

PROYECTO



Contrato No. 4600051633 DE 2013
**CONSULTORÍA Y ASESORÍA TÉCNICA A LA
ALCALDIA DE MEDELLIN EN EL CASO DEL
COLAPSO DEL EDIFICIO SPACE EN MEDELLÍN Y
SOBRE EL ESTADO Y SEGURIDAD DE OTRAS
EDIFICACIONES EN LA CIUDAD**

INFORME FINAL - FASE III

CONCEPTO TÉCNICO EN RELACIÓN A LAS CAUSAS MÁS PROBABLES DEL COLAPSO DEL EDIFICIO SPACE



Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería

BOGOTA – COLOMBIA

OCTUBRE 3 DE 2014

TABLA DE CONTENIDO DEL INFORME

- 1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES**
- 2 OBJETIVOS Y ALCANCE**
- 3 INFORMACIÓN DISPONIBLE**
- 4 ANÁLISIS DE LAS POSIBLES CONDICIONES EXTERNAS QUE PODRÍAN EXPLICAR EL COLAPSO DEL EDIFICIO**
- 5 ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES ESTRUCTURALES QUE PODRÍAN EXPLICAR EL COLAPSO DEL EDIFICIO**
- 6 ESTUDIO DE LAS CONDICIONES GEOTÉCNICAS EXISTENTES**
- 7 CONCLUSIONES Y CONCEPTO TÉCNICO FINAL**

FASES DEL PROYECTO

Fase 1: Elaborar un concepto técnico sobre el edificio Space en relación al cumplimiento o no de las normas técnicas legales aplicables en los procesos de diseño y construcción de la cimentación, estructura y elementos no-estructurales.

Fase 2: Elaborar un concepto respaldado por expertos internacionales sobre la conceptualización general del proyecto, las principales deficiencias y problemas que presenta a la luz del estado del arte del conocimiento y de la práctica mundial aplicable.

Fase 3: Realizar los estudios técnicos de detalle requeridos para conceptuar sobre las causas más probables del colapso de la Etapa 6 del edificio Space.

Fase 4: Realizar los estudios, evaluaciones, diagnósticos y recomendaciones en relación a las edificaciones Continental Towers y Asensi para las cuales la Alcaldía requiere contar con un concepto técnico para efectos de toma de decisiones relacionadas con la seguridad y funcionalidad de las mismas.

OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo principal de este informe es rendir el concepto técnico en relación a las causas más probables del colapso de la Etapa 6 del edificio Space y a establecer las recomendaciones específicas a las que hubiere lugar con base en las evaluaciones y estudios que se realizan.

Condiciones externas a la edificación:

1. Ocurrencia de un evento sísmico significativo el mismo día o los días previos al colapso.
2. Ocurrencia de un movimiento del terreno, tipo deslizamiento general o similar, que pudiera haber afectado la distribución de cargas interna en la estructura.
3. Explosiones o incendios internos o cualquier otro evento extraordinario que hubiesen podido generar el debilitamiento de un elemento estructural importante.

Condiciones internas de la edificación:

1. Deficiencia en el dimensionamiento y diseño de elementos estructurales principales.
2. Sobrecargas extraordinarias en la edificación.
3. Deficiencia en las propiedades de materiales de construcción.
4. Ocurrencia de asentamientos diferenciales en el sistema de cimentación de la estructura.
5. Redistribución interna de fuerzas por deformaciones excesivas o problemas de flujo plástico de los materiales estructurales bajo cargas permanentes.
6. Redistribución de fuerzas o esfuerzos en los elementos estructurales por trabajos o intervenciones a los elementos estructurales principales.

INFORMACIÓN DISPONIBLE

| Ref. | Descripción del contenido | Autor | Fuente original de la información | Fecha | Formato | Tamaño | Comentarios |
|---------|--|--|-----------------------------------|----------------------|---------|--|---|
| PE-1_SP | Planos estructurales y de fundaciones originales | Ing. Jorge Aristizábal Ochoa | CDO | 2008 | Físico | 22 planos | Los planos se encuentran firmados por el ingeniero calculista |
| PE-2_SP | Planos estructurales y de fundaciones con etapa 6 actualizada | Ing. Jorge Aristizábal Ochoa | CDO | Actualizados a 2012 | Físico | 11 planos | Falta uno de los planos ya que sólo se entregan 11/12 |
| PE-3_SP | Planos estructurales y de fundaciones originales | Ing. Jorge Aristizábal Ochoa | CDO | 2008 | Digital | 20 archivos DWG | Planos equivalentes a los planos PE-1_SP. |
| PE-4_SP | Planos estructurales y de fundaciones con etapa 6 actualizada | Ing. Jorge Aristizábal Ochoa | CDO | Actualizados a 2012 | Físico | 11 archivos DWG | Falta uno de los archivos DWG, se entregan 11/12 planos. Equivalen a los PE-2_SP |
| PE-5_SP | Planos estructurales actualizados a Diciembre de 2013 | CDO | CDO | Diciembre de 2013 | Digital | 1 archivo DWG | Equivalen a los planos “as-built” Modificados a partir de los planos PE-3_SP y PE-4_SP. |
| PA-1_SP | Planos arquitectónicos | Laureano Forero & Cía. Ltda. | CDO | Actualizados en 2012 | Físico | 23 Planos | Actualizados a 2013, con sello y firma de Curaduría Segunda de Medellín |
| PA-2_SP | Planos arquitectónicos | Laureano Forero & Cía. Ltda. | CDO | Actualizados en 2013 | Digital | 23 archivos DWG | Actualizados a 2013, equivalen a los PA-1_SP, pero incluyen algunos más que no fueron entregados en formato físico |
| MC-1_SP | Resoluciones entregadas en la curaduría urbana segunda de Medellín | CDO – Curaduría urbana segunda de Medellín | DAGR | 2006-2013 | Digital | 10 Resoluciones y 2 Memorias de cálculo | 2 Memorias estructurales anexas a las resoluciones, la primera para etapas 1 a 5 y la otra para etapa 6 relacionadas en DC-3_SP |
| MC-2_SP | Informe complementari o Memoria de Cálculos | Jorge Aristizábal Ochoa | DAGR | Diciembre de 2013 | Digital | 1 archivo PDF | Informe de diseño entregado al DAGRD tras solicitud al ingeniero diseñador. |
| MC-3_SP | SPACE Torre 6 "Análisis real de carga de los apoyos en el momento del colapso" | Jorge Aristizábal Ochoa | Jorge Aristizábal Ochoa | 17 de Enero de 2014 | Físico | 5 Hojas para documento 4 Hojas para tablas anexas | Análisis de cargas en "Torre 6" entregado por Jorge Aristizábal durante reunión con DAGRD y con la Universidad el día 17 de Enero de 2014 |

| Ref. | Descripción del contenido | Autor | Fuente original de la información | Fecha | Formato | Tamaño | Comentarios |
|---------|--|---|-----------------------------------|---------------------------|---------|--|--|
| ES-1_SP | Estudio de suelos | VIECO ingeniería de suelos | CDO | 27 de Septiembre de 2005 | Digital | 1 archivo PDF | Estudio de suelos realizado para el proyecto SPACE. |
| ES-2_SP | Carta a Fiscalía General de la Nación | Bernardo Vieco | DAGR | 20 de Noviembre de 2013 | Digital | 1 archivo PDF | Información con detalles respecto a los estudios de suelos y preguntas realizadas |
| ES-3_SP | Carta a CDO-Reparación pila R3 | Bernardo Vieco | DAGR | 23 de Agosto de 2013 | Digital | 1 archivo PDF | Carta entregada por Bernardo Vieco respecto al caso de pila R3 con asentamientos mayores a los esperados |
| CC-1_SP | Control calidad de los materiales | Ingeconcreto | CDO | Etapas 3-6 | Físico | 2 carpetas, 214 páginas | Resultados de laboratorio para el control de calidad de los materiales usados en obra. |
| CC-2_SP | Indicador de auditoría de calidad | CDO | CDO | | Físico | 2 carpetas, 729 páginas | Reportes de calidad, seguimiento de procesos en obra. |
| CC-3_SP | Informe técnico de auditoría de calidad | CDO | CDO | Etapas 6 | Físico | 1 carpeta, 108 páginas | Reportes de calidad, seguimiento de procesos en obra. |
| CC-4_SP | Interventoría a etapas 1-2 de Space | FCR-Francisco Correa y Cía. Ltda. | DAGR | Jul12/2006 - Ago. 14/2007 | Digital | 1 archivo PDF | Interventoría externa |
| AR-1_SP | Actas de reuniones | Universidad de los Andes | Universidad de los Andes | 9 de Diciembre de 2013 | Digital | 1 Archivo Word, 2 Grabaciones de audio | Acta de reunión entre CDO, Alcaldía de Medellín, Universidad de los Andes y asesores nacionales e internacionales |
| RP-1_SP | Registros pluviométricos | Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá-SIATA | SIATA | 13 de Marzo de 2014 | Digital | 4 archivos Excel y 5 archivos de texto | Registros de resolución original de 4 estaciones pluviométricas en el período comprendido entre 01-11-2010 y 01-11-2013. |
| RT-1_SP | Registro topográfico de Asentamientos de Abril de 2007 a Octubre de 2013 | CDO | CDO | Octubre 11 de 2013 | Digital | 1 archivo Excel | Registro de asentamientos en las columnas. Último registro el 11 de Octubre de 2013. |
| RT-2_SP | Registro topográfico de verticalidad de las columnas | Topografía Alcatop | CDO | Dic19/2013 - Ene23/2014 | Físico | 2 Carpetas | Control horizontal y control vertical de columnas |
| I-1_SP | Informe de ingeniería | Luis Gonzalo Mejía C. | DAGR | Octubre de 2013 | Digital | 1 archivo PDF | Concepto de ingeniería por el ingeniero veedor de las familias |
| I-2_SP | Informe de pre-inspección, reconocimiento de daños, | McLarens | DAGR | 13 de Octubre de 2013 | Digital | 1 archivo PDF | Concepto de ingeniería por el ingeniero veedor de las familias |

| Ref. | Descripción del contenido | Autor | Fuente original de la información | Fecha | Formato | Tamaño | Comentarios |
|----------|---|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|---------|------------------------------|---|
| | colapso final | | | | | | |
| FT-1_SP | Registro fotográfico del proceso de reforzamiento de la columna fallada | CDO | CDO | Octubre de 2013 | Digital | 18 Fotos | Fotos tomadas por personal de CDO. |
| FT-2-SP | Registro fotográfico de la columna fallada | DAGR-CD | DAGR-CD | Octubre de 2013 | Digital | 5 carpetas | Personal de CDO |
| EG-1_SP | Estudios de geología, geomorfología y amenaza de la zona | Gobernación de Antioquia | DAGR | Diciembre de 2007 | Digital | 3 Mapas, 1 documento de Word | Estudio de geología de la zona del proyecto Space. |
| EG-2_SP | Estudio Asomadera | Gobernación de Antioquia | DAGR | 2008-2009 | Digital | Documentos PDF | Estudio de geología de proyectos cercanos al proyecto Space. |
| EG-3_SP | Estudio Rancherito Inteinsa 2008 | Gobernación de Antioquia | DAGR | 2008 | Digital | Documentos Excel y DWG | Estudio de geología de proyectos cercanos al proyecto Space. |
| EG-4_SP | Estudio de impacto ambiental actualizado – conexión vial Aburrá-Oriente | Gobernación de Antioquia | DAGR | 2013 | Digital | Documentos PDF | Estudio de geología de proyectos cercanos al proyecto Space. |
| DC-1_SP | Relación de fechas etapas constructivas | CDO | CDO | Diciembre de 2013 | Digital | 1 documento de Word | Sin comentario |
| DC-2_SP | Confirmación de detalles geotécnicos | María Cecilia Posada | CDO | Diciembre de 2013 | Digital | 1 correo electrónico | Respuestas a preguntas geotécnicas realizadas |
| DC-3_SP | Relación de memorias estructurales y su validez | Adriana Cano Patiño-DAGR | DAGR | 14 de Enero de 2014 | Digital | 1 correo electrónico | Sin comentario |
| DC-4_SP | Exoneración de la Supervisión Técnica | Curaduría Urbana Segunda de Medellín | DAGR | 19 de Diciembre de 2007 | Digital | 1 archivo PDF | Carta de la Curaduría Urbana Segunda de Medellín exonerando de supervisión técnica a la constructora. |
| V-1_SP | Reunión de Copropietarios y CDO | Copropietarios | Nelson Vanegas | Octubre de 2013 | Digital | 3 videos | Reunión realizada día anterior al colapso de la etapa 6 |
| IFF-1_SP | Informe Final Fase 1 | Uniandes | Uniandes | 21 de Abril 2014 | Digital | 1 Archivo PDF | Sin comentarios |
| AF-1_SP | Anexo A Informe Final Fase 1 | Uniandes | Uniandes | 21 de Abril 2014 | Digital | 1 Archivo PDF | Sin comentarios |

ANÁLISIS DE LAS POSIBLES CONDICIONES EXTERNAS QUE PODRÍAN EXPLICAR EL COLAPSO DEL EDIFICIO

POSIBILIDAD DE UN EVENTO SÍSMICO

Tabla ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-1 Eventos reportados a corta distancia

| Fecha | Hora UTC | Magnitud | Longitud (°) | Latitud (°) | Municipio | Profundidad (km) |
|------------|----------|----------|--------------|-------------|-----------|------------------|
| 09/10/2013 | 3:43:37 | 1.5 | -75.308 | 7.512 | CACERES | 21.7 |
| 10/10/2013 | 7:12:48 | 2.8 | -76.15 | 6.776 | FRONTINO | 0.0 |
| 10/10/2013 | 10:33:59 | 2.0 | -76.158 | 6.774 | FRONTINO | 3.6 |
| 11/10/2013 | 10:36:44 | 2.6 | -76.632 | 6.907 | MURINDO | 1.2 |
| 11/10/2013 | 11:49:19 | 2.8 | -76.204 | 6.766 | FRONTINO | 2.6 |
| 11/10/2013 | 13:01:10 | 1.5 | -74.653 | 6.931 | REMEDIOS | 38.0 |
| 11/10/2013 | 13:37:22 | 1.5 | -76.464 | 6.708 | FRONTINO | 0.0 |
| 11/10/2013 | 13:38:18 | 1.9 | -76.109 | 6.778 | FRONTINO | 1.8 |
| 11/10/2013 | 21:08:18 | 2.3 | -76.186 | 6.765 | FRONTINO | 4.0 |
| 12/10/2013 | 6:22:46 | 2.9 | -76.053 | 5.547 | ANDES | 32.0 |
| 12/10/2013 | 21:25:58 | 1.5 | -74.494 | 7.162 | SEGOVIA | 44.8 |

POSIBILIDAD DE UN DESLIZAMIENTO O MOVIMIENTO DEL TERRENO

POSIBILIDAD DE UNA EXPLOSIÓN, INCENDIO U OTRO EVENTO EXTRAORDINARIO

ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES ESTRUCTURALES QUE PODRÍAN EXPLICAR EL COLAPSO DEL EDIFICIO

1. Deficiencia en el dimensionamiento y diseño de elementos estructurales principales.
2. Sobrecargas extraordinarias en la edificación.
3. Deficiencia en las propiedades de materiales de construcción.
4. Ocurrencia de asentamientos diferenciales en la estructura.
5. Redistribución interna de fuerzas por deformaciones excesivas o problemas de flujo plástico de los materiales estructurales bajo cargas permanentes.
6. Redistribución de fuerzas o esfuerzos en los elementos estructurales por trabajos o intervenciones a los elementos estructurales principales.

