



ISSN 2078 - 7731

INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Revista del
Instituto de Ensayo de Materiales
"Hugo Mansilla Romero"

Nº 19

Noviembre 2025
La Paz - Bolivia



- ✓ FORTALECIMIENTO DEL SISTEMA DE CALIDAD DEL IEM A TRAVÉS DE LA PARTICIPACIÓN EN ENSAYOS DE APTITUD.
- ✓ ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES MEDIANTE EL MÉTODO DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA AL CORTE CON ELEMENTOS FINITOS.
- ✓ SUELO LIMO ARCILLOSO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO CON FIBRAS PET Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN (RCD) PARA APLICACIONES SOSTENIBLES EN INGENIERÍA CIVIL.
- ✓ EFECTOS DE ESCALA EN ENSAYOS DE CORTE DIRECTO: INTEGRACIÓN DE EVIDENCIA EXPERIMENTAL, PRÁCTICA ESTÁNDAR Y FUNDAMENTOS MECÁNICOS.
- ✓ COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE TINGLADOS EXISTENTES CONSTRUIDOS CON PERFILES METÁLICOS CONFORMADOS EN FRÍO EN LAS CIUDADES DE LA PAZ Y EL ALTO
- ✓ ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE ESTRUCTURAS PATRIMONIALES DE MAMPOSTERÍA DE ADOBE
- ✓ ESTUDIO PATOLÓGICO EMPLEANDO ENSAYOS DE ULTRASONIDO APLICADO A ESTRUCTURAS EN CONSTRUCCIÓN
- ✓ DISCREPANCIAS EN EL MÓDULO DE DEFORMACIÓN LONGITUDINAL DEL HORMIGÓN IN SITU FRENTE A ECUACIONES PRESCRITAS EN LA NORMATIVA ESTRUCTURAL: CASO LA PAZ, BOLIVIA
- ✓ ESTUDIO DE MORTEROS DE JUNTA ELABORADOS CON ARENAS DE MALLASA Y CHACOMA, CON DIFERENTES CONDICIONES DE HUMEDAD Y DOSIFICACIONES BASADAS EN LA ASTM C 270
- ✓ PROPUESTA DE GUÍA TÉCNICA Y METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA PREPARADA EN CALIENTE APLICADA EN FRÍO



MISIÓN

IEM/DIR/MIMP/II/001/2023 v.1

Aportar en la formación de profesionales de alto nivel académico y científico en lo referente a materiales de construcción, estructuras y geotecnia mediante la actividad académica, la investigación y la interacción social.

VISIÓN

IEM/DIR/MIMP/II/002/2023 v.1

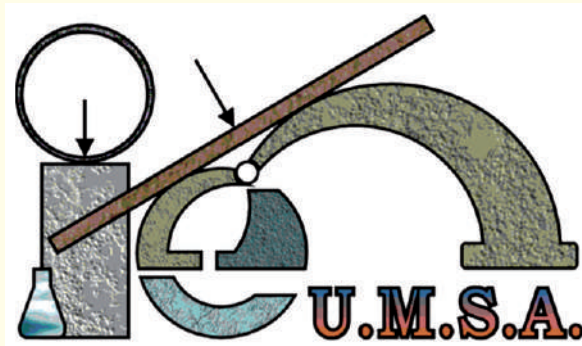
Ser un instituto de investigación líder en la formación académica, comprometido con su sociedad, que desarrolla actividades científicas y tecnológicas basadas en la mejora continua en áreas relacionadas con los materiales de construcción, estructuras y geotecnia.

POLÍTICA DEL SISTEMA DE GESTIÓN

IEM/DIR/MIMP/II/003/2023 v.2

El **Instituto de Ensayo de Materiales de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Mayor de San Andrés**, desarrolla actividades académicas, de investigación e interacción social en las áreas de materiales de construcción, estructuras y geotecnia. Contribuye a la formación integral de los estudiantes, al avance científico y al servicio a la sociedad. Estamos comprometidos con:

- Brindar servicios académicos de excelencia, fundamentados en la ética, innovación y la pertinencia social.
- Realizar investigación rigurosa, relevante y con impacto en el desarrollo científico y tecnológico del país.
- Ofrecer servicios de laboratorio confiables, respaldados por personal técnicamente competente y orientados por los principios de imparcialidad, independencia, confidencialidad y puntualidad.
- Cumplir con los requisitos legales, reglamentarios y normativos aplicables.
- Implementar y mantener los requisitos de la norma NB/ISO 9001:2015 en todas nuestras actividades y de la norma NB/ISO/IEC 17025:2018 en los ensayos de laboratorio acreditados.
- Mejorar continuamente nuestros procesos, servicios y competencias, en beneficio de nuestros estudiantes, clientes externos y demás partes interesadas.



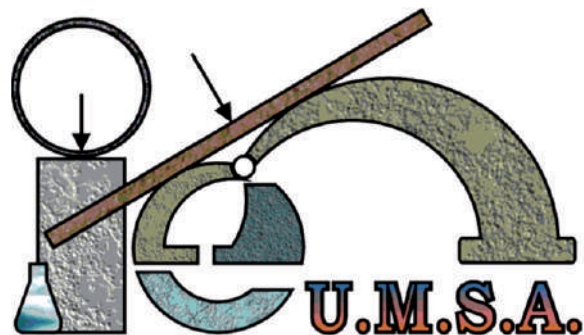
La Paz - Bolivia, Noviembre 2025 N° 19

Carrera de Ingeniería Civil - UMSA

Investigación y Desarrollo

Revista del Instituto de Ensayo de Materiales

“Ing. Hugo Mansilla Romero”



“Ing. Hugo Mansilla R.”
1946 - 2025

DIRECTOR

MSc. Ing. Angel Ramos Maita
INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES

Revisión:

Ing. Claudia Kelly Endara de Loza

INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES

Av. Muños Reyes, calle 30
Campus Universitario (Cota Cota)
Teléfono: 2772111

Av. Villazón 1995
Teléfono: 2444086
E-mail: iem@umsa.bo
Web: www.iem.umsa.bo

DISEÑO E IMPRESION

Visiongraf Impresión y Diseño
Teléfonos: 715 82486 - 719 70855
E-mail: visiongrafpublicidad@gmail.com
La Paz - Bolivia

ISSN 2078 - 7731

DEPOSITO LEGAL 4-3-26-10

“El contenido de los artículos es responsabilidad de los autores”

La Paz, Noviembre de 2025

La Paz - Bolivia

Presentación

El Instituto de Ensayo de Materiales (IEM) de la Universidad Mayor de San Andrés presenta con satisfacción la Edición N.º 19 de la Revista “INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO”, una publicación que refleja el compromiso del Instituto con la investigación aplicada y la calidad técnica en el campo de la ingeniería civil.

Esta edición reúne trabajos desarrollados por docentes, investigadores, profesionales y estudiantes, quienes ofrecen aportes valiosos desde diferentes áreas de la ingeniería civil, mostrando soluciones prácticas, estudios aplicados y reflexiones que responden a las necesidades del entorno. Los artículos publicados constituyen una muestra del esfuerzo conjunto del Instituto para fortalecer la investigación, la transferencia de conocimiento y la integración entre la universidad y la sociedad, en coherencia con los objetivos de la Carrera de Ingeniería Civil, la Facultad de Ingeniería y la Universidad Mayor de San Andrés - UMSA.

