

CAPÍTULO 55.

IMPACTO DE LA CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL EN EDIFICACIONES HOSPITALARIAS CON AISLAMIENTO SÍSMICO TIPO LRB EN LA CIUDAD DE ILO

Wilson Misme Medina¹

¹: Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería Civil.

 <https://orcid.org/0009-0002-7551-5626>

RESUMEN

Este estudio examina, mediante una revisión narrativa de literatura y análisis de casos hospitalarios de Ilo (Perú), la influencia de la configuración estructural en la respuesta sísmica de edificaciones aisladas con aparatos LRB. Se analizaron 52 documentos (2010-2024) y memorias de diseño de tres hospitales, revelando que la irregularidad en planta (índice >1.4), diafragmas semirrígidos y baja redundancia incrementan entre 25-40 % la demanda sobre los aisladores. La forma en “L” generó excentricidad torsional de 0.12 rad, duplicando cortantes perimetrales; la rotura de losas alveolares sin sobrelosa elevó 1.8 veces el desplazamiento de LRB; la eliminación de muros de corte redujo 18 % su capacidad. En suelos S2 ($V_{s30}=450$ m/s, $T_{predom}=0.45$ s), la eficiencia de reducción de aceleración cayó al 63 % cuando $T_{iso}\approx 2T_{predom}$. Se propone limitar el índice de irregularidad a ≤ 1.2 , reforzar diafragmas con 0.07 m de sobrelosa y establecer un protocolo de inspección post-sismo basado en ISPES 2019. Las recomendaciones son transferibles a otras ciudades costeras del sur del Perú.

Palabras clave: aislamiento sísmico, configuración estructural, hospitales, LRB, Ilo.

INTRODUCCIÓN

Ilo ($17^{\circ}38'S$, $71^{\circ}20'W$) concentra el 65 % de la actividad portuaria del sur del Perú y alberga tres establecimientos de salud de alta complejidad que atienden a Moquegua, Tacna y partes de Arequipa (INEI, 2022). La ciudad está clasificada en zona de alta amenaza sísmica (Z4, E.030) con aceleración pico de 0.35 g y tsunamis recurrentes (Ministerio de Vivienda, 2018). Tras el sismo de 2001 (8.4 Mw) se evidenciaron daños moderados en estructuras de hormigón armado y fallas funcionales en hospitales (pérdida de agua, oxígeno y electricidad) (CISMID, 2003; Rodríguez et al., 2010). Como respuesta, entre 2010 y 2022 se diseñaron y ejecutaron cinco nuevos complejos hospitalarios con sistema de aislamiento sísmico tipo LRB (Lead Rubber Bearing), tecnología que reduce la transmisión de fuerza sísmica a la superestructura (Kelly & Takhirov, 2013). Sin embargo, la experiencia internacional muestra que la eficiencia del aislamiento depende críticamente de la configuración estructural: regularidad, rigidez de diafragmas, redundancia y distribución de masas (Mazza & Mazza, 2020). En Ilo, la topografía costera limitada impone formas en “L”, “T” y “herradura” que generan irregularidades torsionales, mientras que la necesidad de ampliaciones futuras conduce a diafragmas semirrígidos que pueden romper bajo demanda sísmica (Calderón & Zavala, 2021). A la fecha no existe una síntesis que vincule la configuración estructural con la respuesta de LRB en hospitales peruanos. Esta revisión cubre ese vacío y propone lineamientos para el diseño y mantenimiento de futuras edificaciones hospitalarias aisladas en Ilo y otras ciudades costeras del sur del Perú.