EVIDENCIAS DE FALLAS Y PATOLOGÍAS PREVIAS AL COLAPSO

Registro de fallas y patologías

- Inicio de construcción Etapa 6A: marzo 01 de 2011.
- Inicio de Etapa 6B: enero 01 de 2012.
- Registro de asentamiento en el eje R3 mayor al permitido: febrero 02 de 2013.
- Desprendimiento de concreto de recubrimiento de la columna R3 en el nivel 5: febrero 20 de 2013.
- Inicio de ocupación del edificio por parte de residentes: abril 01 de 2013.
- Construcción de las pilas muletas de refuerzo en la pila del eje S3 por causa de los asentamientos excesivos: agosto 21 de 2013.
- Falla estructural detectada en columna S3: octubre 11 de 2013.
- Colapso de la Etapa 6: octubre 12 de 2013.

Tabla ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-2 Resumen eventos importantes de patologías de colapso

| FECHA | ANOTACIÓN ENCONTRADA EN LA REFERENCIA | COMENTARIO |
|------------|--|--|
| Marzo 2011 | Inicio de obra torre 6A | Sin comentario |
| Enero 2012 | Inicio de obra torre 6B | Sin comentario |
| 21/05/2012 | En la construcción de la losa N° 4 se evidenció el agrietamiento de la losa en la parte central de esta, sin embargo el asentamiento no se ha incrementado y se conserva en 9.0 cm. Se recomienda hacer seguimiento. | Primera detección de grandes deflexiones en losas |
| 13/08/2012 | Durante la semana se realizó un recorrido extenso con el fin de identificar la aparición de una grieta ubicada en la columna T5 la cual se encuentra entre los niveles 5 al 19 siendo los niveles 18,12,11,10 los que presentan un espesor entre los 3 y 4mm, los demás niveles son grietas de 3mm aproximadamente. Se recomienda hacer seguimiento. Adicionalmente se ha evidenciado deflexión de 10.5cm en la losa del piso 4, se está realizando seguimiento a esta situación. | Se reportan grietas en columnas con espesores entre 3 y 4 mm. También se reportan deflexiones en placas de hasta 10.5 cm. No hay reportes específicos del daño en la columna T5. |
| 20/08/2012 | Se continúan con los trabajos de mampostería en el nivel 4 e inicio del nivel 5 se verifican plomos, calidad de la pega, disposición del alambro. Se evidencia la aparición de fisuras en los muros divisorios al siguiente día después de haberse ejecutado la mampostería ubicada entre las columnas R-S del eje 3, se evidencia también que en el nivel 3 y 4 las losas de la parte central están muy deflectadas, generando la aparición de fisuras sobre la mampostería. (Deflexiones de hasta 10.5 cm como se informó la semana anterior.) | Deflexiones en losas presentadas en el eje R-S y evidencia de fisuras en muros de mampostería en niveles 3 y 4. Posible sobrecarga de muros divisorios. |
| 17/09/2012 | Se realizan los trabajos pendientes de aplicación de revoque en apto 401. Se observa que hay muros que ya presentan fisuración por asentamiento de la losa, se verifican plomos, filetes y esquinas. | Sin comentario |
| 05/11/2012 | Durante la semana anterior continúa la aplicación de mortero de nivelación sobre apartamentos 401, 402 esta vez con la adición de pequeñas esferas de porón (icopor) en la mezcla, con el fin de disminuir el peso sobre la losa. Recordemos que en ese piso se había presentado una deflexión de más de 8 cm en uno de los módulos de la losa lo cual se destaca como una medida de buena acción para disminuir el impacto sobre la losa. | Deflexiones en losa sobre los apartamentos influyentes en la columna que presenta falla posteriormente. |

| FECHA | ANOTACIÓN ENCONTRADA EN LA REFERENCIA | COMENTARIO |
|------------|--|--|
| 2012 | Durante la semana anterior se realizó el vaciado de reparación de losa tipo bóveda ubicada en el S1 entre ejes Q3-5 y R3-5 se aplica un concreto de mejor especificación (concrelisto de Toxement) y de baja retracción para evitar el fisuramiento de la losa a su vez que se coloca varilla de 5/8 en forma de cruz para disminuir las deflexiones sobre la losa. Todo fue consultado con el ingeniero calculista. | Reparación en losa en el nivel 5 entre los ejes Q3-R3. Posible influencia en la posterior fisuración de la columna R3-5. |
| 21/01/2013 | Se está observando en obra la aparición de fisuras y grietas producto del asentamiento del edificio ubicados en los ejes R, S, y T sobre los muros y en enchapes de las duchas. Se recomienda revisar bien este caso...(aptos 402 y 802) | Primeras evidencias de fisuración y grietas debidas a asentamientos. |
| 28/01/2013 | Continúan los trabajos de mortero de nivelación en los apartamentos 10-02 11-02 los cuales se evidencia que están presentando mucho consumo de mezcla producto de las deflexiones que se presentan en la losa, por ello se observa que hay zonas en las partes centrales de la losa con llenos de 25 a 21 cm, en los baños de 11cm y en habitaciones de 12cm para evitar el aumento de peso se colocan trozos de porón (icopor) para aligerar los espesores de la losa. | Se reportan morteros de nivelación en pisos con hasta 25 cm de espesor. |
| 25/02/2013 | Durante la semana anterior se detectó el desprendimiento del concreto ubicado sobre la arista superior de la columna R3 del piso 5, se analizaron causas con el ingeniero estructural lo cual radica principalmente en la generación de esfuerzos ubicados sobre ese punto el cual atraviesa una viga de amarre y el voladizo de la circulación la recomendación es organizar la superficie y aplicar un producto llamado "Grautoc". | Evidencia clara de falla estructural en la columna R3 del piso 5. Según las fotografías hay pandeo del acero de refuerzo. La falla se habría detectado entre los días 15 a 20 de febrero de 2013 |
| 04/03/2013 | En el informe técnico anterior se mencionó el tema relacionado con el desprendimiento del concreto en la columna R3 en donde por autorización del ingeniero calculista se procedió a aplicar el producto "Grautoc" sobre la superficie afectada, se hará seguimiento a todos los elementos estructurales para verificar el estado en que se encuentran. | Sin comentario |
| 26/03/2013 | Continúan los trabajos de mortero de nivelación e instalación de porcelanato en los apartamentos 503, 19-01, 21-01. Durante la aplicación de mortero de nivelación se está utilizando trozos de porón para disminuir el peso del mortero sobre la losa. Esto se presenta debido a las deflexiones en la parte central de la losa en donde hay que hacer llenos promedio entre 11 y 13 cm y llenos de 21-25 cm en caso apartamento 10-02 (ver informe técnico 28/01/2013) | Trabajos de mortero de nivelación en los pisos superiores a las columnas R3-5 y S3-4. Rellenos de hasta 25 cm de espesor. |

| FECHA | ANOTACIÓN ENCONTRADA EN LA REFERENCIA | COMENTARIO |
|------------|--|--|
| 26/03/2013 | Se evidencia que aún falta mejorar sobre la fisura que está apareciendo en la escuadra de las zonas de duchas. La fisura se presenta debido a los asentamientos que está presentando la estructura lo cual está afectando el enchape en dicha zona, los apartamentos que presentan este problema son: 12-02 y 301 (con enchape). | Sin comentario |
| 29/04/2013 | Continúan los trabajos de mortero de nivelación en apartamentos 801, 902, 11-03. En este último apartamento se tomaron medidas cuyos espesores están entre 11 y 14 cm en la parte central de la losa (en donde hay más deflexión) y en la parte más delgada quedara con un espesor de 5.5 cm. se instala lamina de icopor perimetral y el tratamiento en la parte central de la losa se llena con trozos de icopor en partes pequeñas. | Sin comentario |
| 18/08/2013 | En el apto 302 se está interviniendo. Fisura por asentamiento, cielos descolgados, puertas descuadradas que no cierran y ventanería que se ve con luces, desplomadas y desajustadas que no cierran. | Sin comentario |
| 18/08/2013 | Se continúa con la perforación para pila nueva en el eje R3 de forma axial a la viga para equiparar la carga actual de la viga y mejorar la estabilidad del terreno. (Diseño diámetro 1.60- altura aprox. 18m.) | Trabajos de construcción de pilas muletas de refuerzo en cimentación por problemas de asentamientos reportados |
| 28/09/2013 | Fecha de construcción de las pilas de refuerzo | Sin comentario |
| 11/10/2013 | Se presenta falla de la columna S3 en el nivel 4. | Falla de columna S3 en el nivel 4 detectada en octubre 11 de 2013 |
| 12/10/2013 | Colapso de la etapa 6 de la edificación Space. | Sin comentario |

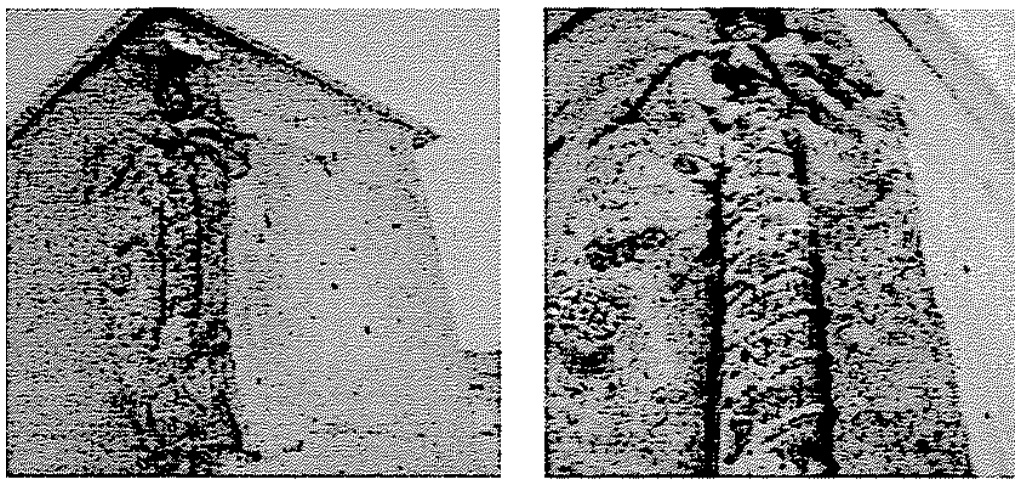


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-1 Evidencia de desprendimiento columna R3 nivel 5 (tomado de la ref. CC-3)

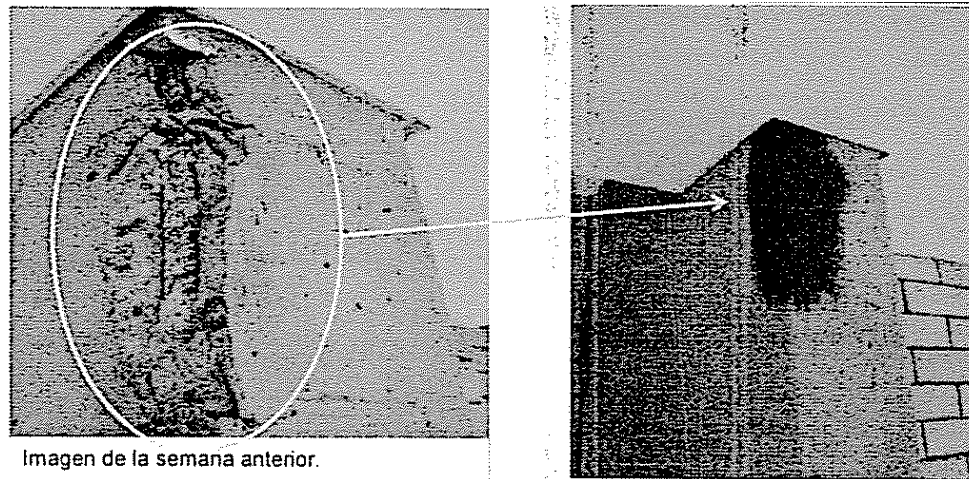


Imagen de la semana anterior.