A lo largo de la revista se presentan temas como la importancia de los ensayos de aptitud para fortalecer la calidad de los laboratorios; el análisis de estabilidad de taludes mediante elementos finitos; la estabilización sostenible de suelos con fibras PET y residuos de construcción; y los efectos de escala en ensayos de corte directo realizados en suelos granulares.

También se incluyen estudios sobre el comportamiento de tinglados metálicos en La Paz y El Alto, la evaluación de estructuras patrimoniales de adobe, y la aplicación del ultrasonido como técnica no destructiva para el diagnóstico del hormigón.

Asimismo, se presentan investigaciones sobre las discrepancias del módulo de deformación del hormigón elaborado in situ, un estudio dedicado a los morteros de junta con arenas locales, y una guía técnica para evaluar mezclas asfálticas aplicadas en frío, desarrollada a partir de ensayos en campo y laboratorio.

Cada artículo refleja el esfuerzo del IEM por integrar la investigación, la docencia y la prestación de servicios de calidad, contribuyendo al desarrollo técnico y científico del país. El Instituto reafirma su compromiso con la excelencia, la mejora continua y la formación de profesionales capaces de responder a los desafíos actuales de la ingeniería.



MSc Ing. Angel Ramos Maita

DIRECTOR

INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES

“Hugo Mansilla Romero”

CARRERA DE INGENIERIA CIVIL

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

FORTALECIMIENTO DEL SISTEMA DE CALIDAD DEL IEM A TRAVÉS DE LA PARTICIPACIÓN EN ENSAYOS DE APTITUD	19
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES MEDIANTE EL MÉTODO DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA AL CORTE CON ELEMENTOS FINITOS	27
SUELO LIMO ARCILLOSO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO CON FIBRAS PET Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN (RCD) PARA APLICACIONES SOSTENIBLES EN INGENIERIA CIVIL.	38
EFFECTOS DE ESCALA EN ENSAYOS DE CORTE DIRECTO: INTEGRACIÓN DE EVIDENCIA EXPERIMENTAL, PRÁCTICA ESTÁNDAR Y FUNDAMENTOS MECÁNICOS	45
COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE TINGLADOS EXISTENTES CONTRUIDOS CON PERFILES METÁLICOS CONFORMADOS EN FRÍO EN LAS CIUDADES DE LA PAZ Y EL ALTO	52
ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE ESTRUCTURAS PATRIMONIALES DE MAMPOSTERIA DE ADOBE	64
ESTUDIO PATOLÓGICO EMPLEANDO ENSAYOS DE ULTRASONIDO APLICADO A ESTRUCTURAS EN CONSTRUCCIÓN	75
DISCREPANCIAS EN EL MÓDULO DE DEFORMACIÓN LONGITUDINAL DEL HORMIGÓN IN SITU FRENTE A ECUACIONES PRESCRITAS EN LA NORMATIVA ESTRUCTURAL: CASO LA PAZ, BOLIVIA	81
ESTUDIO DE MORTEROS DE JUNTA ELABORADOS CON ARENAS DE MALLASA Y CHACOMA, CON DIFERENTES CONDICIONES DE HUMEDAD Y DOSIFICACIONES BASADAS EN LA ASTM C 270	86
PROPUESTA DE GUÍA TÉCNICA Y METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA PREPARADA EN CALIENTE APLICADA EN FRÍO	92

EL INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES CONSOLIDA SU COMPROMISO CON LA CALIDAD Y LA EXCELENCIA TÉCNICA

Ing. Claudia Endara

clauendara.sg@gmail.com

El Instituto de Ensayo de Materiales (IEM) de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) continúa fortaleciendo su compromiso con la excelencia, la confiabilidad técnica y la mejora continua en todas sus actividades. Durante la gestión 2025, el Instituto alcanzó un nuevo logro significativo en su trayectoria de aseguramiento de la calidad, al realizar exitosamente su primera evaluación de seguimiento para el mantenimiento de la acreditación de su Sistema de Gestión bajo la norma NB/ISO/IEC 17025:2018, acreditación otorgada por el Instituto Boliviano de Metrología (IBMETRO).

Esta evaluación de seguimiento, desarrollada entre los meses de junio y julio, tuvo como propósito verificar la continuidad de la acreditación y la conformidad del sistema de gestión con los requisitos de la norma NB/ISO/IEC 17025:2018, asegurando que el laboratorio mantenga su competencia técnica, la validez de sus resultados de ensayo y su compromiso con la mejora continua.

“El Instituto de Ensayo de Materiales, está acreditado por la DTA-IBMETRO según: NB/ISO/IEC 17025:2018. La acreditación es válida solo para el alcance detallado en el certificado DTA-CET-212. Para consultar el estado y alcance de la acreditación, visita la página web de IBMETRO: www.ibmetro.gob.bo”



El IEM obtuvo la acreditación el año 2024, un logro que posicionó al Instituto entre los laboratorios de referencia del país. Previa a esta evaluación externa del 2025, el Instituto realizó su auditoría interna del sistema de gestión bajo la norma NB/ISO/IEC 17025:2018, un paso clave que permitió revisar el cumplimiento de los requisitos de la norma.

La norma NB/ISO/IEC 17025:2018 establece los requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración, abarcando aspectos esenciales como la imparcialidad, la confidencialidad, la competencia del personal, la validez y aseguramiento de los resultados, la trazabilidad metrológica de las mediciones y la gestión adecuada de los equipos e instalaciones. El cumplimiento de estos requisitos demuestra no solo la capacidad técnica del laboratorio, sino también la implementación de un sistema de gestión eficaz, orientado a la confiabilidad, consistencia y mejora continua de los resultados emitidos.

Paralelamente, este año, después del proceso de diseño e implementación integral del Sistema de Gestión de la Calidad conforme a la norma NB/ISO 9001:2015, en el Instituto de Ensayo de Materiales (IEM), se realizaron la auditoría de Etapa I en el mes de agosto y la auditoría de Etapa II en el mes de octubre, que forman parte del proceso de certificación del sistema de gestión.

La norma ISO 9001:2015 constituye una referencia internacional para la gestión de la calidad, y su aplicación en el IEM representa un logro alcanzado gracias al compromiso y esfuerzo de todo su personal. Este sistema de gestión, basado en principios como el enfoque al cliente, el liderazgo, la participación del personal, el enfoque a procesos, la

toma de decisiones basada en evidencias y la mejora continua, permite asegurar la eficacia de los procesos, la coherencia en los servicios y la satisfacción de los usuarios.

Integrar los sistemas ISO/IEC 17025 e ISO 9001 representa para el Instituto de Ensayo de Materiales (IEM) mucho más que el cumplimiento de un requisito técnico: constituye la consolidación de una cultura de calidad. La ISO/IEC 17025 asegura la precisión, la competencia técnica y la confiabilidad de los resultados de laboratorio, mientras que la ISO 9001 promueve la excelencia en la docencia, la investigación y la prestación de servicios de laboratorio, fortaleciendo así una gestión institucional orientada a la mejora continua. Juntas, ambas normas consolidan el compromiso del IEM con la formación de profesionales competentes, la generación de conocimiento científico y la interacción social, a través de la prestación de servicios de laboratorio de calidad, contribuyendo de manera directa al desarrollo científico, tecnológico y social del país.

El IEM agradece a todo su personal por su dedicación y esfuerzo, y comparte con orgullo estos logros que reflejan la constancia, el profesionalismo y el compromiso institucional con la mejora continua.