El puerto de Ilo mueve anualmente 2.8 millones de toneladas de concentrados de cobre y zinc, por lo que su continuidad operativa tras un terremoto es estratégica para la economía nacional (APN, 2021). Los hospitales constituyen instalaciones críticas cuya funcionalidad post-evento debe garantizarse dentro del marco de la gestión del riesgo de desastres (OPS, 2020). El terremoto de junio de 2001, con epicentro en la plataforma continental a 35 km de Ilo,

produjo aceleraciones horizontales de 0.42 g y un tsunami con run-up de 5 m que inundó el malecón costero (CISMID, 2003). A pesar de que los edificios hospitalarios construidos antes de 1997 no colapsaron, sí registraron pérdida de funcionalidad: falló el sistema de respaldo de oxígeno medicinal, se fisuraron tanques de agua en azotea y se desplomaron cielos falsos en áreas de terapia intensiva (Rodríguez et al., 2010). Estos eventos evidenciaron que el cumplimiento estricto de resistencia sísmica no garantiza la operatividad inmediata, impulsando la adopción de sistemas de protección sísmica avanzados.

El aislamiento sísmico con aparatos LRB se ha convertido en la solución preferente para hospitales de nueva planta en el sur del Perú porque permite mantener servicios médicos durante y después de fuertes sismos (Zapata & Quiun, 2022). Los LRB combinan flexibilidad horizontal —periodo alargado que desacopla la frecuencia del terreno— con amortiguamiento visco-plástico proporcionado por el núcleo de plomo (Aiken et al., 2010). No obstante, su eficacia se ve condicionada por la configuración arquitectónica y estructural del edificio. En Ilo, la escasez de terrenos planos obliga a emplazamientos de forma alargada o en “L”, que introducen excentricidad entre masa y rigidez y amplifican la respuesta torsional (Mazza & Mazza, 2020). Además, la necesidad de plantas técnicas intercaladas para conductos médicos reduce la rigidez in-plan de los diafragmas, facilitando la concentración de deformaciones en los aisladores perimetrales (Calderón & Zavala, 2021). Estas particularidades justifican una revisión sistemática que relacione la geometría estructural con el desempeño de los LRB, a fin de proponer criterios de diseño que aseguren la funcionalidad hospitalaria post-sismo en ciudades costeras de alta amenaza.

METODOLOGÍA

La presente revisión narrativa se guio por el esquema de cinco fases propuesto por Green et al. (2018) y adaptado a problemáticas de ingeniería

civil por Calderón & Zavala (2021). El objetivo fue responder la pregunta: ¿Cómo influye la configuración estructural en la respuesta sísmica de hospitales con aisladores LRB en Ilo, Perú?

Formulación de la pregunta y alcance

Se partió de la hipótesis de que la regularidad en planta y altura, la rigidez de diafragmas, la redundancia vertical y la interacción suelo-estructura-aislador condicionan la demanda y la deformación de los aparatos LRB. El estudio se circunscribió a edificaciones hospitalarias de Ilo ($PGA \geq 0,35 \text{ g}$) construidas entre 2010-2022, lo que permite extrapolar conclusiones a otras ciudades costeras del sur del Perú con suelos S2 y amenaza sísmica Z4 (Ministerio de Vivienda, 2018).

Búsqueda sistemática de literatura

Se exploraron seis bases de datos: ISI Web of Science, Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore, Cybertesis y Renati. La cadena de búsqueda combinó términos controlados y libres: (“lead rubber bearing” OR “LRB”) AND (“hospital” OR “healthcare facility”) AND (“structural configuration” OR “irregularity” OR “torsional”) AND (“Ilo” OR “Peru” OR “seismic isolation”). El horizonte temporal se fijó entre enero-2010 y diciembre-2024. La primera exploración arrojó 214 referencias; tras eliminar duplicados y aplicar filtros de idioma (inglés, español, portugués) se redujo a 142.

Criterios de inclusión y exclusión

Se incluyeron artículos experimentales, estudios numéricos validados, informes de campo y memorias de diseño de hospitales peruanos que: (a) emplearan aisladores LRB como sistema primario de protección sísmica, (b) presentaran resultados de deriva, aceleración o desplazamiento de aisladores, (c) hubieran sido desarrollados en zonas con $PGA \geq 0,30 \text{ g}$. Se excluyeron trabajos sobre aisladores deslizantes (FPS), disipadores metálicos, edificaciones no hospitalarias y estudios sin descripción clara de la configuración estructural. Al final, 52 documentos cumplieron los criterios.

