

Incremental Dynamic Analysis of a 60 Year Old Hospital with Handmade Brick Masonry Walls

George Gonzales, Bachiller¹, Ashily Aguilar, Bachiller¹, and Guillermo Huaco PhD PE, Profesor¹
¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201521566@upc.edu.pe, u201517071@upc.edu.pe, pccighua@upc.edu.pe

Abstract— In the world, there are a lot of old hospitals that have been built without considering seismic-resistant design standard. These essential buildings must maintain their functionality during and after a seismic event. That's why, it's so important to adopt non-linear models that represent the appropriate behavior of the structural elements and the structure. Also, to develop seismic analyzes that can capture the behavior that these structures would present before a seismic event. This research proposes a non-linear model of 60 years old hospital with 3 levels of masonry handmade bricks. In addition, the incremental dynamic analysis was developed for 11 pairs of seismic records and IDA curves for both orthogonal directions were reported. The results show that the proposed calibrated model is valid for use in the development of nonlinear seismic analyzes, also structural responses such as drifts and acceleration at different levels of the infrastructure.

Keywords—Incremental Dynamic analysis, hospital, old infrastructure, non-lineal model, handmade brick.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.375>
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

Análisis Dinámico Incremental de un Hospital de 60 Años de Antigüedad con Muros de Albañilería Artesanal

George Gonzales, Bachiller¹, Ashily Aguilar, Bachiller¹, and Guillermo Huaco PhD PE, Profesor¹

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201521566@upc.edu.pe, u201517071@upc.edu.pe, pccighua@upc.edu.pe

Resumen— *En el mundo, existe un gran número de hospitales que por su antigüedad han sido construidos sin tomar en cuenta consideraciones sismorresistentes. Estas edificaciones por ser esenciales deben mantener su funcionalidad durante y después de un evento sísmico. Por ello, es de vital importancia adoptar modelos no lineales que representen el comportamiento adecuado de los elementos estructurales y de la estructura en conjunto, así como también desarrollar análisis sísmicos que puedan capturar de mejor forma el comportamiento que presentarían estas estructuras ante un evento sísmico. La presente investigación, propone un modelo no lineal de un pabellón de hospital de más de 60 años de antigüedad con 3 niveles de sistema de muros de albañilería confinada de unidades de albañilería artesanal. Además, se desarrolló el análisis dinámico incremental para 11 pares de registros sísmicos y se reportaron curvas IDA para ambas direcciones ortogonales. Los resultados muestran que el modelo propuesto calibrado es válido para ser usado en el desarrollo de análisis sísmicos no lineales, como también respuestas a derivas y aceleraciones a niveles de distintos pisos de la infraestructura*

Palabras Clave— *análisis dinámico incremental, hospital, infraestructura antigua, modelo no lineal, albañilería artesanal.*

Abstract— *In the world, there are a lot of old hospitals that have been built without considering seismic-resistant design standard. These essential buildings must maintain their functionality during and after a seismic event. That's why, it's so important to adopt non-linear models that represent the appropriate behavior of the structural elements and the structure. Also, to develop seismic analyzes that can capture the behavior that these structures would present before a seismic event. This research proposes a non-linear model of 60 years old hospital with 3 levels of masonry handmade bricks. In addition, the incremental dynamic analysis was developed for 11 pairs of seismic records and IDA curves for both orthogonal directions were reported. The results show that the proposed calibrated model is valid for use in the development of nonlinear seismic analyzes, also structural responses such as drifts and acceleration at different levels of the infrastructure.*

Keywords— *Incremental Dynamic analysis, hospital, old infrastructure, non-linear model, handmade brick.*