DIRECCIÓN DEL INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES Y COORDINACIÓN DE LOS SISTEMAS DE GESTIÓN (NB ISO/IEC17025 Y NB ISO 9001)



Msc. Ing. Angel Ramos Maita
DIRECTOR IEM



Ing. Claudia Endara
COORDINADORA DE LOS SISTEMAS DE GESTIÓN

EVALUACIÓN DE ACREDITACIÓN EN BASE A LA NORMA NB ISO/IEC/ 17025 REALIZADA POR
IBMETRO - ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CEMENTOS



**AUDITORÍA DE CERTIFICACIÓN EN BASE A LA NORMA ISO 9001:2015
REALIZADA POR IBNORCA ETAPA 1 Y 2**



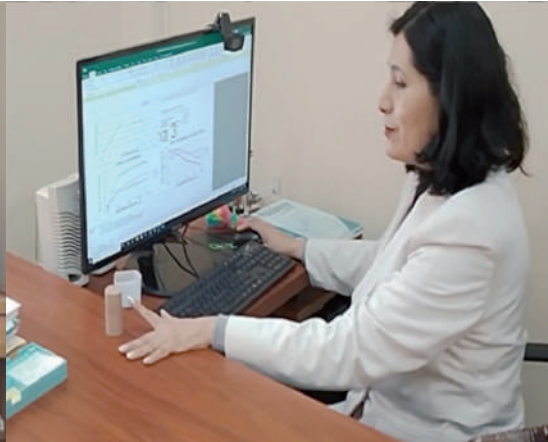
ACTIVIDADES DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD - ÁREA DE ASFALTOS



**ACTIVIDADES DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
ÁREA DE PATOLOGÍA Y EVALUACIÓN ESTRUCTURAL**



ACTIVIDADES DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD - ÁREA DE GEOTÉCNIA



ACTIVIDADES DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD - ÁREA DE HORMIGONES



ACTIVIDADES DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD - ÁREA DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



ACTIVIDADES DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD - ÁREA ADMINISTRATIVA



“FORTALECIMIENTO DEL SISTEMA DE CALIDAD DEL IEM A TRAVÉS DE LA PARTICIPACIÓN EN ENSAYOS DE APTITUD”

Claudia Kelly Endara de Loza

ckendara@umsa.bo

RESUMEN

Los ensayos de aptitud constituyen una herramienta esencial para garantizar la competencia técnica y la calidad de los resultados emitidos por los laboratorios de ensayo. Este artículo analiza de manera integral su definición, propósito y relación con las normas NB ISO/IEC 17025:2018 e ISO/IEC 17043:2023, abordando su papel en el aseguramiento de la validez de los resultados, los criterios de evaluación estadística (como el puntaje z) y su aporte a la mejora continua a través del ciclo PHVA.

Asimismo, se presentan los beneficios técnicos y de gestión asociados a la participación en estos programas, se expone la experiencia del Instituto de Ensayo de Materiales (IEM) en programas de aptitud en las áreas de Materiales de Construcción y Hormigones.

Finalmente, se discute el rol de los ensayos de aptitud como una herramienta estratégica de gestión de calidad, que refuerza la trazabilidad, la confianza y el compromiso del IEM con la excelencia técnica y la mejora continua.

Palabras clave: Ensayos de aptitud; Comparaciones interlaboratorio; NB ISO/IEC 17025; ISO/IEC 17043; Competencia técnica; Acreditación; Calidad; Mejora continua; Instituto de Ensayo de Materiales (IEM).

ABSTRACT

Proficiency testing (PT) is an essential tool for ensuring the technical competence and quality of results produced by testing laboratories. This article provides a comprehensive analysis of the definition, purpose, and relationship of PT with NB ISO/IEC 17025:2018 and ISO/IEC 17043:2023, emphasizing its role in ensuring the validity of results, the statistical evaluation criteria (such as the z -score), and its contribution to continuous improvement through the PDCA cycle.

Additionally, the paper presents the technical and management benefits associated with participation in PT programs and highlights the experience of the Instituto de Ensayo de Materiales (IEM) in proficiency testing within the areas of Construction Materials and Concrete.

Finally, it discusses the role of proficiency testing as a strategic quality management tool that reinforces traceability, confidence, and the IEM's commitment to technical excellence and continuous improvement.

Keywords: Proficiency testing; Interlaboratory comparison; NB ISO/IEC 17025:2018; ISO/IEC 17043:2023; Technical competence; Quality assurance; Continuous improvement; PDCA cycle; Quality management system; Instituto de Ensayo de Materiales (IEM).

INTRODUCCIÓN

En los laboratorios de ensayo de materiales de construcción, asegurar la calidad y la confiabilidad de los resultados es clave para garantizar la seguridad de las obras y mantener la confianza de los clientes. En este sentido, los ensayos de aptitud se han convertido en una herramienta indispensable para evaluar el

desempeño de los laboratorios y confirmar su competencia técnica. Estos ensayos permiten comparar los resultados obtenidos por un laboratorio con valores de referencia o con los resultados de otros laboratorios, bajo condiciones controladas. De esta manera, es posible detectar desviaciones, sesgos o posibles fallas en los procesos de medición, contribuyendo así a la mejora continua y a la credibilidad de los resultados emitidos.

DEFINICIÓN Y PROPÓSITO DE LOS ENSAYOS DE APTITUD

Los ensayos de aptitud se definen formalmente como “la evaluación del desempeño de los participantes con respecto a criterios preestablecidos mediante comparaciones entre laboratorios” (Chiao, 2022). En otras palabras, un organismo proveedor envía a varios laboratorios uno o más ítems de ensayo -por ejemplo, muestras de cemento o probetas de hormigón- para que cada uno los analice. Una vez que todos los participantes envían sus resultados, el proveedor los reúne y evalúa de manera comparativa, contrastándolos con un valor de referencia. Este valor puede provenir de un laboratorio acreditado, de un material de referencia certificado o del promedio estadístico consensuado entre los participantes.

A partir de ese análisis, cada laboratorio obtiene una medida objetiva de su desempeño, expresada normalmente como un puntaje estadístico (z-score). Este resultado le permite saber qué tan cercano estuvo su valor al de referencia.

Es importante diferenciar los ensayos de aptitud de otras actividades más amplias de comparación interlaboratorio. Según la norma ISO/IEC 17043, una comparación interlaboratorio consiste en la organización, realización y evaluación de mediciones o ensayos sobre un mismo ítem por dos o más laboratorios, bajo condiciones previamente establecidas. Este concepto es bastante amplio y puede aplicarse con distintos objetivos, como actividades técnicas de comparación entre laboratorios, el desarrollo o la validación de nuevos métodos de ensayo, estudios de investigación colaborativa, etc.

En cambio, los ensayos de aptitud representan un tipo particular de comparación interlaboratorio, diseñado específicamente para evaluar la competencia técnica de los laboratorios participantes dentro de un esquema controlado (ONUDI&INM, 2021). A diferencia de las comparaciones informales, los ensayos de aptitud se desarrollan bajo un programa estructurado, con un diseño estadístico riguroso, criterios de evaluación predefinidos y un manejo confidencial de los resultados de cada participante. Además, suelen estar organizados por un proveedor competente acreditado conforme a la norma ISO/IEC 17043, lo que garantiza la confiabilidad del proceso.