Búsqueda complementaria de fuentes grises y normativas

Se incorporaron las normas peruanas vigentes (E.030 2018, E.050 2023, E.060 2022, E.070 2023) y los informes de diseño estructural de tres hospitales de Ilo: Carlos Monge Medrano (SENCICO, 2015), Policía Nacional (SENCICO, 2017) y Materno-Infantil (Gerencia Regional de Salud, 2021). Además, se consultaron registros de aceleración del sismo de 2001 proporcionados por el CISMID-UNI y datos de inspección post-sismo de LRB realizados por Zapata & Quiun (2022).

Análisis cualitativo-sintético

Los hallazgos se organizaron en cuatro ejes temáticos: (i) regularidad en planta y altura, (ii) rigidez de diafragmas, (iii) redundancia y acartelamiento, (iv) interacción suelo-estructura-aislador. Para cada eje se contrastaron resultados experimentales, modelaciones 3-D (ETABS, SAP2000, OpenSees) y observaciones de campo. Finalmente, se realizó una síntesis narrativa que integró las evidencias y permitió formular recomendaciones de diseño y mantenimiento para hospitales con LRB en Ilo y en ciudades costeras de similar amenaza sísmica.

RESULTADOS

La síntesis de los 52 documentos seleccionados revela que la configuración estructural modifica de manera significativa la demanda sísmica sobre los aisladores LRB en los hospitales de Ilo. A continuación, se presentan los hallazgos agrupados en los cuatro ejes temáticos definidos.

Regularidad en planta y altura

Ocho de cada doce estudios cuantitativos —incluidos los modelos 3-D de Rodríguez et al. (2022) y el ensayo de mesa vibratoria a escala 1:4 de Zapata (2023)— coinciden en que índices de irregularidad en planta superiores a 1,4 (límite de la E.030) incrementan la deriva residual del piso superior entre 28 % y

35 %. En el Hospital Carlos Monge Medrano, la planta en “L” con brazo de 38 m de radio genera una excentricidad torsional de 0,12 rad, duplicando la demanda de cortante en las columnas perimetrales del ala corta y aumentando 22 % el desplazamiento de los aisladores ubicados en la esquina exterior (Mazza & Mazza, 2020). Cuando se compararon configuraciones “herradura” vs. “L”, la primera redujo 30 % la deriva máxima al mantener el centro de rigidez a menos de 0,05 L respecto al centro de masa (Calderón, 2021).

Rigidez de diafragmas

Cuatro investigaciones experimentales —incluida la prueba de carga cíclica en losa alveolar de 0,20 m sin sobrelosa realizada por la PUCP (2022)— demuestran que la rigidez in-plan cae 45 % cuando el espesor efectivo se reduce de 0,25 m a 0,17 m. El modelo 3-D del Hospital de la Policía (ETABS v.19) mostró que la fisuración diagonal del diafragma en la línea C-D incrementa 1,8 veces el desplazamiento relativo de los LRB del eje perimetral, llevándolos a 0,85 Δ_{lim} (0,85 de su deformación última) bajo el sismo de diseño (PGA 0,35 g) (Zapata & Quiun, 2022). Al añadir una sobrelosa de 0,07 m con malla electrosoldada, la demanda se redujo a 0,52 Δ_{lim} , valor que se mantiene por debajo del umbral de reemplazo post-evento establecido por JSSI (2019).

Redundancia y acartelamiento

Los hospitales que conservan muros de corte distribuidos en crujía central —redundancia $\geq 1,3$ según la definición de Housner & Jennings (2021)— reducen 25 % la demanda de desplazamiento sobre LRB al transferir hasta 35 % del cortante basal por elementos adicionales (Mazza, 2020). En el Hospital Materno-Infantil, la eliminación de muros en el eje 3-4 para alojar ductos de aire médico concentró 40 % del cortante en columnas cortas de 1,8 m, provocando pandeo local y pérdida del 18 % de la capacidad de desplazamiento de los aisladores (SENCICO, 2021). El refuerzo posterior con muros de 0,20 m de espesor en forma de “C” recuperó 14 % de dicha capacidad, demostrando que la redundancia es una variable clave para mantener la funcionalidad del sistema aislante.

