

Diagnóstico y evaluación de fachada monumental de mampostería en zona de elevada sismicidad: un caso de estudio

González del Solar Gerardo A.^{1,2}, Maldonado Noemi G.¹, Martín Pablo E.¹,
Maldonado Ignacio A.¹, Calderón Francisco^{1,3}

1CeReDeTeC, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Rodríguez 273, Ciudad, Mendoza, e-mail: ngm@frm.utn.edu.ar, web: <http://www.frm.utn.edu.ar/ceredetec>.

2 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CeReDeTeC Facultad Regional Mendoza Universidad Tecnológica Nacional

3 Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, CeReDeTeC Facultad Regional Mendoza Universidad Tecnológica Nacional

Palabras claves: mampostería – sismorresistente – rehabilitación – normativa

RESUMEN

El uso de fachadas o parapetos de mampostería sin armar ha sido desalentado por el efecto de los terremotos, sin embargo algunos ejemplares permanecen como íconos aún en zonas de elevado riesgo sísmico. En este caso se evalúan las patologías de una fachada friso de más de 10 m de altura del Museo de Bellas Artes de Mendoza, Casa de Fader, edificio monumental patrimonial de un nivel que cuenta con muros de mampostería cerámica cocida no reforzada de gran espesor y altura y presenta daño estructural debido a distintos eventos sísmicos y problemas de diseño estructural debido a intervenciones anteriores, que alberga la producción de los murales más importantes del artista Fernando Fader.

Los estudios de patología y diagnóstico empezaron en 2007, se continuaron en 2013 y el estado de deterioro de los elementos no estructurales ha obligado a su inhabilitación hasta alcanzar un nivel de seguridad mínimo tanto para las pinturas como para los visitantes.

El análisis del comportamiento estructural del paramento y de su influencia en el conjunto de la edificación se ha evaluado mediante un modelo de elementos finitos, tanto para la valoración del daño existente como para la rehabilitación. La modelación requiere de datos de caracterización física y mecánica de los materiales utilizados mediante ensayos de campo y laboratorio y de las condiciones ambientales, que afectan especialmente la fachada oeste.

INTRODUCCIÓN

Las enseñanzas obtenidas luego de cada terremoto han ido desalentando el uso de la mampostería en la fachada, en especial cuando se trata de mampostería sin armar. Prueba de ello es que después del terremoto de Long Beach, Estados Unidos en 1933 se prohibió el uso de la mampostería sin encadenar en escuelas (Figura 1) y un ejemplo más reciente en Argentina, es el estado en que quedó la ciudad de San Juan después del terremoto de 1944, con las caídas de las fachadas (Figura 2).



Figura 1: A. Hamilton Jr High School, 1933
Terremoto de Long Beach, Estados Unidos



Figura 2: Ciudad de San Juan, 1944
Terremoto de San Juan

En el Gran Mendoza, la zona de mayor riesgo sísmico del país, el uso de fachadas o parapetos de mampostería sin armar ha ido decayendo por el efecto de los terremotos y prueba de ello es que el primer reglamento de construcciones de la Municipalidad de la Capital de 1902 prohibía cornisas, ménsulas y balcones de más de 3 m de altura y el de 1927 indicó que las fachadas debían estar calculadas como “construcciones contra temblores” aplicando una carga horizontal como fracción del peso propio del edificio (1/10 y 1/8) [1].

Sin embargo, en otros departamentos de la provincia dichas restricciones constructivas no se aplicaron.

Tal es el caso del Museo de Bellas Artes, Casa de Fader, que se encuentra ubicado en el departamento de Luján de Cuyo y cuya construcción se inicia en el año 1889. La fachada principal ha sufrido diversas modificaciones [2] hasta el año 1949 permaneciendo desde entonces como un ícono de la obra (Figura 3).



Figura 3: Fachada del Museo de Bellas Artes, Casa de Fader.

Sin embargo, el edificio ha sufrido los efectos del paso del tiempo y la falta de mantenimiento produciendo un importante estado de fisuración que ha llevado a la inhabilitación temporal de la estructura, debiendo realizarse una intervención que conduzca a cumplir los requisitos mínimos de seguridad. La figura 4 presenta vistas en perspectiva de la estructura en estudio con su estado de fisuración actual.