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-2 Reparación columna R-3 Nivel 5 (tomado de la ref. CC-3)



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-3 **Fotografías de la falla de la columna en el eje S3 en el nivel 4 presentada en octubre 11 de 2013 (FT-2)**



(a)



(b)



(c)

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-4 **Métodos de cálculo de deflexión vertical y horizontal de la columna S3 en el nivel 4,**
(a) Movimiento del cuerpo rígido, (b) Doblamiento del fleje, (c) Pandeo de barra de refuerzo (FT-2)

Asentamientos registrados en la estructura

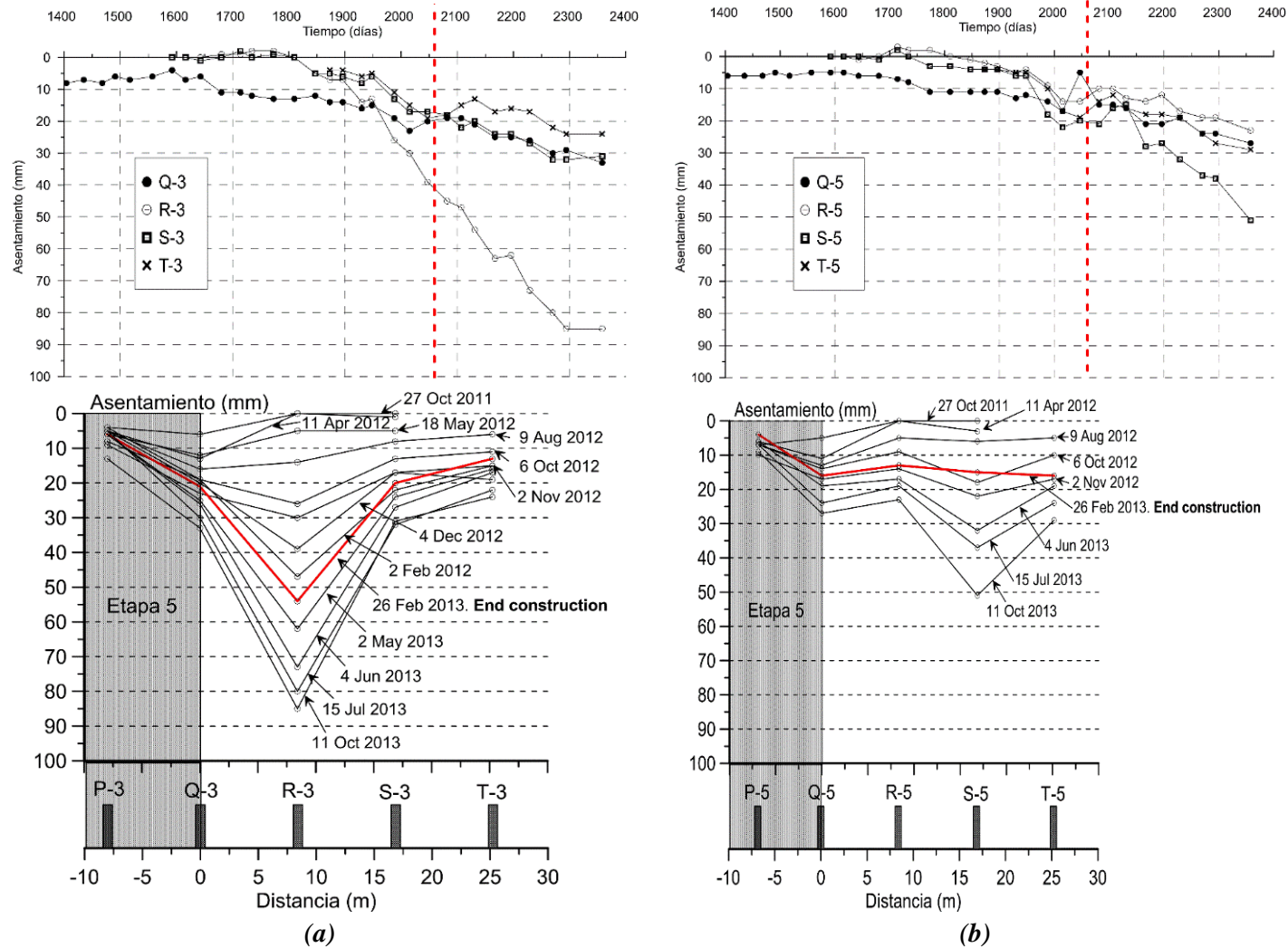


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-5 Registro de asentamientos de la Etapa 6, (a) Eje 3 y (b) Eje 5

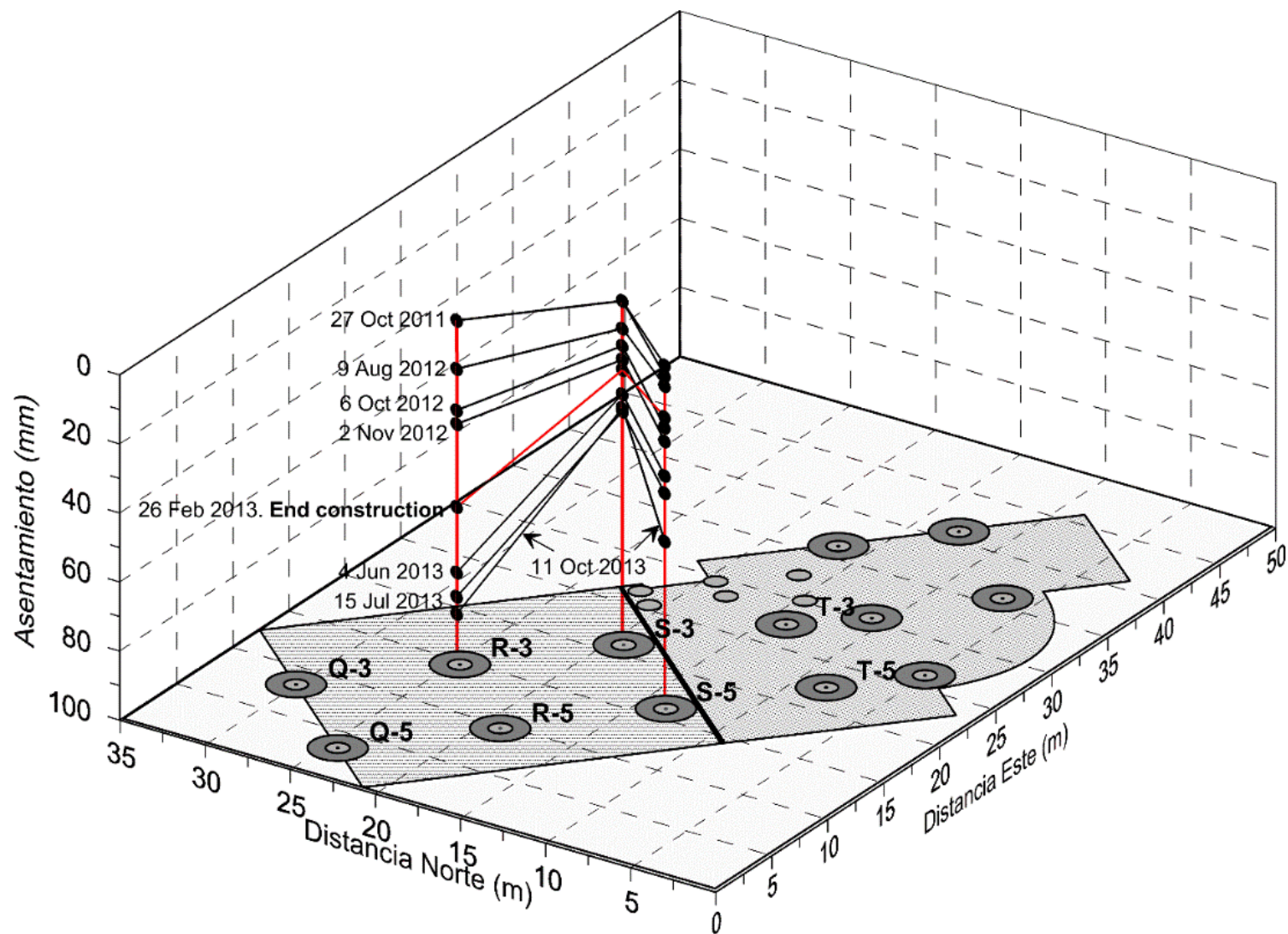


Figura 6 Registro de asentamientos en ejes críticos

MODELO COMPUTACIONAL DE LA ESTRUCTURA

Configuración del modelo para el análisis de las condiciones estructurales

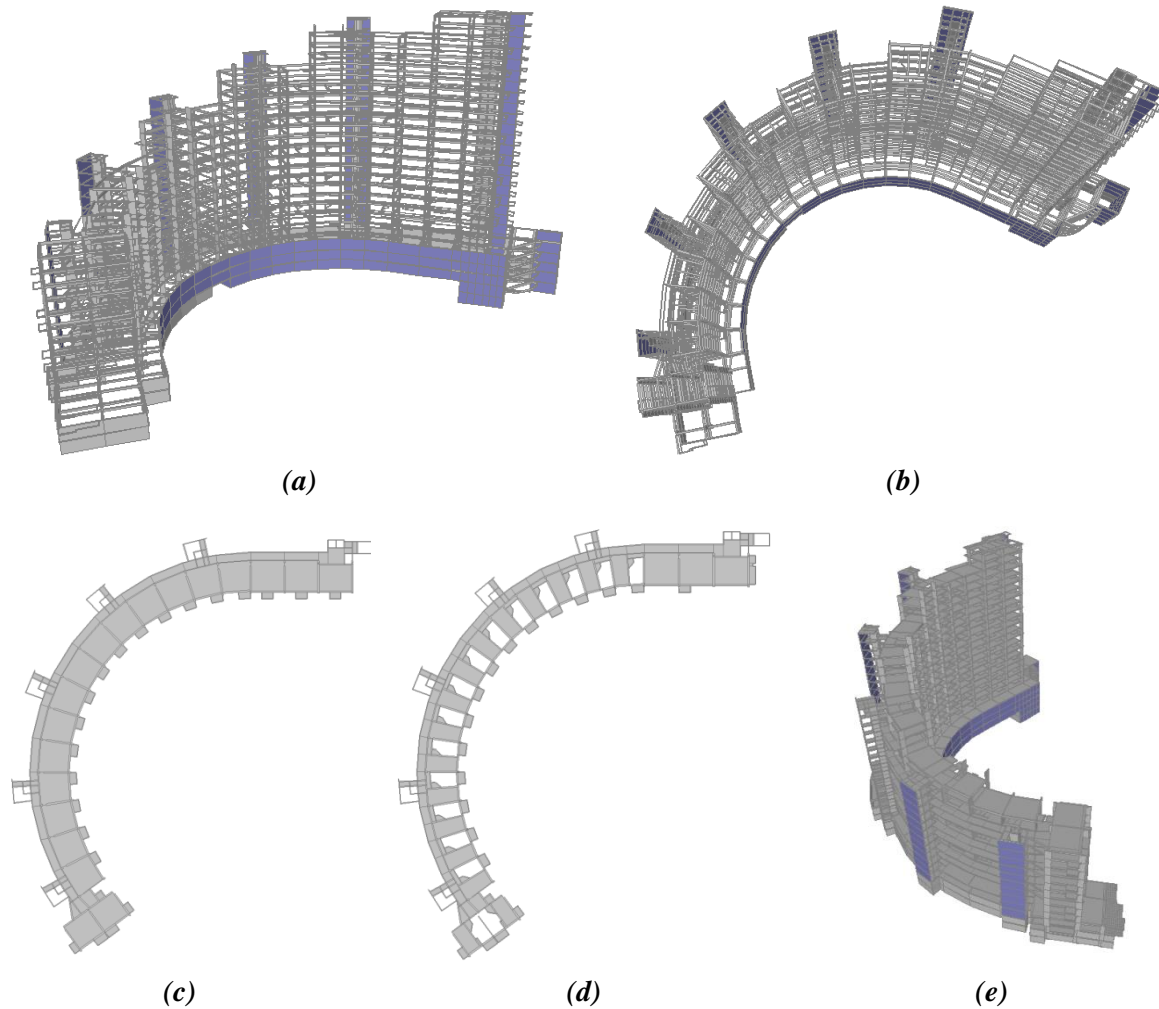


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-7 **Modelo computacional, (a) Vista 3D, (b) Vista 3D, (c) Planta típica, (d) Planta tipo dúplex, (e) Vista 3D**

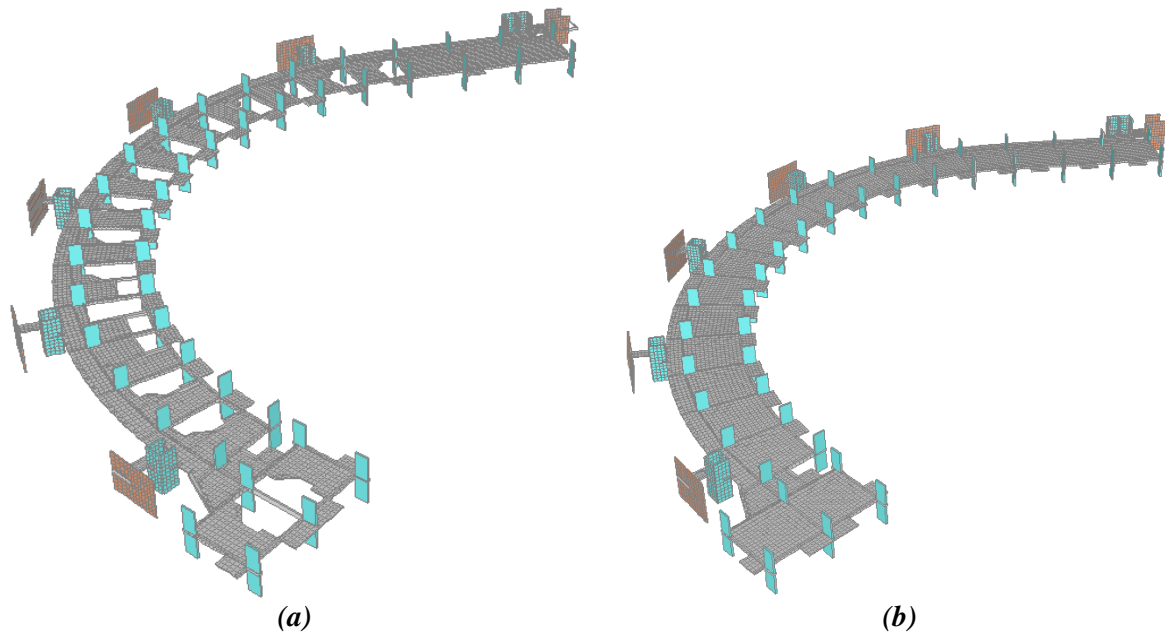


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-8 *Detalle losa típica de entepiso (a) piso dúplex segundo piso, y (b) piso simplex*

Elementos tipo link

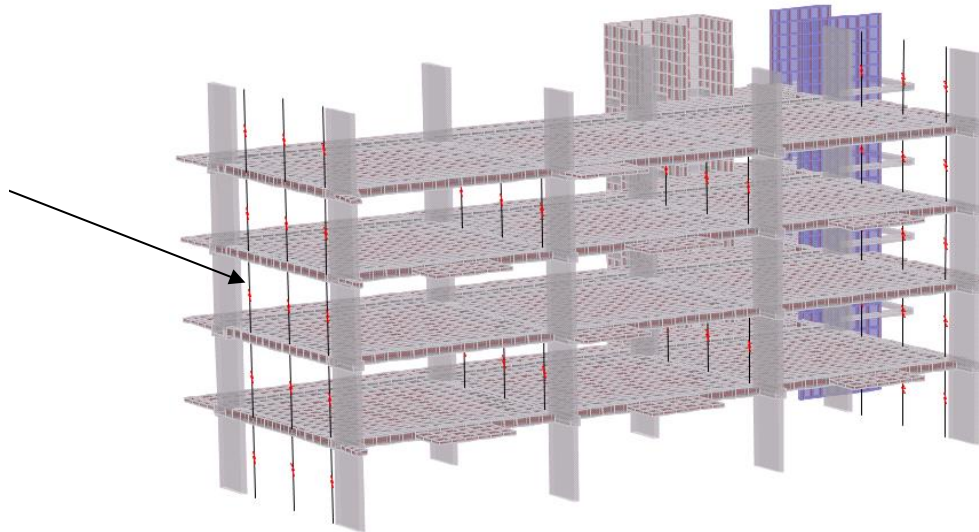


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-9 *Consideración de muros divisorios de mampostería con función estructural en el modelo de análisis*

ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES ESTRUCTURALES

Estado 1: edificación al final de la construcción sin considerar ninguna de las patologías detectadas.