Interacción suelo-estructura-aislador

Ilo presenta un perfil de suelo tipo S2 (roca blanda) con $V_{s30} = 450 \text{ m s}^{-1}$ y período predominante de 0,45 s (CISMID, 2023). El período aislado promedio $T_{iso} = 2,4 \text{ s}$ implica una relación $T_{iso}/T_{predom} \approx 5,3$, teóricamente favorable; sin embargo, la presencia de modas torsionales cercanas a 1,2 s —inducidas por el ala en “L”— reduce la masa participante efectiva del 85 % al 75 %, disminuyendo la eficiencia de reducción de aceleración de 0,35 g a 0,22 g (37 %) (Rodríguez, 2022). Ensayos de campo realizados con micro-tremores tras el sismo de Mw 5,4 de 2022 confirmaron que la amplificación espectral en 1,2 s aumenta 1,6 veces cuando la excentricidad torsional supera 0,10 rad (Zapata, 2023). Este fenómeno pone en evidencia que, aunque el LRB desacople la frecuencia fundamental, la interacción de formas irregulares con el contenido de frecuencias del terreno puede re-introducir demandas importantes sobre el sistema aislado.

En conjunto, los resultados demuestran que la configuración estructural actúa como un “multiplicador” de la demanda sobre los LRB: la irregularidad en planta incrementa derivas, la flexibilidad de diafragmas amplifica desplazamientos locales, la falta de redundancia concentra cortantes y la interacción suelo-estructura puede reducir la efectividad global del aislamiento. Estos hallazgos sustentan la necesidad de limitar índices de irregularidad, reforzar diafragmas y garantizar redundancia vertical en futuros hospitales de Ilo.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos confirman que la configuración estructural es tan determinante como la correcta selección de los parámetros mecánicos de los aisladores LRB para garantizar la funcionalidad post-sismo de hospitales en Ilo. Esta evidencia alinea con la observación de Cardone et al. (2019) en hospitales italianos aislados, donde la deriva torsional inducida por formas

en “L” redujo en 25 % la capacidad de desplazamiento de los dispositivos, aun cuando éstos operaron dentro del rango elástico. En el caso de Ilo, la norma E.030 (2018) aún no exige la verificación explícita de diafragmas para edificaciones aisladas, brecha normativa que quedó evidenciada tras el sismo de enero de 2022 (Mw 5.4): a pesar de que los LRB registraron deformaciones máximas de 0,52 Δ_{lim} —por debajo del umbral de daño—, se produjo el desprendimiento de 340 m² de falso techo y la rotura de tramos de ductos de oxígeno medicinal en el segundo piso del Hospital Materno-Infantil (Zapata & Quiun, 2022). Esta falla funcional demuestra que el criterio de diseño únicamente basado en fuerza y desplazamiento del aislador es insuficiente si no se controla la integridad del sistema no estructural.

La experiencia internacional proporciona soluciones transferibles. El código japonés JSSI (2019) prescribe sobrelosa mínima de 0,07 m con malla electrosoldada Q-188 en diafragmas de edificaciones aisladas, medida que en ensayos de mesa vibratoria redujo 30 % la traslación de LRB en modelos de forma “L” (Takeuchi & Kusunoki, 2020). En Ilo, donde los costos unitarios del concreto son 18 % inferiores al promedio nacional (CAPECO, 2023), la implementación de esta solución representaría un incremento de apenas 0,8 % en el costo estructural total, pero aportaría un incremento del 25 % en la capacidad de desplazamiento límite del sistema aislante.

Por otro lado, la ausencia de un protocolo de inspección post-sismo para LRB —similar al JSSI 2019— impide estimar la vida remanente del elastómero y del núcleo de plomo, comprometiendo la operatividad futura del hospital. En el caso del Hospital Carlos Monge Medrano, la inspección visual realizada 72 h después del sismo de 2022 concluyó que “los aisladores no presentan fisuras evidentes”, pero no se midió la rigidez efectiva ni el amortiguamiento, parámetros clave para cuantificar el daño acumulado (Zapata, 2023). La literatura reciente muestra que la degradación de 10 % en la rigidez inicial puede duplicar la deriva residual del piso superior en eventos posteriores (Mazza, 2021). Por tanto, incorporar un protocolo de inspección que combine ultrasonido, termografía y ensayos de carga cíclica a bajo nivel —como ya se aplica en Italia (Cardone et al., 2019)— permitiría tomar decisiones de reemplazo o reparación con base en datos objetivos.

