiento	Flexión = $0.5EI_g$ Elasticidad transversal = $0.5GA$

## 6.6 Modelos de Componentes y Criterios de Aceptación

Todos los requisitos de desempeño de los componentes serán evaluados en base a la criticidad y ductilidad del componente en relación a una acción de carga dada. Los elementos diseñados para permanecer elásticos serán modelados utilizando materiales elásticos lineales y verificados para asegurar que la demanda no exceda su capacidad elástica. Las siguientes clasificaciones y criterios de aceptación de conformidad se adoptaron según la guía PEER TBI. A todas las acciones se les asigna una de estas clasificaciones y luego se diseñan correspondientemente. El apéndice C documenta la clasificación asociada a cada sistema, componente y acción para el proyecto.



### 6.6.1 Acciones críticas controladas por fuerza

Las acciones críticas controladas por fuerza son aquellas en donde la capacidad de deformación inelástica no puede asegurarse y donde la falla representa consecuencias severas a la estabilidad estructural bajo cargas de gravedad y/o laterales. Lo siguiente aplica para estas acciones:

$$F_u \leq \phi F_{n,e}$$

$F_u$ : 1.5 veces la demanda promedio (donde la demanda no está limitada por un mecanismo de rendimiento bien definido).

$F_u$ : Media de + 1.3 veces la desviación estándar, pero no menor que 1.2 veces la demanda media (donde la demanda está limitada por un mecanismo de plasticidad bien definido).

$F_{n,e}$ : Fuerza nominal con propiedades esperadas de material.

$\phi$ : Factor de reducción de fuerza.

### 6.6.2 Acciones no-críticas controlada por fuerza

Las acciones no críticas son aquellas acciones controladas por fuerza para las cuales la falla no resulta en inestabilidad estructural o daños potencialmente letales. Las acciones controladas por fuerza no críticas deben cubrir:

$$F_u \leq F_{n,e}$$

$F_u$ : La demanda promedio

$F_{n,e}$ : Fuerza nominal con propiedades esperadas de material.

### 6.6.3 Acciones Controladas por Deformación

Las acciones controladas por deformación son aquellas para las que la capacidad de deformación inelástica confiable es alcanzable sin disminución de la resistencia crítica.

Se cumplirá con los límites de deformación en ASCE 41-13 para acciones controladas por deformación.

### 6.6.4 Acciones críticas controladas por fuerza para el GTC

No se permiten deformaciones no lineales asociadas a acciones controladas por fuerza. Las demandas de los análisis no lineales (NLSA/NLRHA) no deben exceder la capacidad de resistencia basada en ASCE 41-13.

## 6.7 Criterios Globales de Aceptación

### Distorsiones de Entrepiso

La distorsión pico para cada piso, promediada en los siete análisis, no excederá 1.0%.

Donde se use análisis de historial de respuesta para el Centro de Transportes Terrestre Intermodal, la distorsión pico promediada de los siete análisis no será mayor de 2%.

La distorsión de entrepiso será considerada como el valor máximo absoluto de distorsión, sin importar la dirección.

### Distorsión de entrepiso residual

Donde se use análisis de historial de respuesta para el Centro de Transportes Terrestre, la proporción de distorsión residual para cada piso, promediada en los siete análisis, no excederá 0.25%.

Este límite será de 1% para el Centro de Transportes Terrestre Intermodal.

### Pérdida Aceptable en la Fuerza entre Pisos

En cualquier análisis de historial de respuesta no lineal, la deformación impuesta en cualquier piso no resultará en una pérdida total de fuerza entre pisos que exceda 20% de la fuerza inicial.

## 6.8 Fatiga por bajos ciclos

Los edificios en la ciudad de México pueden estar expuestos a sismos de larga duración. En consecuencia los componentes pueden estar sujetos a un número de ciclos de carga significativos durante un gran terremoto. Esto crea el potencial para la fatiga de bajo ciclo; donde los ciclos repetidos de esfuerzos dentro del rango elástico de un elemento resultan en la falla del elemento.

La fatiga de ciclo bajo será evaluada para los elementos críticos. Esto se puede lograr a través de enfoques publicados como Manson-Coffin en lugar de dentro de los modelos de análisis globales.

## 7 Robustez y redundancia

---

La robustez es la capacidad de un sistema para soportar demandas extremas. Los sistemas estructurales redundantes son capaces de transportar cargas a través de un trayecto de carga alternativo si se eliminan los elementos clave.

Aunque Arup no tiene requisitos o alcance para considerar eventos extremos o explosiones, la robustez y la redundancia de los sistemas estructurales primarios serán considerados durante el diseño. Este trabajo se lleva a cabo principalmente en el contexto del diseño para incendios basado en desempeño.

Aunque la mayoría de los sistemas empleados en el aeropuerto son convencionales, la escala del techo de la terminal amerita atención especial. El sistema adoptado para esta estructura tiene la redundancia de los elementos clave en los apoyos línea y los funnels de apoyo. La escala de estos elementos también proporciona cierta robustez inherente.