I. INTRODUCCIÓN

La costa occidental del borde del Perú, debido a su ubicación geográfica en el denominado Cinturón de Fuego del Pacífico, es una zona que experimenta la ocurrencia de sismos

de manera frecuente. A lo largo de los años, dichos eventos no habrían liberado en su totalidad la energía acumulada [1]. Debido a ello, este país presenta un alto potencial de generar un terremoto destructor de 8.9Mw [2]. Actualmente, en este territorio existe un gran número de hospitales que han sido diseñados y construidos antes del año 1970, año en el que se emitió la primera versión de la Norma Técnica Peruana de Diseño Sismorresistente E030 [3]. De esta forma, por su antigüedad, estas estructuras posiblemente fueron diseñadas tomando en cuenta solo cargas de gravedad, sin considerar la ductilidad o el control de desplazamientos, las mismas que son criterios establecidos en [3]. Por lo antes mencionado, surge la necesidad de evaluar el comportamiento sísmico de estas edificaciones mediante análisis no lineales que permitan predecir el mecanismo de colapso de la estructura y cuya data sirva como input para estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico, para ello es necesario desarrollar modelos no lineales de la edificación que representen el comportamiento de dichas estructuras.

Muchos investigadores se han interesado en el desarrollo de modelos no lineales de muros albañilería, tal es el caso de [4] que propuso una metodología de modelo no lineal de una edificación de albañilería, en base a un sistema de pórtico equivalente mediante elementos link no lineales. Así también, [5] desarrollaron análisis dinámicos incrementales para la obtención de curvas IDA. Estos resultados sirvieron como input para el desarrollo de funciones de fragilidad analíticas que permitieron evaluar la vulnerabilidad sísmica de dicha tipología estructural.

El presente artículo, propone un modelo no lineal de una estructura de albañilería artesanal de 3 niveles con más de 60 años de antigüedad, la cual fue calibrada computacionalmente con los resultados de ensayos de laboratorios. Este modelo fue sometido a una serie de análisis de historia de respuesta no lineal con diferentes niveles de intensidad de cada sismo, obteniendo de esta manera las curvas IDA para cada dirección ortogonal.

II. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

La edificación estudiada en el presente artículo es un hospital que tiene más de 60 años de antigüedad y consta de 3 niveles con un sistema de muros de albañilería artesanal. Se encuentra en una zona altamente sísmica en la ciudad de Lima, Peru. Según planos originales de dicha infraestructura, el sistema estructural es de mampostería confinada con ladrillo

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.377>

ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

artesanal con área en planta de 11m x 21.60m como se puede ver en Fig.1. La sección de los elementos estructurales, tales como columnas y vigas son mostrados en la Fig. 2 también obtenidas de los planos originales recolectados en el hospital en estudio

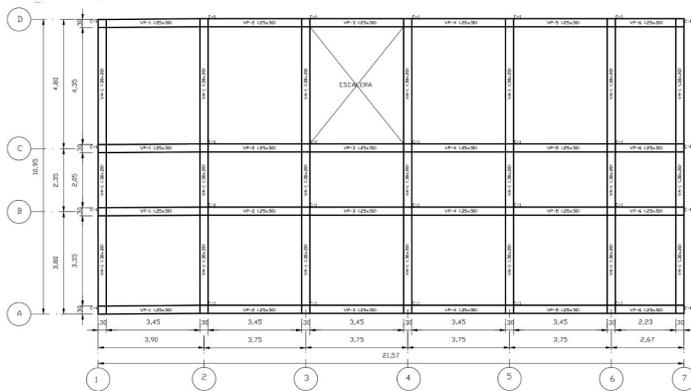


Fig. 1 Plano de planta típica de la edificación.

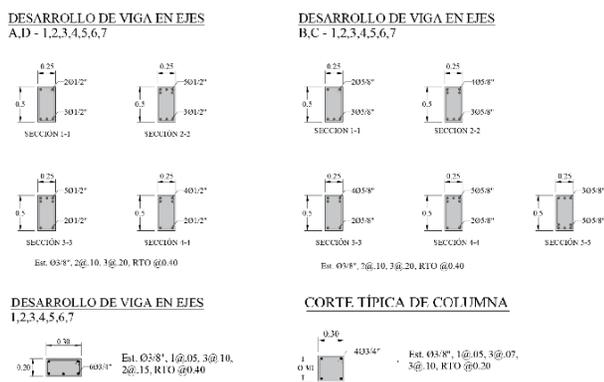


Fig. 2 Detalle de refuerzo de vigas y columnas.