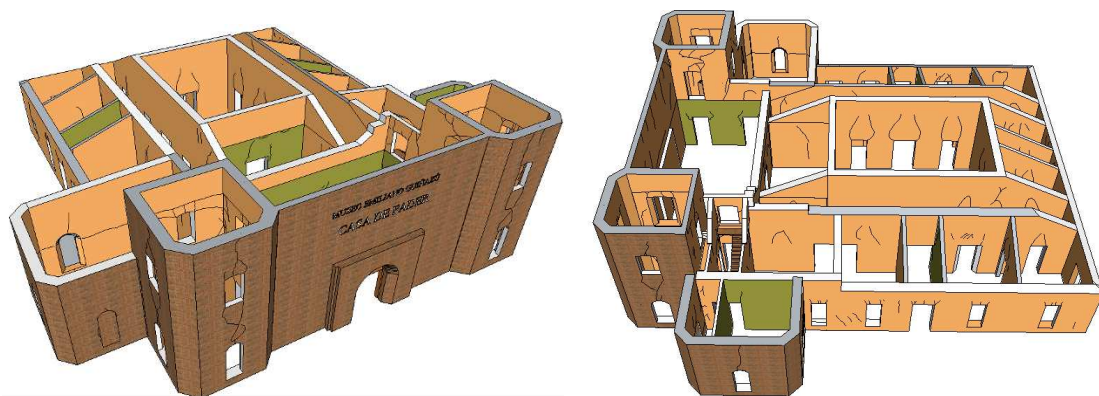


Figura 4: Estado de fisuración del edificio.

DESCRIPCIÓN DEL PARAMENTO EN ESTUDIO

Desde el año 1949 la fachada principal fue vista como un signo emblemático de la obra siendo preservada desde entonces. Las figuras 5 y 6 presentan al paramento en el año 1950 y en su estado actual respectivamente.

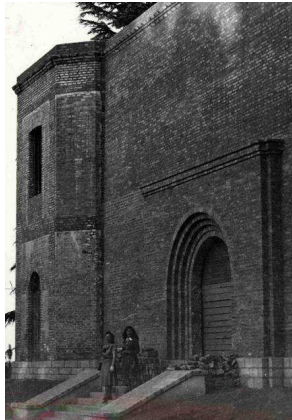


Figura 5: Fachada en 1950



Figura 6: Estado de fachada en 2014

Puede observarse en estas imágenes la presencia de sendas fisuras verticales en correspondencia con la unión entre las torretas y el paramento principal, siendo estas fallas el objeto del presente estudio.

Los dos factores de diseño que controlan el comportamiento de esta fachada de mampostería son el movimiento y la humedad. El movimiento de la pared de mampostería cerámica cocida de más 0.50 m de espesor se produce por cambios en el contenido de humedad y la temperatura. En una primera etapa se produce una expansión del ladrillo cerámico debido a la absorción de la humedad del ambiente y que en el tiempo se hace cada vez más lenta. A esta situación se suma el movimiento debido a los cambios estacionales de temperatura, que por la ubicación climática en verano pueden alcanzar más de 25°C de variación diaria y en invierno se presentan semanas con condiciones de congelación y deshielo. Debido a estas circunstancias, el diseño de la fachada de mampostería requiere de juntas de expansión verticales y horizontales. En este caso, al no existir juntas, se presenta un estado de fisuración generado por la ausencia de las mismas, como se observan en las Figuras 5 y 6, donde se presenta la fisura vertical en correspondencia con la formación de la junta de expansión en la discontinuidad de la fachada central y cuya apertura varía estacionalmente.

Además de las dilataciones y contracciones reversibles debido a las acciones térmicas y de humedad, se pueden presentar daños irreversibles debido a condiciones de fabricación y composición que pueden fisurar la fábrica si el alargamiento o acortamiento está coartado y que se debe monitorear previo a la puesta en valor.