## 8 Elementos No Estructurales

---

Para lograr los objetivos operacionales establecidos para los edificios del aeropuerto, se debe considerar el desempeño de los componentes no estructurales. Los componentes no estructurales incluyen el equipo de servicios del edificio y los elementos arquitectónicos como paredes divisorias, techo, fachadas y puertas.

El desempeño operacional se basa en artículos arquitectónicos ‘no diseñados’ y en acabados secundarios que pueden acomodar las fuerzas y los desplazamientos aplicados directamente a ellos por o por la estructura principal. Para lograr esto, los elementos no estructurales deben diseñarse y especificarse en relación a los límites de desempeño estructural establecidos en las Bases del Diseño y la carga/deformación calculada durante la evaluación estructural primaria. Estos elementos serán coordinados con el Arquitecto y el equipo de servicios del edificio.

## Referencias Adicionales

---

**SAC, 1996:** Analytical and Field Investigations of Buildings Affected by the Northridge Earthquake, Report No. SAC-95-04, prepared by SAC Joint Venture, a partnership of Structural Engineers Association of California, Applied Technology Council, and California Universities for Research in Earthquake Engineering.

**CTBUH, 2008:** Recommendations for the Seismic Design of High-Rise Buildings, Report of the Working Group on the Seismic Design of Tall Buildings, prepared by Willford, M., Whittaker, A.S., and Klemencic, R., edited by Wood, A., for the Council on Tall Buildings and Urban Habitat, Chicago, Illinois.

## Apéndice A

# Cargas y Propiedades del Material

# A1 Criterios de Carga

## A1.1 Cargas Vivas

La Tabla 9 resume las cargas vivas consideradas además del peso propio de la estructura. Estas cargas se tomaron de NTC-RCDF-2004.

Tabla 9 Cargas de Gravedad

Cargas adoptadas para MCA (kPa)	W	Wa	Wm	Nota
Área	kPa	kPa	kPa	
Vialidad de acceso	2.8	3.2	3.5	
Almacenamiento	2.8	3.2	6.0	
Cuartos de instalaciones mecánicas, eléctricas e hidrosanitarias	2.8	3.2	3.5	
Pasarelas móviles de circulación	0.4	1.5	3.5	
Carrusel de equipaje	0.4	2.5	3.5	
Comercios	2.8	3.2	3.5	
Paisajismo del techo interior no público	2.0	2.5	3.0	Cálculo de trabajo
Núcleos (escalera/elevadores/tubería vertical)	0.4	1.5	3.5	
Seguridad/Inmigración/Aduanas	0.4	2.5	3.5	
Sala de espera	0.4	2.5	3.5	
Conformación de manejo de equipaje a nivel de rasante/Franja	0.4	1.0	3.5	Asume mezcla de estacionamiento y puntos de reunión
Sanitarios	0.4	2.5	3.5	
Boletaje/Área de salidas	0.4	2.5	3.5	
Mostrador de documentación	0.4	2.5	3.5	
Circulación	0.4	1.5	3.5	
Asientos	0.4	2.5	3.5	
Puente fijo	0.4	2.5	3.5	
Puente de abordaje	0.4	2.5	3.5	
Reclamo de equipaje	0.4	2.5	3.5	
Área de llegadas	0.4	2.5	3.5	
Áreas de manejo de equipaje a nivel de rasante	0.4	1.0	3.5	Asume mezcla de estacionamiento y puntos de reunión
Oficina	1.0	1.8	2.5	
Techo interior público	0.4	2.5	3.5	
Techo interior no público (plataforma no losa)	0.15	0.7	1.0	
Espacio de equipaje bajo nivel rasante	0.4	2.5	3.5	
Plenum de aire/acceso vehicular	0.4	2.5	3.5	
Fosa de fonil	0.4	2.5	3.5	
Estacionamientos	0.4	1.0	2.5	

$W_m$  utilizado en el diseño estructural para gravedad, asentamiento inmediato de suelos y diseño de cimentación.

$W_a$  utilizado para diseño de viento y sísmico en los niveles de Servicio y de Sismo Máximo Considerado.

$W$  utilizado para cálculos fr asentamientos y desplazamientos a largo plazo.

## A1.2 Peso Propio

Ver la Sección A2 para más detalles sobre las densidades asumidas.

## A1.3 Combinaciones de Carga

A continuación se presentan las combinaciones de carga basado en los estándares de diseño NTC-RCDF-2004 (Código de construcción para la Ciudad de México).