En resumen, mientras que una comparación interlaboratorio puede tener diversos objetivos, los ensayos de aptitud buscan un propósito muy claro: medir y comparar el desempeño de los laboratorios en condiciones controladas, ofreciendo así una evidencia externa, objetiva e imparcial de su capacidad para generar resultados técnicamente válidos. Desde la perspectiva de la norma NB ISO/IEC 17025:2018, que establece los requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración, la participación en ensayos de aptitud es un elemento clave dentro del aseguramiento de la validez de los resultados. Esta norma indica que los laboratorios deben contar con procedimientos sistemáticos para verificar la calidad de sus resultados a lo largo del tiempo, utilizando tanto controles internos como comparaciones externas, entre las que se incluyen los ensayos de aptitud. (Xin YAQ, 2016).

Los organismos de acreditación exigen que los laboratorios presenten evidencia de participación satisfactoria en estos programas como una condición para otorgar o mantener la acreditación. En la misma línea, la International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC), a través de su política ILAC-P9, establece que los laboratorios acreditados deben participar regularmente en programas de ensayos de aptitud pertinentes a los servicios que ofrecen, con el fin de demostrar de manera continua su competencia técnica.

En resumen, ambas normas -NB/ISO/IEC 17025 e ISO/IEC 17043- otorgan a los ensayos de aptitud un papel esencial dentro de los sistemas de calidad de laboratorio. La primera los incorpora como parte del proceso de aseguramiento de la calidad de las mediciones, mientras que la segunda detalla cómo deben organizarse estos ensayos y qué requisitos debe cumplir el proveedor para garantizar que los resultados sean confiables y comparables entre laboratorios.

RELACIÓN CON EL ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD Y LA COMPETENCIA TÉCNICA (NB ISO/IEC 17025)

Un laboratorio acreditado bajo la norma ISO/IEC 17025 debe contar con un sistema de gestión enfocado en la calidad de sus resultados. Dentro de este sistema, los ensayos de aptitud desempeñan un papel importante, ya que permiten asegurar la confiabilidad de las mediciones y demostrar la competencia técnica del personal, los métodos y los equipos utilizados.

La NB ISO/IEC 17025:2017, en su cláusula 7.7 sobre el aseguramiento de la validez de los resultados, establece que los laboratorios deben monitorear periódicamente su desempeño por medio de diferentes actividades, como el análisis de materiales de referencia certificados, la repetición de ensayos con muestras retenidas, y la participación en comparaciones interlaboratorio y ensayos de aptitud. El objetivo es detectar a tiempo cualquier desviación o tendencia que pueda afectar la calidad de los resultados entregados a los clientes. En particular, los ensayos de aptitud brindan una evaluación externa e independiente del desempeño del laboratorio, complementando los controles internos habituales. Cuando los resultados son satisfactorios, confirman que los métodos de ensayo están correctamente implementados y que el personal posee la competencia técnica necesaria (ONUDI&INM, 2021). Por el contrario, si los resultados difieren significativamente del valor de referencia o del consenso entre los participantes -es decir, si se consideran cuestionables o no satisfactorios-, esto actúa como una alerta temprana que permite identificar posibles problemas antes de que impacten los resultados de los ensayos.

Ante un desempeño no conforme, la norma exige que el laboratorio investigue exhaustivamente las causas. Estas pueden incluir errores sistemáticos en la aplicación del método, problemas de calibración, deficiencias en la preparación de las muestras, fallas operativas del analista o condiciones ambientales inadecuadas. Una vez identificadas las causas, deben implementarse las acciones correctivas necesarias, como ajustar procedimientos, ajustar y recalibrar equipos o reforzar la capacitación del personal. Posteriormente, el laboratorio puede participar nuevamente en un ensayo de aptitud o realizar verificaciones adicionales para confirmar la efectividad de las acciones aplicadas y asegurar que su desempeño regrese a niveles satisfactorios.

De esta manera, los ensayos de aptitud se integran directamente en el ciclo de mejora continua del laboratorio. No deben considerarse solo como un requisito de acreditación, sino como una herramienta estratégica de gestión de calidad. Un resultado inesperado se convierte en una oportunidad para fortalecer procesos, prevenir no conformidades y mejorar la fiabilidad de los servicios ofrecidos. Si, los resultados son positivos, el laboratorio obtiene una verificación externa de la solidez de su sistema de medición, lo que refuerza la

confianza del equipo técnico en la calidad de su trabajo. En resumen, bajo la NB ISO/IEC 17025, los ensayos de aptitud cumplen una doble función: por un lado, ofrecen evidencia objetiva de competencia técnica, demostrando ante evaluadores y clientes que el laboratorio realiza su labor con excelencia; y por otro, actúan como un mecanismo de control de calidad continuo, capaz de detectar y corregir desviaciones antes de que se conviertan en problemas. Esta combinación los convierte en uno de los pilares fundamentales del aseguramiento de la calidad en los laboratorios de ensayo y calibración.

BENEFICIOS DE LOS ENSAYOS DE APTITUD PARA LA CALIDAD Y EL DESEMPEÑO DEL LABORATORIO.

La participación regular en ensayos de aptitud ofrece numerosos beneficios tanto técnicos como de gestión, que van mucho más allá del simple cumplimiento de un requisito de acreditación. Estos ejercicios se han convertido en una herramienta esencial para fortalecer los sistemas de calidad y la confianza en los resultados de los laboratorios. A continuación, se presentan los beneficios más importantes, basados en la literatura especializada y en las mejores prácticas internacionales.

- **Detección de sesgos y errores sistemáticos:** Al comparar sus resultados con un valor de referencia conocido o con el promedio de varios laboratorios, un laboratorio puede identificar diferencias sistemáticas (sesgos) en sus mediciones (Puglisi, Kavior, 2012). Por ejemplo, si sus resultados son consistentemente más altos o más bajos que el valor verdadero, el ensayo de aptitud pondrá en evidencia esta desviación, permitiendo investigar la causa. Estas pueden ser diversas: un factor de calibración incorrecto, un reactivo deteriorado, una técnica operativa diferente o un error de manipulación. En ese sentido, los ensayos de aptitud actúan como un diagnóstico externo, capaz de revelar problemas ocultos en los métodos o instrumentos utilizados.

- **Validación y evaluación de métodos de ensayo:** Los ensayos de aptitud también permiten confirmar que los métodos empleados son válidos y adecuados para su propósito, al mostrar que los resultados obtenidos son coherentes con los de otros laboratorios. De igual forma, posibilitan comparar el desempeño de distintos métodos aplicados a una misma prueba. Cuando un laboratorio adopta un nuevo procedimiento o técnica, su participación en un ensayo de aptitud le ayuda de

una forma objetiva a comprobar que el método produce resultados confiables, funcionando como un referente técnico.

- **Verificación de la incertidumbre de medición declarada:** Otra ventaja importante es la posibilidad de comprobar si la incertidumbre de medición estimada por el laboratorio es realista. Al analizar la diferencia entre su resultado y el valor de referencia en un ensayo de aptitud, puede calcularse un puntaje ampliado (z') que considera la incertidumbre declarada. Si la discrepancia observada es mayor a lo esperado, esto puede indicar que la incertidumbre fue subestimada. Por el contrario, resultados coherentes y estables refuerzan la confianza en la estimación realizada. Aunque los ensayos de aptitud no permiten calcular la incertidumbre con precisión estadística -ya que suelen realizarse pocas veces al año- sí son una herramienta muy útil como verificación práctica y cualitativa de la exactitud del laboratorio.