Estado 2: edificación con los asentamientos diferenciales registrados el día 11 de octubre de 2013, momento en el cual se registra la falla de la columna S3 entre los pisos 4 y 5.

Estado 3: edificación en el estado previo al colapso una vez fallada la columna S3.

Estado 1: edificación al final de la construcción sin considerar ninguna de las patologías

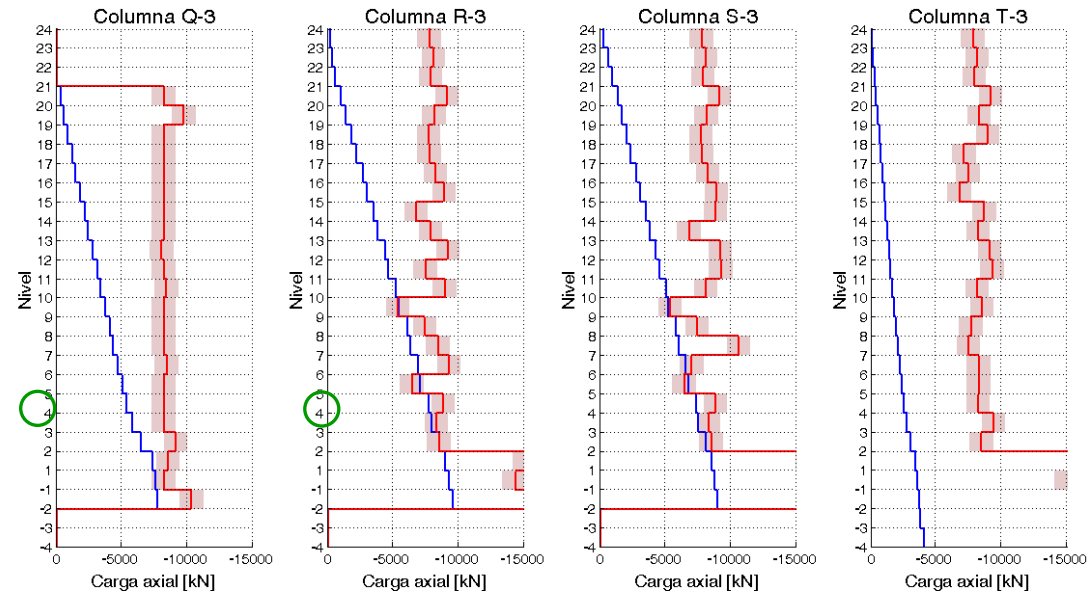


Figura ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-10 Carga axial Etapa 6 – Columnas Eje 3

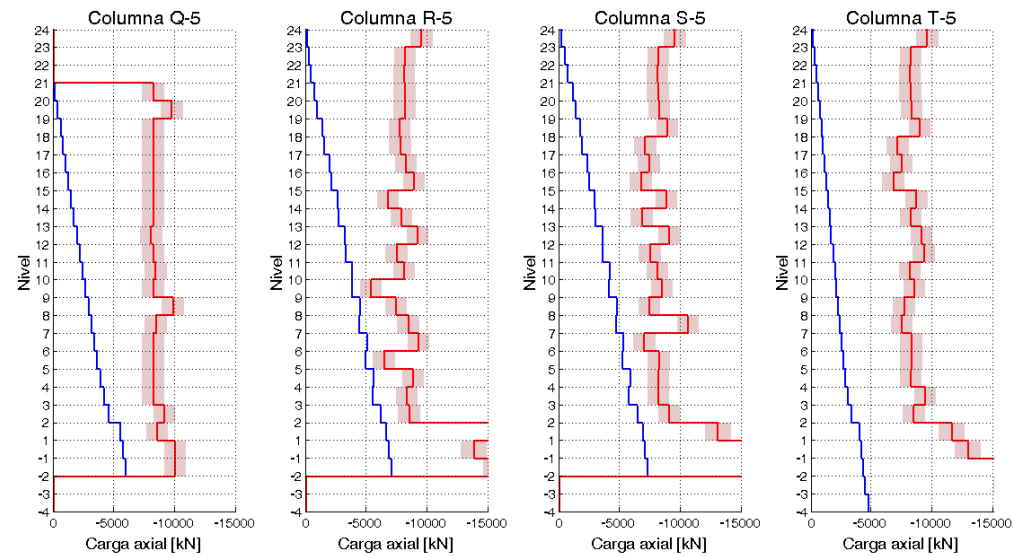


Figura ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-11 Carga axial Etapa 6 – Columnas Eje 5

Análisis para el sismo de diseño

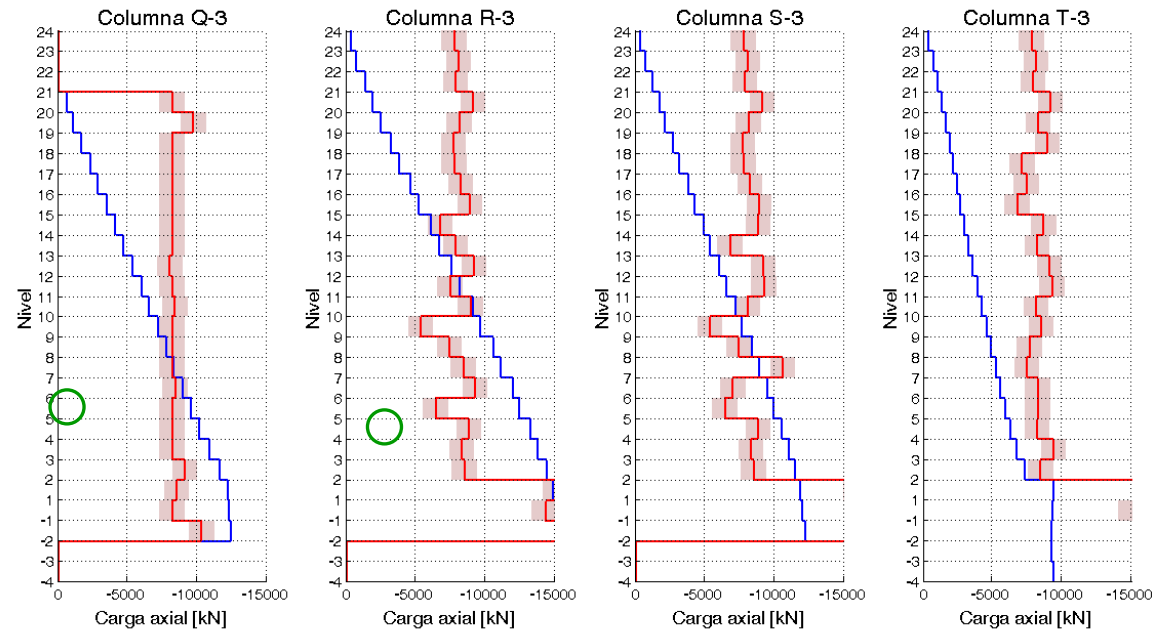


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-12 Carga axial Etapa 6 – Columnas Eje 3

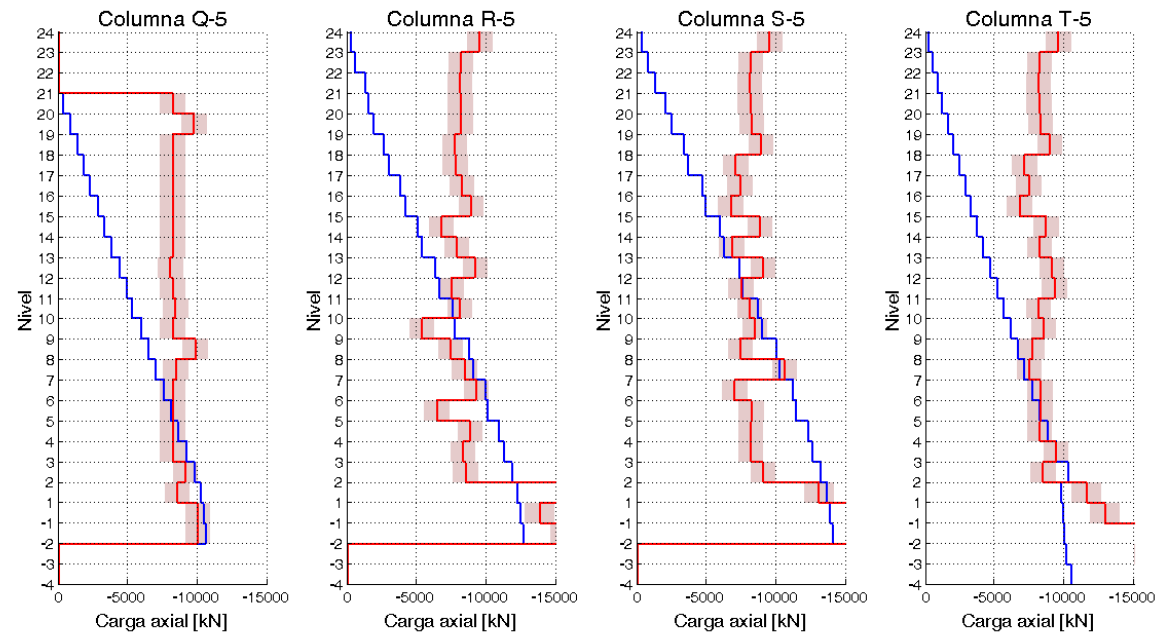


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-13 Carga axial Etapa 6 – Columnas Eje 5

Estado 2: edificación con asentamientos diferenciales medidos el 11 de octubre de 2013

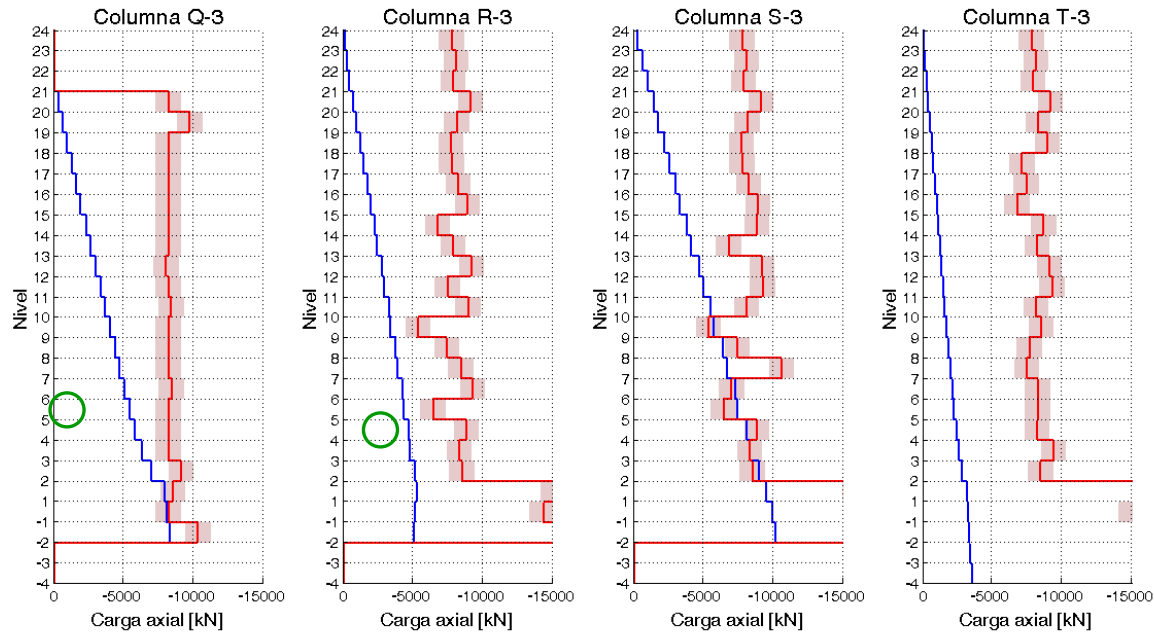


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-14 Carga axial Etapa 6 – Columnas Eje 3

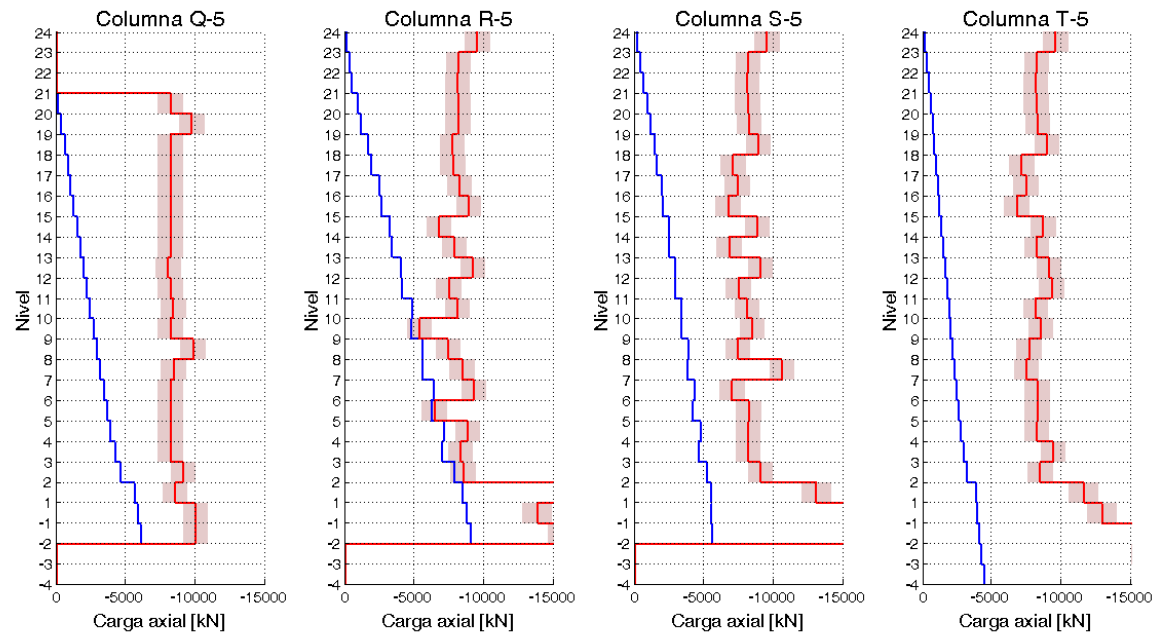


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-15 Cargas axial Etapa 6 – Columnas Eje 5