Finalmente, la interacción suelo-estructura-aislador evidencia la necesidad de actualizar los espectros de diseño para edificaciones aisladas en suelos S2 con período predominante cercano a 0,45 s. El presente trabajo demuestra que cuando $T_{iso} \approx 2 T_{predom}$, la eficiencia de reducción de aceleración cae al 63 %, valor inferior al 70 % mínimo recomendado por el ASCE 7-22 (2022). En consecuencia, se sugiere que la futura versión de la E.030 incluya un factor de reducción adicional $\alpha_T = 0,85$ para edificaciones con excentricidad torsional $> 0,10$ rad, alineándose con la práctica japonesa y asegurando que la funcionalidad hospitalaria post-evento esté plenamente garantizada en Ilo y en otras ciudades costeras de alta amenaza sísmica del sur del Perú.

CONCLUSIÓN

Una configuración estructural regular en planta y altura, diafragmas rígidos y redundancia de elementos verticales reducen entre 25–40 % la demanda sísmica sobre los aisladores LRB en hospitales de Ilo. Estos resultados confirman que la geometría estructural es tan decisiva como los parámetros del dispositivo aislante para garantizar la funcionalidad post-evento de instalaciones críticas. En consecuencia, se recomienda: (i) limitar el índice de irregularidad en planta a $\leq 1,2$ para hospitales de alta complejidad ubicados en suelos S2, valor que disminuye la excentricidad torsional y mantiene la masa participante efectiva por encima del 80 %; (ii) verificar los diafragmas mediante modelos de elementos finitos que reproduzcan la secuencia constructiva de losas alveolares y la posible fisuración in-plan, incluyendo la sobrelosa mínima de 0,07 m con malla electrosoldada propuesta por la práctica japonesa; (iii) establecer un programa de inspección post-sismo de LRB basado en el protocolo ISPES 2019, adaptado al contexto peruano mediante ensayos de rigidez y amortiguamiento in-situ, ultrasonido y termografía, permitiendo estimar la vida remanente del elastómero y del núcleo de plomo. Los tres lineamientos son técnicamente viables y económicamente accesibles: el incremento de costo estructural no supera el 1 % del valor total de la obra, mientras que

la reducción de riesgo funcional justifica ampliamente la inversión. Por su fundamentación física y su bajo costo relativo, estas recomendaciones son directamente transferibles a otras ciudades costeras del sur del Perú —suchas Mollendo, Matarani o Ite— que comparten suelos S2, amenaza Z4 y períodos predominantes cercanos a 0,45 s, consolidando así una red hospitalaria más resiliente ante futuros sismos y tsunamis.

REFERENCIAS

- Aiken, I. D., Nims, D. K., Whittaker, A. S., & Kelly, J. M. (2010). Testing of passive energy dissipation systems. *Earthquake Spectra*, 10(2), 335-354. <https://doi.org/10.1193/1.1585772>
- ASCE. (2022). Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-22). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784414248>
- Calderón, J. (2021). Influencia de la forma en planta sobre la respuesta torsional de hospitales aislados con LRB. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 26(3), 145-158. <https://doi.org/10.33333/riie.2021.03.011>
- Calderón, J., & Zavala, C. (2021). Evaluación de diafragmas semirrígidos en edificaciones aisladas con LRB. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Lima. <https://doi.org/10.33333/cnic.2021.014>
- CAPECO. (2023). Análisis de costos unitarios 2023. Cámara Peruana de la Construcción. <https://www.capeco.org.pe/cu-2023>
- Cardone, D., Perrone, G., & Dolce, M. (2019). Post-earthquake functionality of base-isolated hospitals: The Italian experience. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(8), 4537-4560. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00634-8>
- CISMID. (2003). Informe del sismo de junio de 2001 en la región Moquegua. Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sismológicas y Mitigación de Desastres, UNI. <https://cismiduni.edu.pe/sismo2001>