- **Control continuo del desempeño y mejora interna:** Participar periódicamente en ensayos de aptitud brinda una visión clara del desempeño del laboratorio a lo largo del tiempo. Esta información permite detectar tendencias: por ejemplo, una mejora progresiva después de una capacitación del personal o la adquisición de nuevos equipos, o un deterioro si surge algún problema operativo. Los resultados alimentan el ciclo de mejora continua (PHVA), aportando datos concretos en la etapa de Verificar y sirviendo de base para Actuar. Un resultado no satisfactorio impulsa acciones correctivas, mientras que un desempeño estable motiva a mantener y reforzar las buenas prácticas. En cualquier caso, los ensayos de aptitud proporcionan información objetiva para la toma de decisiones en la gestión técnica y de calidad del laboratorio.

- **Generación de confianza:** Mostrar resultados satisfactorios en ensayos de aptitud genera confianza en los clientes, empresas públicas o privadas, organismos reguladores y certificadores se sienten más seguros al trabajar con laboratorios que se someten regularmente a evaluaciones externas y las superan con éxito.

- **Cumplimiento de requisitos de acreditación y regulaciones:** La participación en ensayos de aptitud es un requisito obligatorio para los laboratorios acreditados bajo la norma NB ISO/IEC 17025. Sin embargo, más allá de cumplir con la obligación, los ensayos de aptitud deben entenderse como una

herramienta estratégica para la mejora continua, capaz de mantener la calidad y la confiabilidad de los servicios ofrecidos.

En ese sentido, los ensayos de aptitud permiten evaluar de manera integral el sistema de medición de un laboratorio: su personal, métodos, equipos e insumos. Su verdadero valor permite detectar a tiempo posibles desviaciones, validar la solidez de los métodos, ajustar la estimación de incertidumbres y, sobre todo, garantizar que el laboratorio se mantenga confiable, competitivo y en constante mejora.

Participación del IEM en Ensayos de Aptitud.

El Instituto de Ensayo de Materiales (IEM), dependiente de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), es un laboratorio de referencia nacional en el campo de los materiales de construcción. Su compromiso con la calidad y la mejora continua también se refleja en la participación sistemática en ensayos de aptitud, organizados por el Instituto Boliviano de Metrología, los cuales constituyen una herramienta clave para mantener y ampliar su competencia técnica bajo los lineamientos de la norma ISO/IEC 17025.

Actualmente, el Laboratorio de Materiales de Construcción del IEM, acreditado por la DTA-IBMETRO según la norma NB ISO/IEC 17025:2018, cuenta con alcance vigente para el ensayo de resistencia a la compresión de cementos, conforme a las normas NB 470 y ASTM C109:23. La acreditación es válida exclusivamente para el alcance detallado en el Certificado de Acreditación DTA-CET-212, emitido por la Dirección Técnica de Acreditación (DTA) del Instituto Boliviano de Metrología (IBMETRO).

Este reconocimiento implicó, entre otros requisitos, demostrar ante el organismo nacional de acreditación la participación regular y satisfactoria en programas de ensayos de aptitud de la matriz cemento, evidenciando la competencia técnica del laboratorio en la ejecución de este ensayo. Los resultados obtenidos en los programas de ensayos de aptitud han mostrado un desempeño consistente y técnicamente confiable, constituyendo parte fundamental de la evidencia presentada durante el proceso de acreditación y su primer mantenimiento. Dichos resultados confirmaron que los métodos aplicados generan mediciones comparables con las de laboratorios pares, incluyendo

otros laboratorios acreditados internacionalmente. Así, la participación en estos programas no solo fortaleció la evidencia documental exigida por ISO/IEC 17025, sino también la confianza institucional en sus métodos de ensayo. A continuación, se muestra el gráfico resumen de la participación del área de materiales de construcción en los ensayos de aptitud de la matriz cemento (ensayo

de resistencia a compresión de cementos) a 28 días del año 2018, 2019, 2021, 2022, 2023 y 2024, los resultados alcanzados en las distintas gestiones fueron satisfactorios en todos los casos, evidenciando la solidez del sistema de calidad implementado y la competencia técnica del laboratorio:

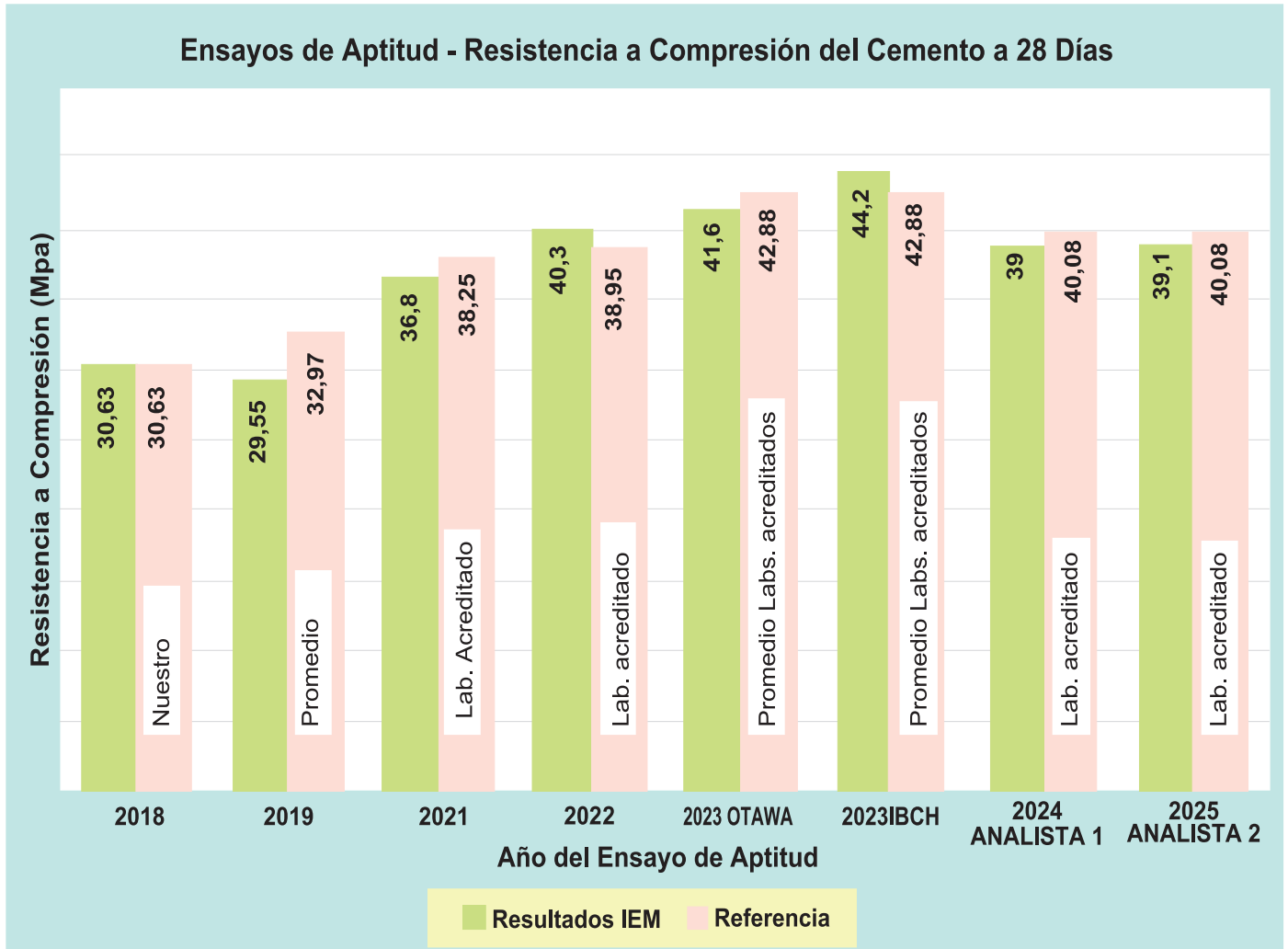


Figura 1. Resumen de los resultados de la participación en ensayos de aptitud de la matriz "Cemento" del área de Materiales de Construcción. (Fuente: Área de Materiales)

Además del área que obtuvo la acreditación del ensayo sobre cementos, el área de Hormigones del IEM también ha comenzado a participar activamente en ensayos de aptitud organizados por IBMETRO, como parte de su preparación hacia la acreditación.