Por otro lado, las propiedades mecánicas del concreto y acero se obtuvieron de un estudio previo realizado por el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) y el Ministerio de Salud (MINSA) [6]. Las propiedades mecánicas del ladrillo se tomaron muestras de pilas hechas con similares tipos de ladrillo artesanal según lo reportado en [7], ello debido a que se tiene poca información de estos tipos de ladrillo durante la construcción del hospital. También se reporta que el tipo de suelo es S1 correspondiente a suelo rígido [6]. La altura de cada nivel de piso es de 3m siendo altura total de 9m considerando los tres niveles del hospital; así mismo presenta juntas sísmicas de 3cm en su lado Norte y 2cm en su lado sur según planos originales del hospital.

III. ANÁLISIS DINÁMICO INCREMENTAL

El continuo crecimiento del poder de las computadoras ha hecho posible un impulso continuo hacia métodos de análisis

cada vez más precisos, pero al mismo tiempo más complejos [8]. El Análisis Dinámico Incremental (IDA) consiste en someter a una estructura a un conjunto de movimientos sísmicos compatibles con el espectro de diseño de la zona, los cuales han sido normalizados a distintos niveles de intensidad (PGA) para ejecutar por cada acelerograma un análisis historia de respuesta no lineal [9].

A. Selección de Registros Sísmicos

Se seleccionaron 11 pares de registros sísmicos, siguiendo las recomendaciones indicadas en [10]. Estos registros fueron seleccionados cuidando que las estaciones donde se registre el movimiento se encuentren ubicadas sobre un tipo de suelo S1 según la clasificación de [3]. Esto debido a que la edificación en estudio se encuentra sobre este tipo de suelo [6]. Los registros seleccionados se muestran en la tabla I.

TABLA I
ESTACIONES SELECCIONADAS.

Fecha	Estación	Código
16/10/1996	Parque de la Reserva	01E-W
		01N-S
31/05/1970	Parque de la Reserva	02E-W
		02N-S
05/06/1974	Zárate	03E-W
		03N-S
03/10/1974	Parque de la Reserva	04E-W
		04N-S
09/11/1974	Universidad Agraria	05E-W
		05N-S
13/06/2005	AQP-Instituto Geofísico-	06E-W
		06N-S
13/06/2005	Universidad Jorge Basadre- Tacna	07E-W
		07N-S
05/05/2010	Universidad Privada de Tacna	08E-W
		08N-S
05/05/2010	Universidad Privada de Tacna	09E-W
		09N-S
05/05/2010	Universidad Jorge Basadre- Tacna	10E-W
		10N-S
19/05/2010	Universidad Privada de Tacna	11E-W
		11N-S

Estos registros fueron tratados mediante un ajuste espectral para que sean compatibles con el espectro elástico del sitio. Siguiendo el procedimiento indicado en [11].

B. Modelo No Lineal de la Estructura

Para desarrollar el modelo no lineal de la estructura a analizar, se tomó como base los resultados de ensayos de laboratorios realizados por [7].

1) *Ensayo de Laboratorio:* A continuación, la Fig. 3 presenta una vista de elevación y planta del muro ensayado.

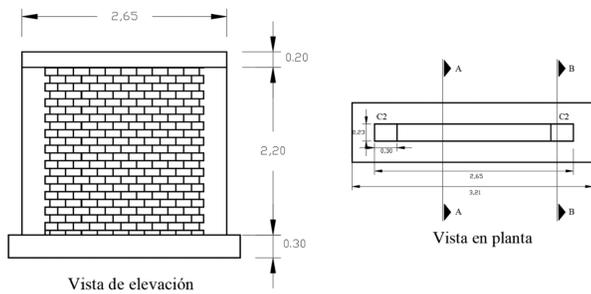


Fig. 3 Vistas de planta y elevación del muro típico ensayado

Para el ensayo de laboratorio se aplicaron cargas laterales tanto positivas como negativas, debido a que se trató de un ensayo cíclico. La Fig. 4 muestra la historia de desplazamientos que presentó el muro ensayado.



Fig. 4 Historia de desplazamientos del muro ensayado [7]

Como resultado del ensayo, la Fig. 5 muestra la curva de histéresis que se obtuvo, la cual representa los desplazamientos vs la carga cíclica aplicada.