Estado 3: edificación con columna S-3 en estado de falla

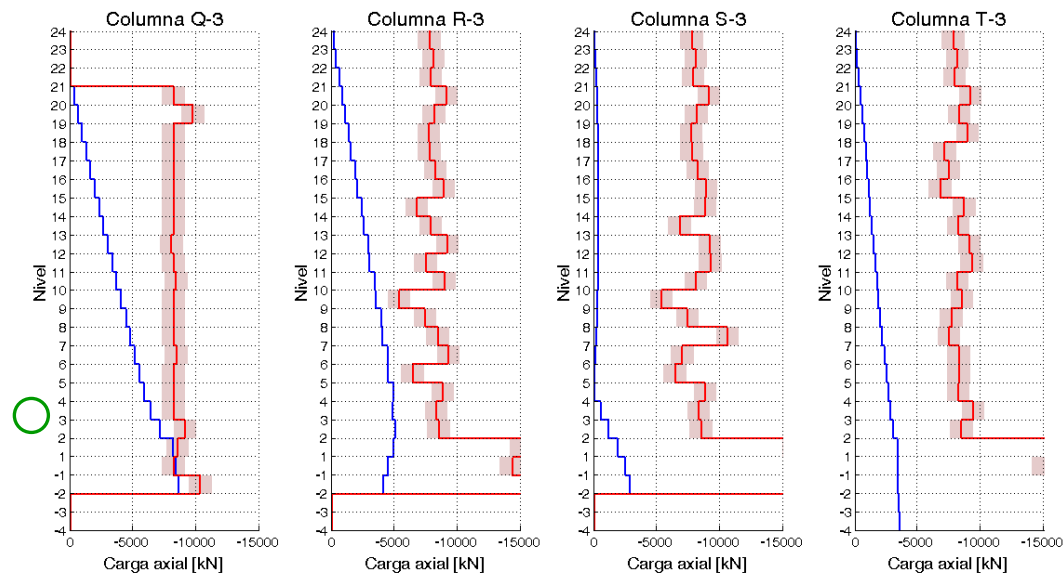


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-16 Cargas axial Etapa 6 – Columnas Eje 3

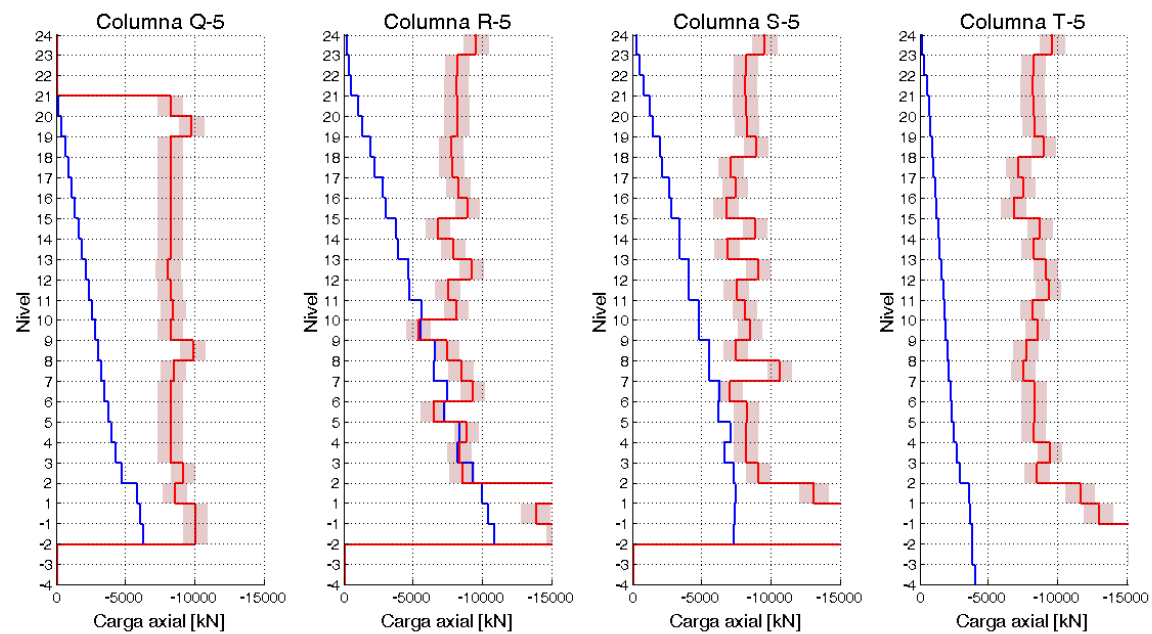


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-17 Cargas axial Etapa 6 – Columnas Eje 5

Cargas axiales en muros divisorios de mampostería

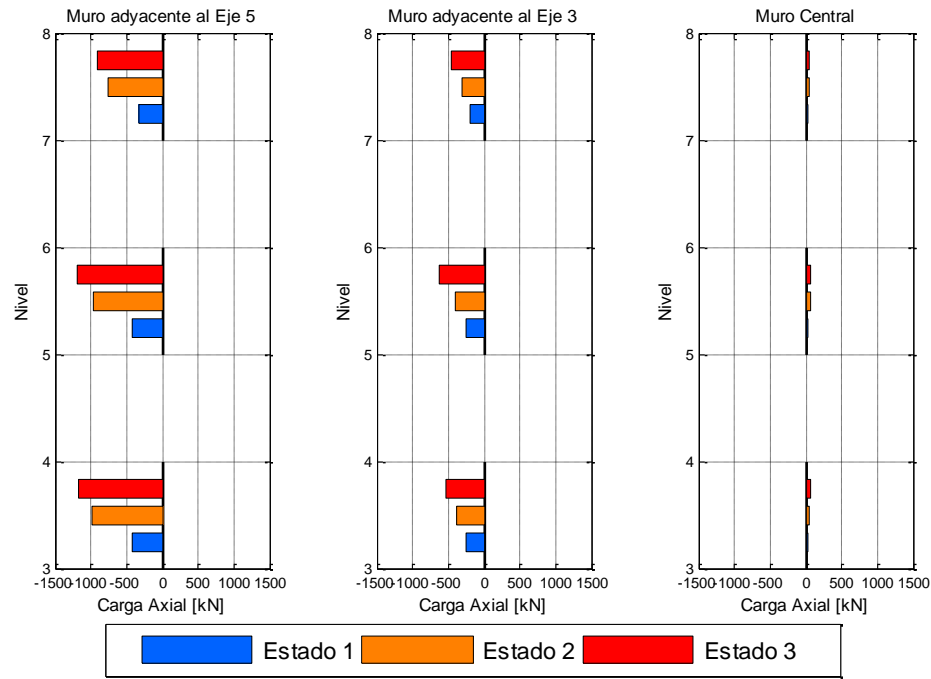
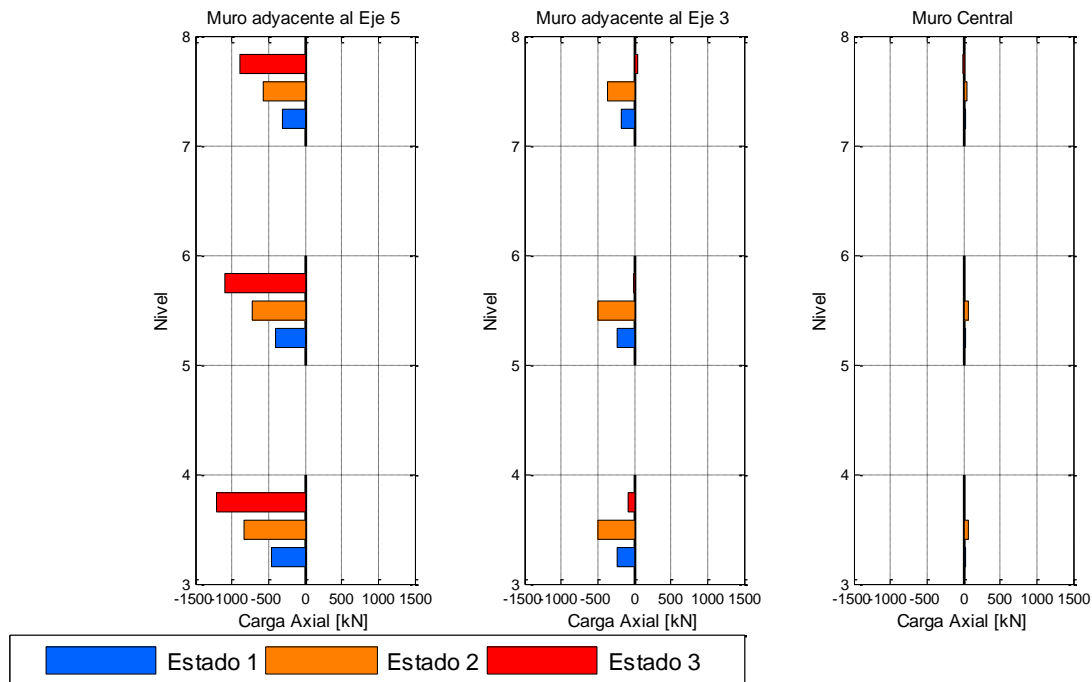


Figura *¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.* -18 Cargas axiales en muros de mampostería para los Estados 1, 2 y 3 - Muros Eje R



Fuerzas cortantes en vigas principales

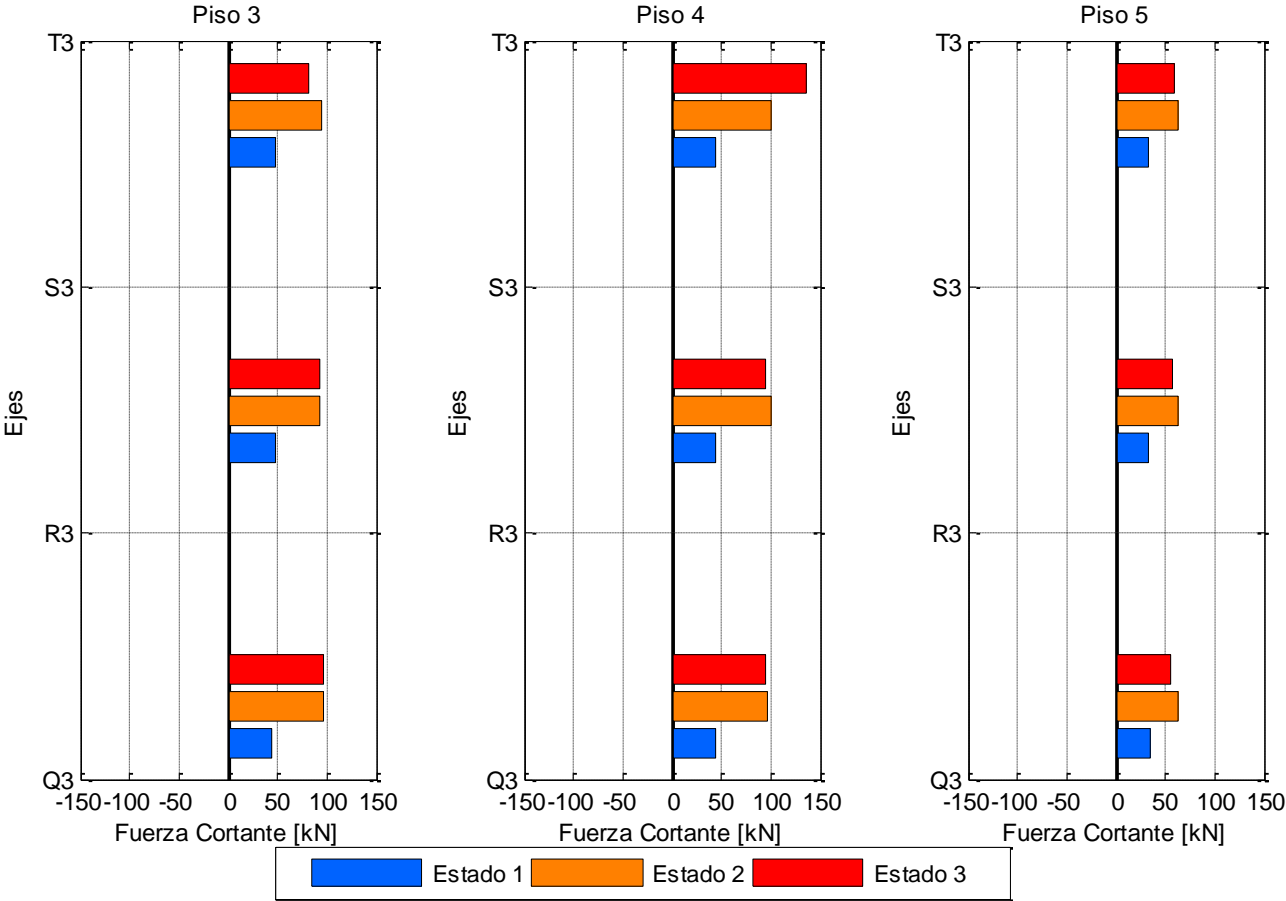


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-20 Fuerza cortante en vigas longitudinales adyacentes a columnas R3 y S3

