

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

**TITULO DE LA TESIS**

**EVALUACION ESTRUCTURAL DE LA TORRE  
DE LA BASILICA DE LA MERCED - LIMA -  
PERU**



TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR

BACHILLER HENRY EDUARDO TORRES PECEROS

ASESOR

ING VIRGILIO ALEJANDRO PEÑA HARO

LIMA – PERU

2009

## Agradecimientos

A la Orden de Nuestra Señora de la Merced al Padre Superior Cesar Quiroa y en especial al Padre Saúl Peredo por su orientación acerca de la Historia de la Basílica de la Merced sin cuyo conocimiento no hubiera sido posible completar esta investigación.

También quiero agradecer al Arquitecto José Niño Villegas por la motivación hacia los temas de Conservación, y por su apoyo en todas las fases de la investigación desde el primer momento.

A la Arquitecta Lucila Uzátegui por la información y los alcances acerca de los estudios de Conservación de esta obra en particular.

A los Ingenieros Benjamín Barriga y Karol Muñoz del Centro de Tecnologías Avanzadas de Manufactura CETAM de la Pontificia Universidad Católica del Perú por permitirme el uso de los laboratorios de cómputo.

*Para mis padres*

## Resumen

Nuestro país, el Perú cuenta con un vasto patrimonio arquitectónico, restos históricos que datan desde la época prehispánica, edificaciones con la cual hemos convivido y la que lamentablemente desde hace mucho tiempo estamos depredando y si ha sido descuidada sucede por una simple razón: no la hemos valorado en su real dimensión esto es, histórica, social, antropológica y técnica, y esta tesis trata sobre este tema.

Valorar el patrimonio que poseemos los peruanos no es una tarea sencilla, sin embargo es ineludible y va en nuestro propio beneficio como sociedad ya que se logra un reencuentro con las sociedades de las cuales somos originarios, una re-conexión con nuestro pasado nos enriquece y nos da el sustento de la identidad como nación.

El presente trabajo se dedica al análisis estructural de la Torre de la Basílica de la Merced en Lima, la construcción de la Torre data del año 1589, uno de los más antiguos y más significativos de la ciudad y esta investigación es un aporte para revalorar este monumento desde el punto de vista técnico, utilizando técnicas modernas de análisis estructural para evaluar su capacidad sísmica a través de todos estos años y poder predecir su comportamiento frente a los sismos que tendrá que soportar.

Para el estudio del comportamiento a las sollicitaciones sísmicas del monumento se hicieron modelos tridimensionales utilizando para el análisis el método de elementos finitos y se calcularon esfuerzos estáticos y dinámicos.

Previamente se hizo un estudio histórico del punto de vista constructivo y sísmico cuyo análisis dio interesantes alcances acerca de las reconstrucciones y reparaciones que ha sufrido así como información acerca de su construcción y los responsables de esta, en cuanto a los grandes sismos que ha sufrido hemos recopilado información acerca de cómo se han reportado daños de los grandes terremotos del pasado en Lima.

Desde el punto de vista técnico se exponen las investigaciones realizadas por prestigiosas instituciones peruanas acerca de las zonificaciones sísmicas y geomórficas, análisis de microtrepidación así como la clasificación por riesgo sísmico de la ciudad en función de las características de suelo de la ciudad de Lima.

Los análisis de elementos finitos que se realizaron fueron dos: análisis estático y el análisis de superposición modal espectral, se exponen los análisis con los esfuerzos y desplazamientos encontrados y se comparan con los daños observados en la estructura de la Torre, de manera que se identifiquen los esfuerzos que los produjeron.

Finalmente se formulan las observaciones, conclusiones del presente trabajo y se plantean las recomendaciones para futuras investigaciones que pudieran realizarse.

# INDICE

<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCION .....</b>	<b>9</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	9
1.2 OBJETIVOS.....	10
1.3 CONTENIDO .....	11
<b>CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE DE LA EVALUACION ESTRUCTURAL DE MONUMENTOS .....</b>	<b>13</b>
1. GENERALIDADES .....	13
2. NORMATIVIDAD.....	13
3. CRITERIOS DE ANALISIS Y RESTAURACION ESTRUCTURAL .....	17
4. INVESTIGACIONES REALIZADAS .....	19
<b>CAPÍTULO 3 CONCEPTOS GENERALES.....</b>	<b>21</b>
INTRODUCCIÓN .....	21
3.1. CRITERIOS DE FALLA DE LOS MATERIALES.....	21
3.2 COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES CLASICOS .....	22
3.2.1 Piedra .....	22
3.2.2 Barro .....	23
3.2.3. Adobes .....	23
3.2.4. Mortero .....	24
3.2.5. Madera .....	24
3.2.6. Metal .....	26
3.3 COMPORTAMIENTO DE LA MAMPOSTERIA .....	26
3.3.1. Materiales de la Mampostería .....	26
3.3.2. Propiedades de las Unidades de Mampostería .....	29
3.3.2. Comportamiento Mecánico de la Mampostería de ladrillos a Compresión .....	33
3.3.3. Comportamiento de la mampostería a cortante.....	34
3.3.4. Comportamiento de la mampostería a tracción.....	38
3.3.5. Comportamiento de la mampostería a flexocompresión y cortante.....	38
3.4. MÉTODOS DE ANÁLISIS.....	40
3.4.1 Análisis Estático Lineal.....	40
3.4.2 Análisis Dinámico.....	41
<b>CAPÍTULO 4 ANTECEDENTES.....</b>	<b>49</b>

INTRODUCCIÓN .....	49
4.1 REVISION DE LA HISTORIA .....	49
4.2 CONSIDERACIONES GEOTECNICAS DEL SUELO DE LIMA .....	56
4.2.1 GEOGRAFÍA.....	56
4.2.2 SISMICIDAD DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	56
4.3 CONSIDERACIONES GEOLOGICAS.....	59
4.3.1 GEOLOGIA Y GEOMORFOLOGIA DE LA CIUDAD DE LIMA .....	59
4.3.2 GEOMORFOLOGÍA DE LIMA .....	61
4.4 ANALISIS DE MICROTREPIDACIONES EN LA CIUDAD DE LIMA .....	62
4.5 ZONIFICACION SISMICA DE LA CIUDAD DE LIMA .....	63
4.6 ANALISIS Y DISCUSION DE LAS CARACTERISTICAS GEOTECNICAS DE LA ZONA EN ESTUDIO ..	65
<b>CAPÍTULO 5 ANALISIS ESTRUCTURAL DE LA TORRE DE LA BASILICA DE LA MERCED .....</b>	<b>66</b>
INTRODUCCIÓN .....	66
5.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA .....	66
5.2 METODOLOGÍA .....	72
5.3 TRABAJOS DE CAMPO .....	72
5.4 ANALISIS DE CARGAS EN LOS MODELOS .....	78
5.5 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	80
5.6 CONDICIONES DEL SUELO .....	80
5.7 MODELO ESTRUCTURAL.....	81
5.8 MODELOS GENERADOS PARA EL ANÁLISIS ESTÁTICO LINEAL.....	81
5.9 ANALISIS DINAMICO LINEAL CON PESO PROPIO: MODOS DE VIBRACION.....	90
5.10 ESPECTRO DE RESPUESTA DE PSEUDO ACELERACIONES .....	96
5.11 ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO SISMORRESISTENTE DE LA TORRE DE LA MERCED	106
<b>CAPÍTULO 6 OBSERVACIONES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>110</b>
6.1 OBSERVACIONES .....	110
6.2 CONCLUSIONES .....	110
6.3 RECOMENDACIONES .....	112
6.4 REFORZAMIENTOS .....	112
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>113</b>
I. TEXTOS CONSULTADOS:.....	113
II. ARTÍCULOS DE REVISTAS .....	113
III. PÁGINAS WEB: .....	114
IV. INSTITUCIONES CONSULTADAS .....	115





# Capítulo 1

## INTRODUCCION

### 1.1 INTRODUCCIÓN

La presente Tesis desarrolla el análisis estructural de la Torre de la Basílica de Nuestra Señora de la Merced, edificación ubicada en pleno Centro Histórico de Lima, para esto se hicieron trabajos y mediciones en campo<sup>1</sup>, se recopiló información histórica, se revisaron planos de obra, se diseñó un modelo matemático para la evaluación de la edificación y se plantearon hipótesis de comportamiento ante sollicitaciones sísmicas de manera que puedan buscarse alternativas de reforzamiento estructural adecuadas.

Es conocido por los profesionales vinculados a la conservación de monumentos que esta es una actividad multidisciplinaria, en la que participan especialistas de diversas materias: arquitectos, historiadores, químicos, restauradores, geólogos, asimismo ingenieros estructurales y geotécnicos son requeridos cada vez más para formar parte de estas actividades y su participación se vuelve importantísima dada la importancia de su campo de acción dentro de los estudios de conservación, sin embargo es una realidad que en nuestras universidades el estudio de las tipologías estructurales y de tecnología de materiales tradicionales es casi nula, un caso contradictorio en nuestro país donde existen más de 4000 años de actividad constructora. Es por esto que podemos identificar estas deficiencias en la formación de los futuros profesionales de la Ingeniería Civil dejando actividades propias de su formación a profesionales como los Arquitectos sobrecargando de responsabilidad de trabajo dentro de la conservación, pudiendo sin embargo con

---

<sup>1</sup> Los trabajos de campo, mediciones, visitas y toma de fotografías se hicieron en el año 2005 fecha en que el autor visitó el Monumento.

una formación adecuada colaborar para que esta actividad se profesionalice mucho más.

Sin embargo esto no es suficiente. En países con mucho mas tradición de conservación y de restauración que el nuestro (Italia y España por ejemplo) se busca desarrollar políticas nacionales y a nivel continental para la conservación de su Patrimonio Cultural, así como lineamientos en cuanto a investigación y desarrollo de Tecnologías adecuadas para la conservación adecuada del Patrimonio, es por esto que en vista de los avances de otros países es que debemos aprender de su experiencia, para elaborar nuestros propios criterios de acuerdo a nuestra realidad económico- social actual.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

- Realizar el análisis estructural de la Torre de la Merced, utilizando para ello un Modelo Matemático y ensayar el Modelo dentro del comportamiento lineal del material por el método de elementos finitos, para obtener valores de esfuerzos y desplazamientos y compararlos frente a los registros de daños elaborados.

### **Objetivos Específicos**

- Identificar las características de los materiales de los elementos estructurales que la componen.
- Elaborar un informe detallado sobre el estado de daño en que se encontraba la estructura.
- Modelar la Torre de la Merced utilizando un software para análisis por el método de Elementos Finitos.

- Adquirir un conocimiento histórico de la obra investigando las intervenciones antiguas y recientes a la que ha sido sometida.
- Ofrecer unas recomendaciones finales acerca del comportamiento estructural frente a sismos de moderada y alta intensidad de manera que se puedan diseñar adecuadamente los reforzamientos respectivos.

### **1.3 CONTENIDO**

El contenido de la Tesis se ha organizado de la manera siguiente:

El Capítulo 1 contiene la introducción y la descripción del contenido de la Tesis.

En el Capítulo 2 se explica acerca del estado actual de las investigaciones acerca de las intervenciones estructurales de Monumentos, centrándose en las metodologías empleadas, así como en la normatividad que se utiliza a la fecha, se mencionan las investigaciones realizadas nacionales y extranjeras que sirven como referencia. Asimismo se hacen comentarios acerca de la metodología que se emplea para las evaluaciones estructurales que se realizan en la actualidad.

En el Capítulo 3 se desarrollan los conceptos básicos y necesarios para el análisis estructural, empezando por el comportamiento de los materiales clásicos más utilizados en los monumentos, así como los métodos de análisis empleados como el estático y el dinámico, el comportamiento lineal y no lineal de los materiales, etc. Se hace un desarrollo acerca del comportamiento sísmico de los edificios antiguos y las pruebas de campo y laboratorio necesarias. Se desarrollan además los conceptos básicos acerca del daño sísmico y de la vulnerabilidad. Se anexa una bibliografía específica para el tema.

En el Capítulo 4 se exponen las consideraciones previas al análisis estructural, como la investigación realizada sobre la historia de la edificación, las condiciones geotécnicas, geológicas, sísmicas, etc.

El Capítulo 5 contiene el desarrollo del análisis estructural. Análisis por peso propio, modos de vibración, análisis sísmico, etc.

En el Capítulo 6 se plantean las observaciones, conclusiones, recomendaciones y reforzamientos de la Tesis y se mencionan los Tópicos de investigación futura.

## Capítulo 2

# ESTADO DEL ARTE DE LA EVALUACION ESTRUCTURAL DE MONUMENTOS

### **1. GENERALIDADES**

En el tiempo presente, la evaluación estructural de Edificaciones Históricas está contenida dentro de la disciplina de la Restauración de Monumentos, los estudios estructurales también han sido desarrollados dentro del marco de las normas y criterios que ha seguido la restauración arquitectónica ya que se han desarrollado para un fin específico formal y arquitectónico, sin embargo sus análisis no han seguido siempre los rumbos correctos, la falta de información sobre sistemas estructurales antiguos y complejos, el uso desaparecido de ciertas técnicas constructivas, la falta de manejo de materiales antiguamente utilizados y las erradas interpretaciones del comportamiento sísmico de las estructuras, hacen de la evaluación estructural de los Monumentos un complicado reto para el ingeniero que se forma en las universidades de nuestro país. Espero que el desarrollo de la Tesis sirva de alguna manera para ayudar a superar estas limitaciones.

### **2. NORMATIVIDAD**

En esta parte se estudiará la Normatividad utilizada en el proceso de conservación de Monumentos porque es importante conocer el marco legal y los criterios que por consenso se adoptan en otros países.

Estas normas están compuestas por los documentos emitidos por entidades internacionales autorizadas como el ICOMOS, Congresos Internacionales así como documentos nacionales tales como las Normas de Edificaciones, sin embargo no tenemos una Ley de protección de patrimonio edificado dentro del territorio

peruano a la fecha por lo que estos documentos extranjeros son útiles como referencia inmediata.

A continuación se exponen los códigos, normativas y otros documentos que a la fecha se conocen a nivel internacional<sup>2</sup> y que se deberían tomar como referencia para que el profesional nacional capacitado en la conservación monumental del patrimonio arquitectónico desarrolle su trabajo.

**1931. Carta de Atenas.** Carta para la Restauración de Monumentos Históricos, adoptada por el Primer Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos en Monumentos Históricas, recomienda respetar “el carácter y fisonomía de la ciudad, especialmente en la cercanía de monumentos antiguos donde el ambiente debe ser objeto de un cuidado especial”. Es considerado un documento clave. Como reconocería posteriormente la Carta de Venecia, la Carta de Atenas contribuyó al desarrollo de un vasto movimiento internacional para la defensa y conservación de los bienes culturales.

**1964. Carta de Venecia.** Carta Internacional sobre la Conservación y Restauración de los Monumentos y los Sitios Histórico-Artísticos propuesta tras el II Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos en Monumentos Históricos.

1965. Creación del Consejo Internacional de Monumentos y Sitios Históricos (ICOMOS), que adoptará la Carta de Venecia.

---

<sup>2</sup> Agustín Azkarate, El Patrimonio Arquitectónico, Universidad del País Vasco Año 2003, pp.6-7.

1972. Adopción por parte de la UNESCO del Convenio para la Protección del Patrimonio Mundial Cultural y Natural.

**1975. Carta de Ámsterdam.** Carta Europea del Patrimonio Arquitectónico.

Importante documento surgido del Congreso sobre Patrimonio Arquitectónico Europeo en el que se enfatizan los conceptos de restauración integral e intervención mínima frente a los excesos de quienes actuaban siguiendo criterios básicamente de reutilización y funcionalidad. Al año siguiente (1976) el Consejo de Europa emite una Resolución relativa a la adaptación de los sistemas legislativos y reglamentarios a los requisitos de la conservación integrada del patrimonio arquitectónico.

**1985. Convenio de Granada.** “Convenio para la salvaguarda del patrimonio arquitectónico de Europa”. Este documento, junto con el Convenio de La Valette de 1992 (Convenio Europeo para la protección del patrimonio arqueológico) y el Convenio de Florencia de 2000 (Convenio europeo del Paisaje), conforma la normativa actual del Consejo de Europa relativa al Patrimonio Cultural.

**1987. Carta Internacional para la Conservación de las Poblaciones y Áreas Urbanas Históricas.**

Concierne a los núcleos de carácter histórico -grandes o pequeños- amenazados por la degradación, deterioro o destrucción provocados por una forma de desarrollo urbano surgida de la era industrial que afecta, en mayor o menor medida, a todas las sociedades.

**1999. Carta del Patrimonio Vernáculo Construido** (Charter on the Built Vernacular Heritage).

Importante documento en el que el Patrimonio Vernáculo, definido como “el modo natural y tradicional en que las comunidades han producido su propio hábitat” es reivindicado y protegido ante la creciente homogeneización de la cultura y la globalización socio-económica, que ponen en riesgo este tipo de estructuras extremadamente vulnerables. Esta Carta ratifica los principios generales de conservación que habían sido propuestos por la Carta de Patrimonio Vernáculo Construido, de Jerusalén (1996).

**2000. Carta de Cracovia.**

Importantísimo documento, tanto por su contenido como por ser el más reciente de cuantos hacen referencia explícita al Patrimonio Arquitectónico. Reivindica la recuperación de la memoria histórica que contiene el patrimonio edificado (vuelve a potenciar, por tanto, sus valores documentales), defiende los distintos valores que ha ido acumulando con los siglos (se opone, por tanto, a la recuperación selectiva de supuestos estados originales) y concibe el acto de la restauración como un proceso de conocimiento.

**LEY 16/1985, Ley del Patrimonio Histórico Español.**

La ley del Patrimonio Histórico Español del 29 de Junio de 1985 es la ley que protege el patrimonio de esta nación y que ha recibido numerosas críticas sin embargo es la que está vigente actualmente.



### **LEYES Y REGLAMENTOS NACIONALES<sup>3</sup>:**

1. **Ley N° 28296:** Ley general del Patrimonio Cultural de la Nación
2. **Constitución Política del Perú:** Artículo N° 21°.
3. **Código Penal:** Título VIII, artículos 226° al 231.
4. **Ley N° 28296:** Ley general del Patrimonio Cultural de la Nación.
5. **D.S.N° 011 - 2006-ED:** Reglamento de la Ley General del Patrimonio Cultural.
6. **Ley N° 27721:** Ley que declara de interés nacional el inventario, catastro, investigación, conservación, protección, difusión de los sitios y zonas arqueológicas.
7. **R.S.N° 004-2000/ED:** Reglamento de Investigaciones Arqueológicas (25.01.2000).
8. **D.S.N° 022-2002-ED:** Texto único de Procedimientos Administrativos - TUPA del INC.
9. **D.S.N° 017-2003-ED:** Reglamento de Organización y Fundaciones del INC.
10. **R.D.N. N° 1405/INC-2004:** Reglamento General de aplicación de sanciones administrativas por infracciones en contra del Patrimonio Cultural de la Nación (23.12.04).
11. **Ley N° 27580:** Ley que dispone medidas de protección que debe aplicar el Instituto Nacional de Cultura para la ejecución de Obras en Bienes Culturales Inmuebles.
12. **Ley N° 27796:** Ley de Municipalidades.

### **3. CRITERIOS DE ANALISIS Y RESTAURACION ESTRUCTURAL**

El criterio, enfocado a la restauración, reúne –o debería reunir- las dos acepciones de la palabra. En efecto, el que la afronte tendrá, primero, que profundizar lo más posible en el conocimiento de aquello sobre lo que va a trabajar en todos sus aspectos que contribuyan y, sólo después, deberá discernir la opción que juzgue más adecuada.

---

<sup>3</sup> Instituto Nacional de Cultura del Perú, <http://inc.perucultural.org.pe>.

Los criterios que se proponen son los siguientes<sup>4</sup>:

**I. RECOPIRAR:** Es necesario hacer una recopilación de toda la información acerca del monumento previamente a la elaboración del proyecto de la obra de intervención estructural-arquitectónica, es importante que “comprendamos la restauración como un medio de investigación y de conocimiento”<sup>5</sup>.

**II. DOCUMENTAR:** A lo largo de la obra de ejecución del proyecto debemos documentar cada paso que ejecutemos, con el fin de enriquecer los datos sobre el edificio y poderlos brindar luego a futuras investigaciones.

**III. ADAPTARSE:** Adaptarse a los estilos y técnicas constructivas que pueden haberse utilizado en la obra a lo largo de su historia de manera que rápidamente identifiquemos sus características y encontremos soluciones adecuadas.

**IV. REEMPLAZAR:** Si fuese el caso que se necesario reemplazar un elemento arquitectónico-estructural por deterioro o pérdida, debemos hacerlo con materiales que aseguren la calidad en cuanto al aspecto que presenten y en cuanto a sus capacidades mecánicas.

---

4

<http://salvarpatrimonio.org>

**V. RESPETAR:** Deben respetarse siempre las características y el funcionamiento de los materiales que se añadan o reemplacen en las obras de consolidación estructural. Es importante identificar plenamente las funciones mecánicas de estas piezas.

**VI. NO ALTERAR:** Al igual que con los materiales, no debe alterarse el funcionamiento de los sistemas constructivos en su conjunto, valiéndose para esto de modelos estructurales o esquemas estructurales del monumento.

**VII. REPARAR:** Las edificaciones históricas por lo general siempre han sido reparadas por esto siempre reparar será una mejor opción a sustituir grandes elementos estructurales o arquitectónicos que alteraran finalmente la calidad y su originalidad histórica, este es un punto controversial<sup>6</sup>.

## **4. INVESTIGACIONES REALIZADAS**

A nivel Internacional y nacional son interesantes los siguientes trabajos y estudios de consolidación estructural acerca de las cuales hemos podido obtener información técnica:

*1. La Torre de Pisa, (2001)*, se realizaron trabajos de consolidación en el suelo que sirve de cimentación a la Torre, se retiraron 38 m<sup>3</sup> de suelo debajo y del lado opuesto de la inclinación de la estructura (lado norte) de manera que se ha detenido su inclinación progresiva con este método bastante eficaz. Obra ejecutada por una junta de expertos especializados reunidos en el “Comitato per la Salvaguardia della Torre di Pisa”, constituido por catorce miembros italianos y de otras nacionalidades.

---

<sup>6</sup> Sobre este punto de controversia sugiero el siguiente texto: Restaurar es reconstruir. A propósito del nuevo Monasterio de Sant Il·lenc de Guardiola de Berguedà (Barcelona) de Antoni González Moreno-Navarro (2007)

2. La rehabilitación de la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México, obra ejecutada con el soporte técnico de las investigaciones realizadas por El Instituto de Ingeniería de la UNAM. En esta intervención se consolidaron la cimentación de toda la superestructura así como se corrigieron deficiencias en la geometría de las columnas y pilares.

3. Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica de la Catedral del Cusco, estudio elaborado por el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), de la Facultad de Ingeniería Civil, de la Universidad Nacional de Ingeniería, el estudio comprendió una evaluación de materiales utilizados, levantamiento de dimensiones de elementos estructurales con fines de evaluación estructural, la realización de un estudio de mecánica de suelos y el análisis dinámico del monumento.

4. Vulnerabilidad Sísmica de la Catedral de Lima, Perú estudio elaborado por el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), de la Facultad de Ingeniería Civil, de la Universidad Nacional de Ingeniería, donde se elaboró el modelo matemático de toda la estructura determinándose los periodos vibratorios y los esfuerzos de sus elementos estructurales más importantes.

## Capítulo 3

# CONCEPTOS GENERALES

<b>Tipo</b>	<b>Criterio del Esfuerzo Cortante Máximo</b>  <b>Guest -Tresca</b>	<b>Criterio de la máxima energía de Distorsión</b>  <b>Hubert-Mises-Hencky</b>	<b>Criterio del Esfuerzo Normal Máximo o de Rankine</b>	<b>Criterio de Mohr</b>  <b>Coulomb</b>
-------------	--	--	---	---

## INTRODUCCIÓN

En la construcción de las edificaciones que componen el conjunto de Monumentos Históricos de nuestro país, se usaron materiales que en su época y de acuerdo a los conceptos de sus constructores eran los más apropiados para resistir las cargas propias, las originadas producto de las condiciones de uso y sísmicas.

Comprender el comportamiento de los materiales entonces se convierte en una necesidad de primer orden, máxime si el tema que nos ocupa es un edificación con una antigüedad de construcción de 450 años, en donde el análisis del comportamiento de los materiales estaba lejos de la profundidad con que contamos en la actualidad y sin embargo han resistido el paso del tiempo en algunos casos con resultados muy aceptables.

### 3.1. CRITERIOS DE FALLA DE LOS MATERIALES

Los criterios de Falla nos permiten determinar los límites de seguridad de fluencia o fractura de un material en función de sus tensiones, estos esfuerzos que se producen por la acción de cargas de tracción, compresión, torsión o flexión, tienen direcciones y valores difíciles de calcular. Los criterios de Falla nos ayudan a predecir estos límites combinando los esfuerzos en cualquier punto de la estructura.

Uso	Se usa en materiales dúctiles	Se usa en materiales dúctiles	Se usa en materiales frágiles	Se usa en materiales frágiles
<b>Definición</b>	Se basa en el cálculo de los esfuerzos cortantes debido a deformaciones por corte.	Se basa en el cálculo de la Energía por variación de forma del material	Se basa en el cálculo del Esfuerzo Normal	Se basa en el cálculo de los esfuerzos máximos en compresión y tracción los cuales contienen los círculos correspondientes a estados tensionales de menor magnitud
<b>Representación Matemática</b>	$\tau_f = \tau_{Max}$ Donde: Esfuerzo de corte para Fluencia = Esfuerzo cortante máximo alcanzado ó $\sigma_y > \text{MAX}( \sigma_1 \cdot \sigma_2 ,  \sigma_1  \cdot  \sigma_2 )$  Donde: Esfuerzo que produce fluencia > Valor de los esfuerzos Principales	$\sigma_y^2 > \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2$ Donde: $\sigma_y$ = Esfuerzo de Fluencia $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = Esfuerzos Principales	$\sigma_u > \text{MAX}( \sigma_1 ,  \sigma_2 ,  \sigma_3 )$  Donde: $\sigma_u$ = Resistencia última del material $ \sigma_1 ,  \sigma_2 ,  \sigma_3 $ = Esfuerzos Principales	$\sigma_1 < \sigma_{uc}, \sigma_{uT}$ $\sigma_2 < \sigma_{uc}, \sigma_{uT}$  Donde: $\sigma_1, \sigma_2$ = Esfuerzos Principales $\sigma_{uT}$ = Resistencia última en tracción $\sigma_{uc}$ = Resistencia última en compresión $ \sigma_{uc}  =  \sigma_{uT} $
<b>Representación Gráfica</b>				
<b>Datos Adicionales</b>	Es el criterio más conservador	Puede predecir la fluencia por torsión	Es el criterio más simple	Usado en mecánica de suelos

## 3.2 COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES CLASICOS

### 3.2.1 Piedra

La piedra constituye un material estructural por si mismo para la construcción de elementos monolíticos o formados por bloques superpuestos. Y ha sido utilizada en base a dos propiedades muy características La Durabilidad y la facilidad para darle la forma adecuada.

La resistencia a la compresión varía entre 6,000 y 10,000 kg/cm<sup>2</sup> (<sup>7</sup>), la resistencia a la tracción es del orden de una décima parte de la compresión.

### **3.2.2 Barro**

El barro se comenzó a usar en las construcciones, en la modalidad de tierra apisonada o tapial en algunas regiones, o como relleno de entramados de madera y caña o quincha como se le conoce en el Perú. Su principal debilidad es la degradación por la intemperie y el agrietamiento a causa de la contracción por secado, como consecuencia la vida útil de las construcciones de este tipo es bastante corta salvo en casos muy excepcionales.