#	LRFD
1)	$1.5[D + H + L_{max} + L_{r,inst} + T_{inst}]$
2)	$1.5[D + H + L_{r,max} + L_{inst} + T_{inst}]$
3)	$1.5[D + H + T_{max} + L_{inst} + L_{r,inst}]$
4)	$1.1[D + H + L_{inst} + L_{r,inst} + T_{inst} + (S_{point} \text{ o } E \text{ o } R \text{ o } W)]$
5)	$1.1[D + H + S_{area}]$
6)	$0.9[D + H + L_{min} + L_{r,min}] + 1.1[E \text{ o } W]$

### Símbolos:

D =	Carga muerta
E =	Carga de sismo
H =	Cargas por la presión de la tierra, presión hidrostática, etc.
$L_{max}$ =	Carga viva máxima
$L_{inst}$ =	Carga viva instantánea
$L_{mean}$ =	Carga viva promedio
$L_{min}$ =	Carga viva mínima
$L_{r,max}$ =	Carga viva de techo máxima
$L_{r,inst}$ =	Carga viva de techo instantánea
$L_{r,mean}$ =	Carga media de techo promedio
$L_{r,min}$ =	Carga viva de techo mínima
R =	Carga de lluvia
$S_{point}$ =	Carga de granizo (carga de punto, ver nota 8)
$S_{area}$ =	Carga de granizo (carga de área, ver nota 9)
$T_{max}$ =	Carga autotensionante máxima

$T_{inst} =$	Carga autotensionante instantánea
$T_{mean} =$	Carga autotensionante promedio
$T_{min} =$	Carga autotensionante mínima
$W =$	Carga de viento

## A1.4 Peso Sísmico y Masa Sísmica

### A1.4.1 Para el Nivel de Sismo de Diseño

El peso sísmico efectivo según ASCE 7-10 y se presenta a continuación:

$$1.0D + 1.0SDL + 0.25L_{storage}$$

Donde  $L_{storage}$  es la carga viva en las áreas utilizadas para almacenamiento.

Observe que la carga muerta sobrepuesta incluye el peso real de las paredes divisorias (o 10 psf mínimo) y el peso de operación total del equipo permanente. Ver la Tabla 9 para más detalles.

El peso sísmico efectivo incluye las cargas sobre la base (según la sección 12.7.2 en ASCE 7-10).

### A1.4.2 Análisis de historial de respuesta para el Sismo Máximo Considerado

El peso sísmico para el análisis de historial de respuesta no lineal (NLRHA) se presenta a continuación:

$$1.0D + 1.0SDL + 0.25L$$

Donde  $L$  es la carga viva no reducida –  $W_m$  en NTC-RCDF-2004.



## A2 Propiedades del Material

Se utilizarán las siguientes propiedades durante el diseño.

### A2.1 Concreto

Tabla 10 Propiedades del material de concreto

Punto	Resistencia de diseño mínima a la compresión, $f'_c$ [MPa]	Resistencia a la compresión esperada	Densidad $\text{kg/m}^3$
Cimentación	50	$1.3 f'_c$	2400
Entramado de concreto típico (losas y vigas)	40	$1.3 f'_c$	2400
Paredes y columnas de concreto	60	$1.3 f'_c$	2400

Tabla 11 Propiedades del acero de refuerzo

Punto	Asignación ASTM	Límite elástico mínimo, $F_y$ [MPa]	Límite elástico esperada
Refuerzo típico	A615 (NMX-C-407)	420	$1.17F_y$
Refuerzo para soldar	A706 (NMX-B-457)	420	$1.17F_y$

### A2.2 Acero Estructural y forjado metálico

Tabla 12 Propiedades de material de acero

Punto	Asignación	Límite elástico mínimo, $F_y$ [MPa]	Límite elástico esperada
Viga de brida ancha y columnas	ASTM A992 (NMX-B-284)	345	$1.1F_y$
Canalones, ángulos y placas	ASTM A36 (NMX-B-254)	250	$1.5F_y$
Sección hueca cuadrada y rectangular	ASTM A500, Grado B (NMX-B-199)	315	$1.3F_y$
Sección hueca circular	ASTM A500, Grado B (NMX-B-199)	290	$1.3F_y$
Tuberías	ASTM A53, Tipo E o S, Grado B	240	$1.4F_y$

	(NMX-B-177)		
Placas	ASTM A572/A572M Gr. 50 (345),	345	1.1Fy
Pernos:  Fuerza elevada  Fuerza normal	ASTM A490  Clase A (NOM-H-118)  ASTM A325M N (NOM-H-124)	De acuerdo al código	1.1Fy
Pernos de anclaje	ASTM F1554	380	1.1Fy
Electrodos de soldadura	E70XX		NA
Cubierta de metálica	ASTM A446, Grado A	275-340	NA

Los valores en la tabla de arriba para las propiedades esperadas se tomaron de la Tabla 7.1 en PEER TBI y en la Tabla A3.1 en AISC 341-10 Disposiciones Sísmicas.

Todos los materiales de acero tienen una densidad de 7850kg/m<sup>3</sup> y módulos elásticos de 205 GPa.

## **Apéndice B**

### Descripción de los Edificios

## B1.1 Edificio Terminal de Pasajeros (PTB)

El Edificio Terminal de Pasajeros incluirá las llegadas y salidas de pasajeros, área de seguridad, área comercial y otras funciones. Estará cubierto por una estructura de techo espacial que está descrita en la siguiente sección. Tiene 5 niveles principales: parte superior de la losa (varía de -5.5 m a -3.9 m), Nivel 1 (+0 m), Nivel 2 (+6 m), Nivel 3 (+12 m) y Nivel 4 (+18 m). El edificio tiene generalmente tres pisos con algunos espacios de doble y triple altura.