ANÁLISIS PROBABILISTA DE CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL

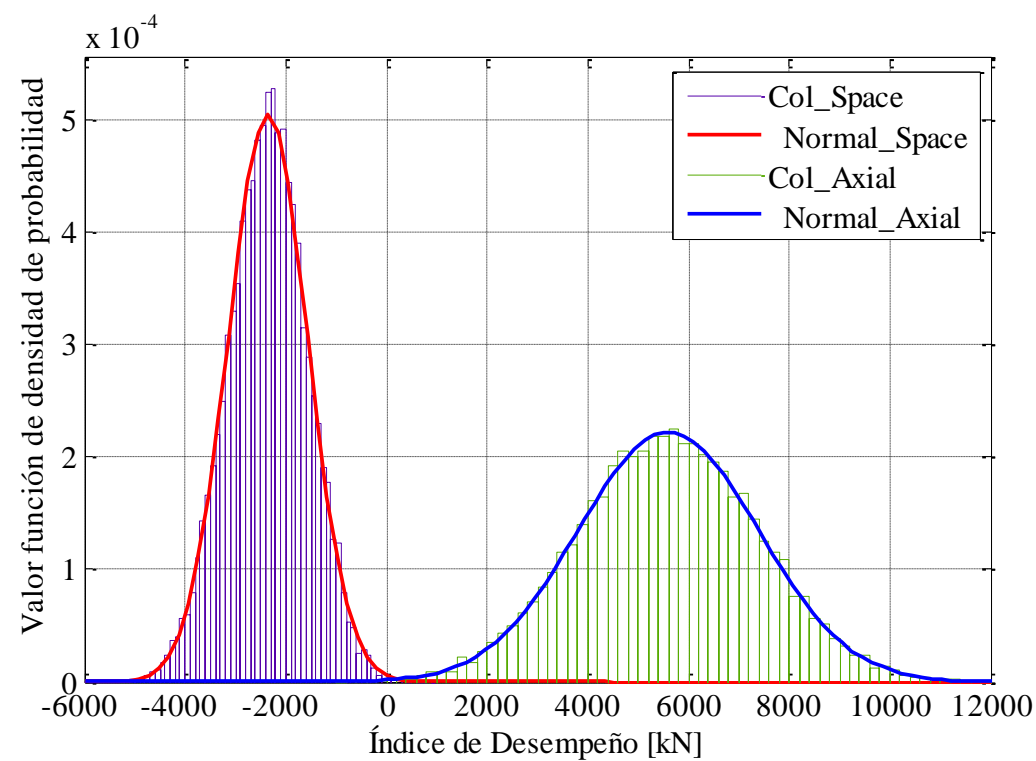


Figura *¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-21 Comparación índices de desempeño*

EVENTOS DE COLAPSO SIMILARES AL CASO SPACE

Uno de los casos más investigados es el del edificio de apartamentos residenciales Zumrut, ubicado en la ciudad de Konya en Turquía. Esta edificación de concreto reforzado de 9 pisos de altura colapsó el 2 de febrero de 2004 dejando 92 personas muertas. Según lo documentado las causas del colapso fueron errores de diseño y de construcción (Kaltakci et al. 2013). Los errores en el diseño estructural se vieron reflejados en diferencias sustanciales entre las cargas reales y las cargas de diseño, espesores de sistemas de piso menores a los admisibles, refuerzos inadecuados e insuficientes y sobrecargas en el suelo.



Figura *¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-22 Evidencia de falla en columnas ante cargas gravitacionales en Zumrut, Turquía (Kaltakci et al. 2013)*

Por otro lado, en octubre de 2004 en una zona cercana al edificio Zumrut, se presentó la falla de dos columnas del sótano del edificio residencial Altinbasak (Kaltakci et al. 2006). La falla ocurre por el fenómeno de flujo plástico debido a cargas axiales excesivas. Las investigaciones realizadas reportan errores de diseño y construcción; las columnas fueron diseñadas para una resistencia de 140 kg/cm^2 y los resultados de los ensayos arrojaron resistencias de 73 kg/cm^2 . Adicionalmente se calculó el índice de sobre-esfuerzo en las columnas, obteniendo valores mayores a la unidad; efecto que refleja la falla frágil de los elementos verticales por deformaciones no lineales por flujo plástico.

Otro caso reportado en la literatura corresponde al colapso de edificaciones debido a cargas gravitacionales ocurrido en Singapur el día 15 de marzo de 1986; el edificio Lian Yak, de 6 pisos de altura y un sótano, que ocasionó la muerte de 33 personas. El repentino colapso de la edificación se atribuyó principalmente al deficiente diseño estructural y la baja calidad de mano de obra; el edificio se terminó de construir en 1971

ESTUDIO DE LAS CONDICIONES GEOTÉCNICAS EXISTENTES

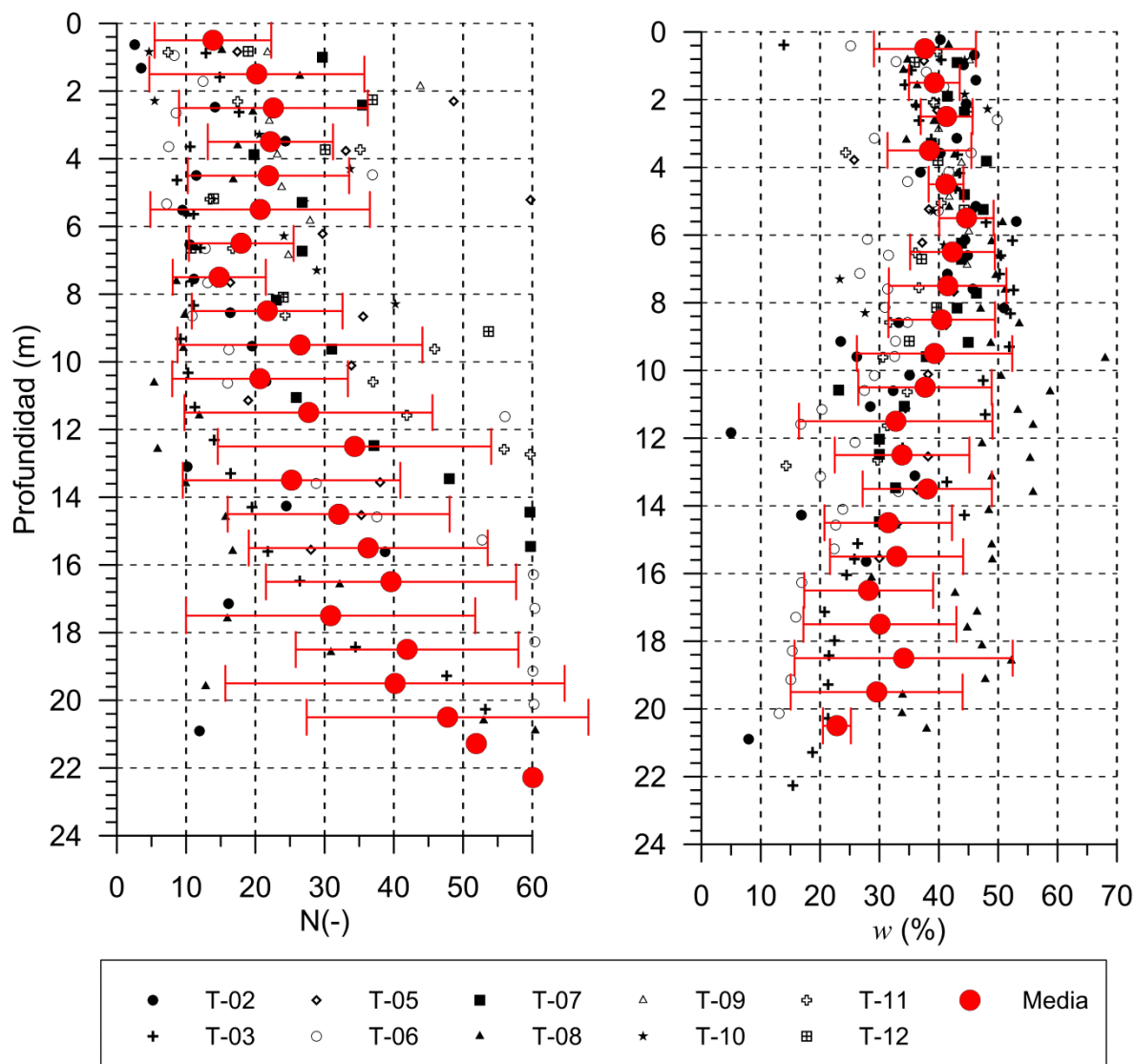


Figura *¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-23* **Resumen de los resultados de penetración estándar y humedad natural en todos los sondeos realizados en el estudio de suelos**

ANÁLISIS DE LOS PROBLEMAS GEOTÉCNICOS QUE PUDIERON INCIDIR EN EL COLAPSO DE LA ETAPA 6

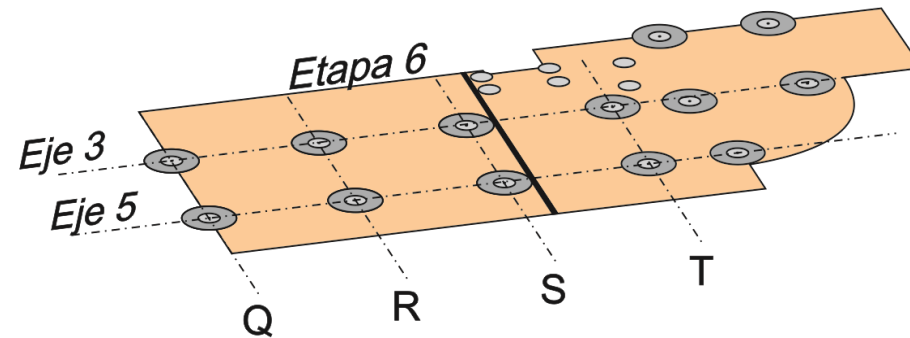


Figura 24 Vista en planta del sistema de cimentación de la Etapa 6

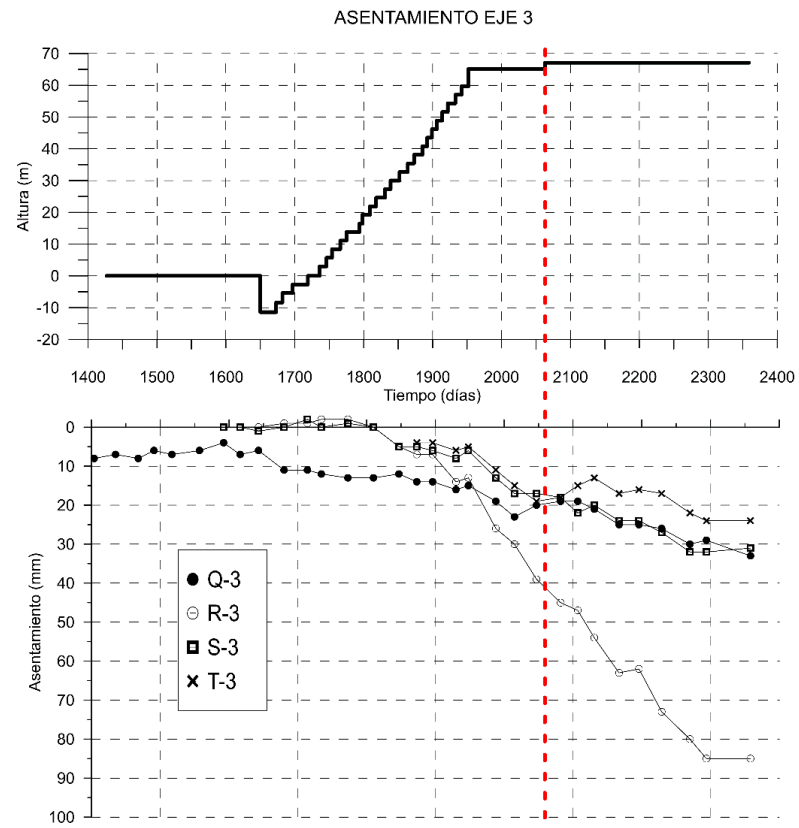


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-25 Asentamientos eje 3

Tipología de las pilas de cimentación utilizadas y su efecto en los asentamientos excesivos

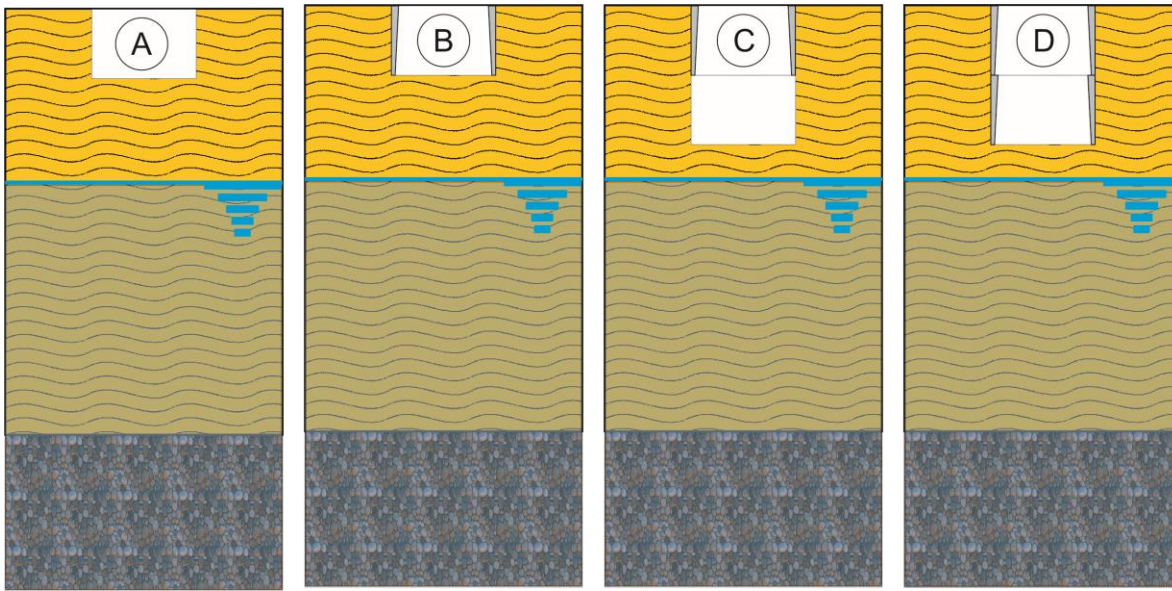


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-26 **Representación esquemática del proceso constructivo de los pilares de cimentación**