MODELO MATEMÁTICO

El modelo desarrollado para el estudio del comportamiento estructural [2] es presentado en la figura 7 en la cual se puede observar la participación de diferentes materiales. La combinación de ellos produce esfuerzos internos ante cargas térmicas debido a la diferencia entre coeficientes de dilatación que pueden llegar a producir un estado importante de fisuración en la estructura. Por otra parte, las cargas gravitatorias someten a la estructura a un estado permanente de sollicitaciones. Finalmente, la zona de emplazamiento de la obra es de elevada sismicidad [3] por lo que es necesario considerar los efectos sísmicos que pudieran presentarse durante la vida útil del edificio.

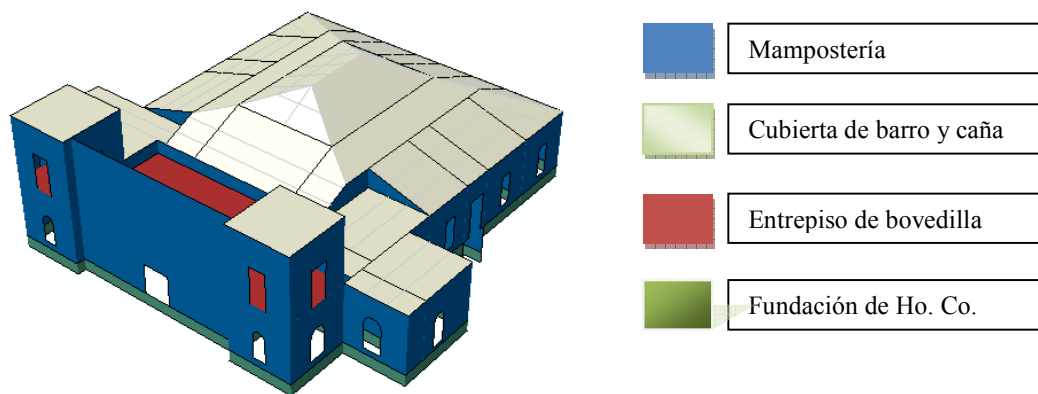


Figura 7: Museo de Bellas Artes, Casa de Fader.

De esta manera, para el estudio de la estructura es necesario someterla a distintos estados de carga y analizar el comportamiento global y, en particular, del paramento frontal a fin de poder determinar el estado de fisuración correspondiente, contrastándolo con el observado en la estructura real.

En cuanto al efecto sísmico considerado, cabe destacar que el mismo es producto de un análisis estático siguiendo las recomendaciones de la reglamentación vigente en nuestro medio [4].

La tabla 1 resume las combinaciones de cargas aplicadas a la estructura.

Tabla 1: Combinación de cargas

D	Peso Propio (D)
D+E	Peso Propio (D) + Efecto sísmico (E)
D+T	Peso Propio (D) + Carga por temperatura (T)

La fachada principal se compone de mampostería simple formada por mampuestos de barro cocido macizo aglutinados con mortero cálcico [2]. Los elementos componentes han sido ordenados de manera tal de formar un espesor de 40 cm en el paramento principal y de 65 cm en las torretas como se presenta en la figura 8.