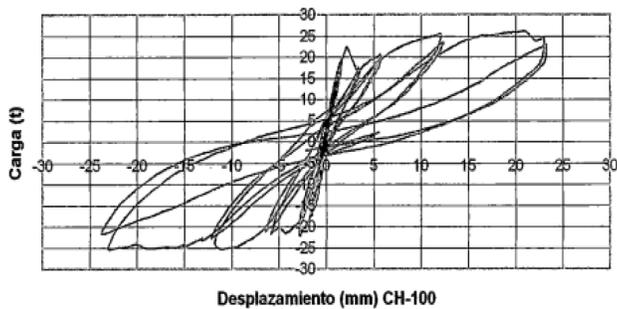


Fig. 5 Curva histérica del muro ensayado [7]

2) *Modelo No Lineal del Muro de Albañilería:* La idealización del modelo matemático no lineal del muro de albañilería se realizó mediante un elemento frame de concreto, con las dimensiones y propiedades lineales de la albañilería obtenidos de [6]. A este elemento, se le asignó una rótula de

corte a media altura en su dirección lateral de deformaciones con las propiedades de la curva de capacidad del muro ensayado. Adicionalmente, se idealizó el modelo de una viga con rigidez infinita sobre el elemento frame. A continuación, la Fig. 6 muestra el esquema del muro de albañilería real y el modelo no lineal equivalente propuesto en este estudio.

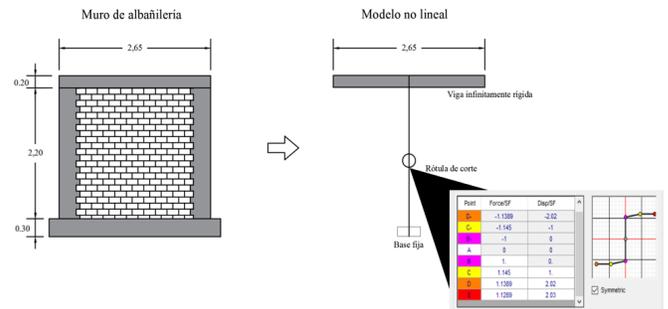


Fig. 6 Muro de albañilería y su modelo no lineal equivalente.

Las propiedades mecánicas de los materiales usados para el modelo equivalente se presentan en la Tabla II y fueron extraídos de [6] y [7].

TABLA II
PROPIEDADES MECANICAS.

Material	Propiedades del Material			
	Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)	Resistencia a Compresión (kg/cm ²)	Peso Unitario (kg/m ³)	Modelo Histerético
Albañilería	2.37x10 ⁴	47.41	-	Pivot
Concreto Losa	2.174x10 ⁵	210	2400	Concreto
Concreto Columna	2.74x10 ⁵	333	2400	Concrete
Concreto Viga	2.55x10 ⁵	289	2400	Concrete
Concreto Rígido	2.17x10 ⁸	210	2400	Concrete
Acero de Rfuerzo	2.039x10 ⁶	-	-	Kinematic

3) Validación del Modelo No Lineal:

Para este estudio se empleó el modelo de histéresis Pivot, ya que hay muchos factores que afectan el comportamiento sísmico de los muros de albañilería [4] como su patrón de degradación de rigidez y liberación de energía. A pesar de que el modelo de histéresis Takeda [12] es de uso común para muchos investigadores, se encontró que para el presente muro el modelo Pivot da valores más comparables con el ensayo de laboratorio.

Con el fin de validar el modelo no lineal equivalente propuesto, se replicó el ensayo de laboratorio en el Software SAP 2000. Para ello, se calcularon los parámetros influyentes en el modelo de Histéresis Pivot siguiendo las indicaciones de [12]. De esta forma, se sometió al muro a un análisis tiempo historia no lineal induciendo la historia de desplazamiento del muro ensayado, para luego comparar las respuestas histéricas obtenidas del Software SAP 2000 y del ensayo de

laboratorio. Por último, se realizó un proceso iterativo variando los parámetros calculados previamente de la curva histerética hasta obtener un mejor ajuste con el modelo experimental.