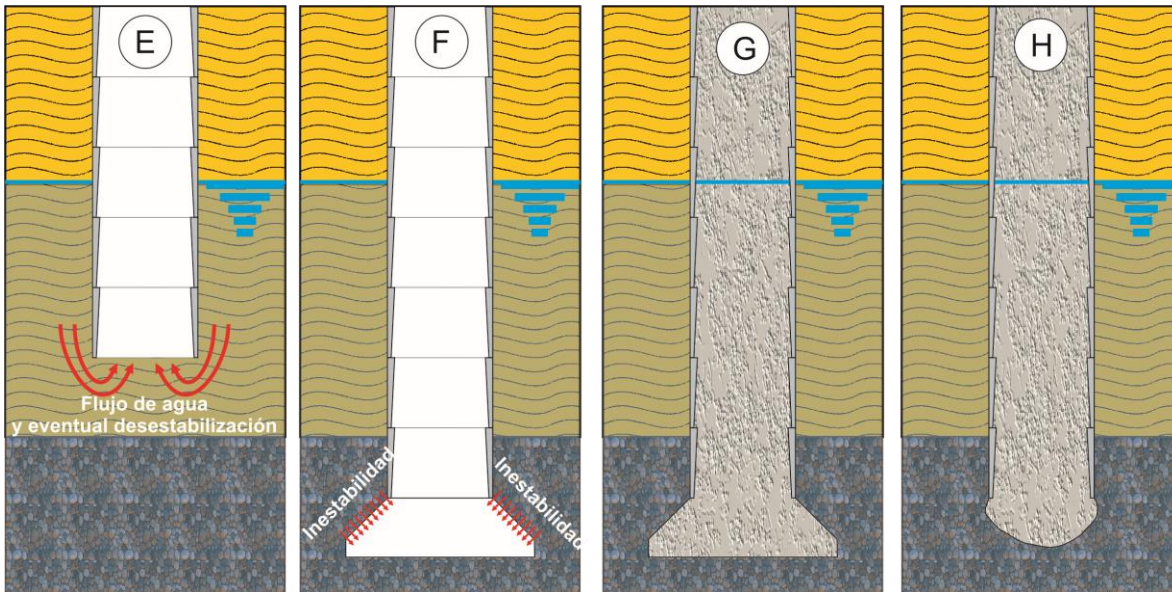


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-27 **Representación esquemática del proceso constructivo de los pilares de cimentación**

EXPLORACIÓN DE CAMPO REALIZADA

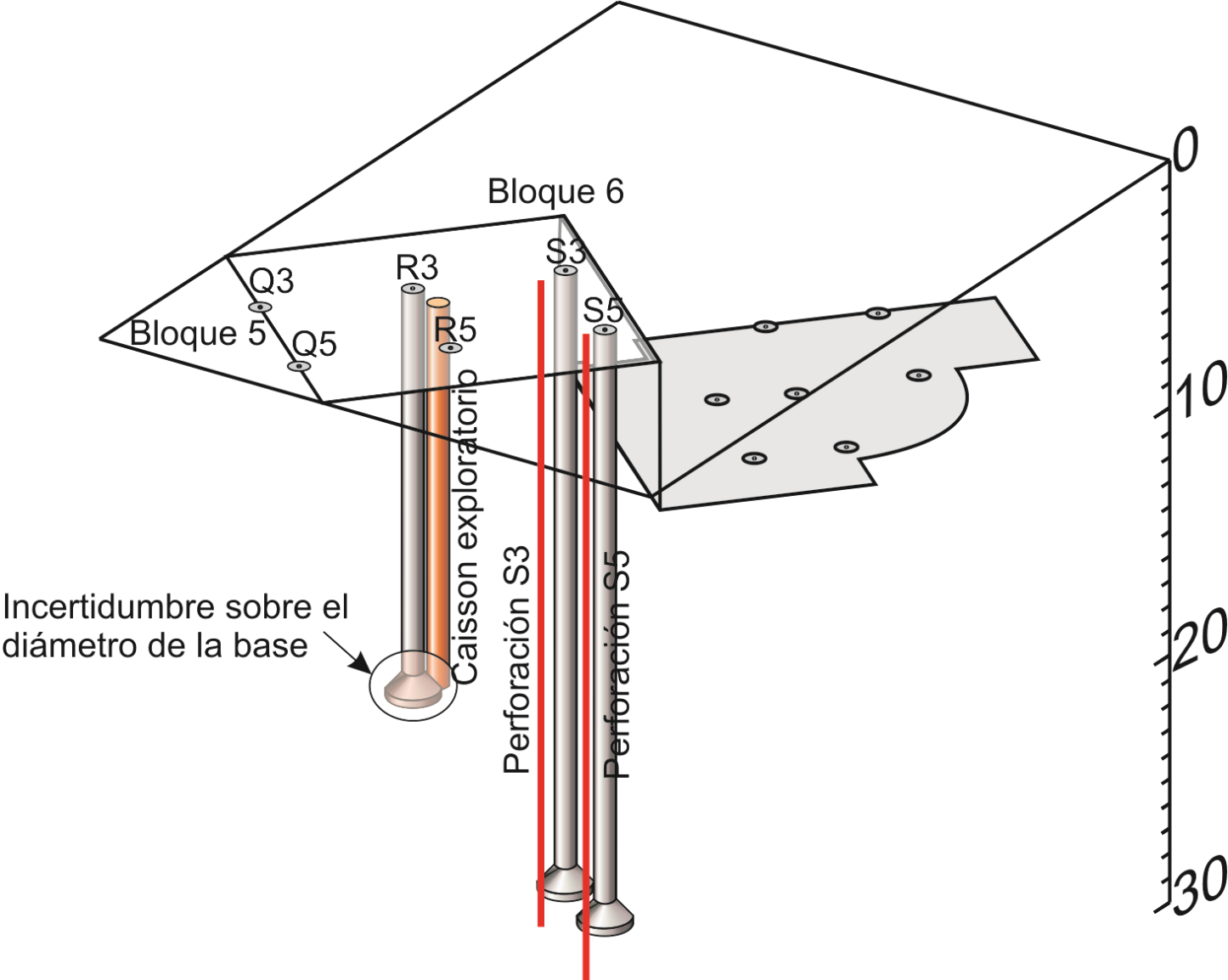


Figura *¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-28 Localización del Caisson exploratorio y de las perforaciones S3 y S5*

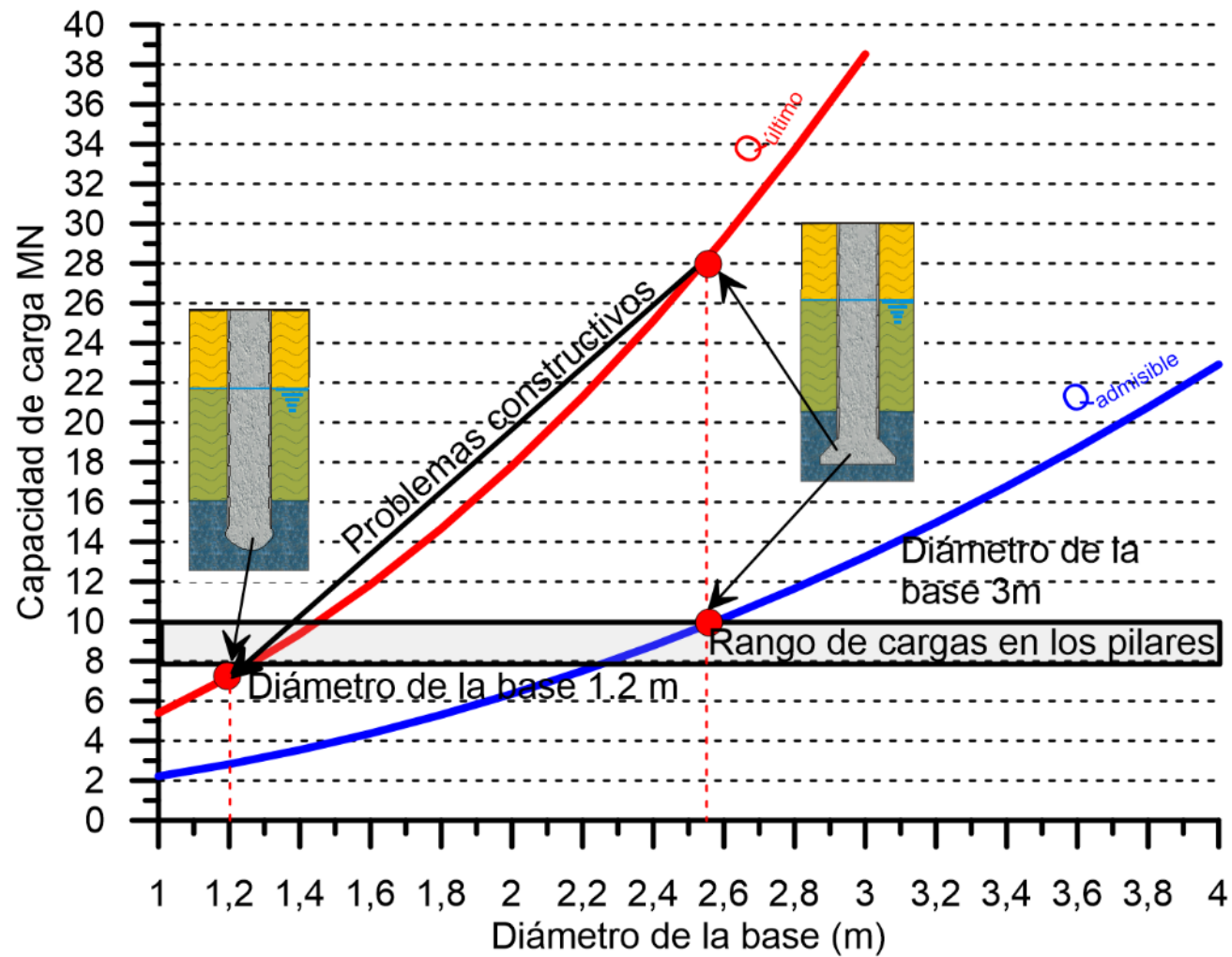


Figura *¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-29* Capacidad de carga para 1.2 metros de diámetro del fuste y diferentes diámetros en la base

ANÁLISIS NUMÉRICO DEL PROBLEMA TRIDIMENSIONAL DE ASENTAMIENTOS

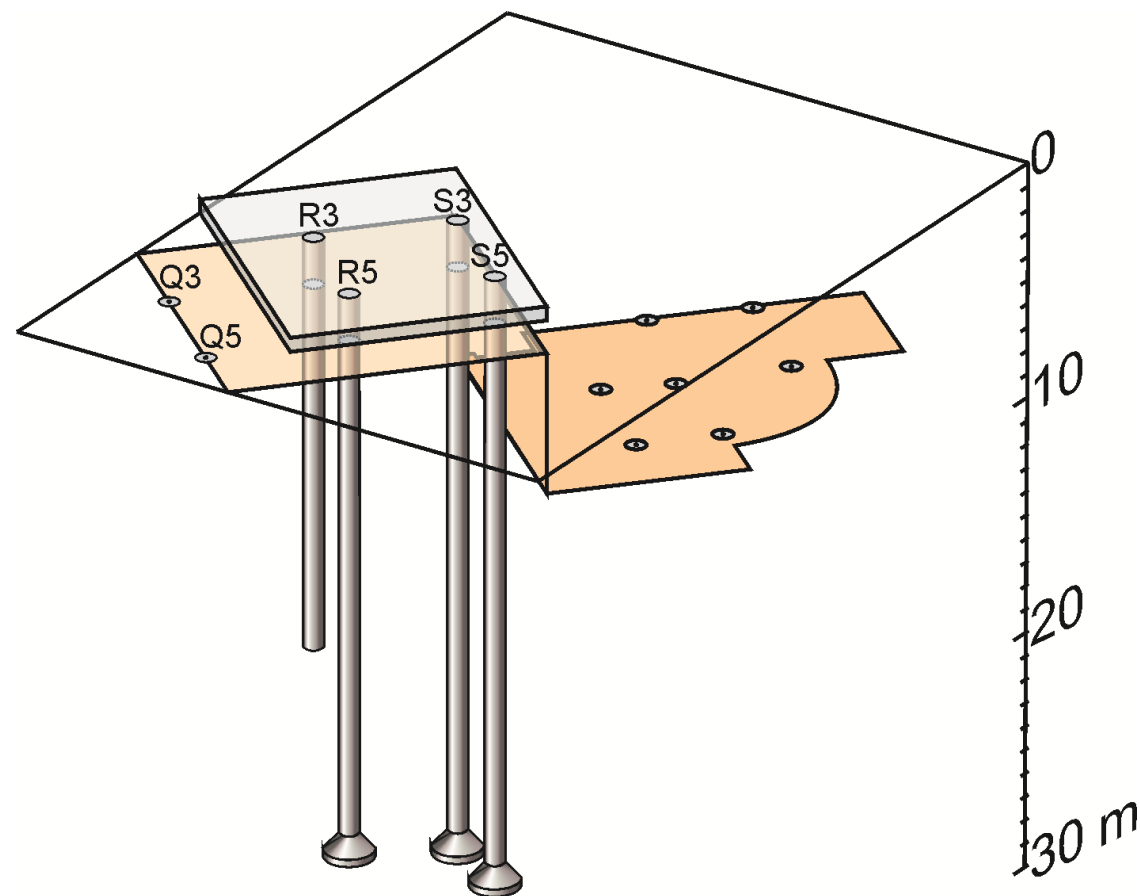
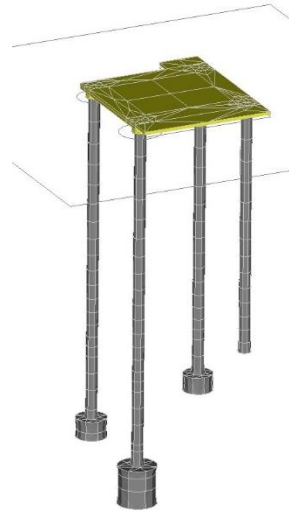
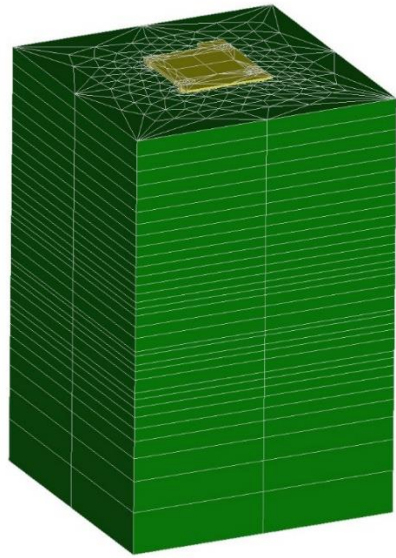


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-30 **Representación esquemática del modelo numérico tridimensional**



Caso sin base ensanchada



Caso con base ensanchada

Figura *¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-31* **Mallado y pilares en el modelo numérico tridimensional**