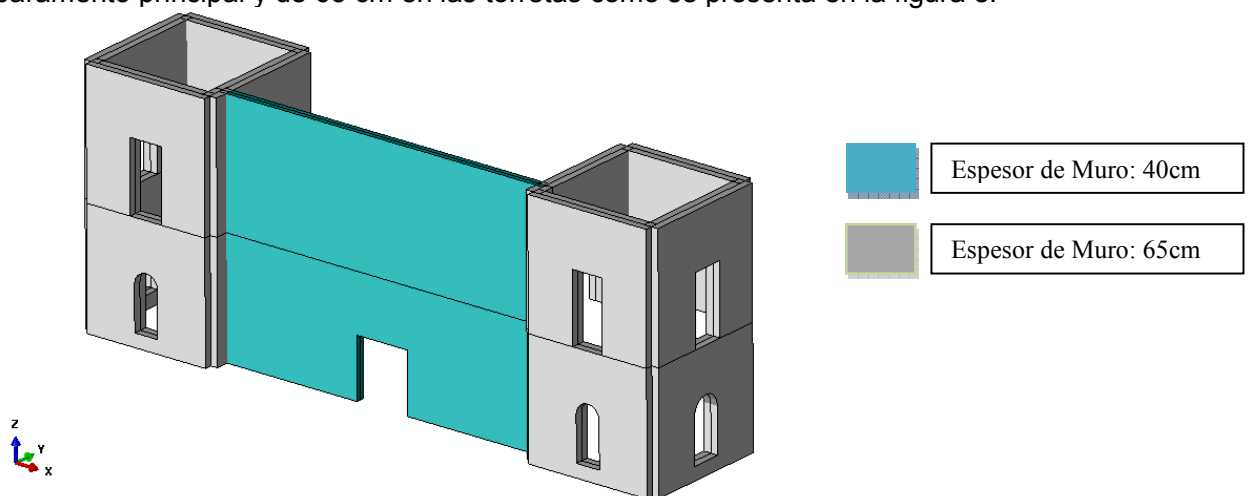


Figura 8: Muros que componen la zona en estudio.

De la imagen debe destacarse el efecto de confinamiento que realizan las torretas sobre el paramento principal que, ante la ausencia de juntas de dilatación, controlan las variaciones volumétricas debido al efecto térmico. Asimismo, la ecuación 1 expone que la deformación de la mampostería por causas térmicas depende del coeficiente de dilatación térmica del material, α , y de la variación de la temperatura, Δt , así como de la longitud original del elemento.

$$\Delta l = \alpha \times l \times \Delta t \quad (\text{Ecuación 1})$$

Al analizar las condiciones térmicas del paramento en época estival, y teniendo en cuenta que el mismo está orientado hacia el oeste, en las horas de mayor temperatura, la superficie del muro alcanza valores de hasta 40°. Las ecuaciones 2 y 3 presentan las deformaciones longitudinal y transversal, respectivamente, del paramento en estudio.

$$\Delta l_{long} = 8.0E - 06 \text{ } ^1/_{\circ C} \times 15450 \text{ mm} \times 40^{\circ C} = 4.94 \text{ mm} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$\Delta l_{transv} = 8.0E - 06 \text{ } ^1/_{\circ C} \times 400 \text{ mm} \times 40^{\circ C} = 0.13 \text{ mm} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Estas deformaciones inducen tensiones en la mampostería que deben ser tenidas en cuenta en los modelos matemáticos y que pueden superar las tensiones máximas admisibles del material.

Para el estudio del comportamiento de la fachada se desarrolla un modelo matemático de análisis global formado por elementos tipo cáscara y definido por un material elasto-plástico que responde al modelo de Drucker-Prager [5]. La tabla 2 presenta de manera resumida las propiedades adoptadas.

Tabla 2: Propiedades adoptadas para la mampostería.

Densidad	1431.1 kg/m ³
Módulo de Elasticidad	7.25E+8 N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.3
Criterio de daño	Drucker Prager
ϕ fricción	67° (se adopta flujo asociado)
Tensión de fluencia a la tracción	2.0E+5 N/m ²
Tensión de rotura a la tracción	6.0E+5 N/m ²
Deformación plástica máx. a tracción	0.01 m
Coef. de expansión térmica	8.0E-6 1/°C

En cuanto a las condiciones de fundación del paramento en consideración, cabe mencionar que el mismo se encuentra fundado por medio de cimientos sobre un suelo deformable tipo limoso. Se adopta como hipótesis que tanto el cimiento como el suelo se comportan como material elástico lineal. En el caso del cimiento se adoptan valores de elasticidad suficientemente elevados para que éstos no condicionen el comportamiento global de la estructura. Sin embargo, el suelo posee un módulo de elasticidad de 4.1E+6 N/m² de magnitud que resulta equivalente al coeficiente de balasto obtenido del análisis de suelo y un coeficiente de Poisson de 0.35.

El entrepiso es simulado como un material de elevada rigidez, de propiedades másicas y elásticas equivalentes a las bovedillas de mampostería y acero que componen a la estructura original, de manera de poder representar así el comportamiento de diafragma rígido correspondiente. La cubierta del museo se

encuentra materializada por barro y caña de manera que para el modelo fue simplificado por medio de un material de elevada elasticidad y masa equivalente.