### **3.2.3. Adobes**

Son bloques secados al sol que unidos con morteros formado por el mismo lodo constituyen los muros de muchos monumentos, es un técnica bastante antigua con alrededor de 3000 años de antigüedad.

Las propiedades mecánicas de la tierra apisonada o en adobe, tienen grandes variaciones según las características del suelo con que se fabrican y el cuidado en su elaboración, la adición de paja, estiércol y algún otro material orgánico aglutinante tiene el propósito de disminuir la contracción del material y aumentar su resistencia al intemperismo. La resistencia a la compresión puede variar entre 5 y 20 kg/cm<sup>2</sup> y la resistencia a la tracción entre 0.25 y 1 kg/cm<sup>2</sup>.

---

<sup>7</sup> Bonett, Ricardo. *Vulnerabilidad y Riesgo Sismico de Edificios*. Barcelona: Universidad Politecnica de Cataluna, 2003 p 191.

Los principales problemas que sufren los bloques de adobe son la degradación del material y la dificultad para conectar las paredes de estos materiales entre sí y con los techos.

#### **3.2.4. Mortero**

La mampostería de los edificios antiguos está generalmente unida con morteros de cal y arena, lo que les confiere ciertas propiedades particulares. La cal adquiere resistencia por un proceso de carbonatación que se da por el contacto con el aire. Este proceso ocurre lentamente y progresa de las caras exteriores hacia el interior del elemento estructural. Esta situación confiere a los elementos estructurales cierta capacidad de deformarse y adaptarse a cambios de forma, como los debidos a hundimientos de su cimentación.

Los morteros de cal y arena alcanzan típicamente resistencias en compresión de entre 5 y 20 kg/cm<sup>2</sup>. Aunque mucho mas durables que los morteros de barro, son también afectados por el intemperismo, debido a que su relativa porosidad permite la penetración de la humedad, con sales que atacan el cementante.

#### **3.2.5. Madera**

Junto con la piedra, la madera es el material más empleado desde la antigüedad, teniendo a su favor bajo peso y su buena resistencia a esfuerzos de tracción, aprovechándose su uso principalmente en coberturas.

La madera es un material biológico y consecuentemente de conformación estructural variada. Sin embargo existen pautas permanentes y fundamentales de formación, apreciables a simple vista, que aseguran una estructura ortotrópica con



propiedades mecánicas diferentes independientes en cada dirección y en cada plano.

Las principales causas de deterioro de la madera son las siguientes:

1. Ataque por insectos.
2. Pudrición por humedad
3. Destrucción por intemperismo

Las propiedades que definen la calidad estructural de la madera aumentan con el peso específico de ésta, el cual varía entre 600 y 1000 kg/m<sup>3</sup>.

La resistencia a la tracción en la dirección de las fibras esta dentro del rango de 75 a 145 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que en la dirección normal a las fibras su valor es técnicamente despreciable, la resistencia a la compresión en la dirección de las fibras es del orden de los 80 a 145 kg/cm<sup>2</sup>.

El esfuerzo cortante resistente varía entre 15 y 20 kg/cm<sup>2</sup>. El módulo de elasticidad típico es de 100,000 kg/cm<sup>2</sup><sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup> Junta del Acuerdo de Cartagena. Manual para diseño de Maderas del Grupo Andino. Lima. 1982

### **3.2.6. Metal**

Las características más importantes de este material son su resistencia y su trabajabilidad. Siendo el acero el más utilizado, en este el carbono es retirado eliminándole su característica frágil.

## **3.3 COMPORTAMIENTO DE LA MAMPOSTERIA**

### **Introducción**

En esta parte se expone el comportamiento de las construcciones con mampostería no reforzada, es decir como aquellos muros que fueron construidos sin arriostres ni refuerzo alguno, y cuyo sustento estructural se encontraba en el gran tamaño de sus dimensiones, así tenemos que los más grandes monumentos de la antigüedad muchos de ellos que prevalecen hasta nuestros días, han sido construidos con este tipo mampostería.

Han sido muchos los materiales utilizados como elementos de mampostería, con el transcurso de los años los procesos de fabricación han ido evolucionando sin embargo la técnica de asentado es la misma, es decir a mano o mampuesto.

### **3.3.1. Materiales de la Mampostería**

Por mampostería se entiende el conjunto de dos fases de materiales constituidas de bloques y una sucesión de juntas, eventualmente de mortero, dispuestas en forma irregular o regular. En este último caso, las juntas siguen la disposición del contorno de los ladrillos. En este caso analizaremos los ladrillos de forma rectangular.

### 3.3.1.1. Unidades de Mampostería <sup>9</sup>

La mampostería consiste generalmente de una masa sólida producida por unidades separadas por un ligamento, que en la mayoría de los casos actuales corresponde a un mortero. A continuación se describen los principales materiales que pueden ser utilizados para su construcción:

**Piedra:** En muchas culturas antiguas, la piedra fue el material más utilizado para la construcción, debido a su alta resistencia y abundancia en el medio. Sin embargo, debido a su peso excesivo, el transporte de este material en la antigüedad era muy difícil, lo cual obligo a las distintas sociedades a usar recursos locales. Esto dio como resultado, una variedad de formas y detalles que reflejaban las limitaciones y potenciales de los materiales disponibles.

**Adobe:** Es una formas bastante antigua de construcción y puede ser la base de alguna de las unidades que se fabrican actualmente. Estas unidades son piezas formadas con tierra arcillosa, mezclada con paja, arena, estiércol u otro material, con forma paralelepípedica, elaborados a mano con la ayuda de un molde sencillo de madera, compactados de forma manual y secados al sol y de tal manera que sus dimensiones permitan su manejo con un solo brazo. Existen la Norma Técnica Peruana E-080 para construcciones con adobe, documento que reglamenta los procedimientos para este tipo de construcciones no obstante, en la mayoría de los casos, este tipo de obras se ejecutan sin ningún tipo de normativa.

**Ladrillo:** Es un mampuesto de forma hexaédrica, fabricado con una gran cantidad de materiales, tales como: el barro seco, la arcilla, la pizarra, la arcilla cocida o la

---

<sup>9</sup> *Bonett, Ricardo. Ob. cit., p 188.*

mezcla de estos. El proceso de fabricación consiste en someter a la unidad a temperaturas entre 750°C y 1300°C de tal forma que el agua se evapore y las partículas de arcilla se endurezcan, causando así la fusión de los componentes debido a las elevadas temperaturas. Posteriormente, tiene lugar una vitrificación parcial y la temperatura se mantiene por un tiempo preestablecido. El proceso completo puede tardar más o menos entre 40 y 150 horas, según el tamaño y volumen de los ladrillos y el tipo de horno. El enfriamiento debe ser controlado, ya que puede alterar la calidad de la unidad.

El color, la forma y las propiedades estructurales de los ladrillos, varían considerablemente entre los diferentes tipos. Los ladrillos de arcilla cocida, pueden resultar sumamente atractivos, por la variedad de apariencias que pueden ser obtenidas a partir de las combinaciones de forma de las unidades y la disposición del mortero. Las dimensiones de los ladrillos varían desde 12.0X9.0X4.5 cm a 30.0X18.0X12.0 cm y su peso específico se encuentra entre 13 y 22 KN/m<sup>3</sup>.

Los ladrillos de arcilla pueden clasificarse en dos tipos: 1) perforados, en los cuales el área neta es menor que el 75% del área bruta de la sección y 2) sólidos o no perforados, donde el área de las perforaciones es menor o igual al 25% del área de la sección bruta.

**Unidades de Concreto:** Las unidades de Concreto prefabricado han sido usadas para construcciones de mampostería durante muchos años. Sólo en años recientes, han comenzado a ser aceptadas en general, para construcciones expuestas a la vista y para ser utilizadas con fines estructurales. Estas unidades están conformadas básicamente por cemento Portland, agua y agregados minerales. Normalmente son moldeadas en muchos tamaños y formas bajo presión y/o vibración. Los factores

más importantes que afectan la resistencia de las unidades de mampostería de concreto son:

- La relación agua-cemento
- El peso de la unidad
- El tipo de agregado
- El proceso de fraguado

### 3.3.2. Propiedades de las Unidades de Mampostería

#### Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión  $f'_{cb}$  muestra un intervalos de variación bastante amplio, dependiendo del material y del tipo de unidad, la tabla siguiente muestra los intervalos de variación de la resistencia a la compresión de diversos materiales.

Material	Intervalo $f'_{cb}$ (t/m <sup>2</sup> )
Piedra	$4,000 < f'_{cb} < 10,000$
Concreto macizo	$1,500 < f'_{cb} < 2,500$
Arcilla	$500 < f'_{cb} < 2,000$
adobe	$100 < f'_{cb} < 150$

Cuadro. Nro. 2.- Resistencia a la compresión de algunos materiales usados en mampostería.<sup>10</sup>

Los resultados de los experimentos en ladrillos de arcilla indican que la relación esfuerzo deformación es casi lineal hasta la falla, punto al que sigue un rápido decrecimiento de la resistencia.

---

<sup>10</sup> Bonett, Ricardo. *Ob. cit.*, p 191.

## Resistencia a la tracción<sup>11</sup>

Generalmente, el valor de la resistencia a la tracción uniaxial de las unidades de mampostería,  $f_{tb}$  se obtiene en función de la resistencia a la compresión  $f_{cb}$ . No obstante estas expresiones son bastante sensibles a la técnica de ensayo empleada. La siguiente ecuación presenta una relación  $f_{cb} - f_{tb}$ :

$$f_{tb} = c \sqrt{f_{cb}}$$

C es una constante que tiene en cuenta el tipo de ensayo, esto es:

$c = 0.28$  para ensayo de tracción uniforme

$c = 0.34$  para ensayo de tracción indirecta

$c = 0.69$  para ensayo de flexión

El ensayo de tracción indirecta, parece ser el que proporciona las mediciones más realistas de la resistencia a la tracción de las unidades de mampostería sometidas a fuerzas en su propio plano.

## Módulo de elasticidad y relación de Poisson

El módulo de elasticidad de las unidades de mampostería  $E_m$ , presenta un amplio rango de variación y básicamente depende del tipo de material y de la resistencia a la compresión  $f_m$ . No hay un método estándar para evaluar el módulo de elasticidad. Usualmente para ladrillos de arcilla, el módulo de elasticidad  $E_m$  es

---

<sup>11</sup> *Bonett, Ricardo. Ob. cit., p 192.*

más pequeño que el correspondiente a las unidades de concreto. Este parámetro puede obtenerse aproximadamente como<sup>12</sup>:

$$E_m = 500 f'_m$$

El valor del modulo de Poisson  $\nu_b$  lo hemos asumido dentro de un rango de 0.15 a 0.22.

### **Contenido de humedad y absorción**

El contenido de humedad y la absorción son las propiedades más importantes de las unidades y tienen un efecto considerable sobre las características de la mampostería. El contenido de humedad se define como la masa de agua por unidad de volumen, la cual puede ser expresada, en términos absolutos o en términos relativos a la densidad de la unidad cuando está seca. El intervalo típico de este parámetro es 50-60 kg/m<sup>3</sup> y 2-3% respectivamente.

#### **3.3.1.2. Mortero**

El mortero está usualmente compuesto de agua, cemento y arena, no obstante en algunos casos, se adicionan otros materiales para aumentar su capacidad de adherencia y de secado y/o hacerlo más manejable durante la construcción. Las propiedades mecánicas que más influyen en el comportamiento estructural de un elemento de mampostería son su deformabilidad y su adherencia con las piezas. La adherencia entre el mortero y las piezas define en muchos tipos de mampostería, sobre todo en aquellos en los que las piezas son muy resistentes, la resistencia a cortante del elemento.

---

<sup>12</sup> Norma Técnica Peruana E-070 Albañilería

## **Componentes del mortero**

**Cemento:** Su función es proporcionar resistencia a la mezcla. Usualmente se utiliza cemento Portland tipo I. La densidad aproximada es de 1500 kg/m<sup>3</sup>.

**Arena:** es la encargada de proporcionar estabilidad volumétrica a la mezcla y atenuar la contracción por secado, es preferible que los granos de arena sean redondeados y de una granulometría completa, es decir con variedad en el tamaño de las partículas que permita rellenar fácilmente los vacíos.

**Agua:** El agua que se utiliza para la mezcla debe ser potable, libre de partículas orgánicas y de sustancias como aceites o ácidos, su función es darle trabajabilidad a la mezcla e hidratar el cemento.

**Cal hidratada normalizada:** De ser el caso la cal debe ser hidratada y normalizada. La densidad de la cal es de 640 kg/m<sup>3</sup>. Cuando se emplea cal en el mortero, endurece muy lentamente al reaccionar con el anhídrido carbónico en un proceso llamado carbonatación, con lo cual se producen dos fenómenos: las fisuras se sellan a lo largo del tiempo al formarse cristales de carbonato de calcio, y al endurecer lentamente favorecen la retentividad (se explica a continuación) de la mezcla.



### **Propiedades del Mortero<sup>13</sup>**

*La adherencia unidad-mortero*, cuando el mortero en forma de los solubles cristalizados del cemento penetra como si fueran agujas en la unidad a través de sus poros y rugosidades, formando una llave de corte-fricción entre las hiladas.

*Consistencia*, se define como la capacidad que tiene la mezcla de poder fluir o ser manejable utilizando los instrumentos adecuados para ello.

*Retentividad*, consiste en la capacidad de la mezcla de mantener su consistencia o de continuar siendo manejable después de un lapso de tiempo.

### **3.3.2. Comportamiento Mecánico de la Mampostería de ladrillos a Compresión**

La mampostería de ladrillos es un material que presenta un comportamiento óptimo cuando está sujeta a esfuerzos de compresión. Su comportamiento y los modos de Falla ante cargas axiales, dependen de la interacción de piezas y mortero, esta puede interpretarse en la siguiente forma: las piezas y el mortero tienen características esfuerzo-deformación diferentes; por lo tanto al ser sometidos a un mismo esfuerzo, se produce una interacción entre ambos, que consiste en que el material menos deformable las piezas en general, restringe las deformaciones transversales del material más deformable (el mortero), introduciéndole esfuerzos de compresión de dirección transversal.

El tipo de Falla más común en este tipo de ensayo, es la formación de grietas verticales en las piezas, producidas por las deformaciones transversales, la resistencia a la compresión de la mampostería  $f_m^2$  depende tanto de las propiedades

---

<sup>13</sup> *Bonett, Ricardo. Ob. cit.*

mecánicas de los materiales constitutivos como de la forma como éstos se combinan para formar la mampostería.

La Tabla resume algunos de los principales factores de las unidades, el mortero y de la propia mampostería, que afectan su resistencia a la compresión.

<b>Características Unidades</b>	<b>Características Mortero</b>	<b>Paneles de Mampostería</b>
Resistencia	Resistencia	Colocación
Absorción	Espesor	Hechura
Humedad	Relación agua-cemento	Dirección de carga
Relación altura-espesor	Características de deformación	Adherencia
Geometría	Retentividad de agua	

Cuadro Nro3 .- Factores que afectan la resistencia a la compresión<sup>14</sup>

### **3.3.3. Comportamiento de la mampostería a cortante**

Para el diseño de estructuras de mampostería no reforzada, sometidas a cargas laterales inducidas por movimientos sísmicos, es necesario evaluar adecuadamente la resistencia a cortante. Generalmente, los esfuerzos de cortante son combinados con los esfuerzos de compresión producidos por cargas gravitatorias u otras acciones.

---

<sup>14</sup> *Bonett, Ricardo. Ob. cit., p 198.*

## **Modos de Falla**

I Falla Fricción-Cortante: este tipo de Falla ocurre para esfuerzos normales de compresión bajos y se produce por la unión débil de las interfaces mortero-unidad, dando lugar a esfuerzos cortantes deslizantes en las juntas horizontales.

Las grietas escalonadas diagonales están asociadas a este tipo de Falla, las cuales se forman a partir de los extremos de las juntas verticales, que constituyen planos de debilidad en la mampostería, debido a que su resistencia a la adherencia disminuye por causa de la contracción y de los vacíos existentes.

II. Falla por tracción diagonal: se produce directamente sobre las unidades de mampostería para valores de esfuerzos normales de compresión moderados. La resistencia a cortante de las juntas de mortero, se incrementa debido al efecto de los esfuerzos normales de compresión.

Por lo tanto, las grietas se producen en las unidades, como resultado de los esfuerzos de tracción inducidos por el estado de esfuerzos de compresión y cortante.

III. Falla a compresión: este tipo de Falla se presenta para valores muy altos de esfuerzo normal  $f_{in}$  en comparación con los esfuerzos cortantes  $\tau$ . En este caso, la falla es similar al que se produce bajo compresión directa, aunque el efecto del esfuerzo cortante causa una reducción en la resistencia a la compresión de la mampostería. Las grietas se forman por las deformaciones verticales y se incrementan por el efecto de las deformaciones del mortero en las juntas. Estas grietas se propagan verticalmente y atraviesan las unidades de mampostería,

llegando en algunos casos a comprometer la estabilidad del elemento y a producir la falla del mismo.

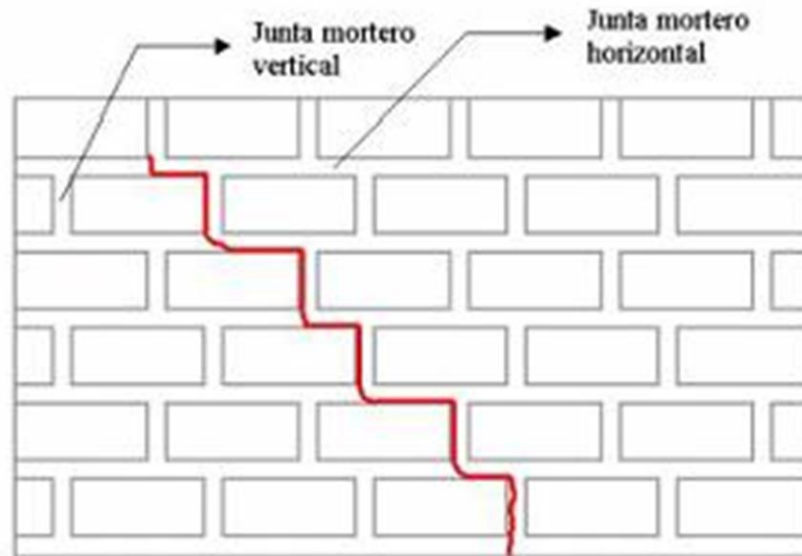


Fig. Nro. 1.- Falla por fricción cortante<sup>15</sup>

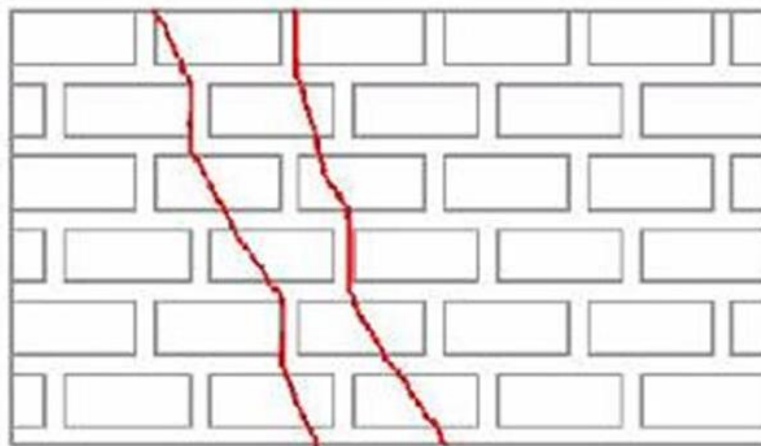


Fig. Nro. 2.- Falla por Tracción diagonal<sup>16</sup>

---

<sup>15</sup> Bonett, Ricardo. *Ob. cit.*, p .203.

<sup>16</sup> Bonett, Ricardo. *Ob. cit.*, p 188..

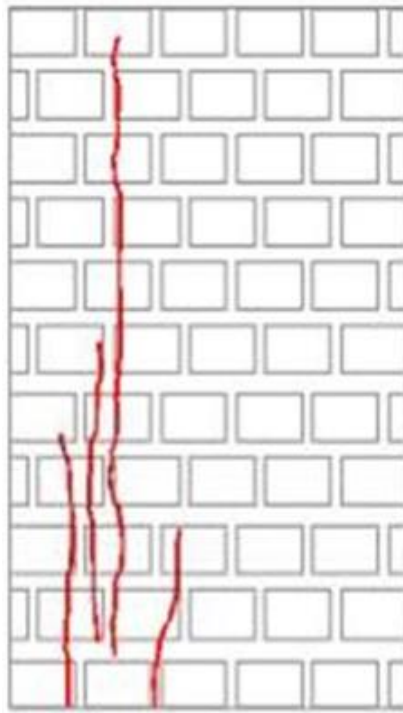


Fig. Nro. 3.- Falla por Compresión<sup>17</sup>

### **Resistencia a cortante de la mampostería**

La resistencia a cortante resulta de la combinación de dos mecanismos diferentes:

- 1) La resistencia a la adherencia y
- 2) La resistencia a la fricción entre las juntas de mortero y las unidades.

---

<sup>17</sup> Bonett, Ricardo. *Ob. cit.*, p .205.

### **3.3.4. Comportamiento de la mampostería a tracción**

La resistencia a la tracción de la mampostería esta principalmente controlada por la adherencia a la resistencia desarrollada en las interfaces mortero-unidad.

#### **Modos de Falla**

Los modos de Falla en un muro sometido a tracciones están sujetos a los siguientes parámetros: la dirección de la carga y a la magnitud relativa de la resistencia de adherencia y la resistencia a la tracción de las unidades de mampostería.

Cuando los esfuerzos son paralelos a las juntas horizontales se pueden presentar dos tipos de agrietamiento:

- Grietas completamente verticales que atraviesan las unidades.
- Las grietas no afectan las unidades y solo pasan a través de las juntas de mortero.

Cuando los esfuerzos en tracción actúan perpendicularmente a las juntas de mortero, los modos de Falla ocurren por la separación de las interfaces mortero-unidad.

### **3.3.5. Comportamiento de la mampostería a flexocompresión y cortante**

Los esfuerzos combinados que se pueden presentar en un muro de mampostería no confinada son difíciles de analizar, los muros tienden luego de superar su fase elástica a deformarse y a fisurarse disipando energía a través de estos mecanismos redistribuyendo los esfuerzos a lo largo del elemento estructural, el análisis

inelástico se hace necesario para aproximarse a una interpretación válida de estos comportamientos.

### **Modos de Falla**

Debemos tener en cuenta que la carga vertical del muro es la que proporciona la resistencia a la flexión en los muros.

#### Falla por cortante

Se presenta en paneles de mampostería con una mayor relación longitud-altura, se producen grietas diagonales-longitudinales. Se producen grietas en el sentido contrario debido al cambio de sentido de la fuerza lateral.

#### Falla por flexión

Se forman grietas horizontales cerca a la parte inferior de los muros o en la junta más cercana al apoyo inferior, en las estructuras de mampostería no reforzada la resistencia a la flexión está condicionada a la magnitud de la carga vertical es decir al peso propio del muro y a la carga tributaria que pudiera recibir, así a mayor carga vertical mayor es la resistencia a la flexión de la estructura.

### **3.4. MÉTODOS DE ANÁLISIS.**

#### **Conceptos Preliminares**

Comportamiento elástico: Se dice que un cuerpo tiene comportamiento elástico “cuando puede recuperar su forma primitiva al descargarlo”<sup>18</sup>, La característica más importante del comportamiento elástico es que es reversible: si se suprimen las fuerzas que provocan la deformación el sólido vuelve al estado inicial que tenía antes de aplicación de las cargas.

Comportamiento lineal del material: Un comportamiento es lineal cuando el valor de la deformación de un material cualquiera es proporcional a los esfuerzos aplicados sobre éste y no al tiempo que se necesita aplicar la carga para alcanzar dicho valor.

Comportamiento Inelástico:

Comportamiento no lineal del material: Un comportamiento es no lineal cuando el valor de la deformación no es proporcional al esfuerzo que lo produce porque es difícil de calcular ya que están en función a una o más variables adicionales tales como la conformación interna del material, la duración de la aplicación de la carga, la geometría de los elementos, etc.

#### **3.4.1 Análisis Estático Lineal**

Se llama análisis elástico lineal al que se basa en la hipótesis de que el material estructural tiene un comportamiento lineal, tanto para esfuerzos de compresión

---

<sup>18</sup> Timoshenko, S. (1957). *Resistencia de Materiales*. Madrid: Espasa-Calpe S.A.



como de tracción. Esta hipótesis no refleja necesariamente el comportamiento real de los materiales, sin embargo suele considerarse aceptable para el comportamiento de ciertos materiales de uso común como la madera y el acero, siendo el concreto armado materia de estudio y discusión ya que en ciertas situaciones de diseño su comportamiento puede no ser considerado estrictamente lineal.

El método tiene otras restricciones de uso como el de estar limitado a estructuras de geometría y condiciones de carga sencilla mas no en estructuras de conformación más elaborada y compleja<sup>19</sup>.

### **3.4.2 Análisis Dinámico**

#### **Introducción**

El objeto de la dinámica estructural es el análisis de estructuras bajo cargas dinámicas, es decir cargas que varían en el tiempo. Aunque la mayoría de las estructuras pueden diseñarse considerando sólo cargas estáticas, hay importantes excepciones que requieren del proyectista la posibilidad de distinguir entre cargas estáticas y dinámicas.

En realidad, las cargas accidentales o las cargas móviles, a diferencia del peso propio, rara vez son estrictamente estáticas porque su aplicación sobre la estructura requiere de un cierto tiempo que en definitiva debe ser analizado para establecer si se trata de una carga estática o dinámica. Sin embargo es intuitivamente válido aceptar que si la magnitud de la fuerza varia en forma suficientemente lenta no causará efectos dinámicos y podrá tratarse como estática.

---

<sup>19</sup> Moreno Gonzales, Rosangel: Evaluación del riesgo sísmico en edificios mediante análisis estático no lineal: Aplicación a diversos escenarios sísmicos de Barcelona, Tesis Doctoral Barcelona 2006, [versión electrónica].

Para determinar si la carga varía en forma “lenta” o “rápida” el valor de referencia para comparación es el “periodo natural de la estructura”. El periodo natural es el tiempo que tarda la estructura en recorrer un ciclo de vibración libre, es decir la vibración que ocurre después que finaliza la excitación externa o después que la carga deja de variar y se mantiene constante. El periodo natural depende de la masa, de la rigidez y de las condiciones de vínculo, todas éstas características intrínsecas o propias de la estructura.

### 3.4.2.1. Análisis Dinámico Lineal

El análisis dinámico de estructuras se refiere al análisis de las pequeñas oscilaciones o vibraciones que puede sufrir una estructura alrededor de su posición de equilibrio. El análisis dinámico es importante porque ese movimiento oscilatorio produce una modificación de los esfuerzos existentes, que deben tenerse en cuenta para lograr un diseño sísmico adecuado.

Como resultado de una perturbación exterior un edificio o estructura resistente que bajo la acción de unas cargas estaba en reposo, experimenta oscilaciones que en primera aproximación pueden representarse como un movimiento armónico compuesto, caracterizado por un sistema de ecuaciones lineal del tipo:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{F}(t)$$

Donde:

$\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{K}$  Son respectivamente la matriz de masas, la matriz de amortiguación y la matriz de rigidez de la estructura.

$\mathbf{x}(t)$ ,  $\dot{\mathbf{x}}(t)$ ,  $\ddot{\mathbf{x}}(t)$  Son tres vectores que representan la posición, velocidad y aceleración de un conjunto de puntos de la estructura.