Los resultados del IEM se ubicaron en la zona de desempeño satisfactorio, evidenciando su capacidad

técnica en el ensayo de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de hormigón a 28 días.

A continuación, se muestran los resultados de la participación del área de hormigones en los ensayos de aptitud del año 2018, 2023 y 2024, en los cuales el laboratorio obtuvo desempeños satisfactorios en todas las rondas:



Figura 2. Resultado de la participación en ensayos de aptitud 2018 - H21, del área de Hormigones. (Fuente: Área de Hormigones)



Figura 3. Resultado de la participación en ensayos de aptitud 2018 - H25, del área de Hormigones. (Fuente: Área de Hormigones)

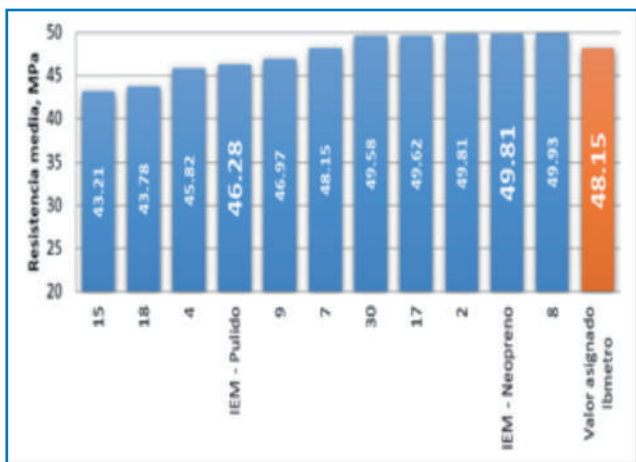


Figura 4. Resultado de la participación en ensayos de aptitud 2018 - H35, del área de Hormigones (Fuente: Área de Hormigones)

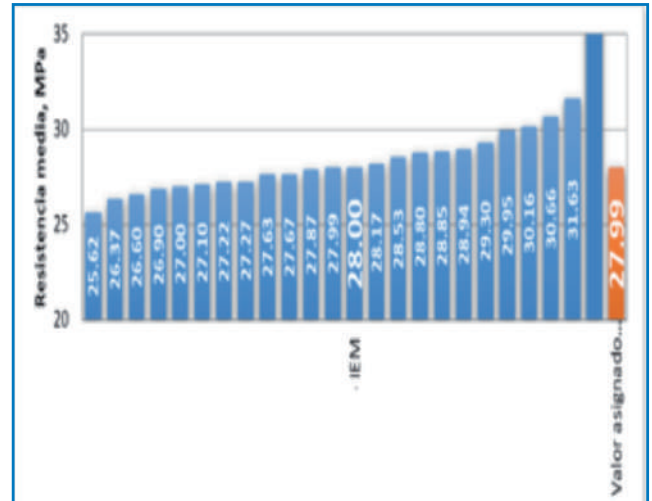


Figura 5. Resultado de la participación en ensayos de aptitud 2023 del área de Hormigones (Fuente: Área de Hormigones)

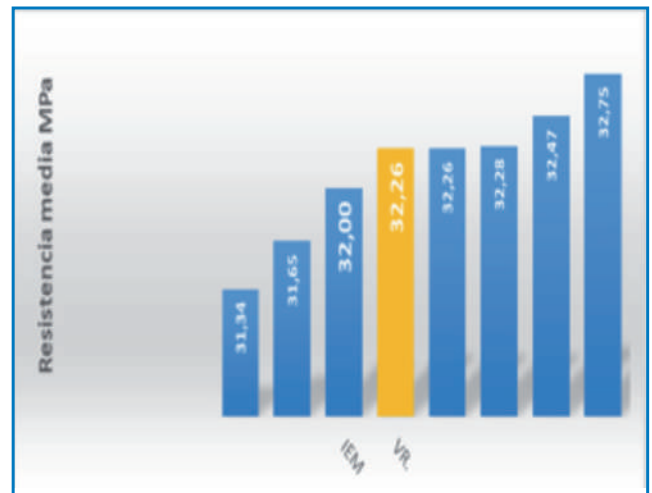


Figura 6. Resultado de la participación en ensayos de aptitud 2024 del área de Hormigones (Fuente: Elaboración propia)

A lo largo de los últimos años, el IEM ha extendido su participación en ensayos de aptitud en las áreas de Materiales de Construcción, Hormigones y Química, y ha organizado además comparaciones interlaboratorio en el área de Asfaltos, consolidando su rol como actor central en la infraestructura nacional de la calidad.

La evidencia de desempeño favorable en diferentes matrices (cemento, hormigón, asfalto y química) respalda la visión del IEM de convertirse en un referente técnico y académico, comprometido con la excelencia y la confiabilidad de los resultados que ofrece a la sociedad y al sector de la construcción.

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE APTITUD: EL PUNTAJE Z Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN.

Una vez que el laboratorio participa en un ensayo de aptitud y recibe el informe de resultados, es crucial interpretar adecuadamente qué nos dice dicho informe sobre el desempeño del laboratorio. La evaluación cuantitativa del desempeño en la mayoría de los programas de ensayos de aptitud se basa en un indicador estadístico ampliamente utilizado: el puntaje z (z-score). Este parámetro, junto con otros indicadores complementarios, permite medir de manera objetiva qué tan cerca o lejos se encuentra el resultado de un laboratorio respecto al valor de referencia establecido.

A continuación, se explica de forma sencilla qué representa el puntaje z, y cuáles son los criterios comúnmente aplicados para interpretar el desempeño de un laboratorio, así como las acciones recomendadas en función de cada resultado.

El puntaje z de un participante se define generalmente como:

$$Z = \frac{x_i - x_{pt}}{\sigma_{pt}}$$

Donde x_i es el resultado reportado por el laboratorio i , x_{pt} es el valor asignado para la muestra (es decir, el valor de referencia considerado como “verdadero” o consenso), y σ_{pt} es la desviación estándar de aptitud elegida para esa ronda (INSHT, 2016). La idea de esta fórmula es expresar la diferencia entre el resultado del laboratorio y el valor verdadero en unidades de la desviación estándar del ensayo, asumiendo una distribución aproximadamente normal de los errores.

Criterios de aceptación típicos: La mayoría de los proveedores se adhieren a los criterios recomendados internacionalmente (por ISO 13528 y documentos como ILAC) para juzgar los puntajes z. Estos criterios suelen ser:

$|z| < 2,0$: Desempeño satisfactorio (aceptable). Si el valor absoluto del z es menor que 2.0. El laboratorio puede interpretar esto como que su resultado es consistente con el valor de referencia, sin indicios de sesgo significativo.