Los diferentes materiales que componen la estructura global fueron relacionados entre sí por medio de vínculos perfectos.

Por otra parte, para el análisis de carga debido al efecto sísmico (E) se adopta una aceleración en el sentido longitudinal del paramento en estudio de 0.5 veces la aceleración de la gravedad. En cuanto al análisis por carga de temperatura (T), se aplica a la estructura una variación térmica de 40°C, aplicados sobre la cara frontal fachada, formada por las torretas y el paramento.

La estructura simulada se compone de elementos tipo cáscara con un mallado formado por elementos S4R, es decir, elementos cuadriláteros (4 nodos con doble curvatura) tipo cáscara de bajo o gran espesor, integración reducida, hourglass control y deformación limitada de membrana.

La figura 9 presenta en detalle el mallado empleado para el análisis de la mampostería [6]. Cabe destacar la distribución de elementos estructurados que predominan tanto en la fachada como en las torres en estudio.

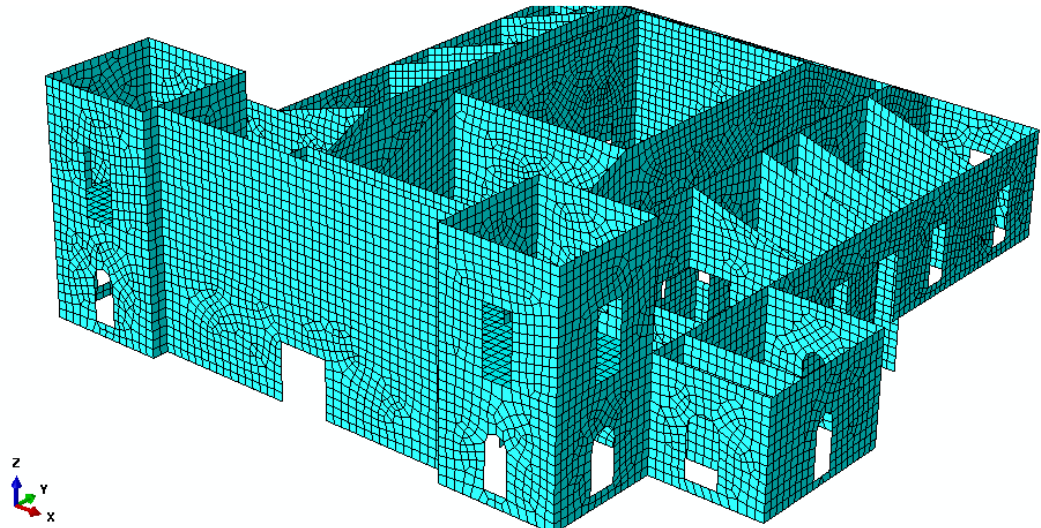


Figura 9: Descripción de la malla empleada para el modelo desarrollado.

RESULTADOS

Los resultados que se presentan resumen los estados tensionales para los casos de análisis propuestos en la zona de estudio, y hacen un análisis más profundo respecto de las fisuras verticales en los encuentros paramento-torretas. Los resultados que se presentan a continuación se limitan a la mampostería en la zona en estudio.

Carga vertical producto del peso propio (D)

La figura 10 presenta el estado de tensiones máximas en el paramento de la fachada sometido a la acción de la carga gravitatoria únicamente.

Se puede destacar que tanto la estructura global como en particular la región que compone la fisura en análisis se encuentran sometidos a un bajo estado de tensiones. La mampostería que compone la zona fisurada presenta una tensión máxima principal

aproximada de $3.5E+3$ N/m² en el nivel inferior, en tanto que de $0.5E+3$ N/m² en el nivel superior de la estructura.