### Sistema estructural

El sistema de gravedad típico está formado de vigas y columnas de acero. La losa es de concreto ligero sobre un forjado metálico soportado por secciones de acero laminado. Hay cuatro tipos de tamaños de bahías: 10x15 m, 9x18 m, 18x18 m y 18x36 m. En bahías más grandes (18x36 m), se requiere armadura de piso de 3 m de profundidad como vigas principales.

El Edificio Terminal de Pasajeros está dividido en 19 segmentos del edificio con juntas de movimiento. Cada segmento tiene su propio sistema lateral independiente típicamente compuesto de marcos de acero con contravientos.

La cimentación será una losa compensada con diferentes profundidades desde 1.3 m a 1.5 m.

## B1.2. Techo del Edificio Terminal de Pasajeros (Techo PTB)

El techo del Edificio Terminal de Pasajeros incluye la Terminal como una estructura independiente. Esta expresada arquitectónicamente en una estructura espacial de 2 capas.

### Sistema estructural

El techo del Edificio Terminal de Pasajeros es un sistema estructural de marco espacial de acero prefabricado. Incluirá aproximadamente 450,000 elementos utilizando un sistema propio tipo nodo (Mero, KK o equivalente). El techo está soportado por 21 soportes de acero tubular soldado mencionados como funnels y está soportado directamente por la cimentación a nivel de piso a lo largo de todos los extremos excepto a lo largo del área de dejada del sur donde los elementos de acero convencional proporcionarán soporte al extremo. La estructura espacial resistirá las cargas laterales y de gravedad.

El techo del Edificio Terminal de Pasajeros será soportado por la cimentación principal del Edificio Terminal.

## B1.3 Torre de Control de Tráfico Aéreo (ATCT)

En desarrollo.

## B1.4 Centro de Transportes Terrestre (CTT)

El Centro de Transportes Terrestre es un edificio de cuatro pisos utilizado para estacionamiento y transportación terrestre con un techo verde. Las elevaciones de los estacionamientos están ubicados en +0, +3.5, +7, +10.5 m y el techo a +15 m. La estructura está dividida en un número de segmentos utilizando juntas de expansión.

### Sistema estructural

El sistema de gravedad consiste de una malla de columnas de aproximadamente 18m x 9m en la mayoría de las áreas con un sistema de piso que consiste de una losa en una cubierta metálica con concreto de peso ligero. Vigas secundarias, a 3m de distancia, correrán a lo largo de la dirección (18m). El sistema lateral consiste de marcos con contravientos concéntricos. Los pisos fungen como diafragmas que distribuyen las fuerzas laterales a los marcos con contraviento. Es probable que se requiera el uso de recolectores y refuerzos horizontales, con base en la distribución del sistema lateral.

La cimentación será losa compensada de 1 m a 1.5 m de espesor. Se anticipa que el fondo de la elevación de la losa se encontrará entre -5.0 y -6.0 m.