$2,0 \leq |z| < 3,0$: Señal de advertencia (resultado cuestionable). Es una llamada de atención: el laboratorio

debe revisar su resultado y condiciones de ensayo, No se declara aún “falla” rotunda, pero sí se sugiere precaución.

$|z| \geq 3,0$: Desempeño no satisfactorio (inaceptable). El laboratorio debe tomar este resultado muy en serio e iniciar de inmediato una investigación y acciones correctivas.

Además del puntaje z tradicional, algunos informes incluyen otros indicadores:

Puntaje z' (z modificado): Es similar al z, pero en la fórmula se incorpora también la incertidumbre del valor asignado.

ROL DE LOS ENSAYOS DE APTITUD EN EL CICLO DE MEJORA CONTINUA (PHVA).

El ciclo PHVA (Planificar - Hacer - Verificar - Actuar), también conocido por sus siglas en inglés PDCA (Plan - Do - Check - Act), es un modelo universal para gestionar la mejora continua en cualquier proceso de calidad. En el contexto de un laboratorio de ensayo, este ciclo se aplica para asegurar que todos los aspectos del trabajo (desde la calibración de equipos, procedimientos, personal, hasta los resultados finales) estén sujetos a un proceso continuo de optimización. Los ensayos de aptitud encajan de manera natural en este ciclo de mejora.

De esta forma, los ensayos de aptitud proveen el elemento de “Verificación externa” dentro del ciclo PHVA, complementando la verificación interna (controles de calidad). Un laboratorio verdaderamente orientado a calidad usará cada resultado de aptitud, bueno o malo, como un insumo para ajustar sus procesos.

CONCLUSIONES

Puede afirmarse que la cultura de participación en ensayos de aptitud es, en realidad, una cultura de calidad. Para un laboratorio acreditado, estos ensayos han dejado de ser únicamente un requisito de acreditación para convertirse en una herramienta estratégica de gestión, que orienta las mejoras técnicas, aporta evidencia objetiva de competencia y fortalece su reputación nacional e internacional.

En el camino hacia la excelencia, tanto el IEM como los demás laboratorios del país deben seguir fortaleciendo su participación en estos programas y, al mismo tiempo,

impulsar el desarrollo de nuevos ensayos de aptitud locales en aquellas áreas donde aún existen vacíos. Los ensayos de aptitud representan, sin duda, el camino más sólido hacia la excelencia técnica y la mejora continua en los laboratorios de ensayo.

REFERENCIAS

- [1] **Controllab (s. f.)**. Ensayo de Aptitud - Demuestre la confiabilidad de sus resultados. [Página web]. Controllab, Brasil. Recuperado 2025.
- [2] **ISO/IEC 17025:2017**. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. Ginebra: International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission.
- [3] **ISO/IEC 17043:2010**. Evaluación de la conformidad - Requisitos generales para los ensayos de aptitud. Ginebra: ISO/IEC.
- [4] **GQSP Colombia - ONUDI (2022)**. Aseguramiento de la Validez de los Resultados - ISO 17025:2017 (Presentación). Global Quality and Standards Programme, ONUDI.

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES MEDIANTE EL MÉTODO DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA AL CORTE CON ELEMENTOS FINITOS

Giordy Cruz Barra

giordycruz0106@gmail.com

Yecid Aliaga Bruch

yab@constec.com.bo

Gricel Alcira Portillo Miranda

pmgaportillo@umsa.bo

RESUMEN

Este trabajo aborda el análisis de estabilidad de taludes mediante el método de reducción de parámetros de resistencia al corte, formulado dentro del marco de la mecánica del medio continuo y resuelto mediante el método de los elementos finitos, desarrollando un código computacional en MATLAB. La masa de suelo se discretiza con elementos triangulares de deformación constante, y su comportamiento se idealiza con el modelo elastoplástico de Mohr-Coulomb bajo condiciones de estado plano de deformaciones y régimen no drenado.

Palabras Clave: Talud, Elementos finitos, Modelo constitutivo, Elástico, Plástico, Reducción de parámetros resistentes, Algoritmo de retorno, Mohr-Coulomb.

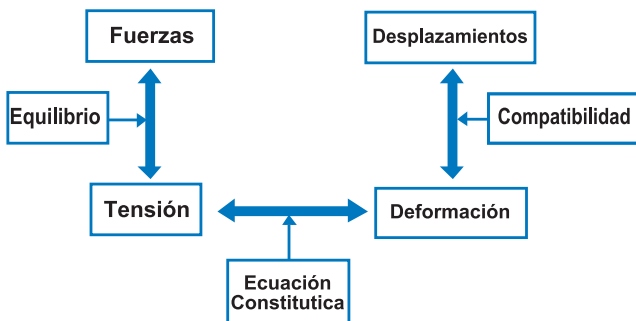
ABSTRACT

This work addresses slope stability analysis using the shear strength reduction method, formulated within the framework of continuum mechanics and solved through the finite element method by developing a computational code in MATLAB. The soil mass is discretized using constant strain triangular elements, while its behavior is idealized with the Mohr-Coulomb elastoplastic model under plane strain and undrained conditions.

Keywords: Slope, Finite elements, Constitutive model, Elastic, Plastic, Strength reduction, Return algorithm, Mohr-Coulomb.

INTRODUCCIÓN

La modelación numérica en geotecnia transforma problemas físicos en modelos matemáticos mediante ecuaciones diferenciales y condiciones de contorno, idealizando el suelo como medio continuo sin discontinuidades, donde tensiones, desplazamientos y deformaciones se relacionan mediante funciones continuas.



El tensor de tensiones de Cauchy define el estado de tensiones en un punto con nueve componentes.

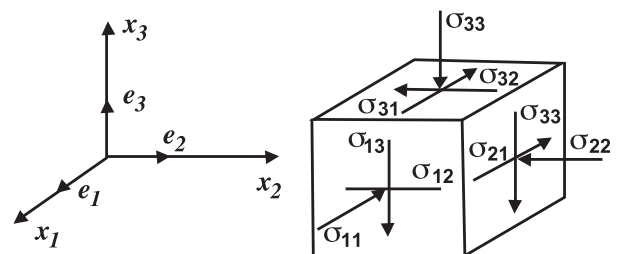


Figura 1. tensor de tensiones

Fuente: Constitutive Modelling in Geomechanics (Puzrin, 2012, p. 28)

Las tensiones principales ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) son esfuerzos que actúan en planos donde las componentes de corte son nulas.

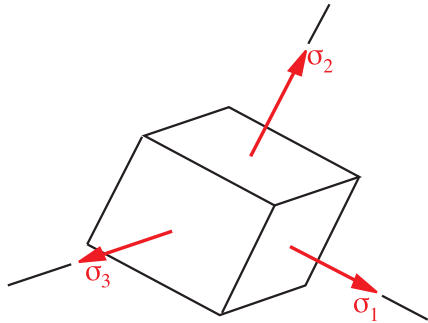


Figura 2. Tensiones principales

Fuente: Mecapedia

(www.mecapedia.uji.es/pages/tensiones_principales)

$$(\sigma_{ij} - \sigma \cdot I) n_i = 0 \quad (6)$$

Donde:

σ_{ij} : Tensor de tensiones

σ : Tensiones principales (autovalores)

I : Matriz identidad

n_i : Direcciones de las tensiones principales (auto vector)

Estabilidad de taludes

El estudio de estabilidad de taludes busca reducir riesgos mediante medidas preventivas, evaluando su seguridad mediante un factor de seguridad, influido por geometría, condiciones geológicas, sismos, agua y propiedades del suelo.