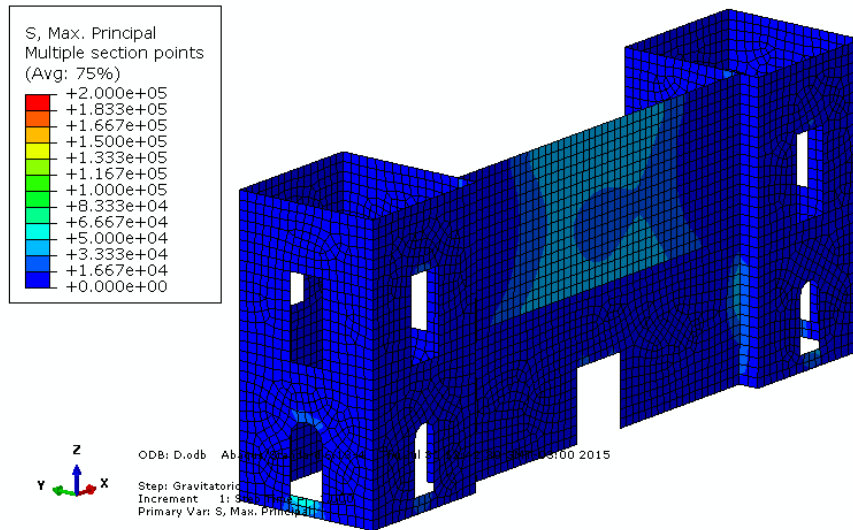


Figura 10: Estado tensional bajo cargas verticales de Peso Propio.

Carga vertical (D) + Carga Sísmica (E)

La figura 11 presenta el estado tensional de la estructura sometida a la acción de las cargas verticales y los efectos sísmicos. Estos últimos son analizados únicamente en la dirección transversal de la estructura (sentido longitudinal del muro) ya que se considera que es el estado más solicitante para nuestro análisis.

Se puede observar que la estructura se encuentra bajo un elevado estado tensional que produce grandes esfuerzos en el parapeto principal. Sin embargo, el estado de tensiones máximas principales en la zona de la fisura en estudio correspondiente al nivel inferior es de $5.5E+4$ N/m² siendo que en el nivel superior, las tensiones medias disminuyen a $0.15E+4$ N/m².

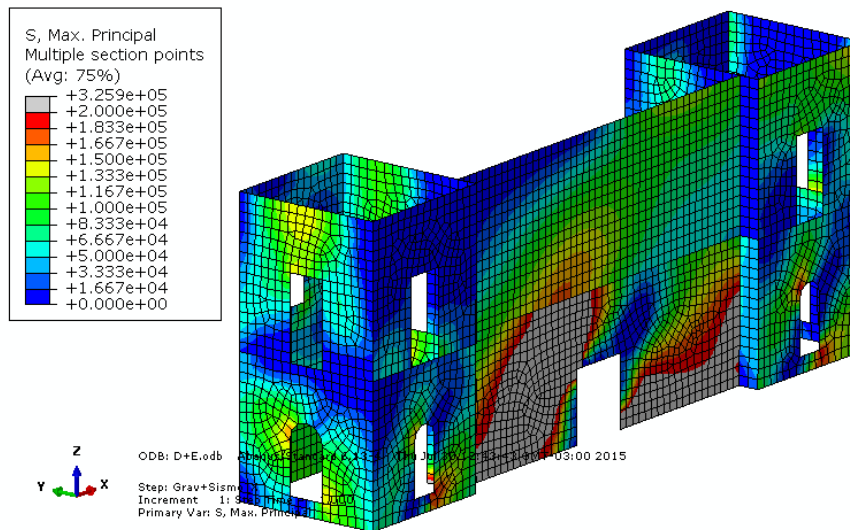


Figura 11: Estado tensional bajo cargas verticales y acción sísmica en el sentido transversal de la estructura

Carga vertical (D) + Carga por Temperatura (T)

La figura 12 muestra el estado tensional producto de la combinación de la temperatura y la carga gravitatoria. Se puede observar que la expansión por efecto térmico del parapeto principal en su sentido longitudinal es controlada por la presencia de las torretas ubicadas a cada extremo del muro impidiéndole la dilatación libre. Este estado de confinamiento genera una fuerte concentración de tensiones y que pueden dar lugar a la fisuración vertical que se evidencia visualmente en la estructura.

Las tensiones máximas principales alcanzan un valor máximo de $1.8E+5N/m^2$, siendo el promedio de $1.6E+5N/m^2$ en planta baja, en tanto que alcanza un valor máximo de $1.5E+5N/m^2$ y un valor medio de $1.3E+5N/m^2$ en planta alta.