## **Apéndice C**

### **Diseño Gráfico y Evaluación de Componentes**

## C1 Diseño Gráfico de Componentes y Clasificación de Acciones

Tabla 17 Modelos de componentes y clasificaciones de acciones

Sistema	Componente	Acción	DC/FC	Crítica	Rendimiento	Modelo de material (LS-DYNA)	Notas
Estructura espacial del techo	Refuerzo	Axial	FC	S	N	Elástico	
		Flexión	-				
		Elasticidad transversal	-				
Columna de soporte de la cubierta	Refuerzo (no es parte del sistema de gravedad)	Axial	DC			*MAT_STL_CON_B R	
		Flexión	-				
	Elasticidad transversal	-					
	Refuerzo (sistema de gravedad)	Axial	FC	S	TBC	Elástico	
		Flexión	-				
		Elasticidad transversal	-				
Marcos con contraviento concéntrico ordinario/ Marco con contraviento concéntrico especial	Refuerzo	Axial	DC			*MAT_STL_CON_B R	
		Flexión	-				
		Elasticidad transversal	-				
	Viga	Axial	FC	S	S	Elástico	
		Flexión	-				
		Elasticidad transversal	-				
Columna	Axial	FC	S	S	Elástico		
	Flexión	-					
	Elasticidad transversal	-					
Marcos estructurales de momento	Viga	Axial	-			*MAT_STL_CON_B R	
		Flexión	DC				
		Elasticidad transversal	FC	S	S		
	Columna	Axial	FC	S	S	Elástico	
Flexión		FC	S	S			
Elasticidad transversal		FC	S	S			
Armadura de transferencia	Refuerzo	Axial	FC	S	S/N	Elástico	Verificar la capacidad del armazón del sistema.
		Flexión	FC	S	S/N		
		Elasticidad transversal	FC	S	S/N		
Diafragmas	Losas	Elasticidad transversal	FC	S	S/N	Elástico	Verificar la capacidad del armazón del sistema.
	Refuerzo Plan	Axial	FC	S	S/N	Elástico	
	Colectores	Todas	FC	S	S/N	Elástico	
Contraviento restringido contra pandeo	Refuerzo	Axial	DC			*MAT_RC_BEAM	
		Flexión	-				
		Elasticidad transversal	-				
	Viga	Axial	FC	S	S	Elástico	
		Flexión	FC	S	S		
		Elasticidad transversal	FC	S	S		
	Columna	Axial	FC	S	S	Elástico	
		Flexión	FC	S	S		
Elasticidad transversal		FC	S	S			
Conexiones	Todas	FC	S	S	Elástico		
	Muros	Axial	FC	S	S	*MAT_CONCRETE _EC2	Flexión fuera de plano, flexión que causa compresión, compresión axial, y elasticidad transversal en las paredes del sótano > Controlado por Fuerza crítica
		Flexión	FC	S	S		
Elasticidad transversal		FC	S	S			
Losa Mat	Axial	FC	S	S	Elástico	Flexión que causa compresión, elasticidad transversal y perforación en la base de concreto > Controlado por fuerza crítica	
	Flexión	FC	S	S			
	Elasticidad transversal	FC	S	S			
Pilotes	Axial	FC	S	S	?		
	Flexión	FC	S	S			
	Elasticidad transversal	FC	S	S			
Cabezal de pilotes	Axial	FC	S	S	Elástico	Flexión fuera de plano, flexión que causa compresión, compresión axial, y elasticidad transversal en el cabezal de pilotes > Controlado por fuerza crítica	
	Flexión	FC	S	S			
	Elasticidad transversal	FC	S	S			
Muros a cortantes	Muros	Axial	DC			*MAT_CONCRETE _EC2	Tensión compresiva por flexión y/o acciones en muros a cortante que no tienen aislamiento adecuado o demanda axial > punto de equilibrio >> Controlado por fuerza
		Flexión	DC				
		Elasticidad transversal	FC	S	S		
	Vigas de acoplamiento normal RF	Axial	DC			?	
		Flexión	DC				
Elasticidad transversal	FC	S	S				
Vigas de acoplamiento diagonal RF	Axial	DC			*MAT_HYSTERETI C		
	Flexión	DC					
	Elasticidad transversal	DC					
General	Conexiones	Todas	FC			Elástico	Si no está diseñado explícitamente para la fuerza del componente conectado.

**Notas:**

Todas las acciones están clasificadas como Controladas por Deformación (**DC**) o Controladas por Fuerza (**FC**).

Para las acciones controladas por Fuerza también debe evaluarse la criticidad del componente y la presencia de un mecanismo de rendimiento bien definido. La tabla de arriba presenta una clasificación típica pero debe verificarse explícitamente para cada sistema.

Referirse al cuerpo del reporte para los requisitos de diseño asociados a la clasifi



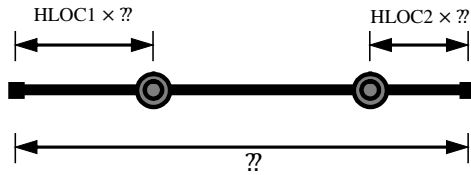
## **Appendix D**

### LS-DYNA Primary Material Models

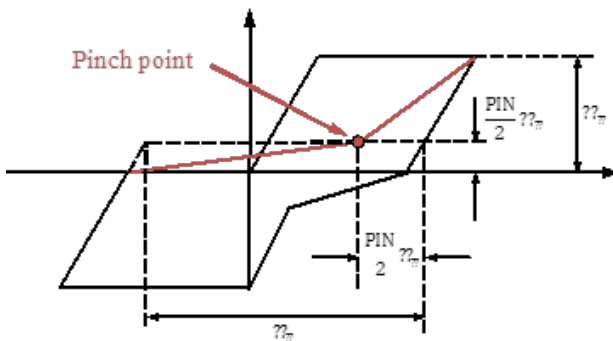
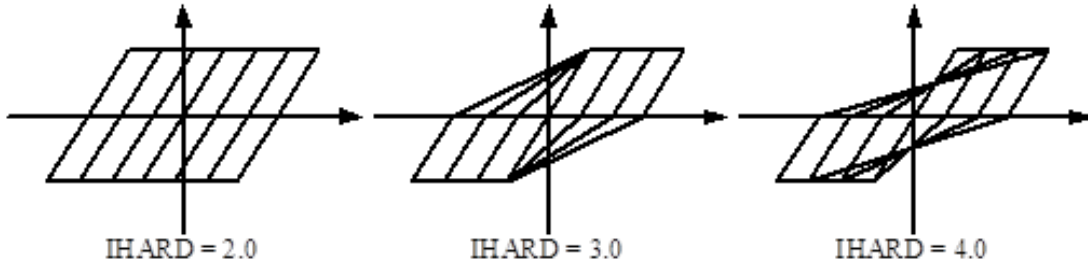
## D1 MAT\_HYSTERETIC\_BEAM

This is a flexural and shear elastic beam with plastic hinges at both ends or at arbitrary locations in between. It has numerous features including:

Hinges may be offset from the extreme ends of the beam

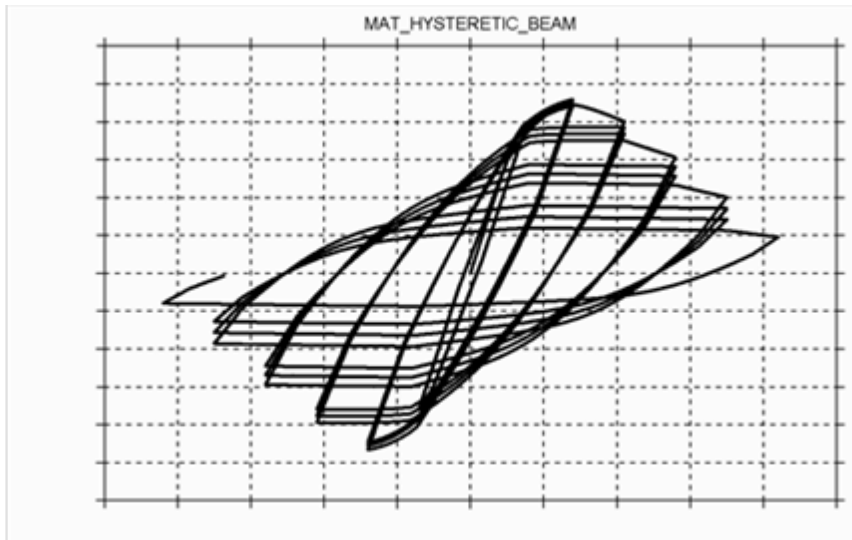


Options for hysteresis behavior, (peak-oriented, pinching, etc.)



Kinematic and isotropic hardening and softening

These may be combined to produce many types of hysteresis



Options for skew interaction surfaces

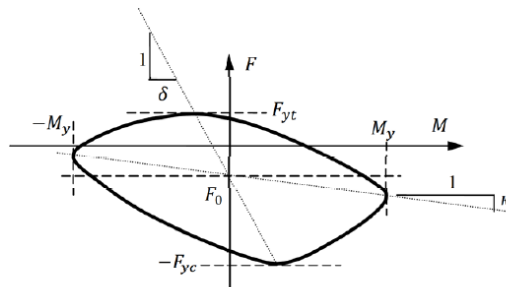


Figure 1 – Schematics of skew parameters for surface Type 3 (kinematic hardening ignored)

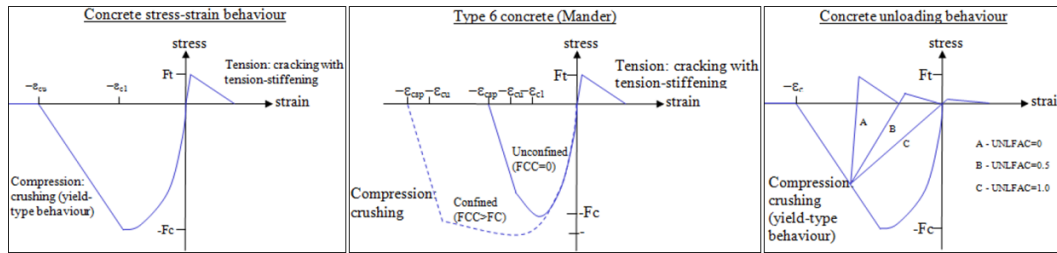
Shear yielding and failure that is axial load-dependent

## D2 MAT\_CONCRETE\_EC2

### D2.1 General

MAT\_CONCRETE\_EC2 is an advanced constitutive model for reinforced concrete that can be used with shell and distributed plasticity beam elements. It contains material options for both concrete and reinforcing bars.

MAT\_CONCRETE\_EC2 reports a total of 22 "extra variables", provided the DATABASE\_EXTENT\_BINARY card is enabled with BEAMIP = 22 (or MAXINT = 22 for shells). The variables can be used to change loading and unloading behavior in compression and tension for confined and unconfined concrete as shown below.



## D2.2 Use with Fiber Beam Elements

The section should generally be built up using INTEGRATION\_BEAM cards; SECTION\_BEAM cards may also be used, but have limited integration point choices. Unconfined concrete, confined concrete, and reinforcement fibers can all be defined explicitly (each integration point in \*INTEGRATION\_BEAM references a Material ID for unconfined concrete, confined concrete or reinforcement) or a smeared approach can be used (all integration points have the same Material ID, with FRACRX equal to the reinforcement in the section). The advantage of the former approach is that individual steel or concrete fibers can be interrogated directly in D3Plot. In the latter approach, the stresses will be a weighted combination of steel and concrete stress.

When \*MAT\_CONCRETE\_EC2 is used for beams, the parameter FRACRY is ignored.

## D2.3 Use with Shell Elements

The non-linear hysteretic behavior of concrete in 2D is highly complex, and all theoretical concrete models have limitations. \*MAT\_CONCRETE\_EC2 is a 'fixed crack' model, and will develop its first crack when the maximum principal stress exceeds the specified tensile strength; the crack is formed normal to that stress direction. Another crack can only form on a plane orthogonal to the first. This can result in inaccurate behaviors; if the loading direction changes, intermediate angles to the crack directions can have tensile stress exceeding the cracking stress. In many cases this is not a practical limitation.