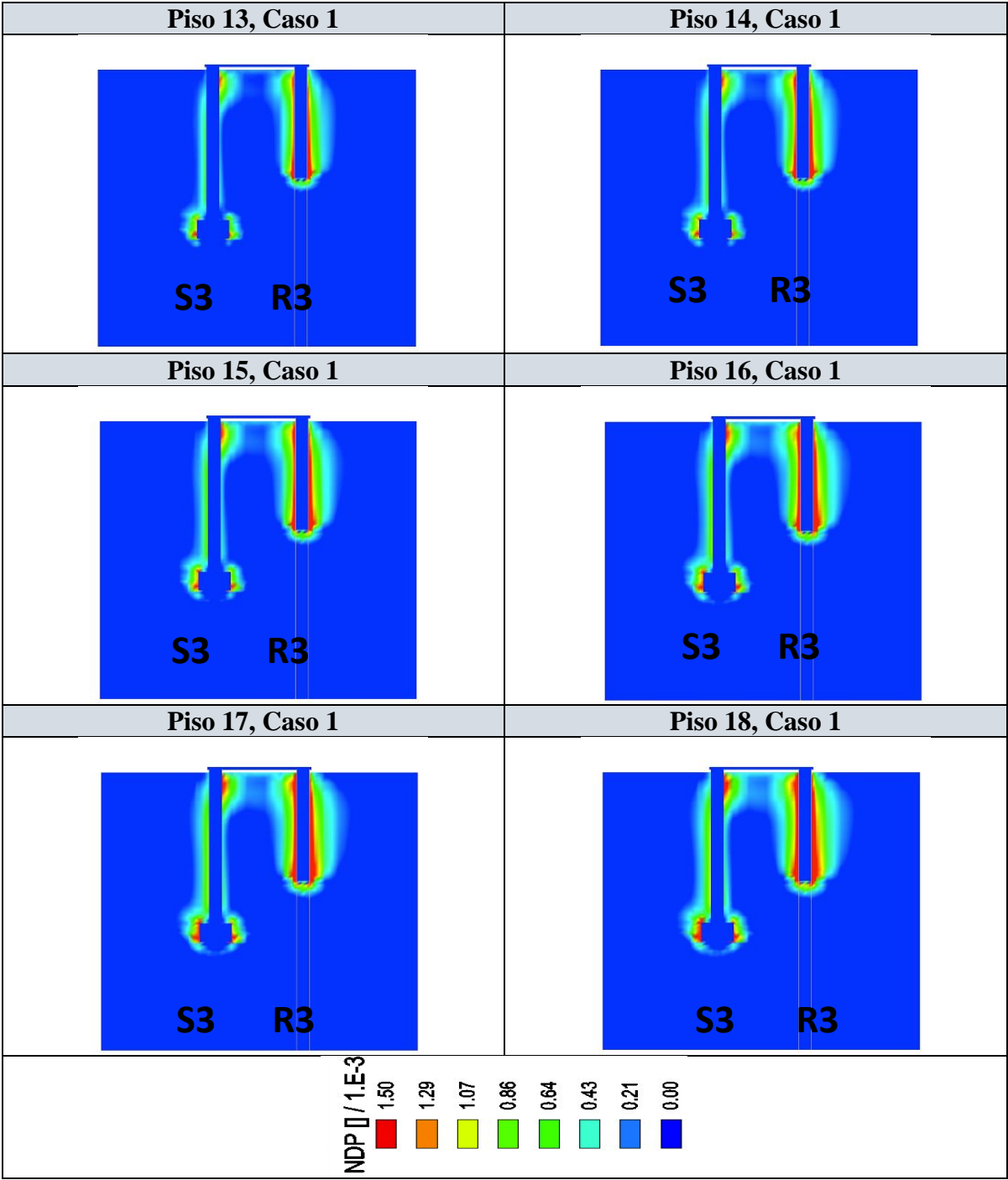


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-32 Resultados del análisis numérico Caso 1, piso 13-18

CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS GEOTÉCNICO

- 1) Los registros muestran un asentamiento excesivo del pilar R3 y uno menos pronunciado pero también alto del pilar S5. Esto generó asentamientos diferenciales significativos entre el conjunto de pilares R3, S3 y S5. Estos asentamientos diferenciales tuvieron una incidencia negativa en la distribución de cargas en las columnas que localizadas sobre esos pilares.
- 2) La exploración de campo y los testimonios de los ingenieros de la constructora demostraron que debido a problemas constructivos el pilar R3 no tuvo base ensanchada.
- 3) Los problemas constructivos se atribuyen a la presencia de aguas subterráneas y acuíferos en profundidad en suelos que presentan poca estabilidad en dichas condiciones, circunstancias que fueron identificadas en la exploración de campo realizada por la Universidad. Al respecto no se encuentran advertencias o recomendaciones en los estudios realizados en la fase de diseño.
- 4) La ausencia de base ensanchada en el pilar R3 disminuyó su capacidad de carga de manera dramática acercándola a la carga aplicada sobre dicho pilar y en consecuencia acercándola a una condición de falla.
- 5) El modelo numérico simplificado demostró que el asentamiento diferencial entre los pilares R3 y S3 efectivamente produjo una transferencia de carga hacia el pilar y las columnas S3.
- 6) El pilar S5 presentó asentamientos pronunciados en la obra. Los modelos analíticos indican que de haberse construido según lo especificado, dicha pila no ha debido sufrir dichos asentamientos. De acuerdo con esto debe considerarse la hipótesis que dicha pila tuvo problemas en su construcción, lo cual explicaría los altos asentamientos registrados.

CONCLUSIONES ESPECÍFICAS GENERALES

Los análisis realizados en relación a las posibles causas del colapso de la Etapa 6 del edificio SPACE permiten establecer lo siguiente:

1. No se encontraron evidencias de que el colapso de la Etapa 6 del edificio pudiese estar asociado a alguno de los siguientes eventos externos:
 - Ocurrencia de un evento sísmico significativo el mismo día o en los días previos al colapso.
 - Ocurrencia de un movimiento del terreno tipo deslizamiento que pudiese haber afectado la distribución de cargas interna en la estructura.
 - Explosiones o incendios internos que hubiesen podido generar el debilitamiento de elementos estructurales importantes.
 - Sobrecargas extraordinarias en la edificación.
2. El edificio presentó diversas evidencias de problemas y patologías estructurales internas en los meses y días previos al colapso entre las cuales se incluyen los siguientes:
 - a. Fisuras y separaciones en los muros divisorios internos en varios de los apartamentos de la Etapa 6.
 - b. Deflexiones verticales excesivas en las placas de entepiso que generan la necesidad de rellenos de nivelación para la instalación adecuada de los terminados de piso. Esto a su vez genera mayores deflexiones que sobrecargan los muros divisorios de mampostería ubicados en los ejes radiales.
 - c. Falla estructural por compresión en la columna del eje R3 en el nivel 5 reportada en febrero de 2013 y registrada mediante fotografías.
 - d. Falla estructural por compresión en la columna del eje S3 en el nivel 4 reportada el día 11 de octubre de 2013 y registrada mediante fotografías.
 - e. Las fisuras en las columnas del eje T registradas en informe técnico de auditoría de calidad.
3. El edificio sufrió asentamientos diferenciales que sobrepasaron los valores admisibles establecidos por la normativa vigente. Las mediciones realizadas indican que las columnas R3, S3 y S5 presentaron asentamientos diferenciales por encima de los valores máximos admitidos.
4. Las causas más probables de los altos asentamientos totales y diferenciales registrados en las columnas de la Etapa 6 se atribuyen a los problemas presentados durante la construcción de las pilas de cimentación, que indican que al menos una de las pilas no quedó construida con las especificaciones establecidas en el diseño, en particular con el diámetro de la base especificado en el estudio de suelos.

5. La evaluación de las condiciones estructurales del edificio permite concluir que la causa principal del colapso está asociada a lo siguiente:
 - a. El edificio presenta una clara deficiencia en el dimensionamiento y diseño de los elementos estructurales principales generando con esto una falta de capacidad estructural en los mismos ante las cargas gravitacionales impuestas. La falta de capacidad está asociada a las dimensiones de los elementos de acuerdo con las propiedades de los materiales y al acero de refuerzo interno especificado.
 - b. El edificio presenta una deficiencia en el dimensionamiento de los elementos estructurales de entrepiso (vigas y placas) por lo cual se presenta una sobrecarga considerable por cuenta de los rellenos requeridos para la nivelación de los pisos.
6. Los análisis realizados permiten establecer la siguiente secuencia probable para el colapso del edificio:
 - a. En la fase final de construcción y antes que se presenten los asentamientos diferenciales registrados, la columna crítica del edificio corresponde a la del eje R3 en el nivel 5 que fue precisamente la columna que evidenció falla estructural en febrero de 2013.
 - b. Los asentamientos diferenciales reportados generan una redistribución interna de cargas en los elementos estructurales principales lo cual lleva a que la columna crítica sea la del eje S3 que fue precisamente la que presentó falla estructural el día 11 de octubre de 2013.
 - c. Ante los excesivos asentamientos diferenciales presentados luego de la falla de la columna del eje S3 se presenta una redistribución importante de cargas a las columnas adyacentes y a los muros divisorios en mampostería, los cuales juegan un papel fundamental para evitar el colapso del edificio en el mismo instante en que se genera la falla estructural de la columna del eje S3.
 - d. Ni los muros de mampostería ni las vigas principales del edificio contaban con la capacidad de carga suficiente para resistir la redistribución de cargas impuestas por los asentamientos diferenciales registrados y la falla misma de la columna del eje S3.
 - e. Ante la anterior situación y considerando la ausencia total de redundancia en el sistema estructural de resistencia ante cargas verticales, se genera el colapso de la edificación un día después de registrada la falla de la columna S3.
7. Las evaluaciones analíticas de confiabilidad estructural indican que la probabilidad de falla del edificio en las condiciones en que se encontraba al final de la fase de construcción era cercana al 100%. También se encuentra que de haberse dimensionado adecuadamente las columnas del edificio de acuerdo con la normativa vigente, la probabilidad de falla de la columna crítica del edificio sería muy baja (inferior al 0.1%), aun considerando la ocurrencia de los asentamientos diferenciales registrados.
8. En relación al incumplimiento en las resistencias mínimas especificadas para el concreto según los ensayos de control de calidad en obra (ver referencias IFF-1 y AF-1) no se considera que este sea un factor determinante en el colapso de la edificación debido principalmente a las siguientes dos razones:
 - a. Aún en condiciones de análisis que suponga que la totalidad de las resistencias de los concretos hubiesen estado por encima del valor especificado por el diseñador, varias de las columnas del edificio presentaban condiciones críticas de capacidad.
 - b. El análisis demuestra que de haberse diseñado y construido las columnas cumpliendo los requisitos mínimos de las NSR-98 correspondientes a la capacidad axial de carga, las columnas hubiesen tenido la capacidad de resistir las cargas axiales actuantes, aún si las resistencias del concreto de las columnas hubiesen presentado valores deficientes en los rangos inferiores de los valores encontrados en los ensayos de control de calidad.

CONCEPTO TÉCNICO FINAL EN RELACIÓN A LAS CAUSAS MÁS PROBABLES DEL COLAPSO

Teniendo en cuenta la información disponible y los diferentes análisis realizados en este estudio, se puede concluir que el colapso de la Etapa 6 del edificio Space está asociado a una causa primaria o principal y a una serie de posibles factores detonantes que se explican a continuación.

La causa primaria o principal del colapso del edificio SPACE se encuentra en la falta de capacidad estructural de las columnas principales de la edificación para resistir las cargas actuantes debidas al peso propio de la estructura y a las cargas de servicio impuestas. En particular las columnas de los ejes R-3 y S-3 presentaron cargas actuantes que superaron sus capacidades en puntos críticos por lo cual estas presentaron falla estructural por compresión los días 20 de febrero de 2013 y 11 de octubre de 2013, esta última un día antes del colapso de la edificación. La falta de capacidad estructural está asociada a la deficiencia en el dimensionamiento y diseño de los elementos estructurales principales (columnas, vigas y placas). Hay evidencia de que el edificio adolecía de problemas y patologías estructurales internas en los meses y días previos al colapso los cuales incluyen fisuras y grietas en muros divisorios de mampostería, deflexiones verticales excesivas en las placas de entrepiso y fallas estructurales en al menos dos columnas principales de la edificación.

En el edificio se registraron asentamientos diferenciales que están por encima de los valores admisibles establecidos por la normativa vigente. Las causas más probables de los altos asentamientos registrados se atribuyen a problemas presentados durante la construcción de las pilas de cimentación, para lo cual se tiene evidencia que al menos una de las pilas no quedó construida con las especificaciones establecidas en el diseño en relación al diámetro de la base. Al respecto no se encontraron advertencias o recomendaciones en los estudios sobre la posibilidad de problemas constructivos asociados a la presencia de aguas subterráneas y suelos inestables. A pesar de lo anterior no se considera que los asentamientos sean una causa principal del colapso por las siguientes tres razones:

- Aún en condiciones de análisis sin ningún tipo de asentamientos, varias de las columnas de la edificación ya presentaban condiciones críticas de capacidad.*
- Las evaluaciones analíticas detalladas indican que aún de no haberse presentado los asentamientos diferenciales registrados, el edificio en su configuración original presentaba un alto riesgo de colapso ante las cargas sísmicas de diseño o ante una eventual falla frágil por flujo plástico acelerado de las columnas críticas sometidas a altas cargas axiales.*
- El análisis demuestra que de haberse diseñado y construido las columnas cumpliendo con los requisitos mínimos de las NSR-98 correspondientes a la capacidad axial de carga, estas hubiesen tenido la capacidad de resistir las cargas axiales asociadas a dicha situación, aun considerando la ocurrencia de los asentamientos diferenciales registrados.*

De acuerdo con los análisis efectuados y teniendo en cuenta la causa primaria establecida, se considera que el colapso de la edificación se produjo por la ocurrencia de los siguientes posibles factores detonantes:

- Los efectos de la redistribución progresiva de cargas y las altas excentricidades generadas por los asentamientos diferenciales registrados en la edificación y por la falla de la columna S3.*
- Los altos niveles de esfuerzo en elementos estructurales principales como las columnas lo cual conlleva a problemas de deformación excesiva por flujo plástico y a la posibilidad de la falla frágil anticipada de estos elementos.*
- Los trabajos de intervención estructural que se estaban realizando en la noche de 11 de octubre de 2013 en los cuales se evidenció la instalación de elementos de refuerzo metálicos, la intervención en los elementos estructurales críticos y la eventual eliminación de muros de mampostería adyacentes a la columna fallada.*
- La eventual falla a cortante de las vigas principales del edificio en los niveles críticos y/o la falla a compresión de los muros de mampostería ante la redistribución de cargas que se generó a consecuencia de los asentamientos diferenciales reportados y a la falla de la columna del eje S3.*

A juicio de los especialistas y expertos de la Universidad de los Andes, la estructura del edificio SPACE, de haberse diseñado cumpliendo la totalidad de los requisitos aplicables de la Ley 400 de 1997 y sus Decretos Reglamentarios (NSR-98), la Etapa 6 no hubiese presentado el colapso que presentó en las condiciones impuestas.