La Fig. 7 muestra la comparación de la curva histerética del ensayo de laboratorio y del modelo no lineal equivalente.

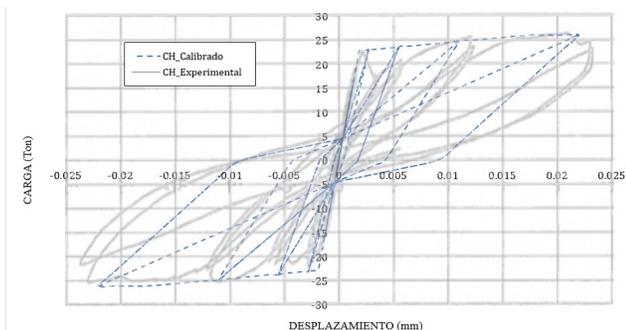


Fig. 7 Comparación de curva histerética del muro ensayado vs el modelo no lineal equivalente calibrado.

4) *Modelo Matemático 3D*: Se desarrollaron 2 modelos previos, el primero considerando solo 3 grados de libertad en cada nudo con respecto a su dirección ortogonal de deformaciones, restringiendo los movimientos solo al análisis en el plano XZ y el segundo considerando 6 grados de libertad de movimiento en sus direcciones ortogonales combinadas sin restringir movimientos en ningún plano. De esta forma se muestra la comparación de resultados en la Fig. 8.

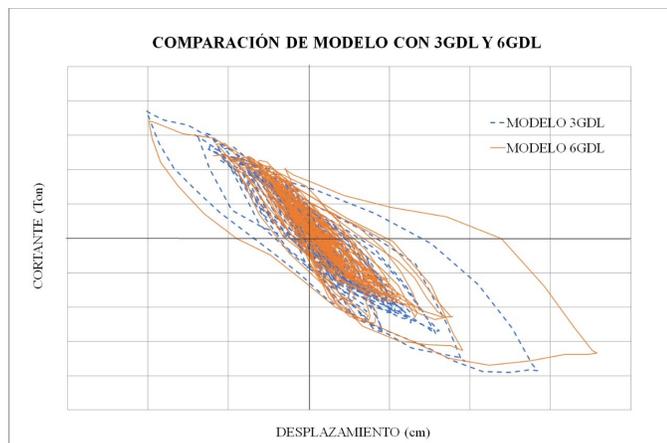


Fig. 8 Comparación de desplazamientos de techo del modelo con 3GDL y 6GDL

En la Fig. 8 se observa que el modelo con 6 GDL presenta mayores desplazamientos como respuesta dinámica, esto se debe al efecto de torsión en la estructura analizada. Por este motivo, se decidió utilizar el modelo completo en 3D considerando 6 GDL.

Finalmente, se presenta el modelo matemático completo realizado en el software SAP 2000 en la Fig. 9.

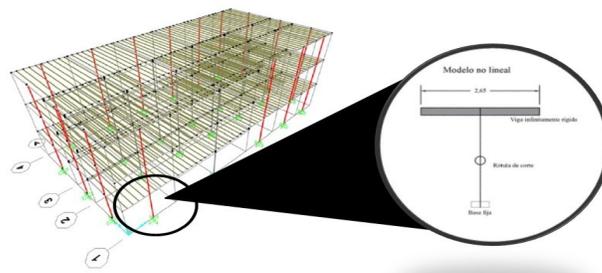


Fig. 9 Modelo no lineal 3D con 6 GDL

C. Curvas IDA

Para plotear las curvas IDA, se definió como parámetro indicador de intensidad IM al PGA y como parámetro indicador de daño DM la distorsión angular de entre piso, debido a que esta última se relaciona con las rotaciones de las articulaciones y colapso [8]. Para cada dirección ortogonal, se ejecutaron 440 corridas de análisis historia de respuesta no lineal y se obtuvieron puntos que relacionan un DM para cada IM, los cuales fueron unidos para representar la curva IDA de cada sismo seleccionado. A continuación, se presentan las gráficas de máxima distorsión angular de entrepiso, la cual corresponde al primer nivel. La Fig. 10 y 11 representan las gráficas de máxima distorsión angular global de la estructura a primer nivel.