$\mathbf{F}(t)$  Es un vector que representa las fuerzas equivalentes aplicadas sobre el mismo conjunto de puntos anteriores, este vector está asociado a la sollicitación exterior que perturba la misma estructura.

#### **3.4.2.2. Análisis Dinámico No Lineal**

Este método de análisis modela la estructura de manera similar al análisis dinámico lineal pero introduce la respuesta inelástica del material, en este tipo de análisis se toma en cuenta la influencia del comportamiento de los elementos no estructurales de la edificación, además es necesario que se utilicen varios análisis de historias en el tiempo usando varios registros de acelerogramas.

El análisis dinámico no lineal es una herramienta importante de investigación ya que brinda el comportamiento estructural detallado, es decir la distribución de esfuerzos y describe desplazamientos, etc<sup>20</sup>.

#### **Frecuencias Naturales**

De cualquier estructura física se puede hacer un modelo en forma de un número de resortes, masas y amortiguadores. Los amortiguadores absorben la energía pero los resortes y las masas no lo hacen. Como lo vimos en la sección anterior, un resorte y una masa interactúan uno con otro, de manera que forman un sistema que hace resonancia a su frecuencia natural característica. Si se le aplica energía a un sistema resorte-masa, el sistema vibrará a su frecuencia natural, y el nivel de las vibraciones dependerá de la fuerza de la fuente de energía y de la absorción inherente al sistema. La frecuencia natural de un sistema resorte-masa no amortiguado se da en la siguiente ecuación:

---

<sup>20</sup> Moreno Gonzales, Rosangel: Ob cit, p. 23.

$$F_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Donde  $F_n$  = Frecuencia natural

$k$  = Constante del resorte, o rigidez

$m$  = Masa

De eso se puede ver que si la rigidez aumenta, la frecuencia natural también aumentará, y si la masa aumenta, la frecuencia natural disminuye. Si el sistema tiene absorción, lo que tienen todos los sistemas físicos, su frecuencia natural es un poco más baja y depende de la cantidad de absorción.

Un gran número de sistemas resorte-masa-amortiguación que forman un sistema mecánico se llaman "grados de libertad", y la energía de vibración que se pone en la máquina, se distribuirá entre los grados de libertad en cantidades que dependerán de sus frecuencias naturales y de la amortiguación, así como de la frecuencia de la fuente de energía

### **Modos de vibración**

Un modo de vibración es un patrón o forma característica en el que vibrará un sistema mecánico. La mayoría de los sistemas tienen muchos modos de vibración y es la tarea del **análisis modal** determinar la forma de esos modos. La vibración de una estructura es siempre una combinación o una mezcla de todos los modos de vibración. Pero no todos están excitados al mismo grado.

### **3.4.2.3. Análisis por superposición espectral de las respuestas modales<sup>21</sup>**

Desde el punto de vista matemático el movimiento de un vibrador complejo se puede representar por superposición de los movimientos de los vibradores que representan los distintos modos naturales de vibración. Una ventaja importantísima del método es que generalmente un número relativamente pequeño de modos (normalmente los primeros) tiene influencia significativa en la respuesta de la estructura y esto permite simplificar el análisis. En consecuencia es necesario evaluar la respuesta para cada modo y luego superponer la influencia de los distintos modos. Esto es relativamente fácil cuando las excitaciones son sencillas, en particular una excitación periódica, porque la respuesta se puede expresar en forma cerrada.

La aplicación más común del método es la obtención de valores de la respuesta estructural elegida (es decir los valores máximos de las variables que supuestamente representan el comportamiento de la construcción) por superposición de respuestas espectrales.

### **3.4.2.4. Análisis Tiempo-Historia**

La Norma E 030 señala lo siguiente: El análisis tiempo historia se podrá realizar suponiendo comportamiento lineal y elástico y deberán utilizarse no menos de cinco registros de aceleraciones horizontales, correspondientes a sismos reales o artificiales. Estos registros deberán normalizarse de manera que la aceleración máxima corresponda al valor máximo esperado en el sitio.

Para edificaciones especialmente importantes el análisis dinámico tiempo-historia se efectuará considerando el comportamiento inelástico de los elementos de la estructura.

---

<sup>21</sup> REBOREDO, Agustín: El Análisis Dinámico de Construcciones Sismo Resistentes Conceptos Básicos y limitaciones, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina, 1996, pág.21. [Archivos Electrónicos de Cátedras].

El análisis tiempo-historia permite obtener directamente la respuesta del modelo para cualquier tipo de excitación, no sólo excitaciones armónicas (como los sistemas de un sólo grado de libertad). En el caso de excitaciones cualesquiera casi la única solución práctica es el análisis de la historia del movimiento (tiempo-historia) del vibrador cuando es excitado por una acción determinada o un sismo. Cuando las excitaciones son caóticas, como es el caso de un terremoto, no es posible obtener valores útiles en forma directa. Será necesario considerar los valores extremos de las respuestas más significativas para la seguridad de la construcción.

Es recomendable que se estudie la respuesta para un **conjunto de sismos** cuyos espectros cubran el espectro de proyecto reglamentario. Estos sismos pueden ser generados artificialmente o pueden ser acelerogramas de sismos reales modificados para obtener las características deseadas.

En cuanto a la respuesta, los conocimientos actuales conducen a considerar los desplazamientos de las masas como valores más representativos que fuerzas o sollicitaciones en las piezas estructurales.

#### **3.4.2.5. Espectro de respuesta**

La naturaleza caótica de los movimientos sísmicos hizo imposible la utilización directa de los métodos básicos de análisis dinámico (vibrador elástico de un grado de libertad) desarrollados para obtener la respuesta del vibrador. Se trató de encontrar un método para obtener resultados prácticos para la ingeniería estructural, así se encontró en el espectro de respuesta la representación del valor de respuesta máximo de una característica cualquiera del movimiento de un vibrador **de un grado de libertad** durante el desarrollo completo de un sismo,

datos que son usualmente requeridos por el diseñador para el cálculo de estructuras.

En forma general, podemos definir espectro como un gráfico de la respuesta máxima expresada en términos de desplazamiento, velocidad, aceleración, o cualquier otro parámetro, que produce una acción dinámica determinada en una estructura u oscilador de un grado de libertad. En estos gráficos, se representa en abscisas el periodo propio de la estructura y en ordenadas la respuesta máxima calculada para distintos factores de amortiguamiento.

### **Tipos de Espectros**

**Espectros de respuesta elástica:** representan parámetros de respuesta máxima para un terremoto determinado y usualmente incluyen varias curvas que consideran distintos factores de amortiguamiento. Se utilizan fundamentalmente para estudiar las características del terremoto y su efecto sobre las estructuras.

**Espectros de respuesta inelástica:** son similares a los anteriores pero en este caso se supone que el oscilador de un grado de libertad exhibe comportamiento no-lineal, es decir que la estructura puede experimentar deformaciones en rango plástico por acción del terremoto. Este tipo de espectros son muy importantes en el diseño sismorresistente, dado que por razones prácticas y económicas la mayoría de las construcciones se diseñan bajo la hipótesis que incursionarán en campo plástico.

**Espectros de diseño:** Estos espectros representan una envolvente de los espectros de respuesta de los terremotos típicos de una zona. Los espectros de diseño se obtienen generalmente mediante procedimientos estadísticos. Estos espectros se aplican al cálculo y verificación de estructuras y representan la sismicidad probable del lugar.

#### **3.4.2.6. Análisis Estático No Lineal**

Se llama análisis estático no lineal al que se basa en la hipótesis de que el material estructural tiene un comportamiento no lineal es decir la relación esfuerzo-deformación está sujeta a variables que influyen en su comportamiento y desarrollo tales como el tiempo, las condiciones de esfuerzo, así como de la composición interna sea esta homogénea o no, esta hipótesis refleja con mas fidelidad el comportamiento real del material.

Esta descripción es cierta en ciertos elementos estructurales los cuales a pesar de ser sometidos a grandes estados de esfuerzos no reflejan deformaciones significativas y mucho menos proporcionales a su nivel de carga.

Otro caso de importancia es el de los sistemas comúnmente representados por lineales que sin embargo luego de haber sobrepasado el nivel de carga última, por efectos de una rotura, fisuración o deformación excesiva por múltiples causas, pueden ser analizados a partir de un análisis no lineal el cual reflejará de mejor manera el comportamiento frente a las nuevas sollicitaciones de cargas, estableciendo un nuevo nivel de cargas últimas estabilizando las actuales condiciones de servicio.



## Capítulo 4

# ANTECEDENTES

## INTRODUCCIÓN

El análisis estructural de un Monumento que se realiza para fines de su conservación es una tarea que implica especial cuidado, el hecho de analizar una edificación con varios siglos de antigüedad nos enfrenta a un reto que nos corresponde apreciar de varios ámbitos, el estudio compromete aspectos geológicos, históricos, arquitectónicos, estructurales, hasta aspectos legales y económicos. Esta disciplina nos obliga a poner especial cuidado en los análisis de su historia constructiva y estar atentos a las técnicas empleadas en su época, identificarlas, procesarlas y emitir juicios acerca de su comportamiento a lo largo de su vida útil para de esta forma poder proyectar las mejores técnicas para poder recuperar y en otros casos mejorar su desempeño estructural.

### 4.1 REVISION DE LA HISTORIA

La revisión de la historia de la Torre de la Merced nos permitirá conocer la reseña de las etapas constructivas del Monumento, proporcionándonos información acerca de sus constructores, las fechas y plazos en que se hizo la obra original y sus posteriores ampliaciones, modificaciones o reconstrucciones, así como las restauraciones de las que pudo haber sido objeto en fecha reciente. Para esto es necesario hacer uso de fuentes escritas, físicas, incluso orales o de otra índole pero siempre acreditadas, en caso contrario pueden hacerse inspecciones de campo propias pero siempre contando con los medios y preparación suficiente para emitir un juicio apropiado.

En nuestra investigación hemos consultado diversas fuentes de manera que podamos recopilar información prolija y confiable que nos permita reproducir las condiciones lo más cerca posible de su estado real, esto es importante por cuanto el conocimiento de la historia de un monumento o edificación de carácter histórico nos aporta información valiosa que utilizaremos para nuestro análisis estructural, tales como materiales utilizados, fechas de obra, fechas de eventos sísmicos, reconstrucciones, medidas originales y toda la bibliografía que nos permita conocer bien la obra que tenemos que evaluar tales como planos de proyectos, fotografías, relatos o transcripciones, testimonios orales<sup>22</sup>, contratos de obra, etc.

### **Historia de Construcción de la Torre de la Merced**

La Torre de la Merced fue construida por el maestro albañil Alonso de Morales según contrato firmado el 12 de Mayo de 1589 y cuyo original se encuentra en el archivo General de la Nación, por parte de la Orden de la Merced firmo el Comendador Fray Diego de Angulo, certificó el Notario Rodrigo Gómez de Baeza<sup>23</sup>. Según las medidas acordadas en el contrato se especifican las medidas, en hiladas y longitudes, todas en medidas antiguas utilizadas en la época de inicio de la obra.

La Torre y la Basílica en su conjunto se hicieron en fechas distintas por lo que se sabe parte del Convento ya estaba construido cuando la Torre recién empezó a construirse hacia el año 1589.

---

<sup>22</sup> El testimonio oral a la fecha constituye una fuente importante de información, en nuestro caso, nos sirvió para darnos un importante dato histórico acerca de la probable antigüedad de la Torre.

<sup>23</sup>El documento se puede contemplar en el Archivo General de la Nación, Folio 734, Víctor M. Barriga en su libro El Templo de la Merced de Lima, hizo un estupendo aporte al transcribir en su integridad el contrato ya que el original es un poco difícil de leer dada la antigüedad de su caligrafía.

El año 1621<sup>24</sup> se firma un contrato con el maestro Andrés de Espinoza, para reconstruir el templo sin embargo parece que esta obra no llegó a concretarse.

Un nuevo contrato se firmó el 5 de Mayo de 1628 por el cual se concertaba ‘reedificar el cuerpo de la Iglesia y naves del coro alto’ en el cual el capitán Bernardo de Villegas se convirtió en benefactor y artífice de esta reconstrucción, en este contrato la Orden de la Merced se comprometía a entregar en agradecimiento dos capillas dentro de la nave del templo.

Hacia el año 1759 fue refaccionada la Torre, seguramente afectada por el Terremoto del año 1746<sup>25</sup>, donde se detalla *obras de cal y ladrillo, obra de madera, gasto de campanas, el subirlas y poner perfecta dicha obra.*

El 20 de Noviembre del año 1790 un nuevo movimiento sísmico afecta la Torre, ocasionando la caída de dos campanas afectando a la iglesia<sup>26</sup>.

El 2 de Julio de 1860, el arquitecto Guillermo D’Coudrey realiza una inspección y hace un análisis del estado de la Torre manifestando que es necesario derribarla por considerar que las reparaciones serían tan costosas como una obra nueva, es preciso mencionar que al parecer el arquitecto se refería al mal estado en que se encontraría la Torre por esos años y cuyos daños al parecer se mantuvieron hasta el siglo XX.

---

<sup>24</sup>Barriga, Víctor, El Templo de la Merced de Lima, p 94, el documento fechado el 3 de Agosto de 1621, contempla derribar el Templo y hacerlo de nuevo, archivo Merced T VIII, transcripto en el libro.

<sup>25</sup> El movimiento sísmico ocasionó un tsunami que destruyó el Callao.

<sup>26</sup> Barriga Víctor, Ob. cit., p 187, relación del escribano Diego Fernández Montaña Archivo Nacional T XIII p. 6.

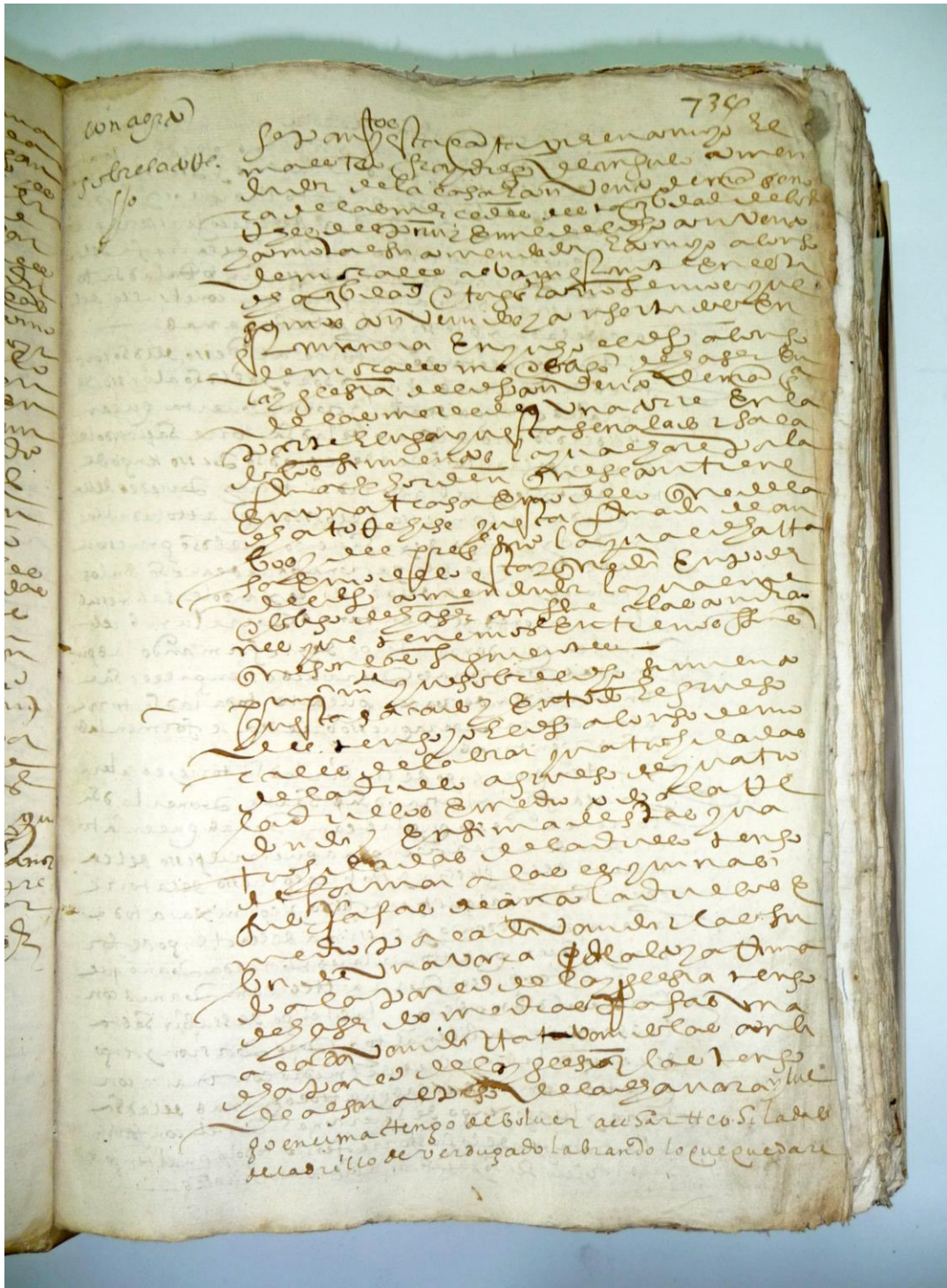


Imagen Nro. 14.- Vista del Contrato de trabajo para la construcción de la Torre de la Merced, existente en el Archivo General de la Nación, Notaria Gómez de Baeza, Folio 734, anverso.



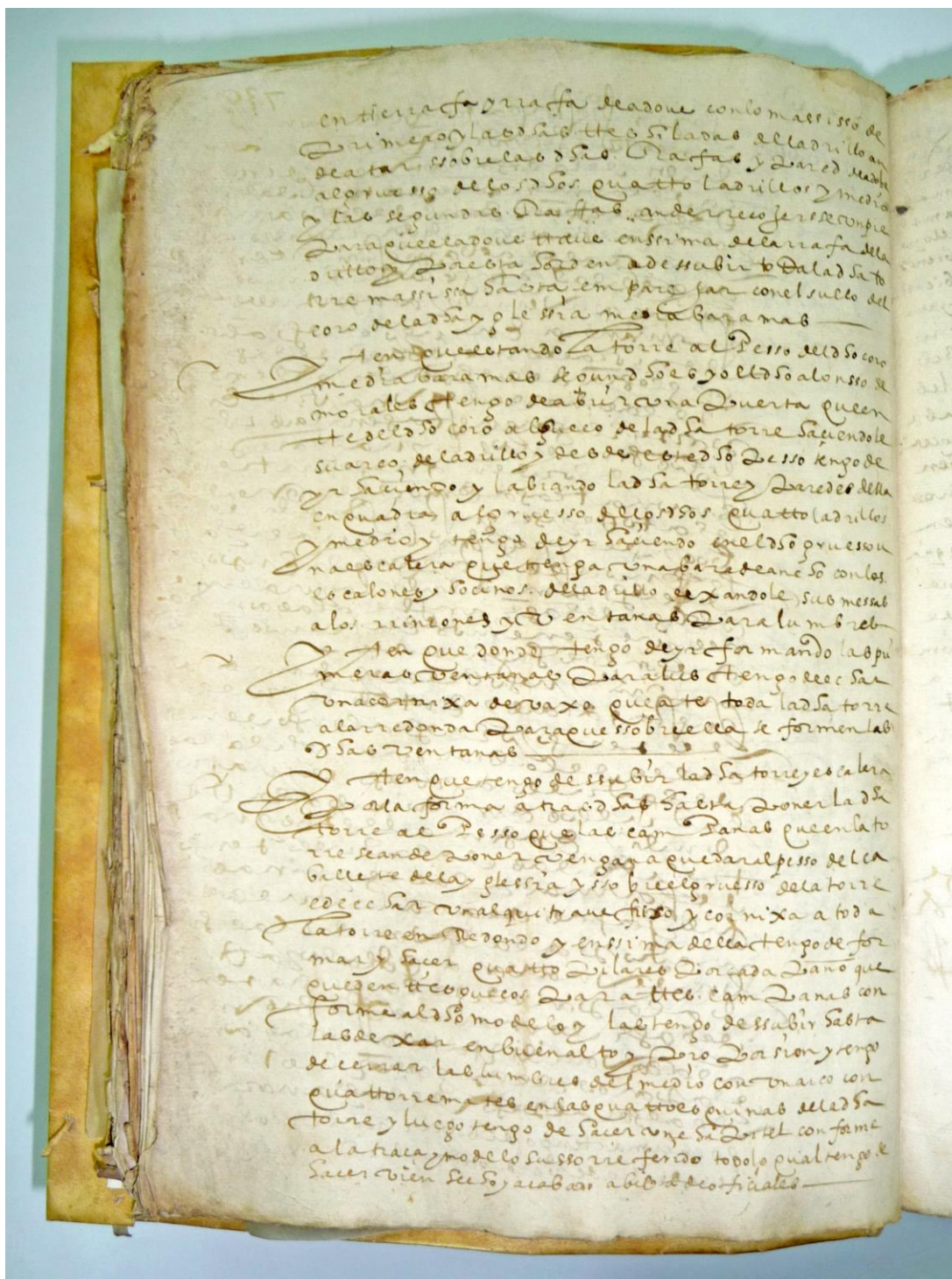


Fig. Nro. 5.- Vista del Contrato de trabajo para la construcción de la Torre de la Merced, existente en el Archivo General de la Nación, Notaría Gómez de Baeza, Folio 734, reverso.



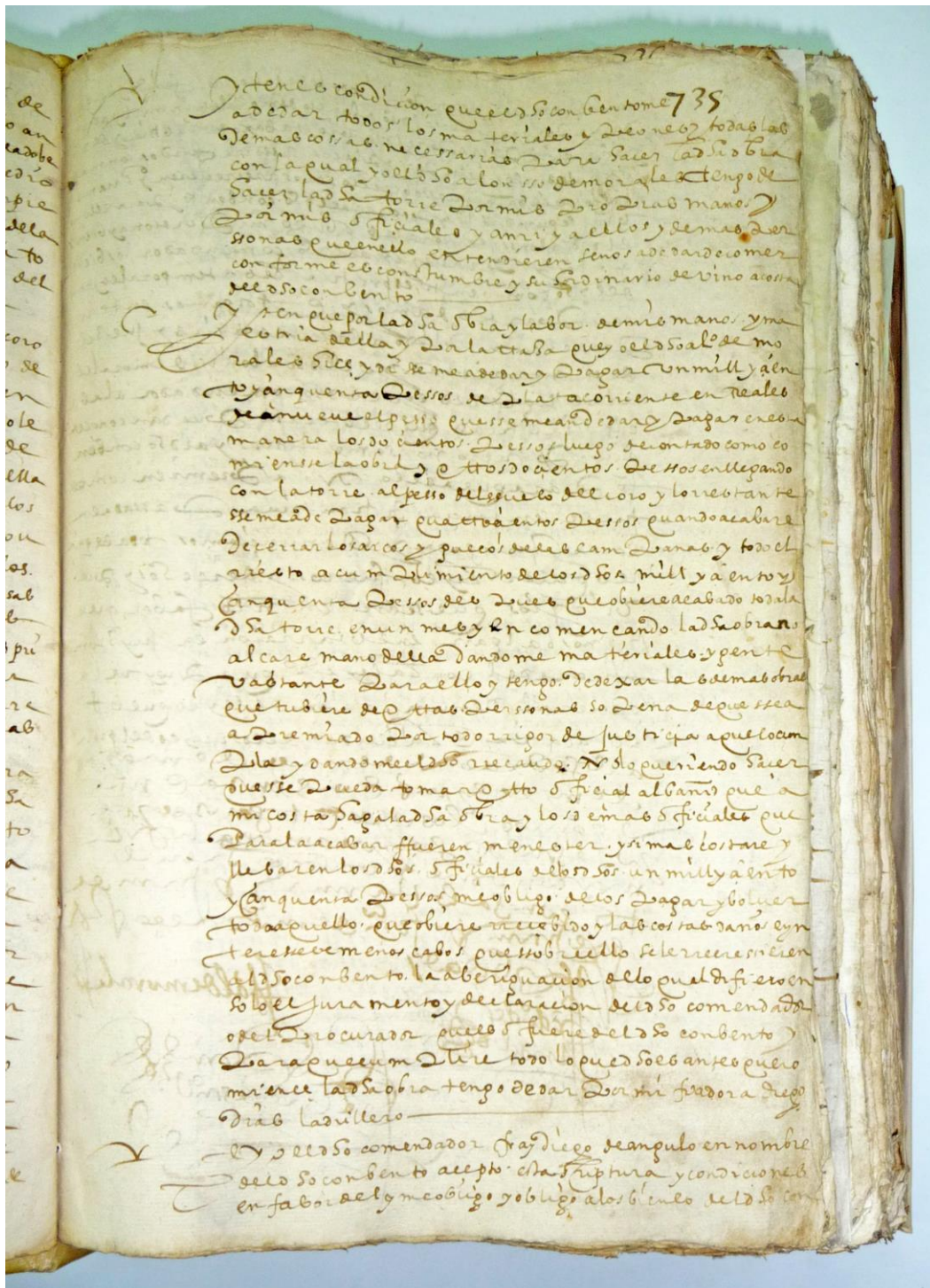


Fig. Nro. 6.- Vista del Contrato de trabajo para la construcción de la Torre de la Merced, existente en el Archivo General de la Nación, Notaria Gómez de Baeza, Folio 735, anverso.





Fig. Nro. 7.- Vista del Contrato de trabajo para la construcción de la Torre de la Merced, existente en el Archivo General de la Nación, Notaria Gómez de Baeza, Folio 735, reverso.

## **4.2 CONSIDERACIONES GEOTECNICAS DEL SUELO DE LIMA**

### **4.2.1. GEOGRAFÍA**

Lima se ubica en la Costa del Pacífico sobre los 77°03' de longitud al Oeste del Meridiano de Greenwich y a los 12°04' de latitud Sur, su altura promedio es de 100 metros sobre el nivel del mar. El Área Metropolitana tiene una extracción aproximada de 3,923.56 km<sup>2</sup>. El área descrita comprende un terreno predominantemente plano, con una ligera pendiente promedio de aproximadamente 4 a 5% en dirección NE-SO. El río Rímac atraviesa el Casco Urbano de la Ciudad, en dirección Este-Oeste, para desembocar al Norte del Puerto del Callao.

### **4.2.2 SISMICIDAD DE LA ZONA DE ESTUDIO**

La ciudad de Lima se encuentra en la zona denominada cinturón de Fuego del Pacífico, por ser la zona con más actividad sísmica del planeta.

La sismicidad de la Ciudad de Lima está condicionada a la interacción de la Placa de Nazca con la Placa Continental. La actividad sísmica se origina cuando la placa de Nazca penetra por debajo en la placa continental fenómeno conocido como subducción, por lo tanto Lima con su cercanía a la zona de subducción es susceptible de movimientos sísmicos de gran magnitud cuanto más cerca de la zona mencionada se encuentra el epicentro del evento, la cual disminuye hacia la zona de la sierra y la selva zonas donde la subducción es menos superficial

Durante la vida colonial y republicana y hasta nuestros días fechas en que se han tomado registros de los eventos sísmicos la zona de Lima ha soportado más de 17 movimientos telúricos con intensidades comprendidas entre clase VII y clase IX en



la Escala Modificada de Mercalli<sup>27</sup>. Los sismos más recientes que se sintieron en la ciudad de Lima fueron los que ocurrieron en el 2001 cuando se produjo un terremoto de magnitud 6,9 en Camaná (Arequipa) y el último el del 15 de Agosto del 2007 (06h 40min, hora local) en la región central del Perú ocurrió un sismo de magnitud 7.0 ML con epicentro en 13.49° Sur y -76.85° Oeste; es decir, 74 km al oeste de la ciudad de Pisco (<sup>28</sup>).