La figura 13 presenta un detalle de la distribución de tensiones en el encuentro paramento-torre que corresponde a la zona de la fisura en estudio.

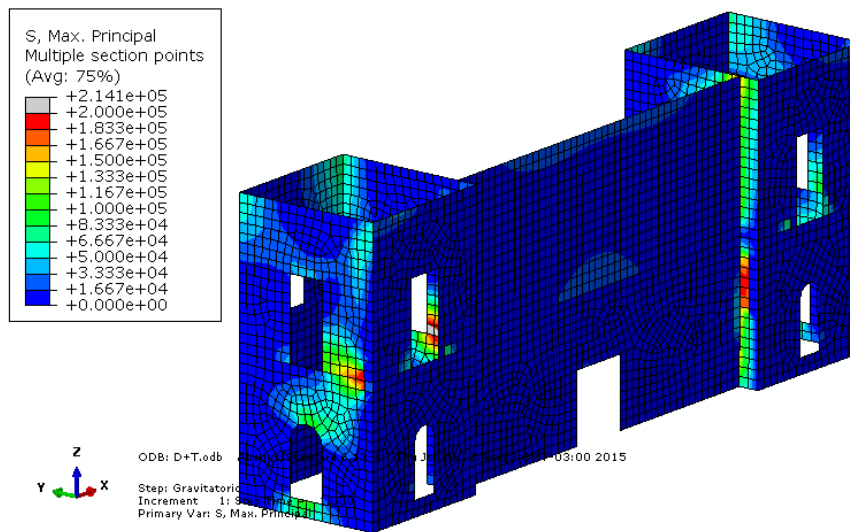


Figura 12: Estado tensional bajo cargas verticales + temperatura

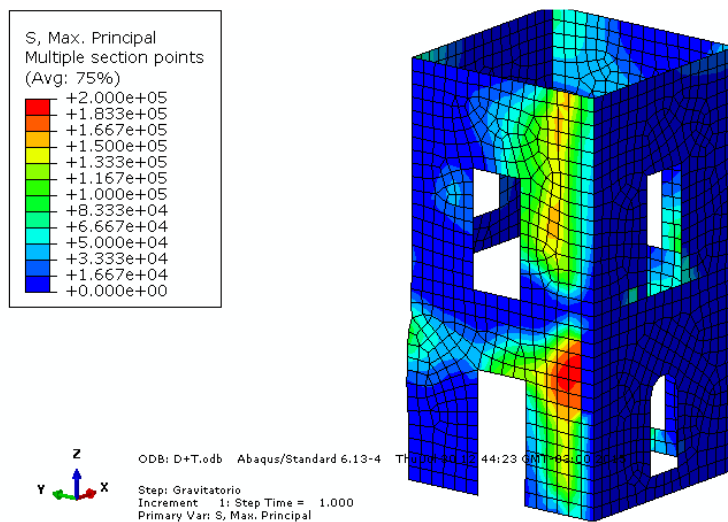


Figura 13: Detalle del estado tensional bajo cargas verticales + temperatura en la zona de fisuración en el encuentro de muros entre el paramento principal y la torreta.

CONCLUSIONES

De los resultados antes expuestos, se observa que las tensiones máximas que se alcanzan en la zona en estudio corresponden al estado de cargas producto de la combinación del efecto térmico y la acción de la gravedad. Esto produce un estado de tensiones medio en el nivel inferior de $1.6E+5N/m^2$ y de $1.3E+5N/m^2$ en el nivel superior. Estos niveles de tensiones son muy cercanos a los correspondientes al inicio de la plastificación por tensión del material ($2.0E+5N/m^2$). De esto se concluye que, ante la combinación de este estado de cargas y problemas de índole constructivos o bien la acción sísmica, puede darse a lugar a la aparición, formación y propagación de la fisura vertical en estudio. Teniendo en cuenta el efecto cíclico de las acciones sísmicas, es razonable pensar en la simetría de la fisuración, es decir en la existencia de la fisura en ambas torretas.

Ante esta posibilidad y con el fin de justificar lo expuesto, se realiza el análisis de tensiones máximas principales para el caso de carga que combina la acción de la gravedad (D), la temperatura (T) y la acción sísmica (E), siendo la figura 14 aquella que expresa los resultados alcanzados.