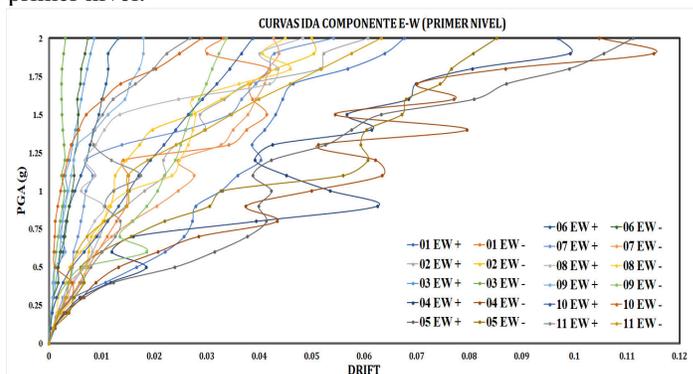


Fig. 10 Curvas IDA componente E-W (Primer nivel)

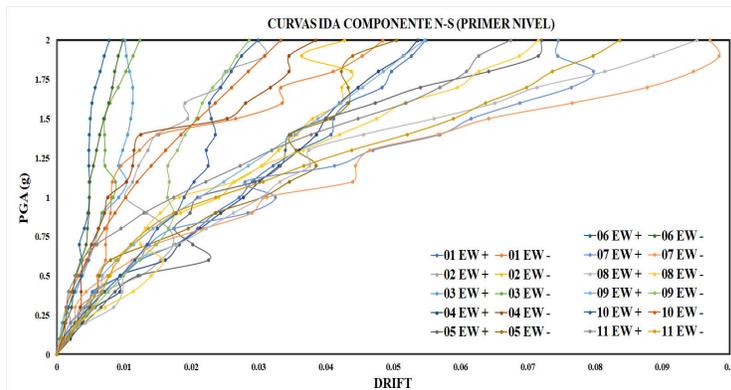


Fig. 11 Curvas IDA componente N-S (Primer nivel)

La Fig. 12 y 13 representan las gráficas de máxima distorsión angular global de la estructura a nivel de techo.

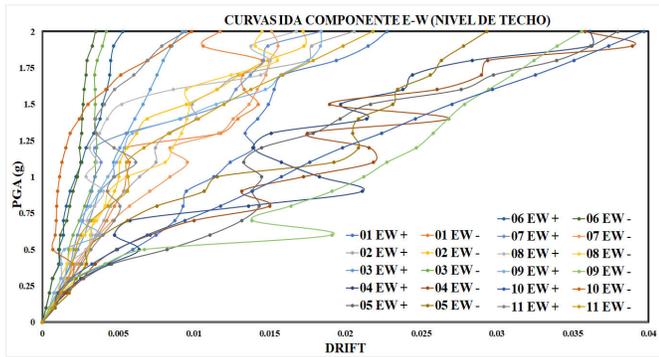


Fig. 12 Curvas IDA componente E-W (Nivel de techo)

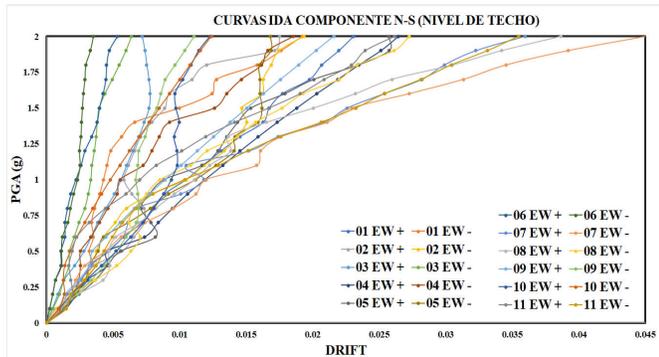


Fig. 13 Curvas IDA componente N-S (Nivel de techo)

Se debe de indicar que los desplazamientos laterales del pabellón en estudio tienen derivas mayores al 0.5% que es el límite según el código peruano sísmico para ambas direcciones ortogonales del hospital, obteniendo desplazamientos laterales cercanos a la junta sísmica.