## **RESEÑA ACERCA DE LOS SISMOS QUE HAN AFECTADO LA CIUDAD DE LIMA<sup>29</sup>**

*“Lima, principal metrópoli de la América del Sur, fue destruida por el terremoto de 1687 reconstruida por el Virrey don Melchor de Navarra y Rocafull, Duque de La Palata, volvió a ser íntegramente destruida por el gran sismo de 1746, que acompañado de un tsunami arrasó el puerto del Callao. El Virrey don José Manso de Velasco realizó nuevamente la reconstrucción de la ciudad. En ese período otras ciudades del interior del País fueron igualmente destruidas por sismos; Arequipa lo fue sucesivamente en 1582, 1600 y 1784; la ciudad imperial del Cuzco en 1650; Trujillo en 1619 y 1725. Durante el siglo XIX sucedieron varios sismos; uno de los principales por su intensidad fue el de 1868, que devastó Arequipa, Tacna y Arica.*

---

<sup>27</sup> Silgado Ferro, Enrique. Instituto de Geología y Minería, Boletín Nro. 3, Serie C, Geodinámica. Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú 1513-1974, Lima, Enero 1978.

<sup>28</sup> Aceleraciones Máximas Registradas en la Ciudad de Lima: Sismo de Pisco del 15 de Agosto del 2007 (7.0 ML) (Isabel Bernal y Hernando Tavera Dirección de Sismología-IGP)

<sup>29</sup> Silgado Ferro, Enrique. Ob, cit., Texto extraído.

*En el presente siglo, notables fueron por la intensidad y estragos que causaron, los terremotos que afectaron a Piura y Huancabamba (1912), Caravelí (1913), Chachapoyas (1928), Lima (1940), Nazca (1942), Quiches, Ancash (1946), Satipo (1947), Cuzco (1950), Tumbes (1953), Arequipa (1958-1960), Lima (1966), Chimbote y Callejón de Huaylas (1970), Lima (1974)”.*

Cuadro Nro. 4.- Sismos que han afectado la Costa central y en especial la Ciudad de Lima<sup>30</sup>

<b>SISMOS MAYORES QUE HAN AFECTADO LA COSTA CENTRAL DEL PERU</b>			
<i>Fecha</i>	<i>Magnitud Ms</i>	<i>Intensidad MM</i>	<i>Observaciones</i>
15-11-1555			
17-05-1584			
09-07-1586			<i>Causó destrucción en Lima, 22 muertos.</i>
19-10-1609			<i>Causó destrucción en Lima</i>
27-11-1630			<i>Destrucción en Lima</i>
13-11-1655			<i>Destrucción en Lima</i>
12-05-1664			<i>Destrucción y 400 muertos en Ica.</i>
17-07-1678			<i>Averió principales edificios en Lima.</i>
20-10-1687			<i>Destrucción y 500 muertos en Lima. Produjo grietas de muchos km de extracción en Ica y Cañete.</i>
28-10-1746		X-XI	<i>Destrucción en Lima y Callao, 1141 muertos por sismo, 4000 muertos por tsunami.</i>
30/03/1813			<i>Destrucción y 32 muertos en Ica.</i>
20/09/1827			<i>Destrucción en Lima y Callao.</i>
30/03/1828			<i>Daños y 30 muertos en Lima</i>
04/03/1904		VII-VIII	<i>Destrucción en Lima</i>
24/05/1940	8.0	VII-VIII	<i>Destrucción en Lima</i>
17/10/1966	7.7	VIII	<i>Destrucción y 100 muertos en Lima</i>
31/05/1970	7.7	VII	<i>Destrucción Chimbote, Huaraz, 230 km N de Lima</i>
05/01/1974	6.3		<i>Al Este de Lima</i>
03/10/1974	7.6	VII-VIII	<i>100 km al SW de Lima, destrucción costa central, 78 muertos.</i>
09/11/1974	7.2	VI	<i>Replica del sismo del 03-10.74</i>

<sup>30</sup> SILGADO FERRO, Enrique, Investigación de sismicidad histórica en la América del Sur en los siglos XVI, XVII, XVIII y XIX. Concytec 1992

## **4.3 CONSIDERACIONES GEOLOGICAS**

En esta etapa se hará una revisión de las características Geológicas y Geomorfológicas de la Ciudad de Lima, que es la ciudad donde se encuentra la edificación materia de esta Tesis.

### **4.3.1 GEOLOGIA Y GEOMORFOLOGIA DE LA CIUDAD DE LIMA**

#### **4.3.1.1 Historia Geológica de la Ciudad de Lima**

La Ciudad de Lima se encuentra asentada sobre el cono de deyección de los ríos Rímac y Chillón, que se fue formando desde la época del pleistoceno hasta el cuaternario.

Estas terrazas aluviales se depositaron sobre una base rocosa constituida por formaciones volcánicas y de sedimentos marinos durante el periodo mesozoico, los cuales emergieron luego del retiro de los mares en la era Terciaria.

Estos depósitos aluviales se distribuyeron en la zona donde se ubica la actual ciudad de Lima de manera heterogénea. Los conglomerados pueden variar de ser compactos a sueltos, y de tener un espesor de varios cientos de metros en la zona del centro, hasta zonas cerca al mar donde el espesor es menor. Por lo tanto su capacidad de carga varía dentro de la ciudad siendo la zona del centro de Lima la que presenta las mejores capacidades de carga para la cimentación<sup>31</sup>.

---

<sup>31</sup> MARTÍNEZ VARGAS Alberto, Conglomerado de Lima Metropolitana en Cimentaciones, Conferencia Internacional de Ingeniería Sísmica, Lima 2007, p 16.

#### **4.3.1.2 Estratigrafía de la Ciudad de Lima**

Las características lito-estratigráficas de las rocas y sedimentos que enmarcan la Ciudad de Lima, se describen a continuación:

**Volcánico Santa Rosa:** Consiste en volcánicos andesíticos de color gris, gris verdoso y gris oscuro, de textura porfirítica, depositada en bancos que se intercalan con capas delgadas de areniscas grises de grano fino y limolitas pizarrosas de color gris oscuro.

**Formación Puente Inga:** Consiste en una secuencia de lutitas tobáceas, blandas, finamente estratificadas en laminas delgadas, suaves al tacto y pigmentadas por oxidaciones limoníticas, que se intercalan con derrames volcánicos.

**Formación Ventanilla:** Consiste en derrames y brechas volcánicas, con intercalaciones de lutitas tobáceas, limolitas y areniscas.

**Formación Cerro Blanco:** Se halla constituido por una secuencia sedimentaria volcánica que se presenta en horizontes medios a gruesos bien estratificados; consiste de areniscas, capas de chert y algunos horizontes calcáreos que se intercalan con andesitas afaníticas.

**Formación Morro Solar:** Consiste de intercalaciones de areniscas en bancos delgados con niveles lutáceos, areniscas abigarradas y hacia el techo areniscas cuarzosas interestratificadas con limolitas.

**Formación Marcavilca:** Esta formación está constituida por areniscas cuarcíticas de grano fino a medio, con algunas intercalaciones de lutitas.

**Formación Pamplona:** Está formada por una alternancia de lutitas y calizas, en capas delgadas. Las rocas se muestran bastante fracturadas y alteradas.

**Formación Atocongo:** Esta formación está constituida por calizas de tonalidades gris oscuras a azulinas estratificadas en bancos gruesos, con buzamiento hacia el Norte.

En los afloramientos se observan regularmente fracturadas y poco alteradas.

**Formación Quilmaná:** Consiste de una serie volcánica de textura porfirítica, de color gris verdoso, seudoestratificados, con ocasionales horizontes de areniscas de grano fino. En superficie se encuentran bastante fracturadas y moderadamente alteradas.

**Depósitos Cuaternarios:** En la zona urbana de Lima-Callao, los depósitos cuaternarios presentan amplia propagación en superficie, presentando diferencias en su origen, edad, composición y espesor; por lo general su espesor tiene grandes variaciones de un sector a otro, en la zona precordillerana está limitado a espesores menores a 1m, mientras que en la zona de planicies costeras y conos deyección los espesores varían entre 20 y más de 200 m. Estos depósitos son los más importantes del área

Esta zona está conformada predominantemente por el conglomerado del río Rímac, así como de sus quebradas tributarias. Esta zona presenta las mejores características geomecánicas para la cimentación superficial.

#### **4.3.2 GEOMORFOLOGÍA DE LIMA**

La información geomorfológica del suelo de la Ciudad de Lima es la siguiente:

1. Formaciones rocosas que forman parte de la Cordillera Occidental, con altitudes que pueden superar los 1000 msnm, forman parte de las quebradas de los ríos Lurín, Rímac y Chillón.
2. Presencia de cerros de poca elevación en la zona de transición hacia las formaciones rocosas y la llanura costera que llega al mar, están cubiertas por material transportado eólicamente.
3. La llanura costera formada por el cono de deyección de los ríos Rímac y Chillón; con una topografía muy regular. Tiene la forma de un abanico. Esta llanura aluvial conforma el suelo de fundación del área de Lima metropolitana.
4. En la zona de acantilados como el de la costa verde, zona sometida a una constante erosión por parte del mar.

## **4.4 ANALISIS DE MICROTREPIDACIONES EN LA CIUDAD DE LIMA** <sup>32</sup>

Las micro trepidaciones consisten en el monitoreo y procesamiento de los registros de microvibraciones ambientales.

Permiten determinar el período predominante de vibración del terreno y en algunos casos el factor de amplificación sísmica. Existe una buena correspondencia entre las características geotécnicas y el período predominante de vibración.

Se ha determinado cuatro zonas en Lima Metropolitana en función del período predominante de microtrepidaciones.

**ZONA I:** Zona conformada por grava aluvial y afloramientos rocosos. La constituye la mayor parte de Lima. Los períodos predominantes varían entre 0.1 y 0.3 segundos. Suelo rígido, no se esperan amplificaciones importantes en períodos intermedios y largos.

**ZONA II:** Zona donde se presenta en superficie un estrato de suelo arcilloso o areno-limoso de 10.0 a 20.0 m de espesor sobre la grava aluvial. Los períodos predominantes varían entre 0.3 y 0.5 segundos. Suelo medianamente rígido, se esperan amplificaciones moderadas en períodos bajos e intermedios.

**ZONA III:** Zona formada por depósitos de suelos finos y arenas potentes. Los depósitos eólicos se encuentran en estado suelto. Los períodos predominantes varían entre 0.5 y 0.7 segundos. Comportamiento de suelo blando, con amplificaciones importantes en períodos intermedios y largos.

---

<sup>32</sup> AGUILAR BARDALES, Zenón, ALVA HURTADO Jorge E. *MICROZONIFICACION SISMICA DE LIMA- CISMID-UNI*

**ZONA IV:** Áreas puntuales de depósitos eólicos en Villa El Salvador y zona de canteras de Pachacámac. Los períodos predominantes varían entre 0.7 y 2.0 segundos. Comportamiento de suelo muy blando con amplificaciones importante en períodos largos.

## **4.5 ZONIFICACION SISMICA DE LA CIUDAD DE LIMA<sup>33</sup>**

Se ha propuesto cinco zonas en base a las características geotécnicas sísmicas del terreno de cimentación

**ZONA I:** Zona que incluye afloramientos rocosos, estratos potentes de grava que conforman los conos de deyección de los ríos Rímac y Chillón y los estratos de grava coluvial – eluvial de los pies de las laderas. Comportamiento rígido, con periodos de vibración natural entre 0.1 y 0.3 segundos. El factor de amplificación sísmica por efecto local del suelo en esta zona es  $S = 1.0$  y el periodo natural del suelo es  $T_p = 0.4$  segundos, correspondiendo a un suelo tipo 1 de la norma sismo resistente peruana.

**ZONA II:** Zona conformada por un estrato superficial de suelos granulares finos y suelos arcillosos, con potencias que varían entre 3.0 y 10.0 m. Subyaciendo a estos estratos existe grava aluvial o grava coluvial. Los periodos predominantes varían entre 0.3 y 0.5 segundos. El factor de amplificación sísmica por efecto local del suelo en esta zona es  $S = 1.2$  y el periodo natural del suelo es  $T_p = 0.6$  segundos, correspondiendo a un suelo tipo 2 de la norma sismo resistente peruana.

---

<sup>33</sup> AGUILAR BARDALES, Zenón, ALVA HURTADO Jorge. E. *Ob. cit.*

**ZONA III:** Zona conformada en su mayor parte por depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor en estado suelo. Se presentan en algunos sectores de los distritos de Puente Piedra, La Molina y Lurín, y en los depósitos de arenas eólicas que cubren parte de los distritos de Ventanilla y Villa El Salvador. Los periodos predominantes varían entre 0.5 y 0.7 segundos. El factor de amplificación sísmica por efecto local del suelo es  $S = 1.4$  y un periodo natural de  $T_p = 0.9$  segundos, correspondiendo a un suelo tipo 3 de la norma sismo resistente.

**ZONA IV:** Zona conformada por depósitos de arenas eólicas de gran espesor y sueltas, depósitos marinos y suelos pantanosos ubicados en la zona del litoral de los distritos de Ventanilla, Callao, Chorrillos, Villa El Salvador y Lurín. También el distrito de La Punta, con un estrato de grava superficial sobre un depósito potente de arcilla que genera periodos relativamente largos, y un sector del distrito de Pachacámac, con depósitos profundos de arena. Los periodos predominantes son mayores que 0.7 segundos, por lo que su comportamiento dinámico ha sido tipificado como un suelo tipo 4 de la norma sismo resistente peruana, asignándoles un factor de amplificación sísmica  $S = 1.6$  y un periodo natural de  $T_p = 1.2$  segundos (caso especial según la Norma).

**ZONA V:** Constituida por áreas puntuales conformadas por depósitos de rellenos sueltos de desmontes heterogéneos que han sido colocados en depresiones naturales o excavaciones realizadas en el pasado, con potencias entre 5.0 y 15.0 m. También se incluye a los rellenos sanitarios que en el pasado se encontraban fuera del área urbana y en la actualidad han sido urbanizados. Las áreas que han sido identificadas se encuentran ubicadas en los distritos del Rímac, Surquillo, Bellavista, La Perla, San Juan de Miraflores y San Juan de Lurigancho, no descartándose la existencia de otras similares en Lima Metropolitana. El comportamiento dinámico de estos rellenos es incierto por lo que requieren un estudio específico.



## **4.6 ANALISIS Y DISCUSION DE LAS CARACTERISTICAS GEOTECNICAS DE LA ZONA EN ESTUDIO**

1. El suelo que sirve de cimentación a la estructura de la Torre de la Merced es una zona conformada predominantemente por el conglomerado del río Rímac. Esta zona presenta inmejorables condiciones y características geomecánicas para la cimentación superficial.
2. De acuerdo al cuadro de microzonificación sísmica la Torre de la Iglesia de la Merced está ubicado en la ZONA I, es decir está ubicado sobre un estrato de grava aluvial.
3. Este estrato de suelo aluvial tiene un comportamiento rígido, con periodos de vibración natural entre 0.1 y 0.3 segundos. El factor de amplificación sísmica por efecto local del suelo en esta zona es  $S = 1.0$  y el periodo natural del suelo es  $T_p = 0.4$  segundos, correspondiendo a un suelo tipo 1 de la Norma E-030 Norma sismo resistente Peruana
4. Por lo tanto las condiciones de suelo de la Torre de la Basílica de la Merced son buenas, el suelo tiene excelente capacidad de carga, la amplificación de onda sísmica es la mínima de acuerdo a lo que establece la Norma sismorresistente peruana y los asentamientos están descartados.
5. Tendrían que hacerse estudios para controlar dos posibles factores de riesgo, la presencia de humedad por filtraciones de agua en la base de la Torre, y el posible efecto de resonancia sísmica que podría ocurrir entre el suelo y la estructura si los periodos de vibración de ambos elementos fueran similares antes o durante un evento sísmico.

## Capítulo 5

# ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA TORRE DE LA BASÍLICA DE LA MERCED

## INTRODUCCIÓN

La Basílica de la Merced se encuentra ubicada en el Jirón de la Unión y la intersección con la calle Miro Quesada en el Centro Histórico de Lima. El inicio de la construcción del complejo en general data del año 1535 y el de la Torre en particular del año 1589 según el contrato de trabajo existente en el Archivo General de la Nación celebrado entre las autoridades de la Orden de la Merced y el constructor Alonso de Morales, a la fecha la Torre mantiene las características que se mencionan en el contrato y posiblemente la mayor parte de ella sea edificación original.

## 5.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA

### **Estructuración y Materiales originales**

La estructura del Monumento está compuesta de muros de albañilería de dos metros de espesor aproximadamente, las unidades de albañilería son sólidas, de manufactura artesanal y de medidas 9x14x30 cm, el mortero fue hecho en base a cal y arena, las juntas en promedio miden 2.0 cm. de espesor.



Fig. Nro. 8.- Iglesia de la Merced en la actualidad.

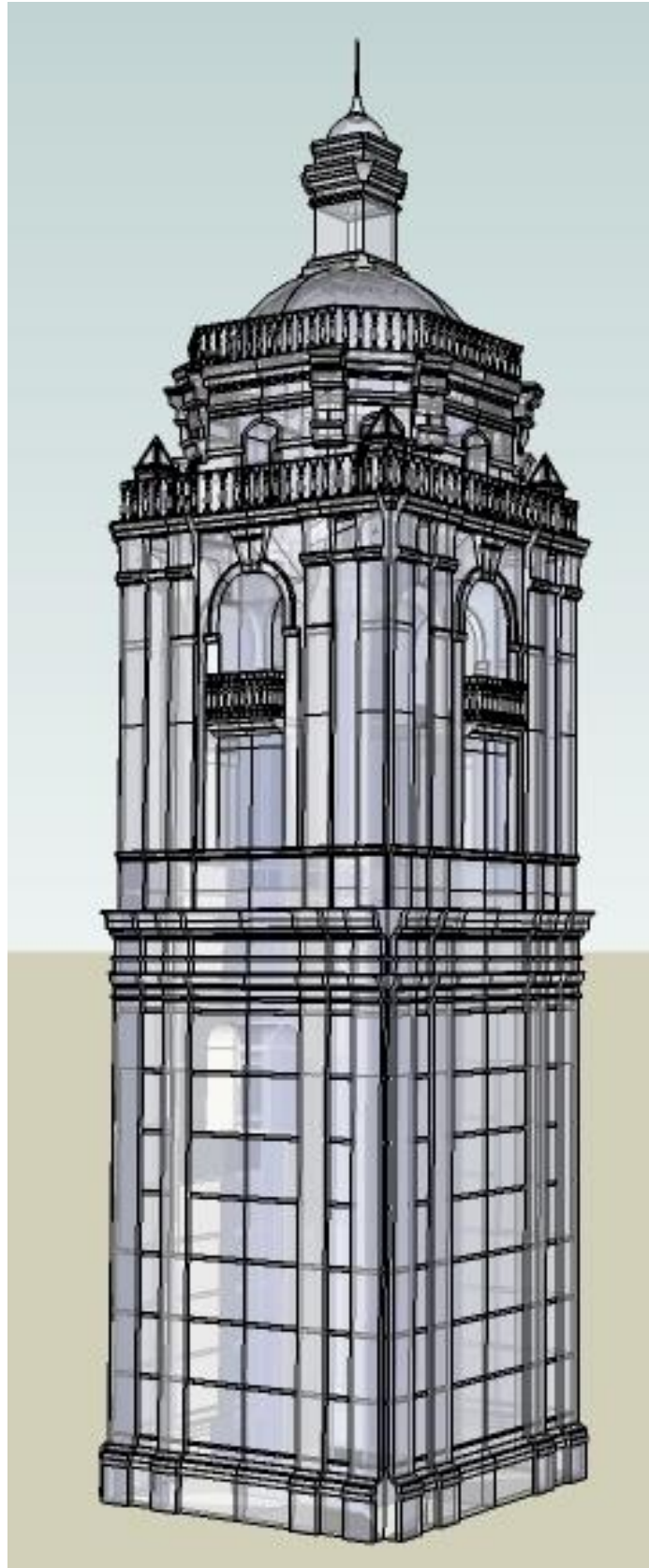


Fig. Nro. 9.- Levantamiento de la Torre, imagen tridimensional a partir de planos y datos de campo.

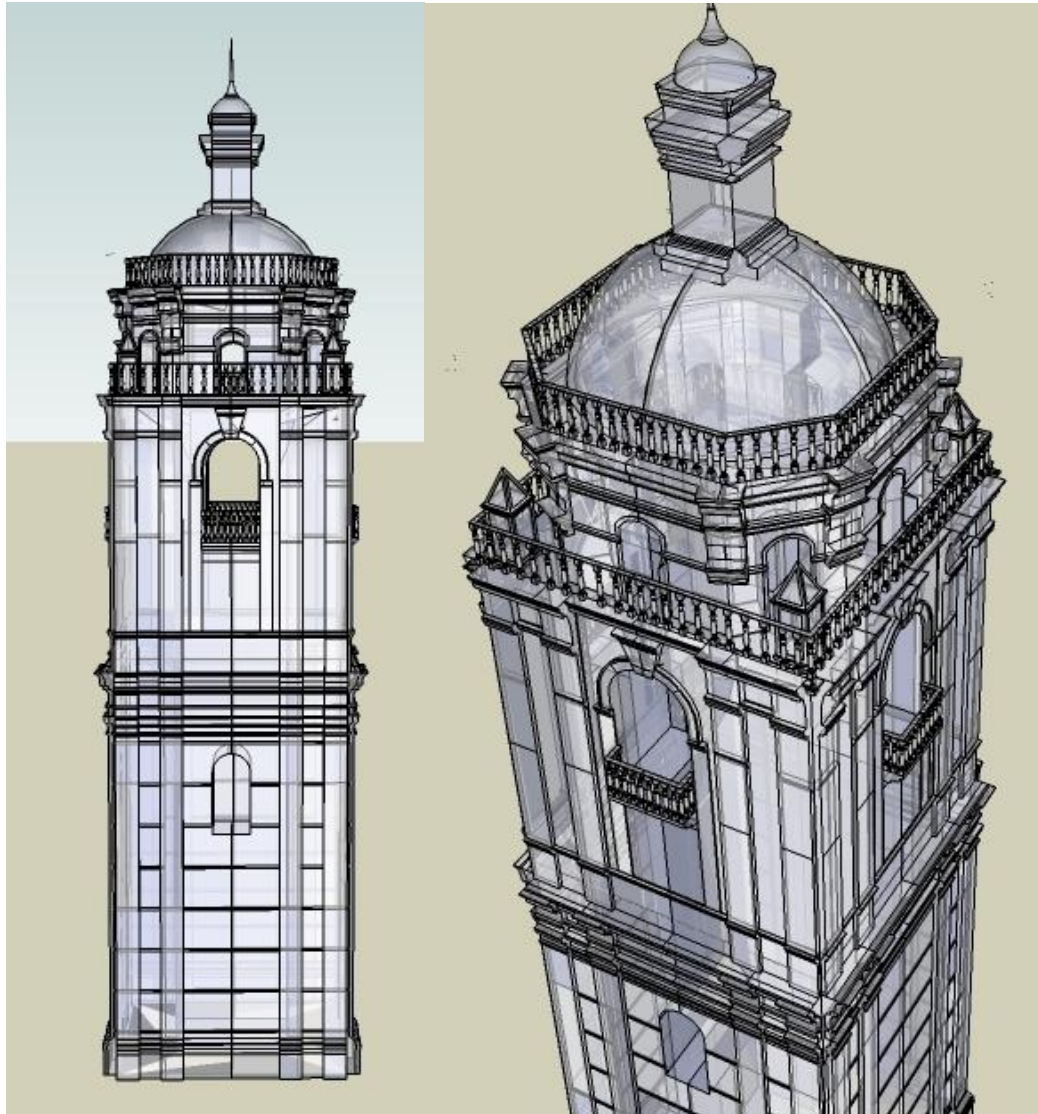


Fig. Nro. 10.- Levantamiento de la Torre, imagen tridimensional a partir de planos y datos de campo.

La Torre mide ocho metros de lado y es de planta cuadrada, la altura total desde el nivel cero o nivel de calle hasta la parte superior de la cúpula es de 35.00 metros.

Los muros forman un prisma rígido y se elevan a todo lo largo de la misma sin variaciones salvo por pequeñas aberturas tipo vanos y la presencia de pilares que rematan en cuatro arcos de medio punto que a su vez soportan el “tambor” que



sirve de apoyo a la cúpula de material liviano que corona la torre. Esta cúpula estaba construida con cerchas de madera y la membrana de la cúpula estaba originalmente formada por bloques de arcilla asentados tal como existen en las otras cúpulas de la Basílica, luego cuando esta fue destruida debido al deterioro ha sido reemplazada como parte de los trabajos de restauración realizados hacia los años 40 por una membrana de mortero reforzado con metal expandido la misma que se mantiene hasta nuestros días.



Fig. Nro. 11.- Levantamiento de la Torre, imagen tridimensional a partir de planos y datos de campo.

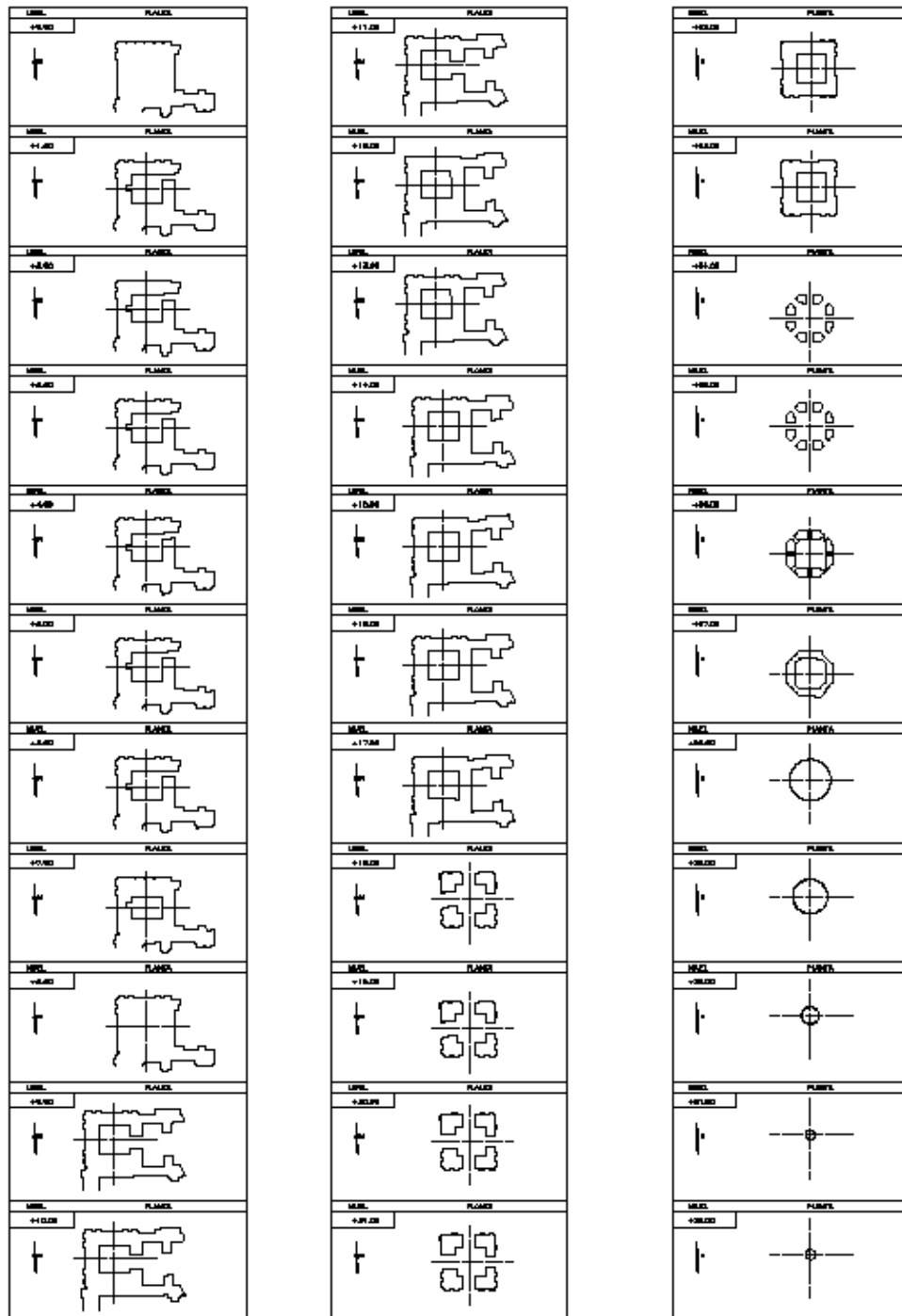


Fig. Nro. 12.- Cortes transversales de la Torre cada cien centímetros.