### D2.3.1 Definition of concrete uniaxial stress strain curve

The definition of the uniaxial stress-strain curve in MAT\_CONCRETE\_EC2 depends upon the parameter TYPEC. With TYPEC = 1.0 or 2.0 (not sure about others), the initial elastic stiffness is given by  $3F_c/2E_{c1}$  which is more reasonable than \*MAT\_RC\_BEAM. Alternatively with TYPEC = 6.0, the Mander model is used for the stress-strain of the concrete (not sure what version of DYNA

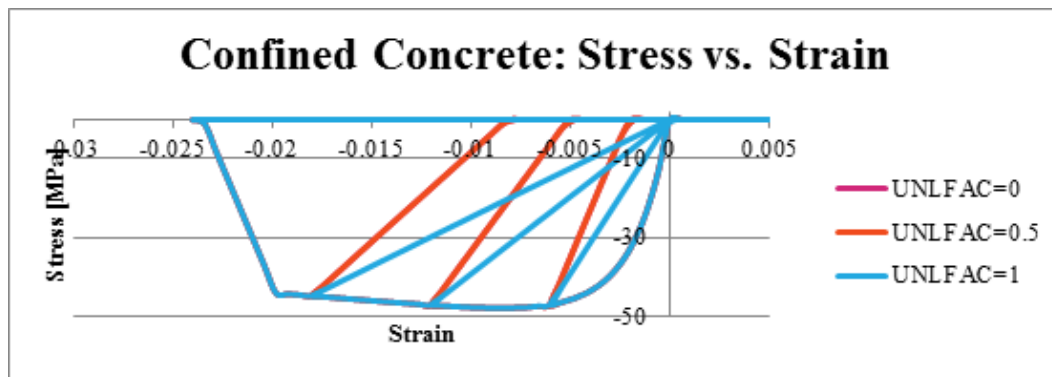
this requires), and the user can specify the Young's modulus of the concrete explicitly.

If the concrete aggregate type, TYPEC, is selected as either 3 or 6, it is very important that the associated stress-strain variables be defined properly.

- If TYPEC = 3, ET36, PRT36 and ECUT36 must be defined.
- If TYPEC = 6, ET36 and PRT36 must be defined. FCC6 must also be defined for confined concrete or left blank for unconfined concrete. The user can define EC1\_6, ECUT36 and ECSP\_6 or default values will be calculated using Mander's equations. If the user chooses to enter those values it is very important that they are consistent with the formulas used by LS-DYNA, otherwise odd concrete behavior may occur.

### D2.3.2 Concrete unloading

Concrete unloading is controlled by parameter UNLFAC. Example behaviors are shown below.



### D2.3.3 Reinforcement Type 5

If reinforcement type TYPER is selected as 5, the user can define reinforcement stress-strain behavior that is not temperature-sensitive as LCRSU. This curve must be input as a factor of the ultimate stress of reinforcement vs. PLASTIC strain. Therefore the first point is 0,0). This would mean the stress before yield is zero and odd behavior after yield depending on the curve input.

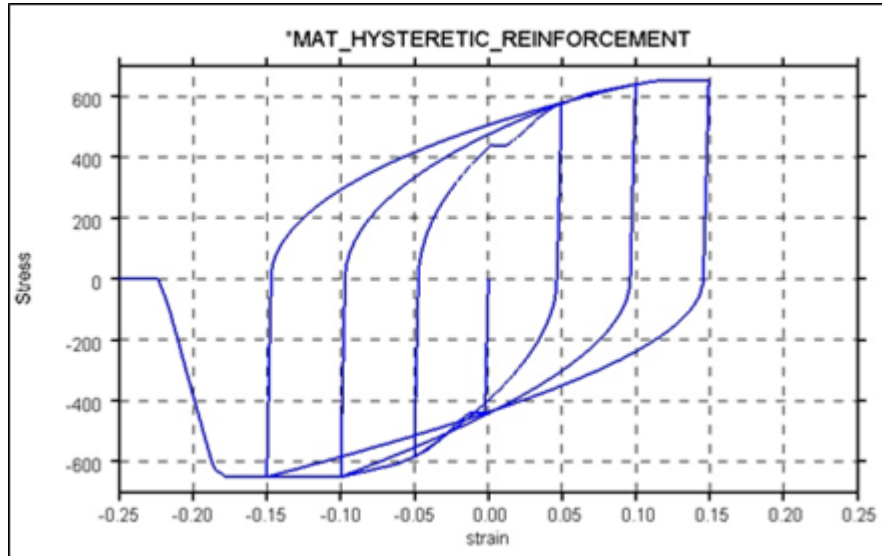
### D2.3.4 Rebar buckling

Rebar buckling is an important behavior in some circumstances, such as limiting the ductility of many axially loaded RC walls in flexure. If rebar buckling is to be represented, MAT\_HYSTERETIC\_REINFORCEMENT should be used. Even if buckling isn't being modelled this option is recommended to capture the Bauschinger effect – energy absorbed during hysteresis, as shown below.