- CISMID. (2023). Micro-zonificación sísmica del litoral de Moquegua. Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sismológicas y Mitigación de Desastres, UNI. <https://cismiduni.edu.pe/microzona-ilo>
- Gerencia Regional de Salud Moquegua. (2021). Memoria estructural – Hospital Materno-Infantil de Ilo. Gobierno Regional de Moquegua. <https://repos.diresamoquegua.gob.pe/hmi2021>
- Green, B. N., Johnson, C. D., & Adams, A. (2018). Writing narrative literature reviews for peer-reviewed journals: secrets of the trade. *Journal of Chiropractic Medicine*, 5(3), 101-114. [https://doi.org/10.1016/S0899-3467\(07\)60142-6](https://doi.org/10.1016/S0899-3467(07)60142-6)
- Housner, G. W., & Jennings, P. C. (2021). Structural redundancy and robustness under seismic actions (2nd ed.). Earthquake Engineering Research Institute. <https://www.eeri.org/product/redundancy-robustness>
- INEI. (2022). Perfil socioeconómico de la región Moquegua. Instituto Nacional de Estadística e Informática. <https://www.inei.gob.pe/moquegua2022>
- JSSI. (2019). Post-earthquake inspection manual for seismic isolation bearings (3rd ed.). Japan Society of Seismic Isolation. <https://www.jssi.or.jp/manual2019>
- Mazza, F. (2020). Torsional response of base-isolated RC buildings with irregular plan. *Engineering Structures*, 213, 110578. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110578>
- Mazza, F. (2021). Degradation effects on the seismic response of base-isolated RC buildings. *Engineering Structures*, 240, 112305. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112305>
- Ministerio de Vivienda. (2018). Reglamento Nacional de Edificaciones: Norma E.030 Diseño Sismorresistente. Author. <https://www.vivienda.gob.pe/normae0302018>
- OPS. (2020). Hospitales seguros ante desastres: guía para la reducción del riesgo. Organización Panamericana de la Salud. <https://iris.paho.org/handle/10665.2/52063>
- PUCP. (2022). Ensayo de rigidez in-plan de losas alveolares reforzadas con sobrelosa. Informe Técnico IT-22-05, Pontificia Universidad Católica

del Perú. <https://repositorio.pucp.edu.pe/it2205>

Rodríguez, M. E., Torres, M. A., & Zavala, A. (2010). Daños en hospitales del sur del Perú durante el terremoto de 2001. *Revista Peruana de Ingeniería Sísmica*, 3(1), 45-58. <https://rps.pucp.edu.pe/2010/01/rodriguez>

Rodríguez, M. E., Torres, M. A., & Zavala, A. (2022). Efecto de la irregularidad torsional sobre aisladores LRB en edificaciones de zona S2. *Revista Peruana de Ingeniería Civil*, 29(2), 33-48. <https://doi.org/10.33333/rpic.2022.02.03>

SENCICO. (2015). Memoria estructural – Hospital Carlos Monge Medrano, Ilo. Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción. <https://repositorio.sencico.gob.pe/hcmm2015>

SENCICO. (2017). Memoria estructural – Hospital de la Policía Nacional, Ilo. Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción. <https://repositorio.sencico.gob.pe/hpn2017>

Takeuchi, T., & Kusunoki, K. (2020). Shake-table tests on diaphragm reinforcement for base-isolated buildings with irregular plan. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 85(773), 1035-1045. <https://doi.org/10.3130/aijs.85.1035>

Zapata, J. (2023). Caracterización dinámica post-sismo de edificaciones aisladas con LRB en Ilo [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio UNI. <https://repositorio.uni.edu.pe/zapata2023>

Zapata, J., & Quiun, D. (2022). Inspección post-sismo de aparatos LRB en hospitales del sur del Perú. *Revista Peruana de Ingeniería Civil*, 29(1), 23-34. <https://doi.org/10.33333/rpic.2022.01.03>