## **5.2 METODOLOGÍA**

El estudio comprende de desarrollo de modelos de Elementos Finitos para reproducir el comportamiento estructural de la edificación.

Como primer paso de han realizado modelos de la Torre en 3D a partir de los planos existentes y los levantamientos efectuados, de esta forma hemos representado fielmente las condiciones geométricas de la estructura solo dejando de lado los elementos no estructuralmente importantes. Se han generado modelos, de manera que se puedan apreciar bien los aspectos que nos interesan en nuestra investigación.

Como se ha visto en el análisis Histórico, la edificación ha sufrido varias intervenciones a la fecha, incluso la última de ellas la hemos visitado personalmente, se realizo un primer modelo con la versión original de la Torre, en la que esperamos encontrar fundamentos para explicar los daños encontrados debido a los sismos que posteriormente sucedieron afectando especialmente las pilares y la parte de la cúpula, es por esto que se detallo la zona de pilares y cúpula para investigar los esfuerzos en esta zona que es la de menor peso de toda la estructura.

## **5.3 TRABAJOS DE CAMPO**

### **Levantamiento de Daños**

El levantamiento de daños tiene como propósito evaluar las condiciones en las que se encontraba la estructura de la Torre de la Basílica de la Merced, reproduciendo las condiciones ocasionados por el peso propio y los movimientos sísmicos.

Para esta tarea contamos con varias fuentes, siendo estas las siguientes:



Primera: Es la inspección personal realizada a las instalaciones, antes de su última intervención de conservación en el año 2005.

Segunda: Planos pertenecientes a la Municipalidad de Lima Metropolitana del año 1998.

Tercera: Información recopilada gracias a la colaboración de las autoridades del Convento y Basílica de la Merced de Lima.

## **DESCRIPCION DE LOS DAÑOS, GRIETAS Y DESPRENDIMIENTOS OBSERVADOS EN EL AÑO 2005**

### **LADO OESTE**

Se observa una gran grieta diagonal ascendente al centro de la estructura a N+18.00 aproximadamente.

### **LADO SUR**

Se observa una grieta que sube por la clave del arco en forma diagonal ascendente a N+23.00 aproximadamente.

### **LADO NORTE**

Se observa una doble grieta diagonal a N+18.00 aproximadamente. Y otra grieta horizontal cortando uno de los cuatro elementos verticales a N+18.50 m.

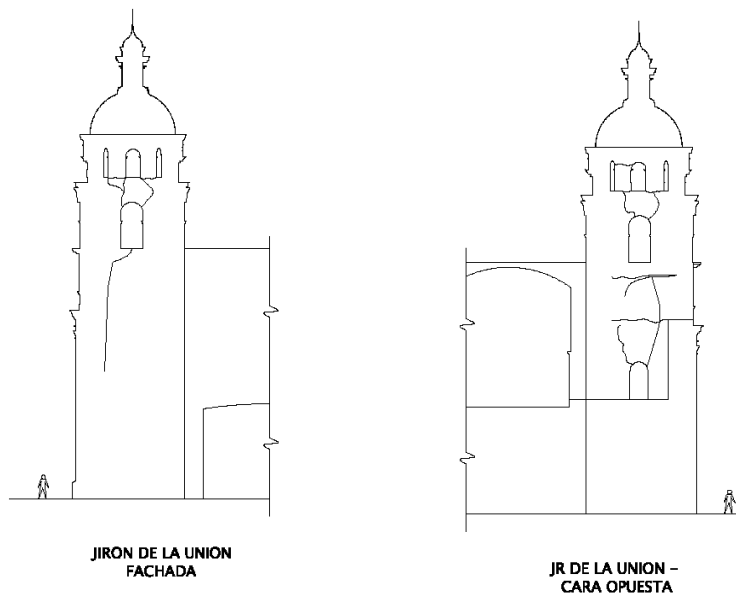


Fig. Nro. 13.- Daños visibles de la Torre (año 2005), según planos y trabajos de campo.

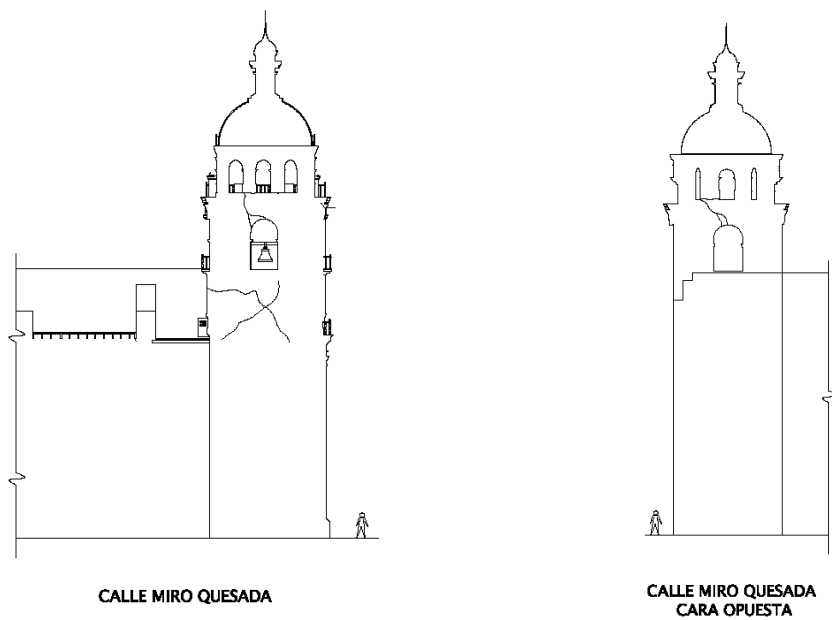


Fig. Nro. 14.- Daños visibles de la Torre (año 2005), según planos y trabajos de campo.

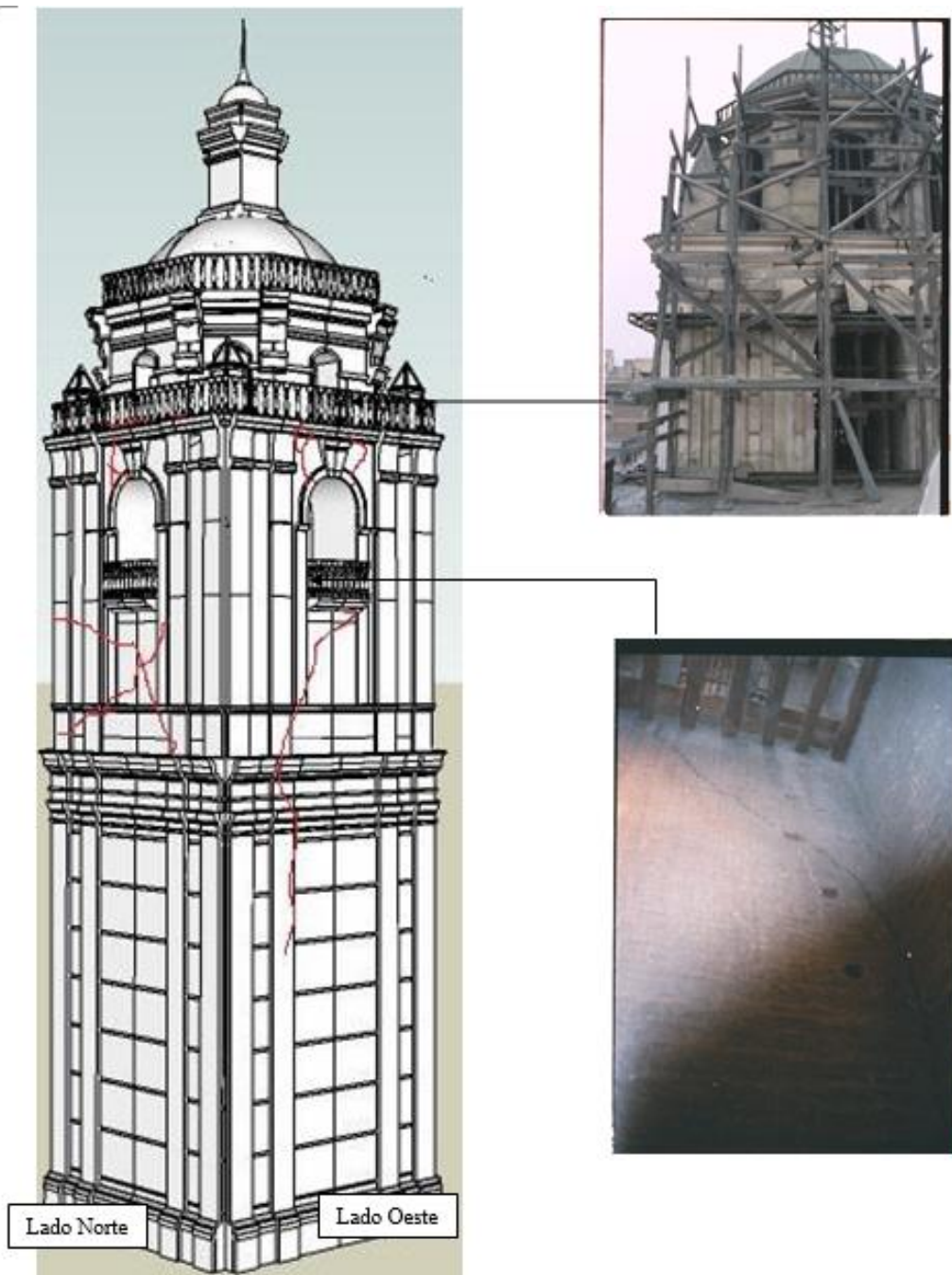


Fig. Nro. 15.- Daños visibles de la Torre (año 2005), según planos y trabajos de campo. Vista Isométrica.

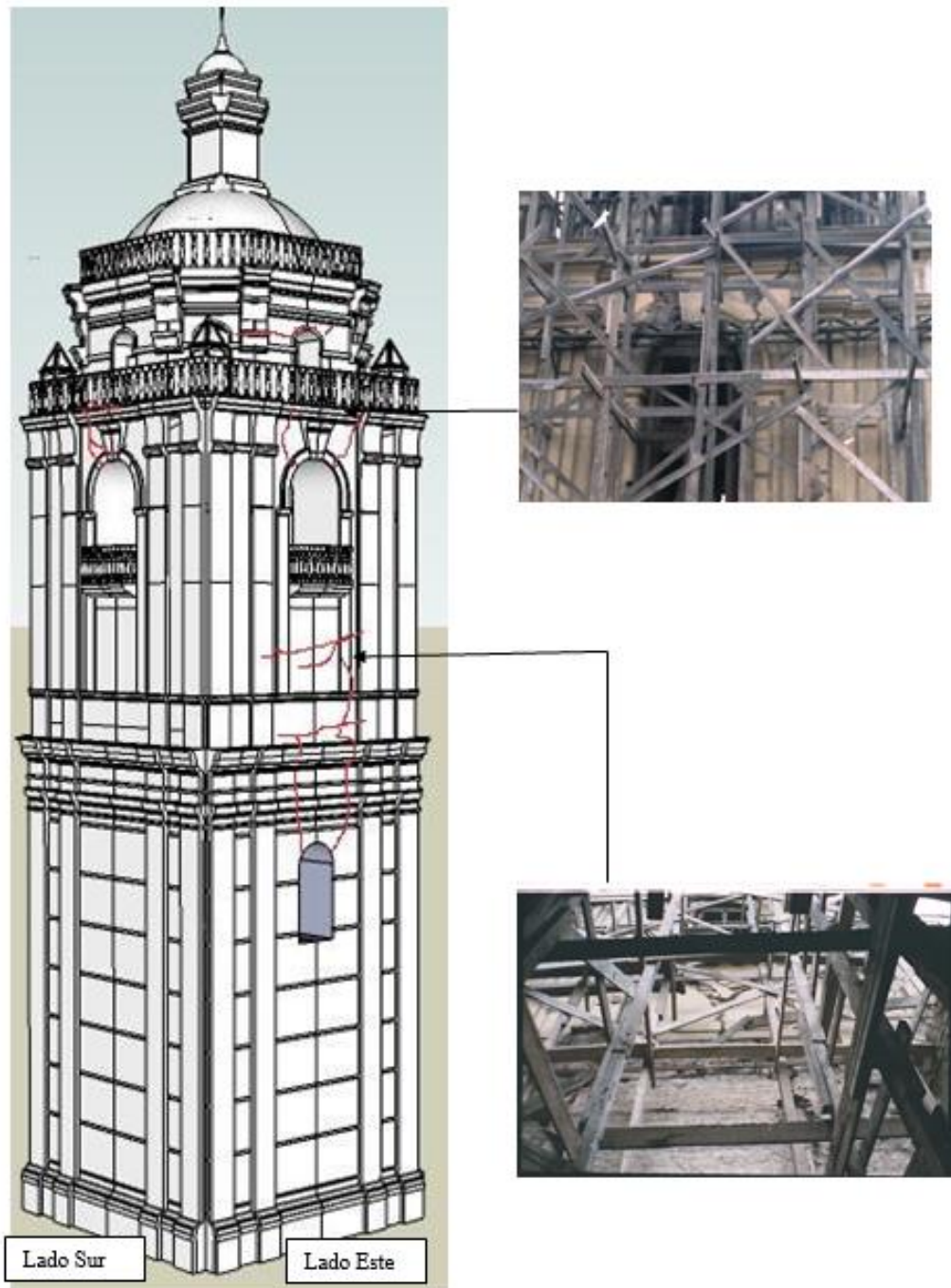


Fig. Nro. 16.- Daños visibles de la Torre (año 2005), según planos y trabajos de campo. Vista Isométrica.

## LADO OESTE

Se observa grietas profundas que nacen de la clave del arco a N+8.55 y que ascienden hacia el entablado ubicado a N+13.00 aproximadamente que nacen de la clave del arco a N+8.55

Se observa grietas horizontales a N+17.00 aproximadamente.

Se observa grietas profundas en la clave del arco del campanario a N+21.00 y se dirigen en forma diagonal ascendente hacia el N+23.00.



Fig. Nro. 17.- Fotografía que muestra los daños en la cara Este de la Torre,

## 5.4 ANALISIS DE CARGAS EN LOS MODELOS

### 1. Cargas Muertas:

Se ha considerado un peso por volumen de la albañilería de 1800 kg/m<sup>3</sup>. Peso de cúpulas, incluyendo su cobertura, y chapitel de madera.

Las campanas, que son cinco en total, serán consideradas ya que se enmarcan dentro de los conceptos del ítem 1.3 de la Norma E 020, el cálculo de su peso se detalla a continuación.

<b>Nro</b>	<b>Diametro (m)</b>	<b>Constante</b>	<b>Peso (kg)</b>
1	1.2	579	1,000.51
2	1	579	579.00
3	0.7	579	198.60
4	0.8	579	296.45
5	0.8	579	296.45
Total			2,371.01

Fig. Nro. 14.- Cálculo del peso de las campanas

### 2. Cargas Vivas:

Por tratarse de una Torre de campanario con gran cantidad de carga muerta las cargas vivas las hemos considerado de poca participación por lo que podemos utilizar el mínimo establecido por el Reglamento Nacional de Edificaciones.



3. Carga de Viento: No considerado en nuestro calculo.



18



19



20

Fig. Nro. 18 y 19.- Campanas en la Torre de La Merced,

Fig. Nro. 20.- Vista del relleno encontrado en los vanos debajo de las campanas,

## 5.5 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Material	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Poisson	Peso Especifico (Kg/m <sup>3</sup> )
Muro de ladrillo	4.5 x 10 <sup>4</sup>	0.1	1,800
Madera	1 x 10 <sup>5</sup>	---	700

Cuadro Nro. 5.- Características físicas de los materiales empleados en los modelos de la Torre de la Basílica de la Merced

## 5.6 CONDICIONES DEL SUELO

El suelo sobre el cual está construida la Torre de la Basílica de la Merced pertenece al cono deyeectivo de río Rímac conformada por material de acarreo transportado por el río Rímac, constituidos por cantos rodados y gravas de diversas dimensiones, el comportamiento del suelo es rígido, con periodos de vibración natural entre 0.1 y 0.3 segundos. Según la norma sismo resistente peruana E- 030 El factor de amplificación sísmica por efecto local del suelo en esta zona es  $S = 1.0$  y el periodo natural del suelo es  $T_p = 0.4$  segundos<sup>34</sup>, correspondiendo a un suelo tipo 1.

El espesor de estos depósitos aluviales del cono de deyección del río Rímac puede llegar a medir más de 100 metros, con capacidades de carga de más de 5.00 kg/cm<sup>2</sup><sup>35</sup>.

Por lo antes expuesto concluimos que el suelo presenta las mejores características geotécnicas para la cimentación superficial.

---

<sup>34</sup> Según se especifica en la Norma E-030 para el tipo de suelo analizado, sin embargo existen estudios que otorgan valores entre 0.1 y 0.3 segundos, ver página 59.

<sup>35</sup> MARTÍNEZ VARGAS Alberto, Conglomerado de Lima Metropolitana en Cimentaciones, Conferencia Internacional de Ingeniería Sísmica, Lima 2007, p 16.



## **5.7 MODELO ESTRUCTURAL**

Para el desarrollo de los modelos de elementos finitos de la Torre de la Basílica de la Merced se ha utilizado el software ALGOR versión 12.06 y 20.4. En la modelación se han utilizado elementos poliédricos tipo ‘brick’ en muros, pilares y arcos así como elementos tipo ‘plate’ o planos con espesor continuo, de forma cuadrangular y triangular utilizados para modelar cúpulas, estructuras de madera, muros, etc.

Se han realizado los siguientes modelos:

1. Modelo global de la Torre sin daños, que corresponde a los primeros años del siglo XX es decir previa a los terremotos de 1940, 1966 y 1974.
2. Modelo local de la zona de pilares, tambor y cúpula.

En los modelos se han incluido las campanas y las vigas de madera que las soportan sin embargo el análisis que estos elementos y los efectos que puedan tener en la estructura no han sido tenidos en cuenta en el presente trabajo. Los elementos de la edificación que no se han modelado son molduras y otros elementos de carácter decorativo ya que no tienen mayor importancia estructural.

Los modelos se han considerado empotrados en su Base, sin embargo esta consideración deberá ser verificada en tópicos de investigación que en el futuro deberían ser abordados.

## **5.8 MODELOS GENERADOS PARA EL ANÁLISIS ESTÁTICO LINEAL**

### **MODELO NRO. 1**

El modelo Nro. 1 es un modelo de la estructura integral, donde se han modelado todos los elementos estructurales así como los no estructurales como linterna, molduras y campanas, este modelo está formado por elementos tipo ‘brick’, en los

pilares y cúpula con elementos “plate”, se disminuyeron el número de nodos, de manera que el análisis fue más sencillo.

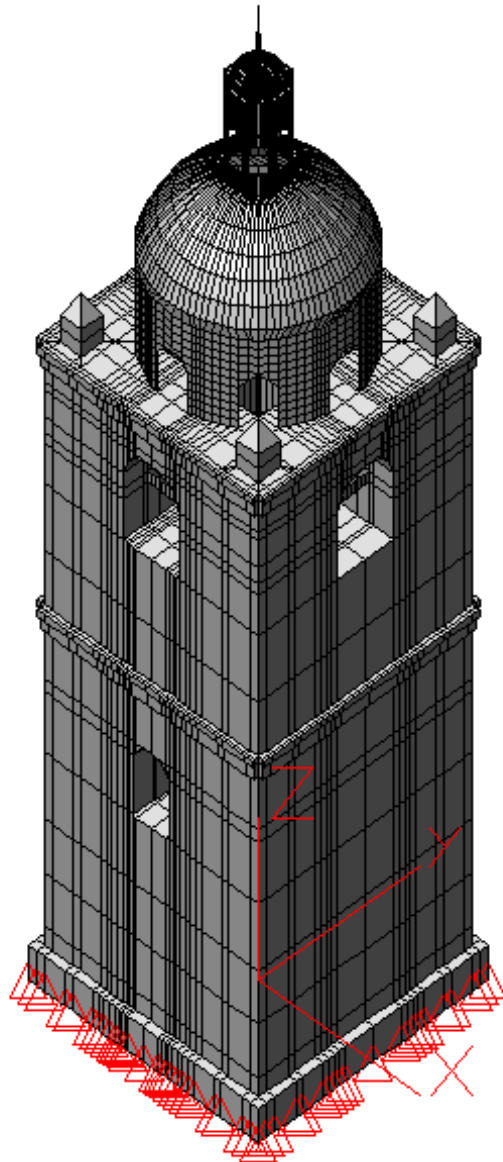


Fig. Nro. 21.- MODELO CON ELEMENTOS FINITOS DE LA TORRE DE LA MERCED,

## ANALISIS ESTATICO LINEAL POR PESO PROPIO

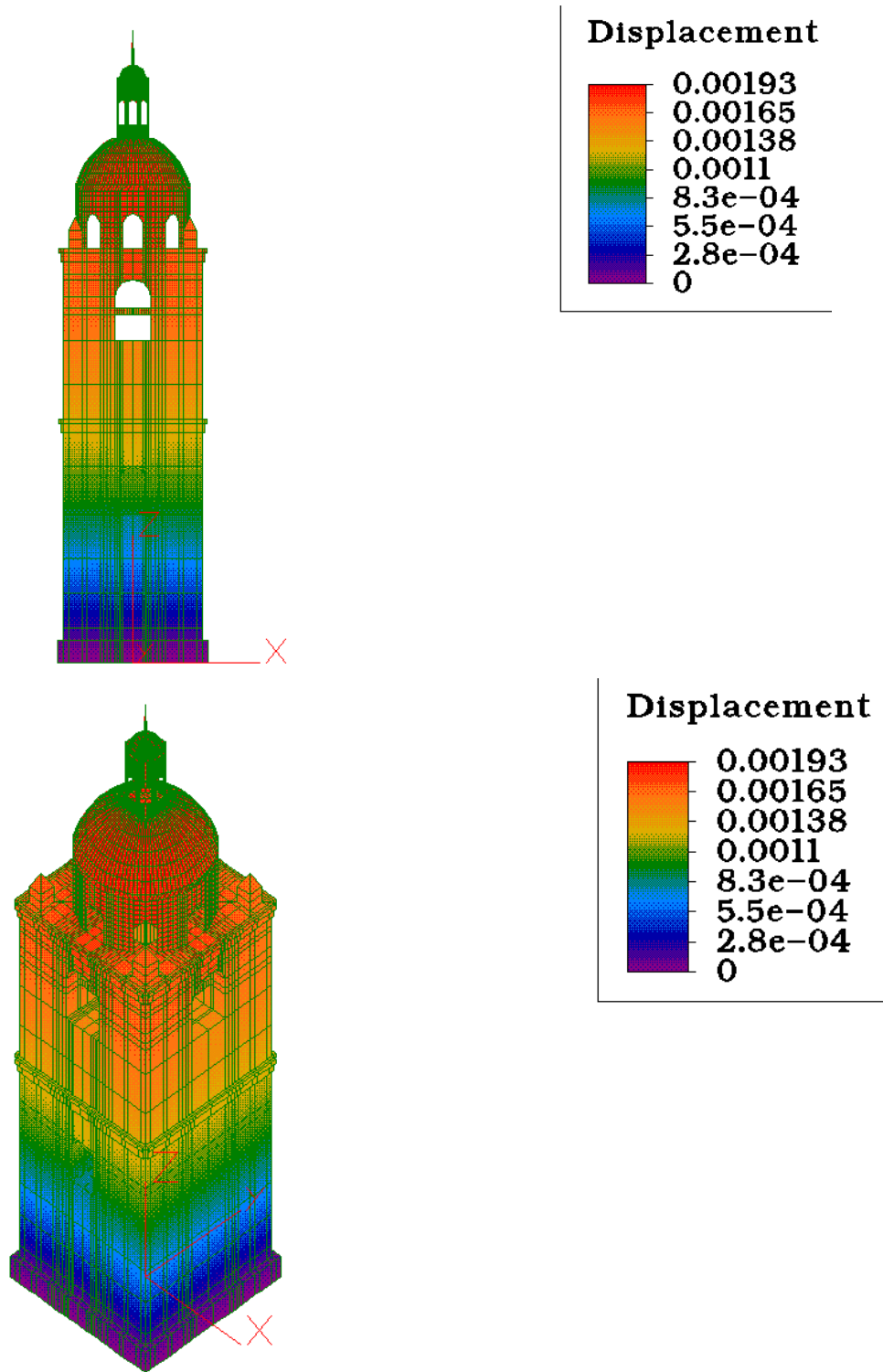


Fig. Nro. 22: ANALISIS LINEAL CON PESO PROPIO: DESPLAZAMIENTOS

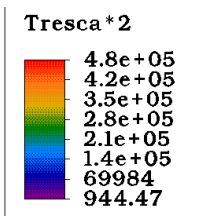
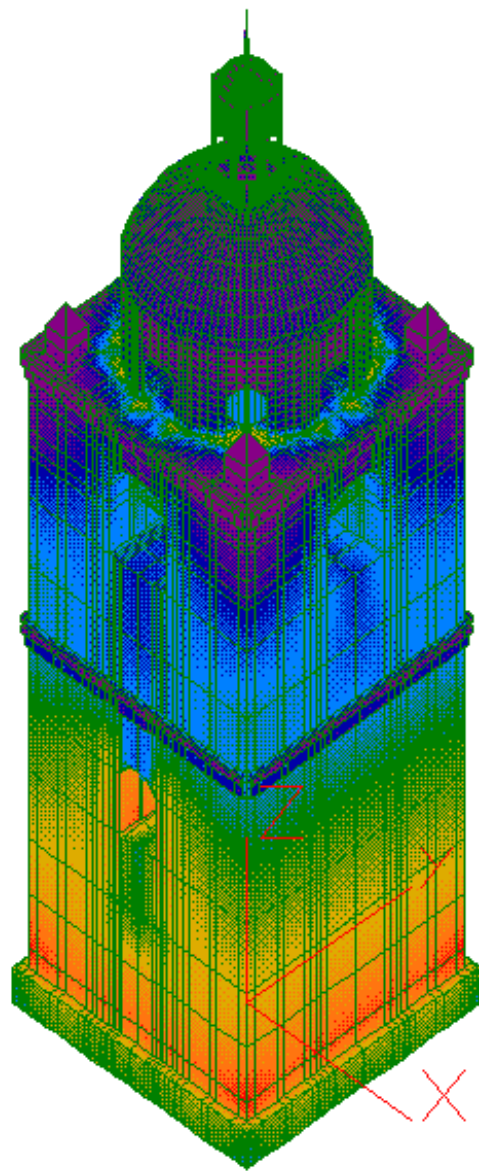