Siguiendo el procedimiento indicado en Vamvatsikos [7] las Fig. 14 y Fig. 15 reportan los percentiles 16%, 50% y 84% de las curvas IDA para cada dirección ortogonal considerando distorsiones angulares del piso 1 (P1) y distorsiones angulares globales de la estructura a nivel de techo (NT) respectivamente.

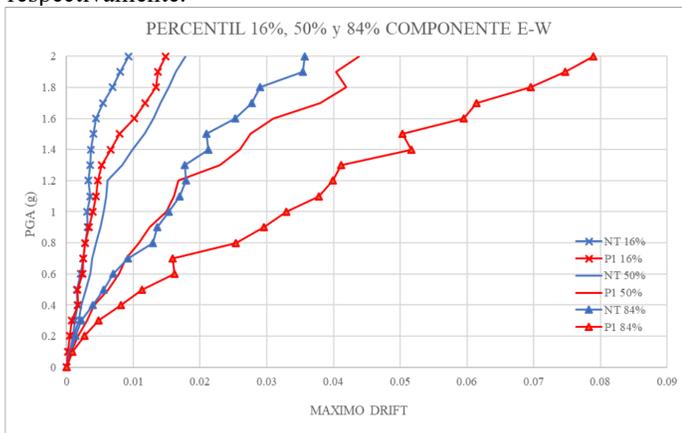


Fig. 14 Comparación de Curvas IDA percentil 16,50 y 84 componente E-W

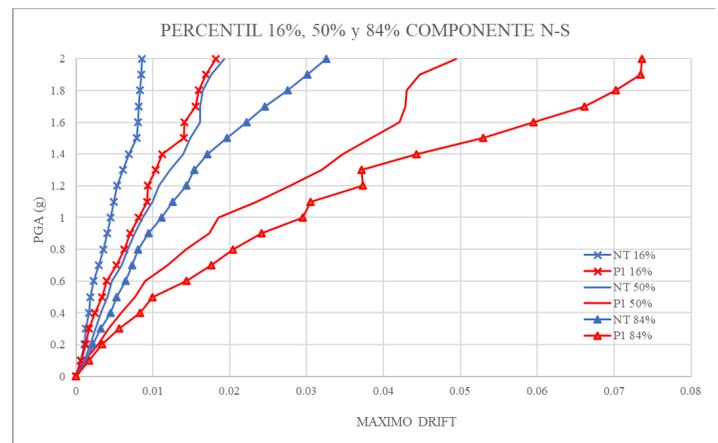


Fig. 15 Comparación de Curvas IDA percentil 16,50 y 84 componente N-S

De las Fig. 14 y Fig. 15, se puede observar que (P1) presenta mayores distorsiones angulares y mayores desplazamientos laterales que (NT). De este modo, las curvas IDA promedio P1 50% son las indicadas para futuras evaluaciones o cálculos como funciones de fragilidad para evaluar la probabilidad de colapso del pabellón de hospital analizado.

III. CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación desarrolló el análisis dinámico incremental de un hospital de más de 60 años de antigüedad de 3 niveles con muros de albañilería artesanal.

El propone un modelo computacional del muro de albañilería artesanal en base a un elemento línea incluyendo una rótula de corte a media altura en su dirección lateral de deformaciones, el cual fue preparado usando resultados de ensayo de laboratorio a fuerzas laterales histeréticas. El modelo del pabellón completo fue sometido a un análisis historia de respuesta no lineal considerando 6GDL en cada nudo encontrando mayor cantidad de liberación de energía debido a la torsión en planta de la estructura comparando un modelo de 3GDL por nudo.

Las curvas IDA muestran que la estructura presentó una gran rigidez para registros de corta duración significativa, esto se debe al efecto de pulso dinámico, especialmente en las curvas IDA del primer nivel. Adicionalmente, se reportaron los percentiles 16%, 50% y 84% de las curvas IDA presentadas para cada dirección ortogonal, donde para cada caso se encontró que las derivas laterales del primer nivel fueron mayores que las derivas globales de la estructura considerando los desplazamientos en el techo. Debido a ello, para futuros estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico se deben utilizar las curvas IDA correspondientes al primer nivel como el cálculo de curvas de fragilidad.