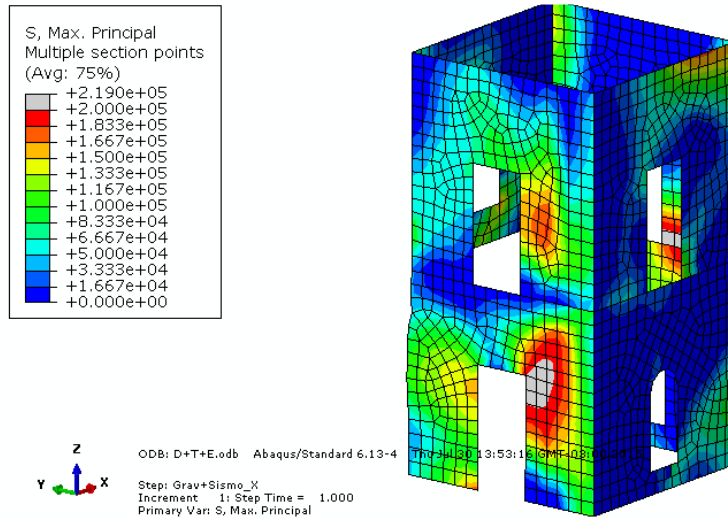


Figura 14: Detalle del estado tensional bajo cargas verticales + temperatura + acción sísmica en la zona de fisuración en el encuentro de muros entre el paramento principal y la torre.

Por otro lado, la figura 15 expone la plastificación debido al estado de carga descrito, coincidente con las patologías evidenciadas durante la inspección.

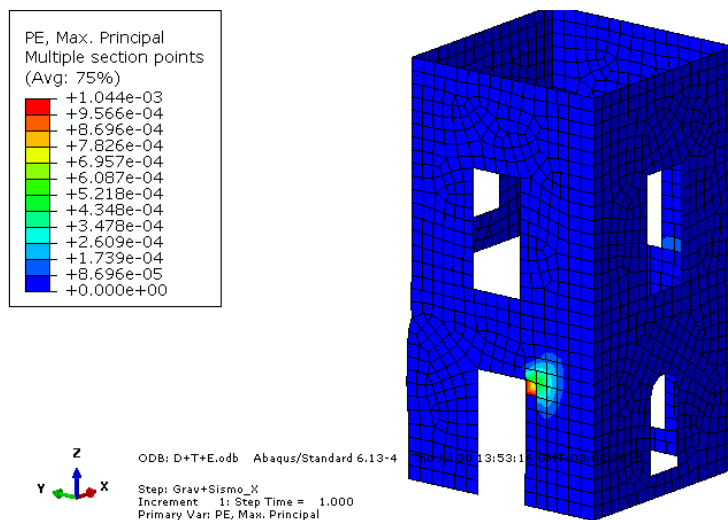


Figura 15: Detalle del inicio de la zona de plastificación en la torre.

REFERENCIAS

- [1] PONTE Ricardo (1987) Mendoza, aquella ciudad de barro. Historia de una ciudad andina desde el siglo XVI hasta nuestros días. Municipalidad de la Ciudad de Mendoza.

- [2] CeReDeTeC. Informe Técnico 01/2014 Museo Emiliano Guñazú – Casa de Fader, 2014, pp. 1-111.
- [3] CASTANO, Juan Carlos (1986) Gran Mendoza, el núcleo urbano expuesto al mayor nivel de riesgo sísmico en la República Argentina. INPRES. Publicación Técnica N°10.
- [4] INPRES CIRSOC 103 Parte I - Reglamento Argentino Para Construcciones Sismorresistentes. (2013)
- [5] Sánchez A.A., González del Solar G.A., Martín P.E., Maldonado N.G. (2013) “Análisis no lineal de muros de gran espesor mediante aplicación de superficie de interacción en ABAQUS”, Mecánica Computacional, Vol. XXXII, pp. 191-211.
- [6] Simulia. ABAQUS 6.11; Manual del Usuario. Dassault Systèmes Simulia Corp., 2011