Fig. Nro. 23: ANALISIS ESTATICO LINEAL CON PESO PROPIO:  
 SUPERFICIE DE FALLA CRITERIO DE TRESCA

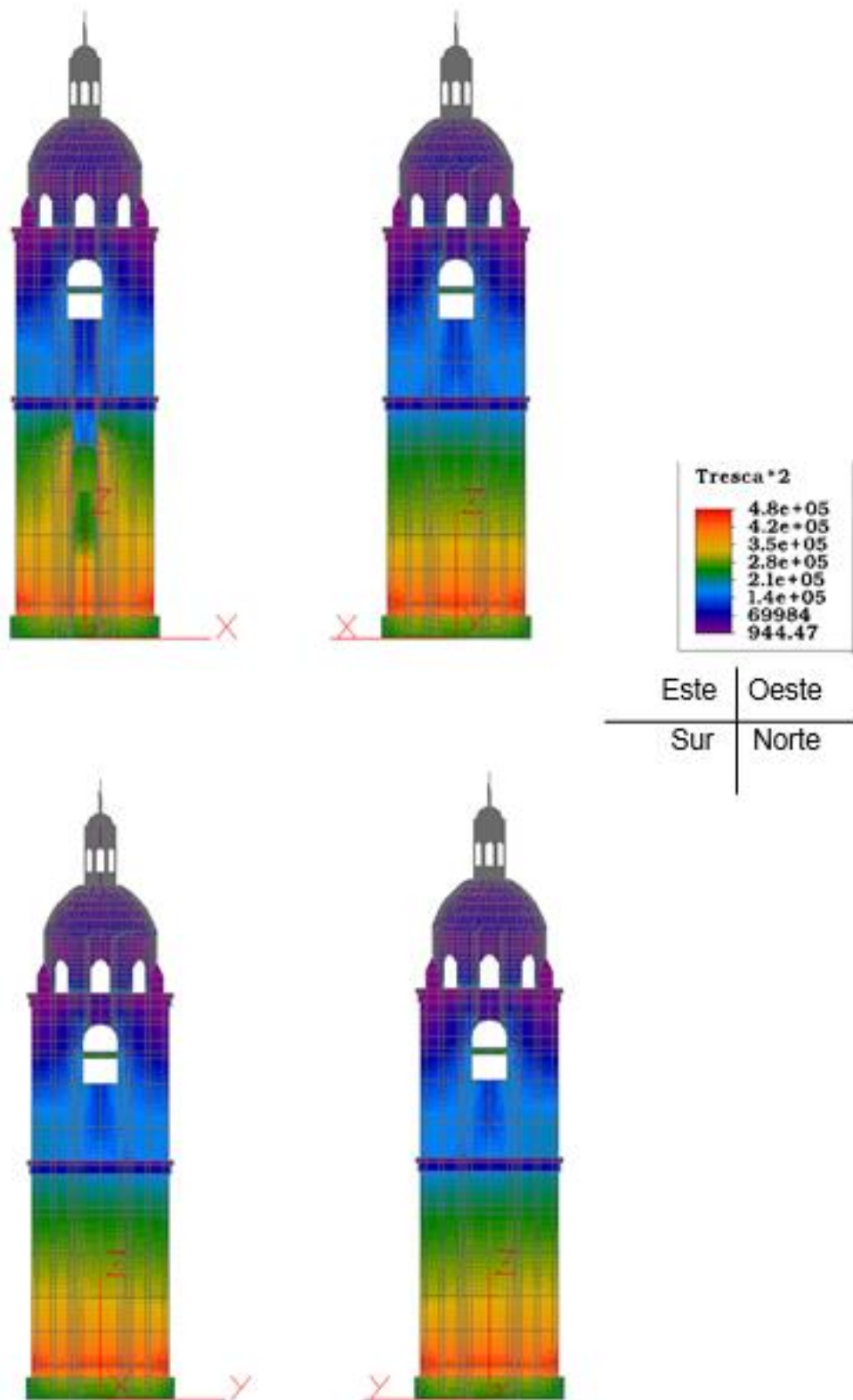


Fig. Nro. 24: ANALISIS ESTATICO LINEAL CON PESO PROPIO:  
SUPERFICIE DE FALLA CRITERIO DE TRESCA

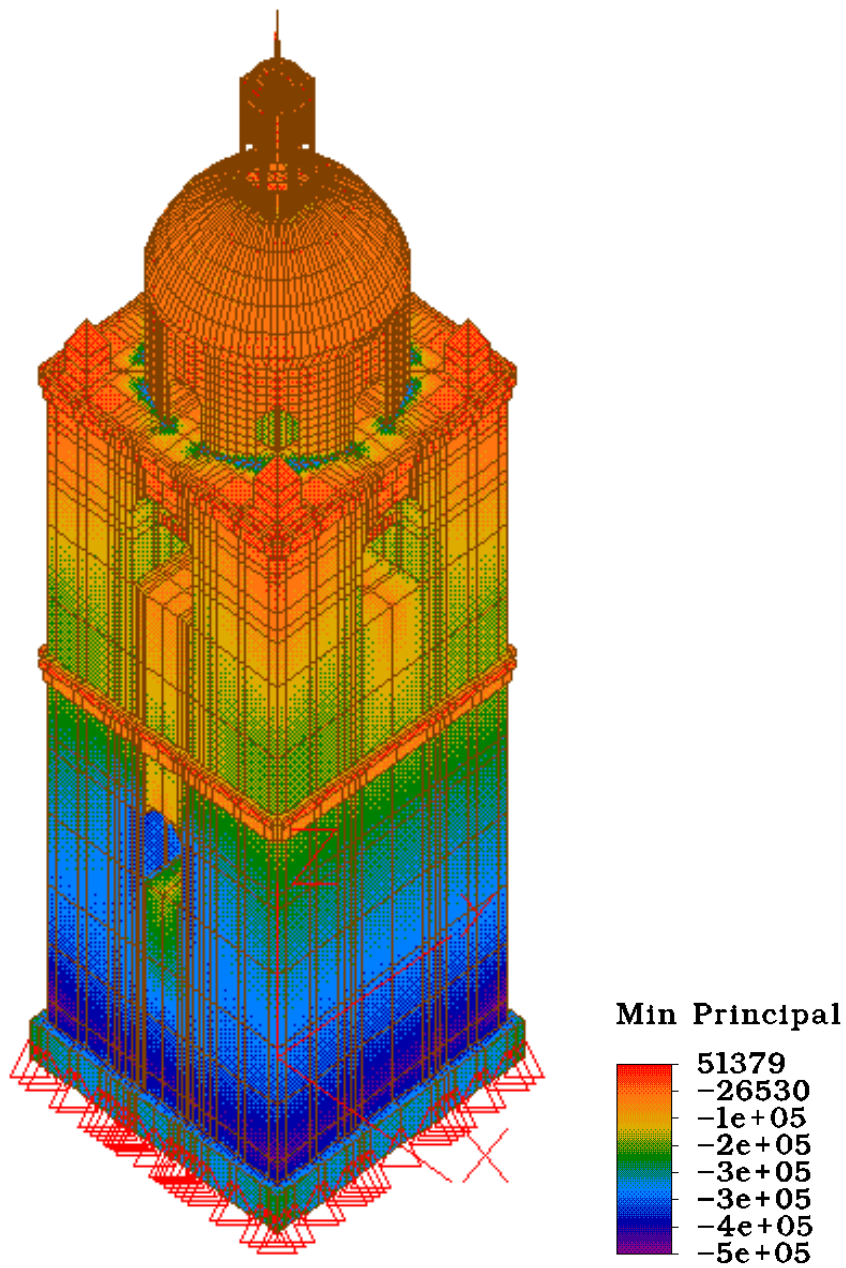


Fig. Nro. 25: ANALISIS ESTATICO LINEAL CON PESO PROPIO:  
ESFUERZOS MINIMOS PRINCIPALES

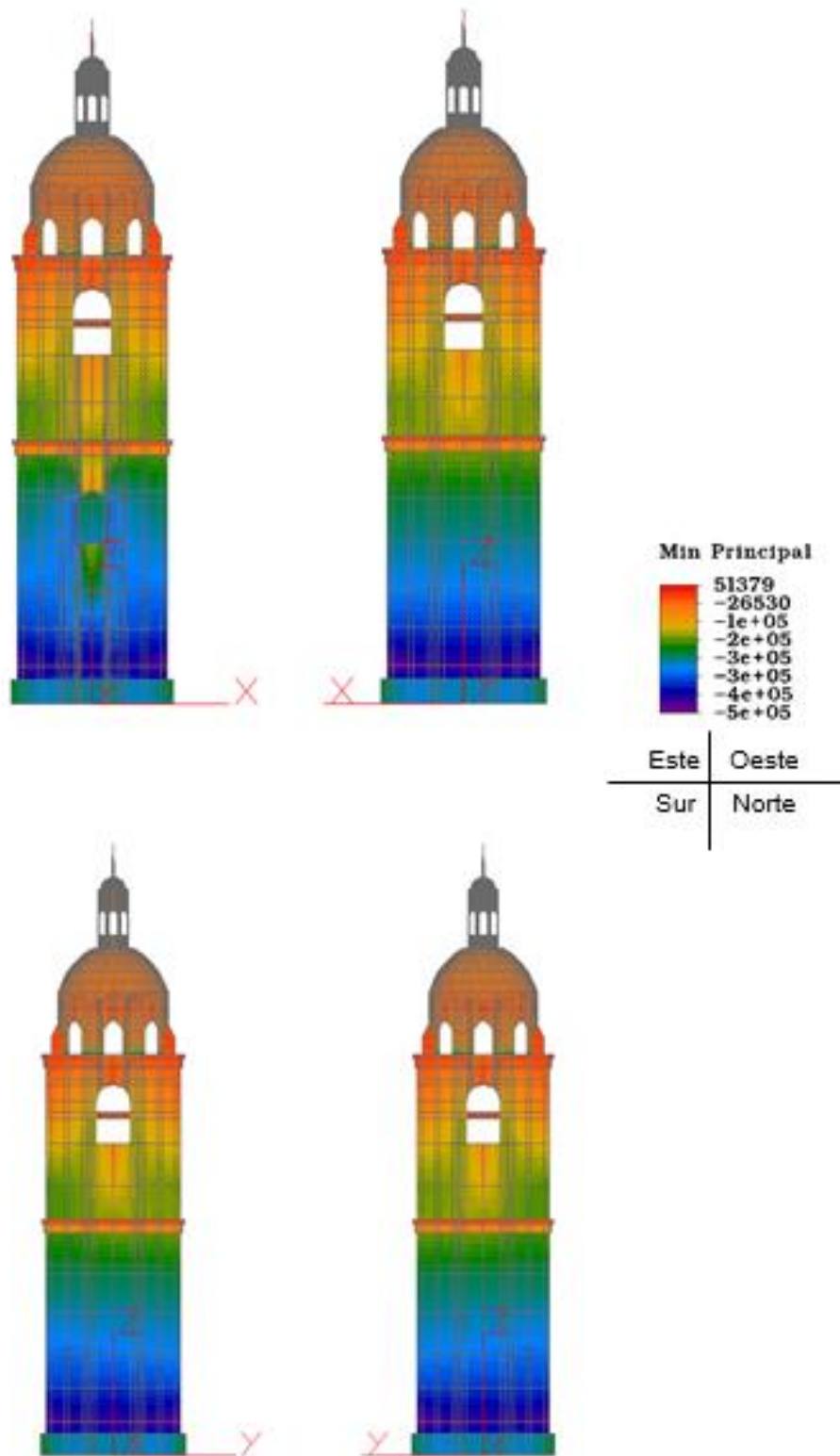
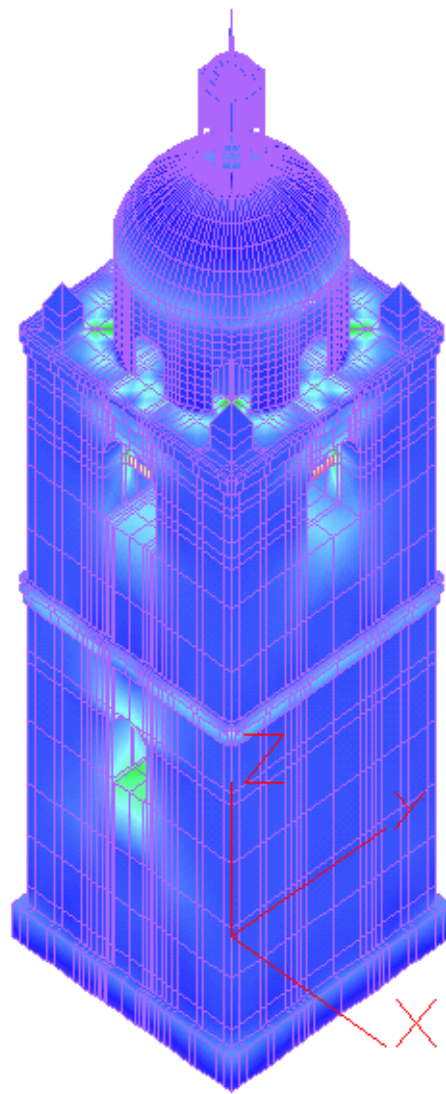


Fig. Nro. 26: ANALISIS ESTATICO LINEAL CON PESO PROPIO:  
ESFUERZOS MINIMOS PRINCIPALES





**Max Principal**

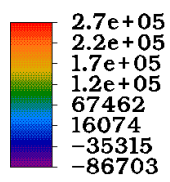


Fig. Nro. 27: ANALISIS ESTATICO LINEAL CON PESO PROPIO:  
ESFUERZOS MAXIMOS PRINCIPALES



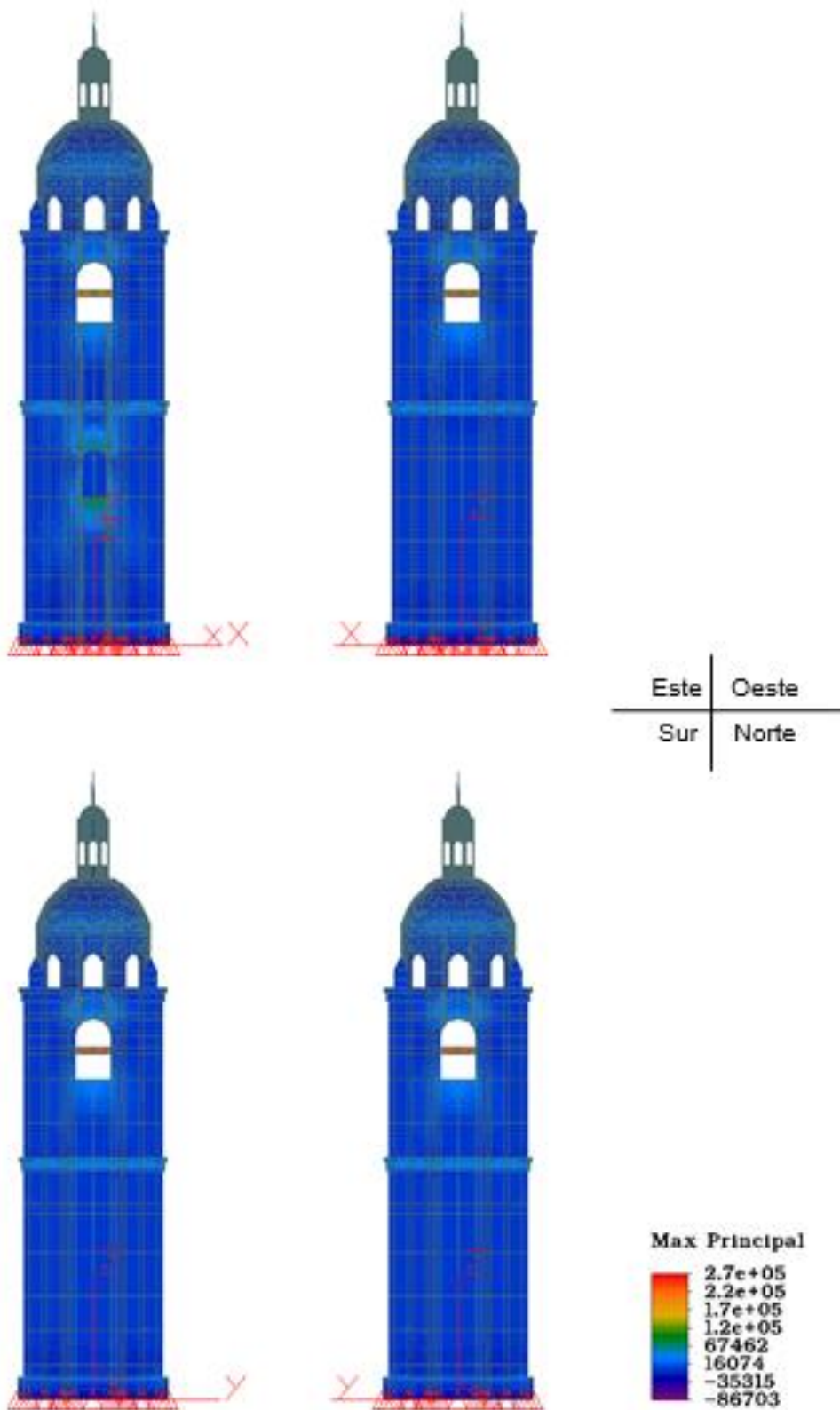


Fig. Nro. 28: ANALISIS ESTATICO LINEAL CON PESO PROPIO:  
ESFUERZOS MAXIMOS PRINCIPALES

## 5.9 ANALISIS DINAMICO LINEAL CON PESO PROPIO: MODOS DE VIBRACION

Para el análisis dinámico, se procedió a calcular los primeros 20 modos, encontrándose los 2 primeros como traslacionales en las dos direcciones, y apreciándose en el tercero la aparición de torsiones. De acuerdo al cálculo, el periodo fundamental de la estructura, es 0.36 segundos.

Se muestran las imágenes de los 9 primeros modos y sus desplazamientos.

mode number (rad/sec)	circular frequency (Hertz)	frequency (sec)	period	tolerance
<b>1</b>	<b>1.7414E+01</b>	<b>2.7715E+00</b>	<b>3.6081E-01</b>	<b>0.0000E+00</b>
2	1.7416E+01	2.7718E+00	3.6077E-01	3.7481E-16
3	4.7730E+01	7.5964E+00	1.3164E-01	2.1957E-15
4	6.5180E+01	1.0374E+01	9.6398E-02	2.9971E-15
5	6.5560E+01	1.0434E+01	9.5839E-02	1.4812E-15
6	8.4260E+01	1.3410E+01	7.4569E-02	3.2026E-15
7	9.1856E+01	1.4619E+01	6.8402E-02	1.8315E-11
8	1.1865E+02	1.8884E+01	5.2956E-02	1.0931E-09
9	1.2001E+02	1.9100E+01	5.2356E-02	5.2758E-10
10	1.2214E+02	1.9439E+01	5.1442E-02	1.4468E-11
11	1.2251E+02	1.9498E+01	5.1287E-02	2.0665E-11
12	1.4104E+02	2.2447E+01	4.4550E-02	3.7153E-07
13	1.5331E+02	2.4400E+01	4.0983E-02	8.4246E-09
14	1.5372E+02	2.4465E+01	4.0875E-02	1.4140E-08
15	1.5472E+02	2.4625E+01	4.0609E-02	6.5705E-09
16	1.6829E+02	2.6784E+01	3.7336E-02	1.0973E-06
17	1.6930E+02	2.6945E+01	3.7113E-02	1.9719E-07
18	1.8648E+02	2.9679E+01	3.3694E-02	2.0524E-06
19	1.8726E+02	2.9803E+01	3.3554E-02	1.1488E-03
20	1.8823E+02	2.9958E+01	3.3380E-02	1.6835E-04

Cuadro Nro. 6.- Valores de los periodos de los 20 primeros modos de vibración de la estructura, se hace notar el periodo fundamental de la Torre.