Para el nivel límite de derivas laterales según provisión sísmica peruana 0.5% y usando el promedio de las curvas IDA para cada dirección, se observa que la estructura en ambas direcciones que en el primer nivel será alcanzado cuando el PGA es menor a 0.35g en dirección de NS y menor PGA

0.40g en dirección EW, considerando que presentaran a ese nivel de demanda grietas diagonales los muros y pudiendo estar a nivel de Ocupación Inmediata a Seguridad de Vida. Se observa la necesidad de reforzar dicha facilidad.

Para dichos eventos de PGA mayores de 0.40g donde se estaría encontrando valores de deriva mayores de 0.5% que es el límite para el código sísmico peruano, se puede observar que antes de un golpeo con pabellones conexos, los muros presentaran grietas diagonales en los paneles de ladrillo artesanal.

Estas conclusiones son aplicables para edificaciones antiguas con muros de albañilería artesanal con elementos similares al caso de estudio.

IV. RECOMENDACIONES

Habiendo finalizado la presente investigación, se recomienda realizar estudios similares para incrementar el rango de estructuras esenciales. De este modo, generar data importante para estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación fue apoyada por la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, quienes nos brindaron las herramientas necesarias para concluir nuestro trabajo. Del mismo modo, expresamos nuestro agradecimiento al personal técnico del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) por dar libre acceso en la información de registros sísmicos y a la información de sus investigaciones. Finalmente, nuestro agradecimiento al Ministerio de Salud (MINSA) por facilitarnos los planos necesarios para realizar el modelo matemático de la estructura.

REFERENCIAS

- [1] H. Tavera, "Actualización del escenario por sismo, tsunami y exposición en la región central del Perú," *Cenepred*, pp. 1–26, 2017.
- [2] N. Pulido *et al.*, "Mega-earthquakes rupture scenarios and strong motion simulations for Lima, Peru," *Int. Symp. CISMID 25th Anniv.*, pp. 1–8, 2012.
- [3] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Norma de Diseño SismoResistente NTP-030 Norma Técnica Peruana. Lima, RNEcomité técnico de la norma de diseño sismorresistente", p. 80, 2018.
- [4] L. Pasticier, C. Amadio, *et al.*, "Non-linear seismic analysis and vulnerability evaluation of a masonry building by means of the SAP2000 V.10 code," *Earthquake engineering and structural dynamics*, no. 37, pp. 467–485, 2007.
- [5] R. Alas y S. Grijalva, "Evaluación de la vulnerabilidad sísmica, por medio de curvas de fragilidad, utilizando el análisis dinámico no lineal incremental," 2018.
- [6] P. Gibu *et al.*, "Estudio De Vulnerabilidad Sísmica: Estructural, No Estructural Y Funcional Del Hospital de Emergencias José Casimiro Ulloa - Miraflores" no. 14, pp. 1–213, 2013.
- [7] G. Huaco, "Comportamiento de una edificación de albañilería construido con ladrillo artesanal frente a cargas laterales", Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil, UNI, Lima, Perú, 2005.
- [8] D. Vamvatsikos, "Seismic Performance, Capacity and Reliability of Structures as Seen Through Incremental Dynamic Analysis," no. 151, pp. 1–172, 2005.

- [9] F. Di Trapani and M. Malavisi, "Seismic fragility assessment of infilled frames subject to mainshock/aftershock sequences using a double incremental dynamic analysis approach," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 17, no. 1, pp. 211–235, 2019.
- [10] FEMA, "Seismic Performance Assessment of Buildings Volume 1-Methodology Second Edition Prepared for FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY," vol. 1, no. December, 2018.
- [11] J. Hancock *et al.*, "An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets," *J. Earthq. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 67–89, 2006.
- [12] . Ilki and N. Kumbasar, "Hysteresis Model for Reinforced Concrete Members," no. January, pp. 20–25, 2000.