Several methods are available in MAT\_HYSTERETIC\_REINFORCEMENT to represent rebar buckling, but none of them are entirely satisfactory. The current recommendation is to use the buckling stress (SBUCK) and slenderness ratio (LAMDA) method. However, will immediately see buckling upon reaching this buckling stress, which may not be accurate. Some amount of yielding before buckling may be more realistic.

Other methods include:

- Compression load curve method (LCCOMP). This is a user defined backbone curve for peak compressive stress
- Buckling strain (EBU) and downslope (DOWNSL)
  - However, will only buckle at this compressive strain. Even if this strain value is exceeded when cycling from tension to compression, this steel material model will only buckle once the strain has crossed over from tension to compression.



### D2.3.5 Shear resistance

While the reinforcing steel is able to take axial loads it has no shear resistance in MAT\_CONCRETE\_EC2. The properties defining shear resistance are all assigned to the concrete material. It is therefore very important that the tensile strength of concrete and other cracking variables be defined realistically, as this information is used to determine the maximum shear stress that cracked concrete can carry. If FT (the tensile stress to cause concrete cracking) is left blank (or input as a small value) and the other cracking variables are left blank, LS-DYNA will determine that there is zero shear resistance after tensile cracking occurs.

The shear resistance calculation is based on parameter AGGSZ.

- If  $AGGSZ > 0$ , the Norwegian standard NS3473 is used to determine the maximum shear stress carried by cracked concrete based on aggregate interlock. In this case,  $AGGSZ$ ,  $ECUTEN$ ,  $UNITL$ ,  $LCHAR$  and  $FT$  must all be defined. The maximum through thickness shear stress after cracking,  $TAUMXC$ , can also be defined directly, but by default will be calculated as  $1.161FT$ . If  $TAUMXC$  is defined, the maximum shear stress calculated will be scaled by  $TAUMXC/1.161FT$ .
- If  $AGGSZ = 0$ , a direct formula is used to calculate the maximum shear stress carried across a crack and requires that  $ECUTEN$ ,  $ECRAGG$ ,  $MU$  and  $TAUMXF$  all be defined.  $TAUMXC$  can either be defined or will be taken as  $1.161FT$  by default.

### D2.3.6 Sections including ‘shear resisting’ steel elements

In elements such as concrete filled steel tubes or SRC (concrete members with large steel sections embedded) the supplementary steel sections can be expected to carry shear, particularly when the concrete is cracked in tension. It is not possible to represent this action if the steel is represented as reinforcement. It is necessary to provide a parallel steel section element.

This may require the use of two coincident beams sharing the same end nodes – one beam to represent concrete integration points and one beam to represent steel integration points.  $*MAT\_EC2$  can still be used to represent the concrete, but some other material (i.e.  $*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC$ ) will need to be used to represent the steel if the steel is expected to take shear loads.

## D3 MAT\_STEEL\_CONCENTRIC\_BRACE

---

The  $MAT\_STEEL\_CONCENTRIC\_BRACE$  material model is essentially a spring element with hysteresis rules to accurately model the tensile and compressive cyclic behavior of relatively slender steel braces which do not suffer local buckling. It incorporates:

- hysteresis cycles in tension and compression
- the Bauschinger effect
- lower capacity in compression than in tension
- post-buckling axial capacity
- cyclic reduction in buckling capacity

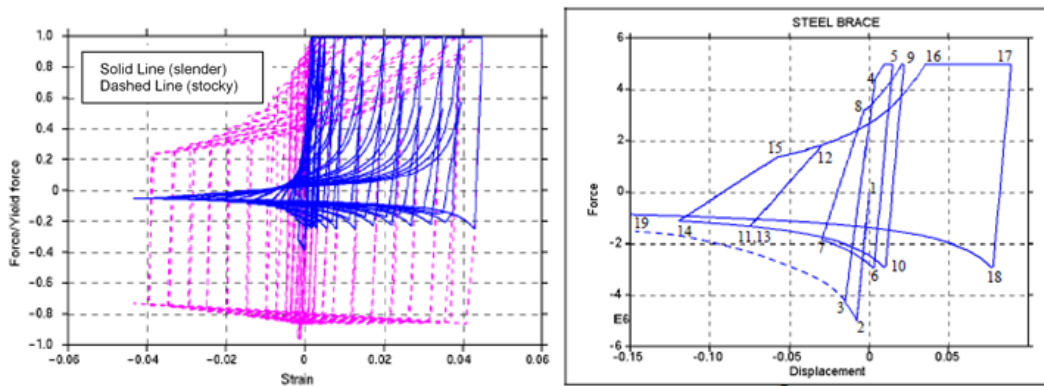
The material model transmits axial force only, and braces must be represented as a single element between support points, as otherwise the member will have a pin in the middle and will be unstable. The slenderness range of applicability is not

documented in the manual, but the model should not be used when the slenderness ratio is less than 30, or:

$$\lambda \leq \sqrt{\frac{E}{7.5f_y}}$$

When used outside this range erratic behavior may result.

Example brace behavior is shown in the figure below.



## D4