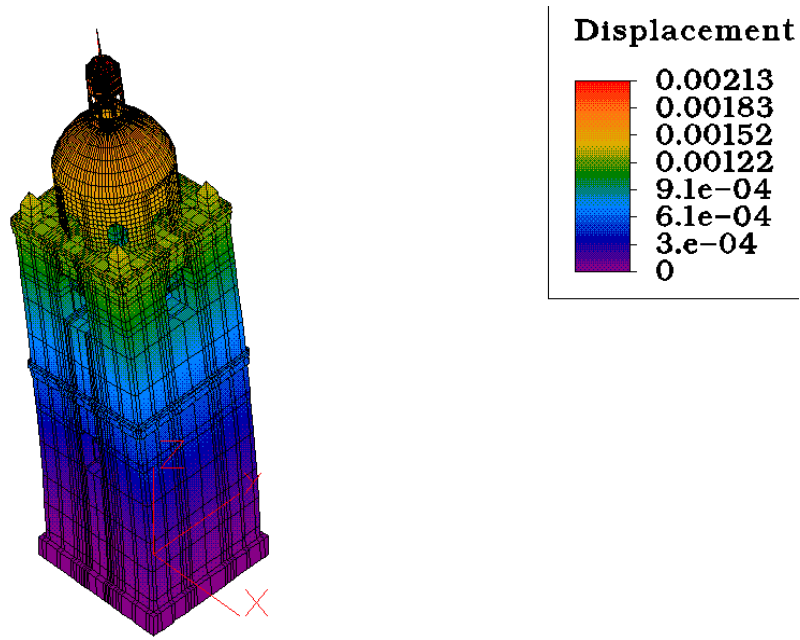


Fig. Nro. 29: PRIMERA FORMA DE MODO: DESPLAZAMIENTO EN LA DIRECCION ESTE-OESTE

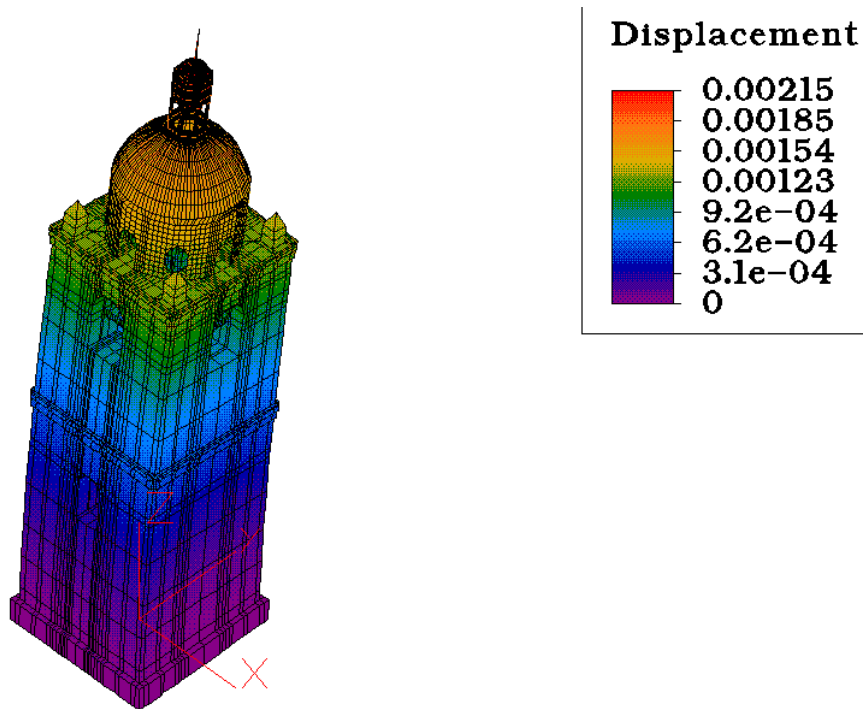


Fig. Nro. 30: SEGUNDA FORMA DE MODO: DESPLAZAMIENTO DIRECCION NORTE-SUR

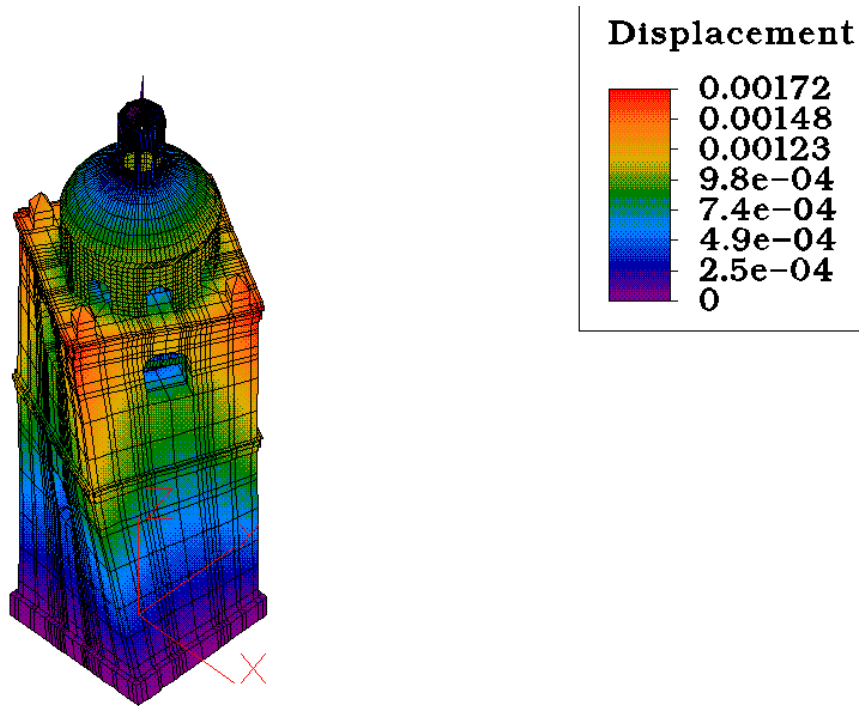


Fig. Nro. 31: TERCERA FORMA DE MODO: TORSION

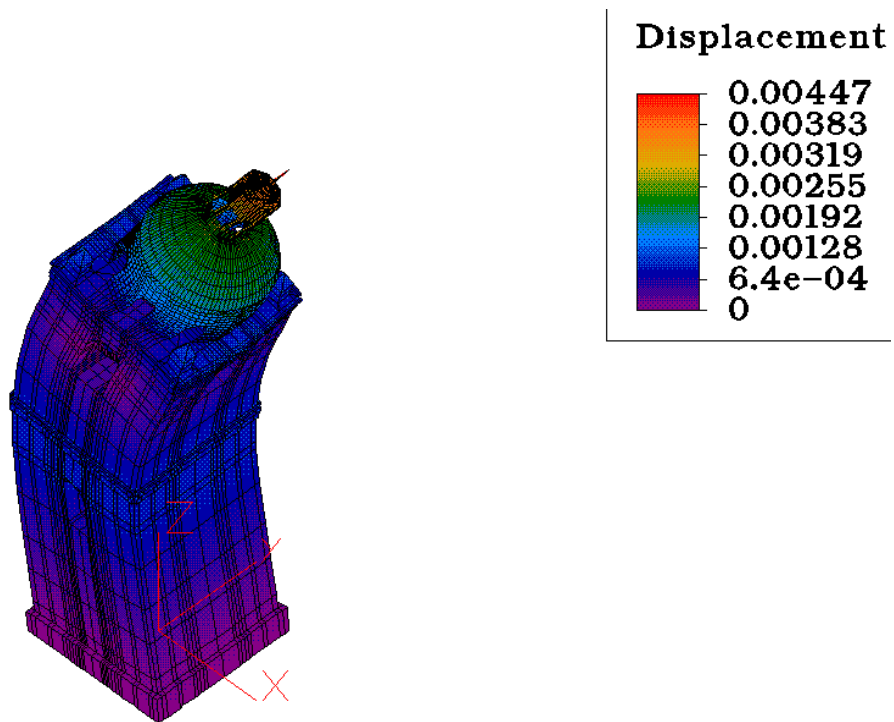


Fig. Nro. 32: CUARTA FORMA DE MODO

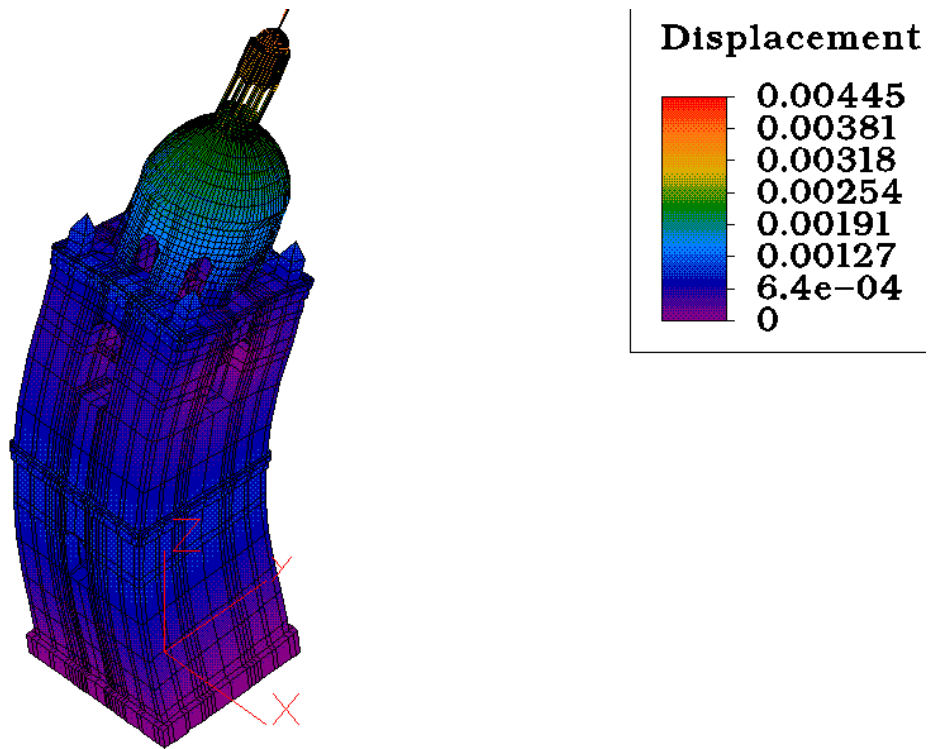


Fig. Nro. 33: QUINTA FORMA DE MODO

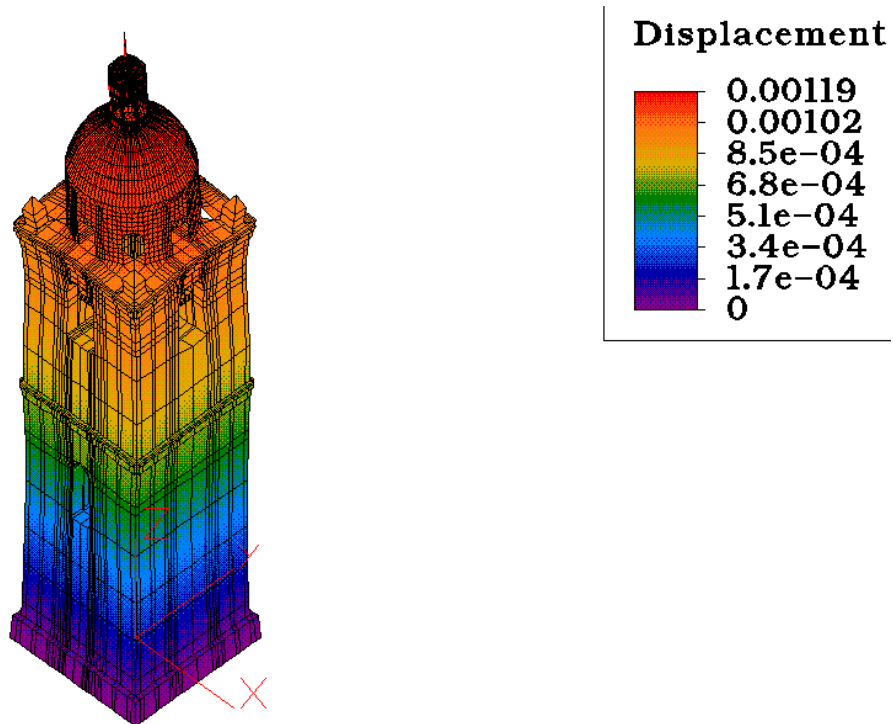


Fig. Nro. 34: SEXTA FORMA DE MODO: DESPLAZAMIENTOS VERTICALES

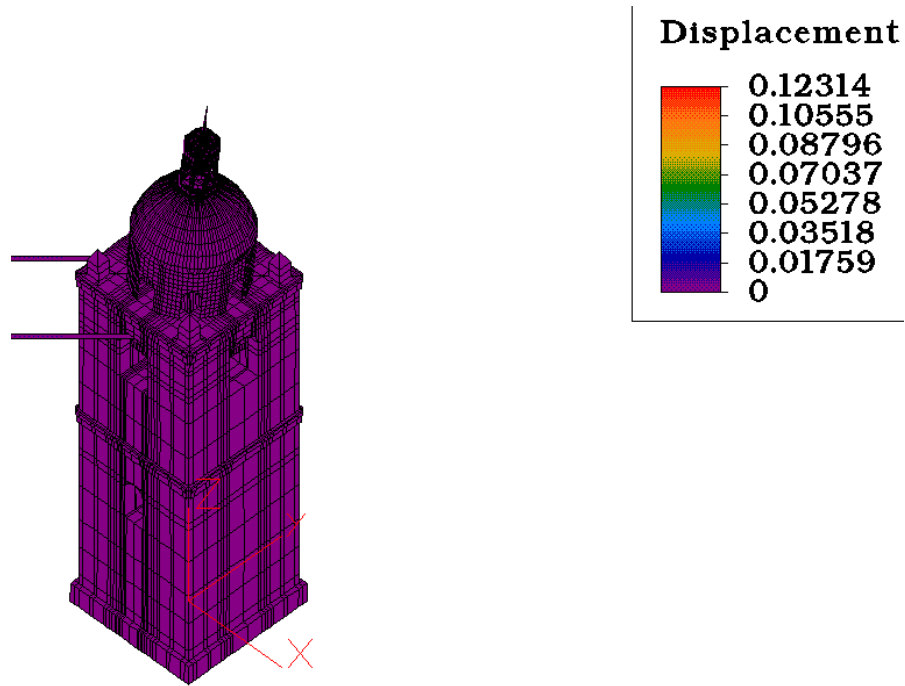


Fig. Nro. 35: SEPTIMA FORMA DE MODO: DESPLAZAMIENTOS LOCALES

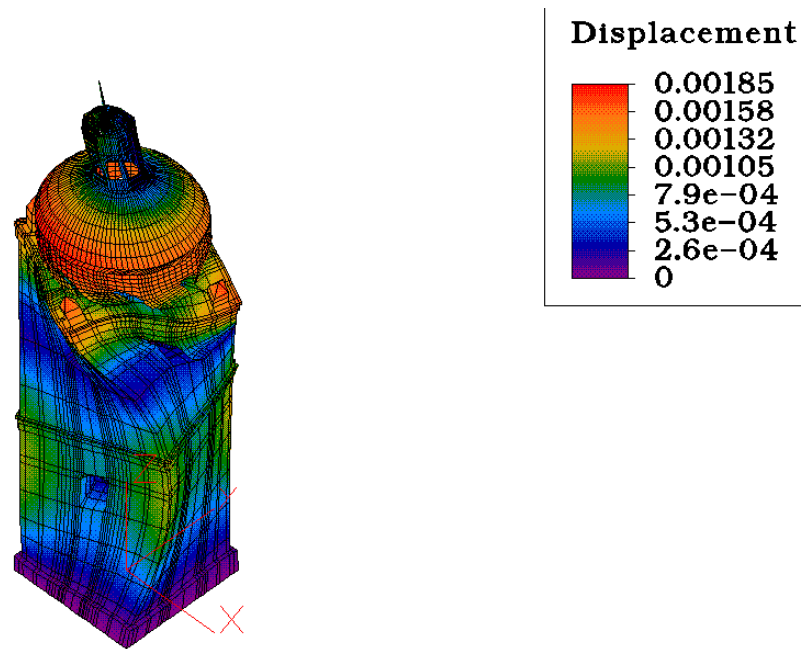


Fig. Nro. 36: OCTAVA FORMA DE MODO: TORSION

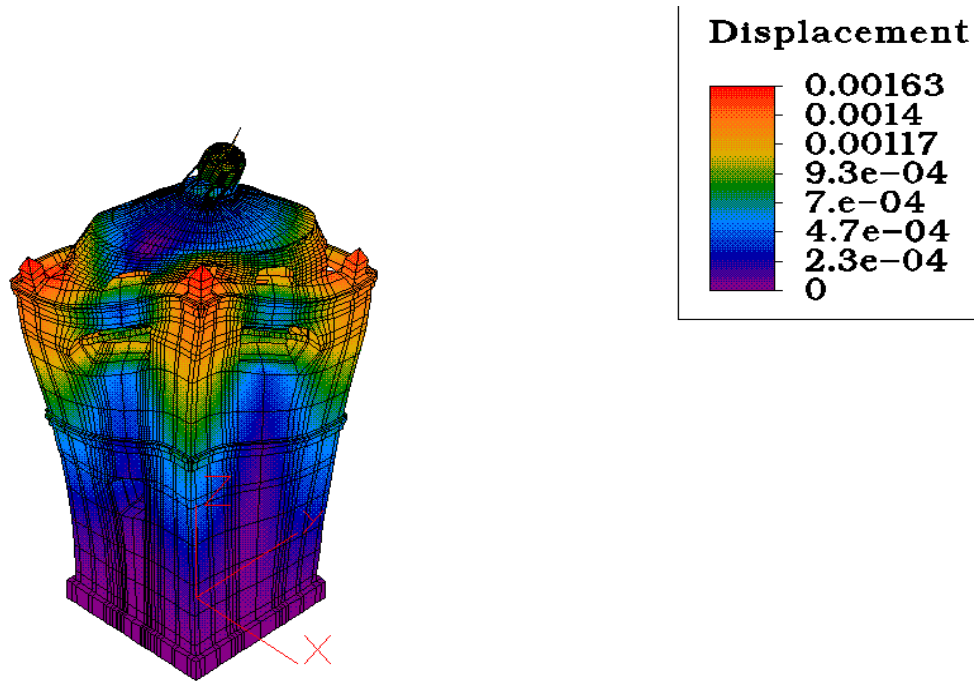


Fig. Nro. 37: NOVENA FORMA DE MODO: DESPLAZAMIENTOS  
VERTICALES

## 5.10 ESPECTRO DE RESPUESTA DE PSEUDO ACELERACIONES

Se calculo el espectro de pseudo aceleraciones de acuerdo a la norma E 030 sismorresistente. Se tomaron los valores de acuerdo a las condiciones de suelo y de material de la estructura.

<b>Z</b>	<b>0.4</b>	<b>Lima se encuentra en la Zona 3</b>
<b>U</b>	<b>1.5</b>	<b>Debido a que su colapso puede originar un riesgo adicional al encontrarse adosada a la Basílica</b>
<b>R</b>	<b>1</b>	<b>Se asumió por ser una estructura muy rígida, con materiales de baja ductilidad.</b>
<b>g</b>	<b>9.8</b>	<b>Valor de la gravedad</b>
<b>S</b>	<b>1</b>	<b>Factor de amplificación sísmica del suelo - Suelo rígido</b>
<b>Tp</b>	<b>0.4</b>	<b>Periodo de vibración del suelo</b>

Cuadro Nro. 7.- Valores usados en el cálculo del espectro de Respuesta

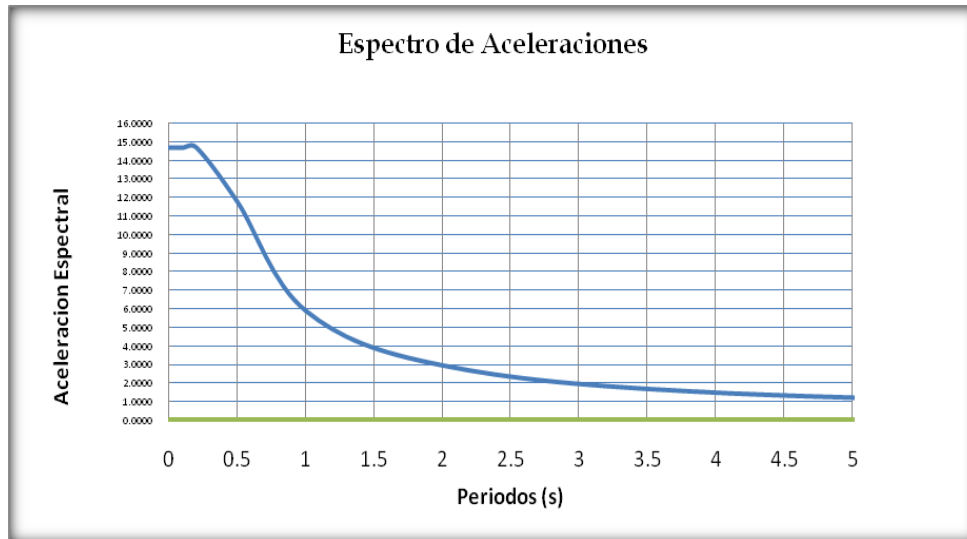
<b>T (s)</b>	<b>C</b>	<b>S, R=1</b>
0.0001	2.50	14.7000
0.01	2.50	14.7000
0.1	2.50	14.7000
0.2	2.50	14.7000
0.3	2.50	14.7000
0.4	2.50	14.7000
0.5	2.00	11.7600
0.6	1.67	9.8000
0.7	1.43	8.4000
1	1.00	5.8800
5	0.20	1.1760

Cuadro Nro. 8.- Espectro de Respuesta, R=1.



Se muestra el cálculo del espectro de pseudoaceleraciones de acuerdo a lo que indica la Norma Sismorresistente vigente, se utilizó un valor de Reducción de la fuerza sísmica igual a 1<sup>36</sup> luego se obtuvieron las respuestas de los desplazamientos de la estructura.

Cuadro Nro. 9.- Curva Aceleración Vs Periodo.



<sup>36</sup> El valor reducción de ductilidad para este tipo de estructuras no está detallado en la Norma E-030, se asumió un valor igual a 1, en virtud a la baja ductilidad de la mampostería asumimos un valor conservador, no podemos precisar valores mayores ya que la estructura no tiene elementos que le aseguren deformaciones sin llegar al colapso, además, el modelo matemático propuesto muestra que los desplazamientos calculados, a pesar de ser menores incluso que los que la norma vigente indica para estructuras de albañilería, ocasionaron valores de esfuerzo que produjeron agrietamientos en muchas zonas críticas. Se hicieron los cálculos para otros valores de R, se muestran en la siguiente tabla:

T (s)	C	S, R=1	S, R=2	S, R=3
0.0001	2.50	14.7000	7.3500	4.9000
0.01	2.50	14.7000	7.3500	4.9000
0.1	2.50	14.7000	7.3500	4.9000
0.2	2.50	14.7000	7.3500	4.9000
0.3	2.50	14.7000	7.3500	4.9000
0.4	2.50	14.7000	7.3500	4.9000
0.5	2.00	11.7600	5.8800	3.9200
0.6	1.67	9.8000	4.9000	3.2667
0.7	1.43	8.4000	4.2000	2.8000
1	1.00	5.8800	2.9400	1.9600
5	0.20	1.1760	0.5880	0.3920

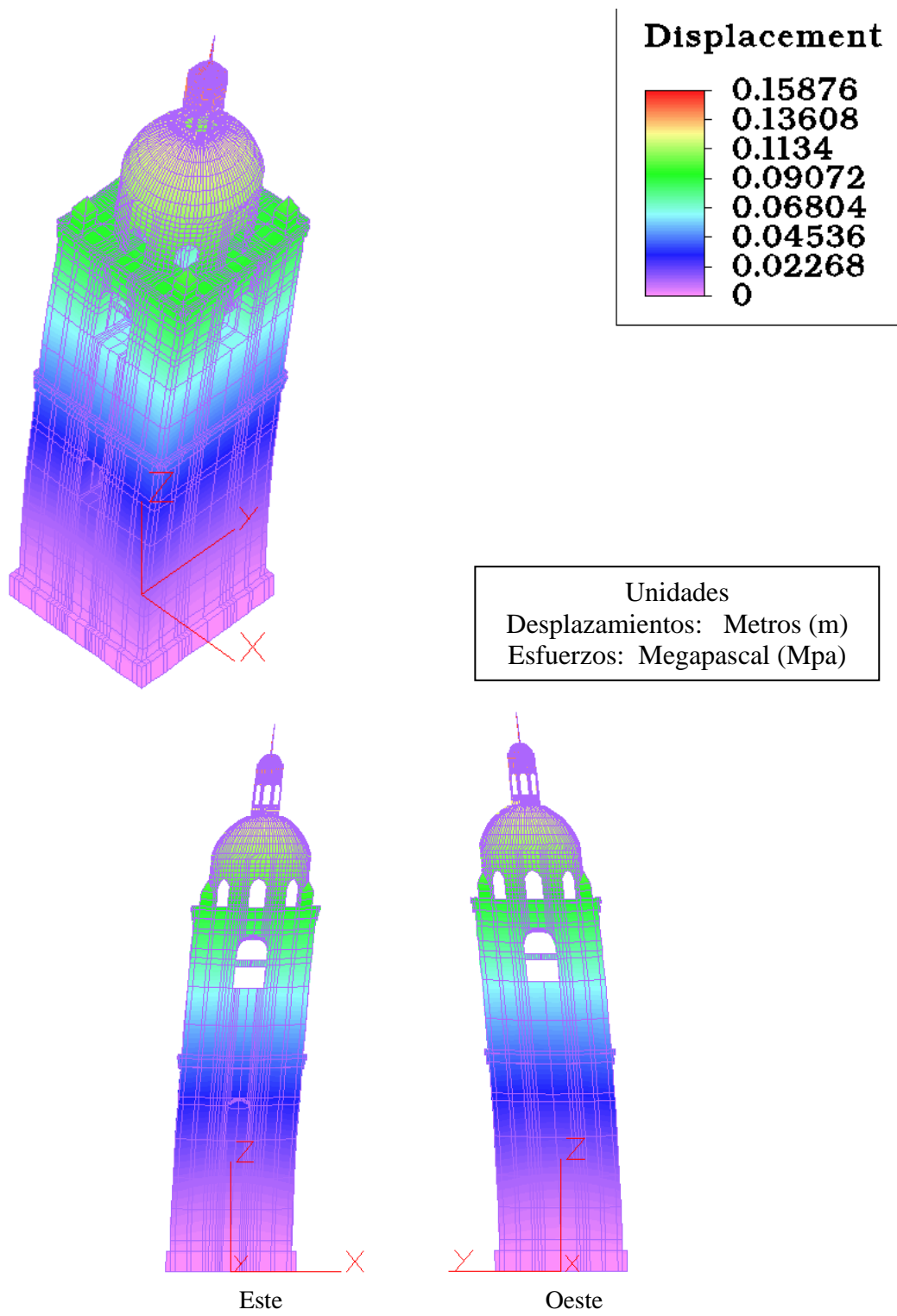


Fig. Nro. 38: DESPLAZAMIENTOS SISMICOS

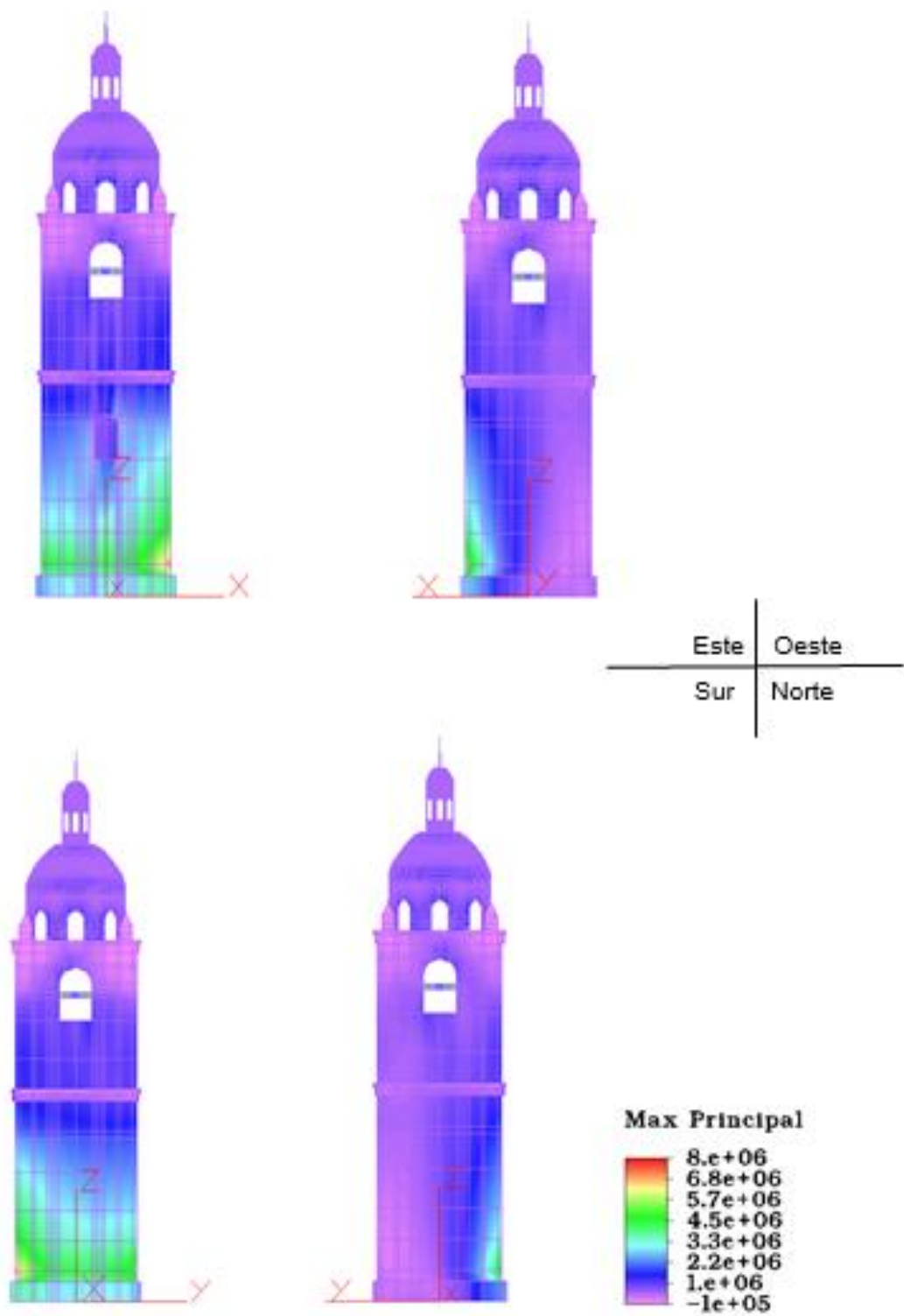


Fig. Nro. 39: ESFUERZOS MAXIMOS PRINCIPALES POR SUPERPOSICION MODAL

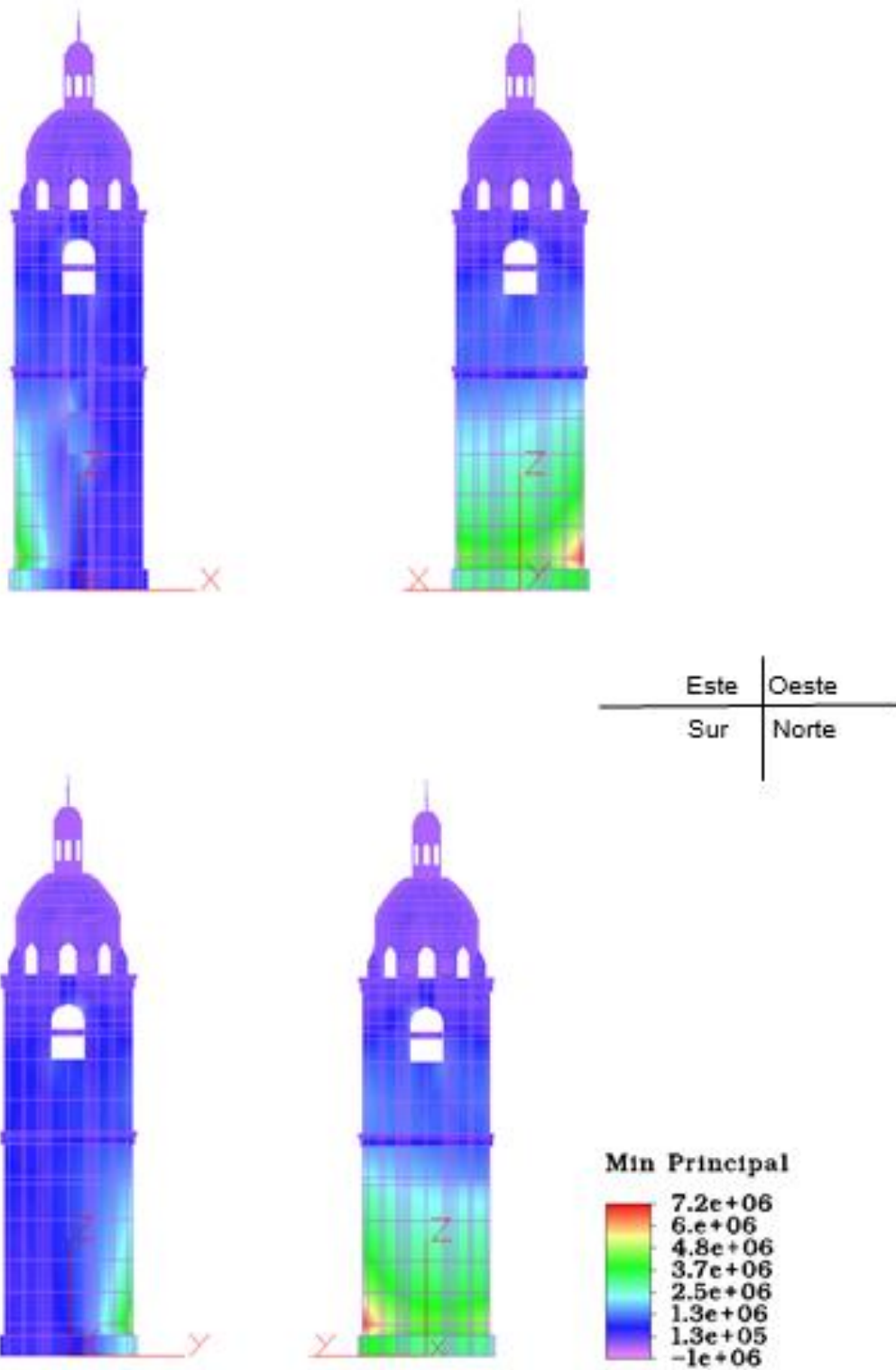


Fig. Nro. 40: ESFUERZOS MINIMOS PRINCIPALES POR SUPERPOSICION MODAL

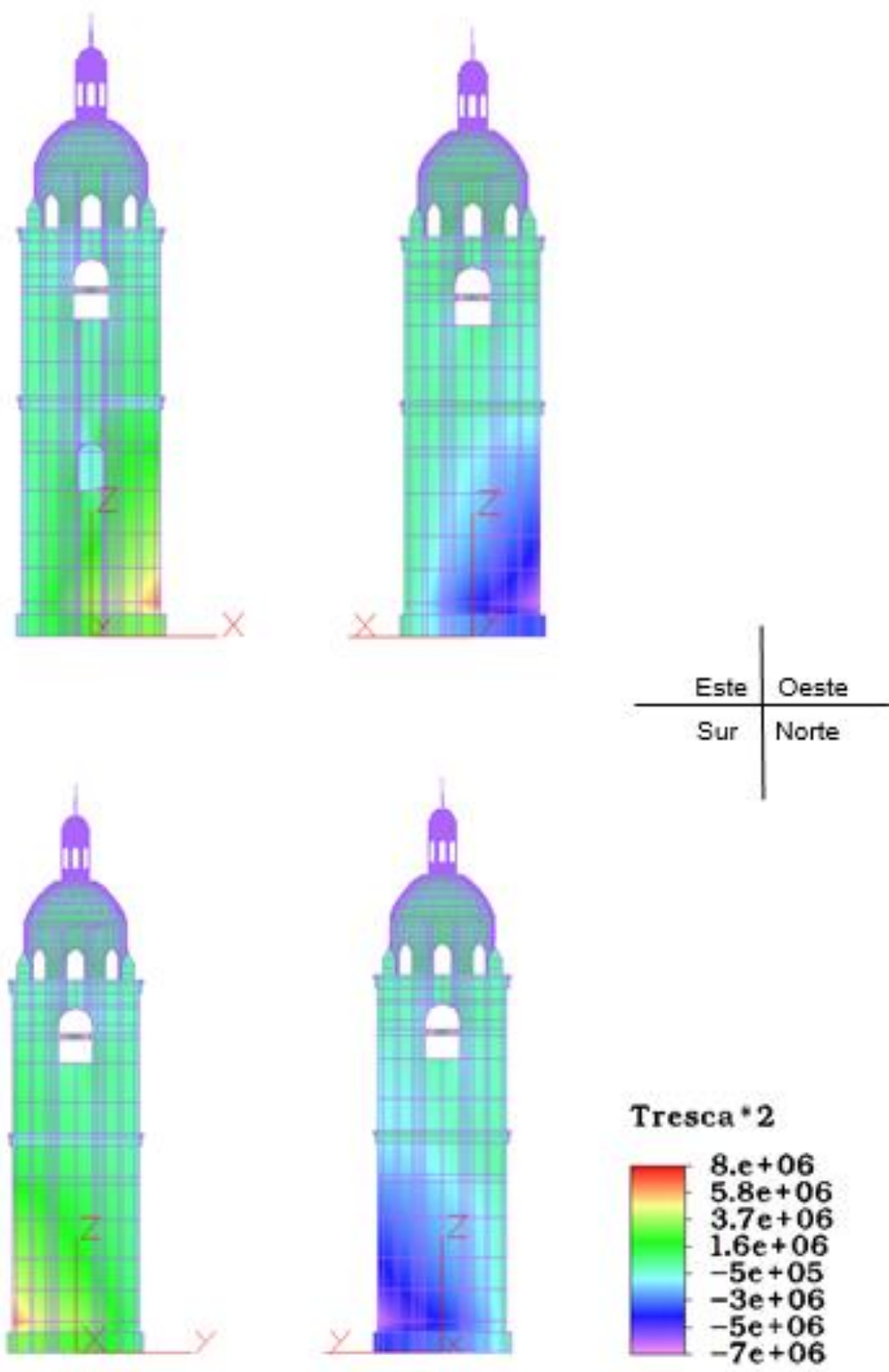


Fig. Nro. 41: ANALISIS POR SUPERPOSICION MODAL: SUPERFICIE DE FALLA CRITERIO DE TRESCA

## MODELO NRO. 2

El modelo Nro. 2 es un modelo que representa la zona de pilares y cúpula modelados con elementos tipo “brick” y tipo “plate” respectivamente, no se modeló la linterna de remate de la cúpula por estimar poco significado estructural y en su lugar se distribuyeron cargas puntuales equivalentes a su peso, los pilares se modelaron empotrados en su base.

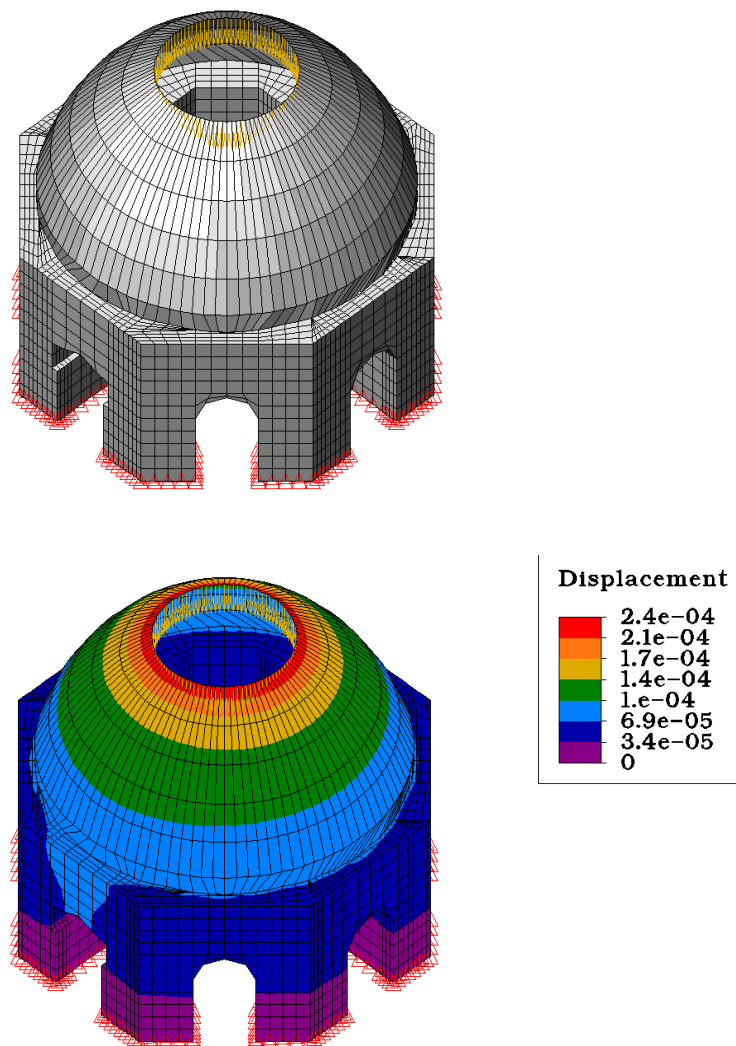


Fig. Nro. 42.- Desplazamientos en la zona de pilares y cúpula por peso propio, los valores son relativamente bajos dado el poco peso de la cúpula respecto de los pilares rígidos de gran volumen.

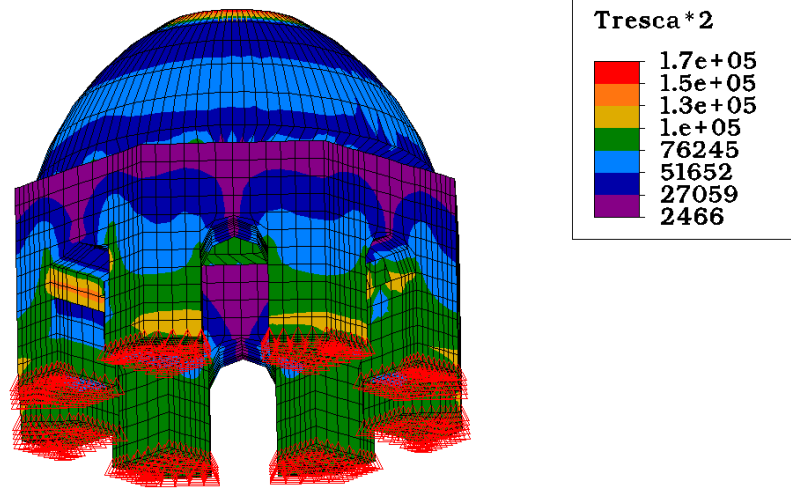


Fig. Nro. 43.- Esfuerzos en la zona de pilares y cúpula, nótese que esfuerzos de tracción superiores a 0.50 kg/cm<sup>2</sup> fracturaron los cimborrios y ocasionaron desprendimientos, lo que obligo al apuntalamiento de todos los arcos de esta zona.



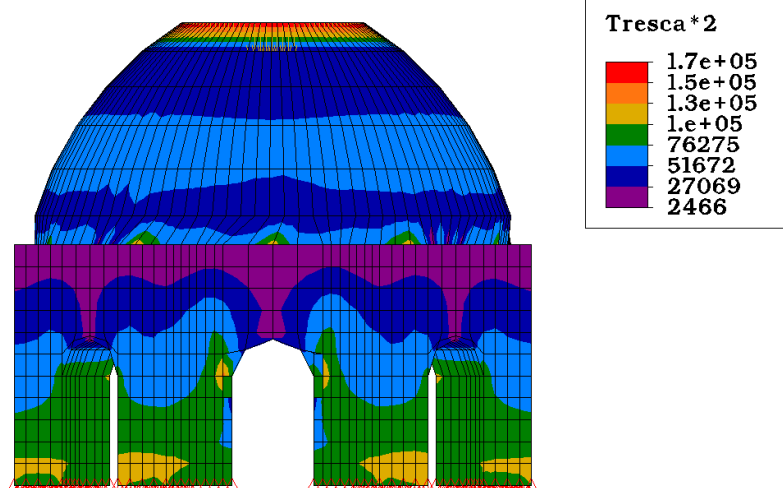


Fig. Nro. 44.- Falla por corte de pilares, para esfuerzos superiores a  $0.70 \text{ kg/cm}^2$  según el diagrama de esfuerzos, nótese las piezas de madera dentro de los pilares de ladrillo.



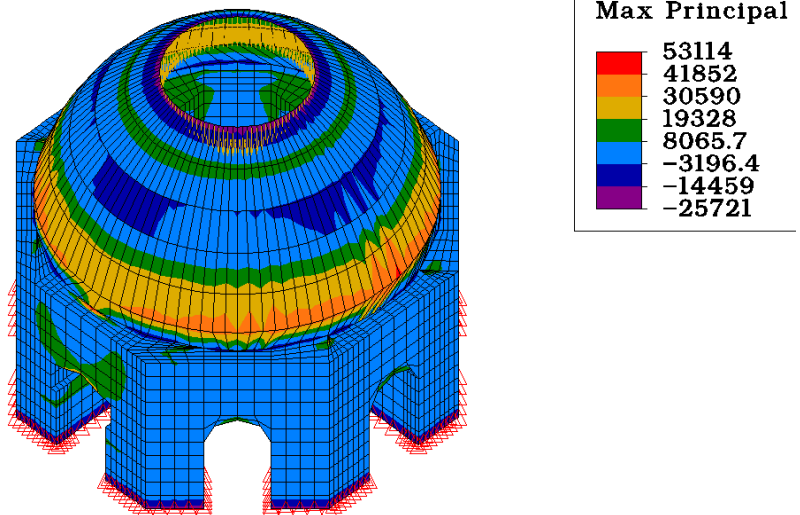
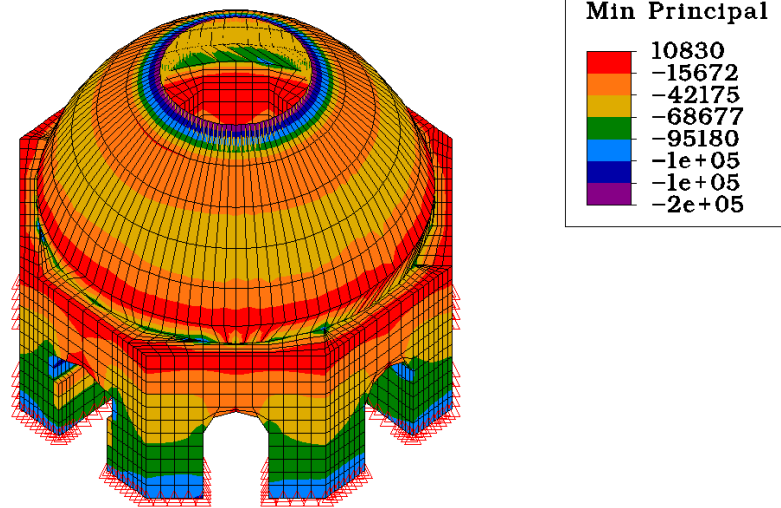


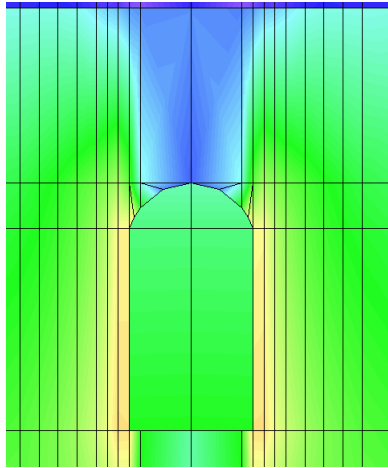
Fig. Nro. 45.- Esfuerzos máximos principales, con tracciones superiores a 0.3 kg/cm<sup>2</sup> cerca de la zona de transición o cimborrio.

## **5.11 ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO SISMORRESISTENTE DE LA TORRE DE LA MERCED**

La capacidad sismorresistente de la Torre de la Merced está sustentada en su peso. El momento de volteo a la que fue sometida debido a la fuerza sísmica fue soportado por la carga axial y por las fricciones que se originan por la significativa masa de los muros de la Torres, 2000 Toneladas concentradas en 64 m<sup>2</sup>.

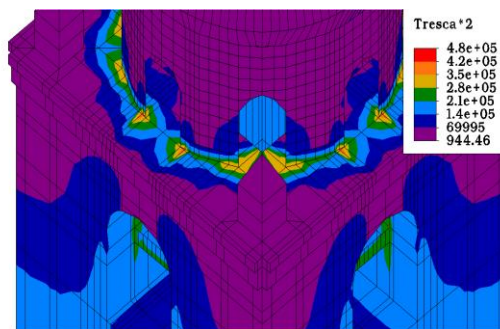
La Torre está constituida por muros de albañilería de ladrillo y mortero, las compresiones por peso propio pueden ser soportadas por estos elementos estructurales sin llegar al aplastamiento en su base, a esto contribuye el grosor de sus muros de dos metros y al mortero de cal y arena con sus importantes capacidades mecánicas, sin embargo, para tracciones y cortantes de valor medio y alto el mortero no estuvo en condiciones de resistirlas.

Los muros norte y sur fueron sometidos a la misma fuerza cortante, no obstante la respuesta de ambos muros fue distinta, el muro sur unido a la nave principal de la basílica sea por fricción o por una real unión con los muros de la nave tiene una rigidez distinta a la del muro norte, correspondiéndole a misma fuerza desplazamientos distintos, esta diferencia origina Fallas por corte que se observan en los muros Este y Oeste en el sentido longitudinal de arriba hacia abajo, siendo el muro Este el más afectado debido a la presencia de un vano de 2.80 metros de alto zona en la cual los esfuerzos se concentran agrietando fuertemente el arco formado en el lugar.



Los pilares en la zona superior tuvieron otro mecanismo de comportamiento similar, las fuerzas cortantes se repartieron uniformemente aunque el valor era elevado para la baja capacidad de la albañilería a resistirlas y Fallaron. La repartición de cortantes entre los elementos se puede dar en teoría de manera homogénea, no obstante se originaron desplazamientos diferentes entre ellos, lo que se origina por múltiples factores, con la consecuente aparición de tracciones en la zona superior de los arcos por esta desigualdad, produciéndose las grietas observadas. En este mecanismo también el peso mantuvo unido al grupo por la importante carga axial y el valor de fricción entre los elementos agrietados.

La cúpula muestra compresiones aceptables y se comporta bien cuando sus elementos se mantienen comprimidos, sin embargo para tracciones pequeñas los elementos no resistieron y colapsaron, así mismo los arranques de la cúpula fallaron por falta de refuerzo que resista los empujes de la cúpula por peso propio.



En general el peso de la estructura ha cumplido un papel importante para evitar el colapso total de toda la edificación, a pesar de los agrietamientos en zonas críticas como pilares y sobre los arcos, y a lo largo de los muros este y oeste la estructura se mantuvo unida y por medio de las fisuras obtuvo cierto nivel de ductilidad a través de estas disipó la energía que aunque de un valor incierto, seguramente pudo haber sido la explicación para que la estructura no haya llegado a niveles de colapso irreversibles<sup>37</sup>.

---

<sup>37</sup> Los valores de desplazamiento máximo no están detallados en la Norma E-030 para este tipo de estructuras, sin embargo para fines académicos se presenta el siguiente cuadro, para un factor de Reducción de Fuerza Sísmica igual a 1, donde se observa que los desplazamientos máximos calculados, no exceden los especificados por la Norma E-030.

Los análisis lineales, en este punto nos proporcionan datos precisos pero muestran limitaciones para mostrar el comportamiento real de la edificación frente a sollicitaciones sísmicas, un análisis de comportamiento no lineal del material se muestra como una opción útil para futuros estudios.

---

<b>Desplazamiento Sísmico (m)</b>	<b>h (m)</b>	<b><math>\Delta/h</math> (m)</b>	<b>Norma E-030</b>
0.15876	36.00	0.0044	0.005
0.13608	30.00	0.0045	0.005
0.1134	27.50	0.0041	0.005
0.09072	23.80	0.0038	0.005
0.06804	18.50	0.0037	0.005
0.04536	14.00	0.0032	0.005
0.02268	8.50	0.0027	0.005

## Capítulo 6

# OBSERVACIONES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 OBSERVACIONES

1. De acuerdo al análisis podemos estimar que el valor de la resistencia a la compresión de las unidades estaría dentro del orden de lo 25-30 kg/cm<sup>2</sup> y su resistencia a la tracción en el orden de 0.5 kg/cm<sup>2</sup> y 1 kg/cm<sup>2</sup> los valores son consistentes y cercanos a los valores de los muros de arcilla de su tipo en la actualidad ya que son materiales de confección artesanal, sin embargo es necesario realizar ensayos normalizados para obtener valores de resistencia más precisos.
2. El periodo fundamental de la estructura es 0.36 segundos. Los modos de vibración fueron principalmente de desplazamientos laterales y los de torsión fueron en menor cantidad.
3. El esfuerzo obtenido en la base del edificio es aceptable dada las condiciones de suelo de la ciudad de Lima puede llegar a 4 kg/cm<sup>2</sup> <sup>38</sup> de capacidad de carga.
4. Se tomó como valor de reducción de fuerza sísmica R igual a 1, es decir completamente elástico, debido a su rigidez, sin embargo este valor debe ser estudiado convenientemente<sup>39</sup>.

### 6.2 CONCLUSIONES

1. El peso de los muros de la Torre de la Basílica de la Merced fue el factor importante para que haya resistido los valores de fuerza cortante por sismo sin llegar al colapso total.
2. Los análisis elásticos en este trabajo se ven limitados, solo nos proporcionan valores aproximados y a la vez muy útiles como se ha observado con los registros de daños. Sería conveniente que utilizando los registros de daños se puedan obtener las curvas de capacidad del monumento con análisis inelásticos.

---

<sup>38</sup> MARTÍNEZ VARGAS Alberto, Conglomerado de Lima Metropolitana en Cimentaciones, Conferencia Internacional de Ingeniería Sísmica, Lima 2007, p 16.

<sup>39</sup> Ver anotación en la página 94.

3. El análisis de muros como de la Torre de la Basílica de la Merced requeriría hacer un cálculo más preciso del factor de reducción de fuerza sísmica  $R$ , tomando en cuenta las disipaciones de energía producto de los agrietamientos progresivos en la estructura.
4. Podemos afirmar, que el comportamiento de los muros cuya resistencia al cortante está basada en su peso con un valor considerablemente alto y sin llegar al aplastamiento del material que lo conforma, es similar al de los muros de gravedad y no como muros típicos de albañilería o muros de corte a los que se refiere la Norma E 030.
5. Debe tomarse en cuenta posibles efectos de resonancia en la estructura, ya que el periodo fundamental del edificio (0.3 segundos) y el periodo del suelo (0.4 segundos) son similares, se necesitarían mediciones en los alrededores de la estructura de la Torre, y recopilar los datos de las vibraciones del suelo y del edificio para mayor certeza de las observaciones.
6. Es posible que los muros que conforman la Torre, por lo visto en los análisis por peso propio y cuyas superficies de Falla coinciden con las fracturas y daños observados, teniendo en cuenta que los periodos de suelo y de la estructura son cercanos, que una vez que la estructura fue sometida a los dos sismos más representativos para Lima en el siglo XX, fue fracturada, por los desplazamientos extremos por sismo, sin embargo, lo cierto es, que una vez agrietada la estructura, ésta cambio de periodo, adquiriendo cierto grado de ductilidad, pudiendo disipar mejor la energía sísmica a la que fue sometido a través de estas grietas y superficies de contacto, acercándose a niveles de colapso, que sin embargo no ocurrió por causa del gran peso de la estructura y a otros factores que son necesarios investigar.
7. Deben considerarse las características de los materiales que conforman la estructura en estudio, teniendo en cuenta que las unidades de albañilería con el mortero de cal y arena no tiene a la fecha un estudio adecuado de su comportamiento en detalle, las características mecánicas de este binomio estructural merece atención sobre todo por el mortero de cal y el aumento de su capacidad estructural en el tiempo.
8. Finalmente se observa que el análisis de monumentos como la Torre no puede limitarse a lo indicado en la normativa vigente y debe ser analizado utilizando criterios de desempeño frente a demandas sísmicas en el tiempo de manera que pueda garantizarse su buen comportamiento frente a eventos extremos, siempre teniendo en cuenta lo indicado en las cartas y normativas mundiales de conservación del Patrimonio.

### **6.3 RECOMENDACIONES**

1. Es necesario que para analizar las edificaciones de carácter histórico se utilicen análisis inelásticos o un análisis tiempo historia, del cual se obtengan resultados más representativos del verdadero comportamiento estructural de la edificación.
2. Es importante reunir toda la documentación histórica a la que se pueda tener acceso de manera que puedan contribuir a enriquecer nuestras referencias para realizar un modelo matemático consistente.
3. El registro y cuantificación de daños causados por los sismos luego de estos eventos deberían tomarse como medidas inmediatas por su contribución a profundizar las investigaciones en el futuro.
4. Las autoridades dedicadas a la conservación del Patrimonio deberían crear equipos multidisciplinarios para formar conciencia acerca del valor histórico del patrimonio arquitectónico de nuestro pasado ya que enriquecen a la sociedad cultural y socialmente.
5. Finalmente es necesario mejorar en la Ley de Protección del Patrimonio Histórico Peruano para que se incluyan los lineamientos técnicos necesarios para efectuar de manera correcta los trabajos de conservación.

### **6.4 REFORZAMIENTOS**

Los reforzamientos que se plantean necesarios de acuerdo al análisis estructural efectuado son los siguientes:

1. Conectar toda la estructura de la Torre longitudinal y transversalmente de tal forma que las fuerzas por sismo sean soportadas uniformemente de manera que se puedan disminuir las diferencias en los desplazamientos, y de esta forma evitar las tracciones y cortantes en los muros y sobre los arcos y vanos.
2. Reforzar la clave de los arcos de la parte superior de la Torre, de manera que puedan soportar los esfuerzos que se muestran en el presente trabajo, elementos de acero o concreto con la cantidad de refuerzo requerida para soportar los esfuerzos.
3. En la zona de pilares en la parte superior de la Torre, se necesitan refuerzos para poder absorber los esfuerzos concentrados por la gran masa de muros de la parte inferior, confinándolas con refuerzo suficiente para soportar las sollicitaciones por corte que se han calculado.
4. La zona de la cúpula de la Torre, requería refuerzo en los arranques, ya que se originan empujes por el peso, la cúpula debe ser de un material de bajo peso y poder soportar además los esfuerzos por corte que se aprecian en los análisis sísmicos cuando la cúpula comienza a deformarse, estos esfuerzos serían absorbidos sin problemas si se reemplaza por una membrana de concreto u otro material similar, siempre dentro de las recomendaciones y criterios que se rigen de acuerdo a las cartas de Conservación del Patrimonio.



# BIBLIOGRAFIA

## I. TEXTOS CONSULTADOS:

1. BONETT, Ricardo. Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de Edificios. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 2003.
2. TIMOSHENKO, S. Resistencia de Materiales. Espasa-Calpe S.A. Madrid España 1957.
3. BARRIGA, Víctor. El Templo de la Merced de Lima. Documentos para la Historia del Arte. Establecimientos Gráficos La Colmena. Arequipa 1944.
4. SILGADO FERRO, Enrique. Instituto de Geología y Minería, Boletín Nro. 3, Serie C, Geodinámica. Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú 1513-1974, Lima, Enero 1978.
5. SILGADO FERRO, Enrique, Investigación de sismicidad histórica en la América del Sur en los siglos XVI, XVII, XVIII y XIX. Concytec. Lima Perú 1992
6. MELI PIRALLA, Roberto. Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos Fundación ICA-México 1988 Primera Edición 220 p.
7. MORENO GONZALES, Rosangel: Evaluación del riesgo sísmico en edificios mediante análisis estático no lineal: Aplicación a diversos escenarios sísmicos de Barcelona, Tesis Doctoral Barcelona 2006, [versión electrónica].
8. JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA. Manual para diseño de Maderas del Grupo Andino. Lima. 1982

## II. ARTÍCULOS DE REVISTAS

1. GONZÁLEZ MORENO-NAVARRO Antoni, Restaurar es reconstruir. (Barcelona) e-rph nº 1, diciembre 2007.

2. BERNAL Isabel, TAVERA Hernando, Aceleraciones Máximas Registradas en la Ciudad de Lima: Sismo de Pisco del 15 de Agosto del 2007, Dirección de Sismología-Instituto Geofísico del Perú .
3. MARTÍNEZ VARGAS Alberto, Conglomerado de Lima Metropolitana en Cimentaciones, Conferencia Internacional de Ingeniería Sísmica, Lima 2007, p 16.
4. AGUILAR BARDALES, Zenón, ALVA HURTADO Jorge E. MICROZONIFICACION SISMICA DE LIMA- CISMID-UNI
5. ALVA HURTADO, Jorge, CHING S. CHANG - Características de los Terremotos en Lima y alrededores Ponencia presentada en el III Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Marzo 29-31, 1978, Lima, Perú,
6. Evaluación Estructural y comportamiento de las reparaciones efectuadas a Edificaciones Históricas, O. De la Torre Rangel y otros, Revista de Ingeniería Sísmica No. 70 1-26 Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica (2004)
7. CISMID- CENTRO PERUANO JAPONES DE INVESTIGACIONES SISMICAS Y MITIGACIÓN DE DESASTRES, EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LA CATEDRAL DEL CUSCO. 2001.
8. MELI PIRALLA, Roberto LA REHABILITACION DE LA CATEDRAL METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO En Revista Digital Universitaria UNAM, 30 de Junio del 2001.
9. PROGETTO & PUBBLICO: 5 GRADI E MEZZO A DRITTA , 13 / Abril 2004, pp. 55-59, Editora BE-MA – Italia, Artículo sobre la consolidación de la Torre de Pisa – Italia.

### **III. PÁGINAS WEB:**

1. Web del Instituto Nacional de Cultura del Perú,  
<http://inc.perucultural.org.pe>.
2. [www.salvarpatrimonio.org](http://www.salvarpatrimonio.org)

3. Web de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.

#### **IV. INSTITUCIONES CONSULTADAS**

1. Centro Regional de Sismología de América del Sur - CERESIS
2. Centro Peruano - Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres CISMID- Universidad Nacional de Ingeniería.
3. Centro de Tecnologías Avanzadas de Manufactura CETAM- Pontificia Universidad Católica del Perú.
4. Archivo General de la Nación - Dirección Nacional de Archivo Histórico- Ministerio de Justicia.
5. Biblioteca de Ingeniería de la Universidad Ricardo Palma.