La inestabilidad de taludes puede originarse por el incremento de esfuerzos (cargas externas, humedad, sismos, socavaciones) o por la disminución de la resistencia del suelo (presión de poro, expansión de arcillas, vibraciones, deshielo y degradación estructural).

Resistencia al esfuerzo cortante

La resistencia al esfuerzo cortante del suelo se describe en términos de tensiones efectivas con la ecuación revisada de Coulomb:

$$\tau = c + \sigma' \operatorname{tg}(\phi)$$

Donde:

τ = tensión tangencial

c = cohesión

ϕ = ángulo de fricción de suelo.

σ' = tensión normal efectiva

Definición del factor de seguridad

El factor de seguridad es empleado por los ingenieros

para conocer cuál es el factor de amenaza para que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento.

$$F.S. = \frac{\text{Resistencia al corte disponible}}{\text{Esfuerzo al cortante actuante}}$$

Métodos de Análisis de Estabilidad de Taludes

Los métodos para cuantificar la estabilidad de taludes incluyen el **equilibrio límite** y los **análisis numéricos** (como el método de los elementos finitos o diferencias finitas). La principal diferencia radica en el comportamiento del suelo que se asume:

- Los métodos de equilibrio límite consideran que el suelo tiene un comportamiento rígido-plástico.
- Los métodos de elementos finitos se basan en un comportamiento elasto-plástico, permitiendo definir relaciones tenso-deformacionales y conocer el plano de falla, la distribución de tensiones y deformaciones.

Aplicación del Método de Elementos Finitos (FEM) a la Geotecnia

El FEM discretiza el suelo en elementos finitos y calcula tensiones y desplazamientos nodales mediante formulación de desplazamiento. Permite modelar el comportamiento esfuerzo-deformación manteniendo equilibrio interno y condiciones de frontera, considerando la falla como proceso progresivo.

Ventajas del Método de Elementos Finitos sobre los Métodos Tradicionales de Equilibrio Límite

- No requiere suposiciones previas sobre la forma o ubicación de la superficie de falla, ya que la falla ocurre "naturalmente" donde la resistencia al corte no soporta los esfuerzos aplicados.
- Permite obtener información sobre las deformaciones en los niveles de tensión de trabajo si se dispone de datos de compresibilidad del suelo.
- Es capaz de monitorear la falla progresiva hasta la falla general por cortante.

Formulación general para el análisis de estabilidad de taludes con SSR-FEM

- **Condiciones de equilibrio**

$$\nabla \cdot \sigma + b = 0$$

donde:

σ : es el tensor de tensiones de Cauchy,
 b : representa las fuerzas de cuerpo (peso propio).

• **Condiciones geométricas**

La deformación se define como la parte simétrica del gradiente de desplazamientos:

$$\epsilon = \frac{1}{2} \cdot (\nabla u + (\nabla u)^T)$$

• **Relaciones constitutivas**

Comportamiento elástico (Ley de Hooke en 2D estado plano de deformaciones):

$$\sigma = D^e \cdot \epsilon$$

donde D^e es la matriz constitutiva elástica:

$$D^e = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 1-2\nu \\ & & & 2 \end{bmatrix} + 1-2 \nu$$

Formulación por Elementos Finitos

Aplicando el principio de energía virtual, se obtiene la ecuación de equilibrio en un elemento finito:

$$\int_{\Omega} [B]^T \cdot D \cdot B d\Omega \cdot \Delta d = \int_{\Omega} \omega^T \cdot b d\Omega + \oint_{\Gamma} \omega^T \cdot t d\Gamma$$

con:

• **Matriz de rigidez del elemento:**

$$K^e = \int_{\Omega} [B]^T \cdot D^e \cdot B d\Omega \cdot \Delta d$$

• **Vector de fuerzas nodales:**

$$f^e = \int_{\Omega} \omega^T \cdot b d\Omega + \oint_{\Gamma} \omega^T \cdot t d\Gamma$$

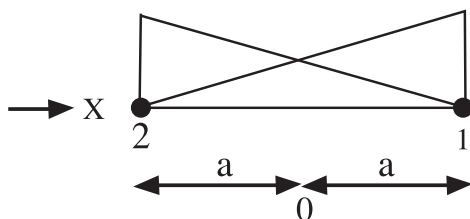
Cargas por gravedad de cuerpo

Se asume un peso propio suelo constante, las fuerzas nodales equivalentes son iguales a:

$$F_c^e = -\gamma A \left[0, \frac{1}{3}, 0, \frac{1}{3}, 0, \frac{1}{3} \right]^T$$

Vector elemental de fuerzas de superficie

A partir de se define el vector elemental de fuerzas de superficie del elemento como:



$$F_{sup}^e = -q[0, a, 0, a]^T = -q[0, L/2, 0, L/2]^T$$

Modelo elástico-perfectamente plástico

Los modelos constitutivos basados en la teoría de plasticidad permiten relacionar incrementos de tensión y deformación en suelos, considerando factores como presión de poros, historial de carga y estructura. Este enfoque se basa en tres propiedades: función de fluencia, regla de flujo y regla de endurecimiento, que definen y controlan el desarrollo de deformaciones plásticas.

Superficie de fluencia

La superficie de fluencia se define mediante una función que depende del estado de esfuerzo, deformaciones plásticas, invariantes y parámetros de endurecimiento.

$$f(\sigma, k) = 0$$

manera:

- $f(\sigma, k) < 0$: Comportamiento elástico
- $f(\sigma, k) = 0$: Comportamiento plástico o elastoplástico
- $f(\sigma, k) > 0$: Comportamiento inadmisibile

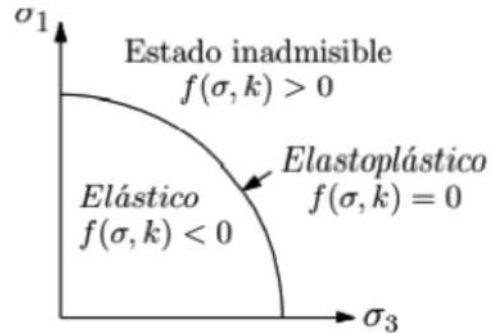


Figura 3. función de fluencia

Fuente: Desarrollo de un código de elementos finitos para modelar la respuesta sísmica de suelos (Kungar G., 2016, p. 63)

Regla de flujo y potencial plástico

La regla de flujo describe cómo evolucionan las deformaciones plásticas según el estado de tensiones, controladas por un multiplicador plástico y un potencial plástico.

$$d\epsilon^p = d\lambda^p \frac{\delta g}{\delta \sigma} = d\lambda^p g_g$$

Donde:

$d\lambda^p \geq 0$: Multiplicador plástico.

g : potencial plástico.

matriz constitutiva elastoplástica, que relaciona los incrementos de tensión y deformación considerando simultáneamente el comportamiento elástico (ley de Hooke) y el plástico (regla de flujo y condición de consistencia), garantizando que el estado tensional se mantenga en la superficie de fluencia en el caso de plasticidad perfecta.

$$D^p = \frac{D \begin{pmatrix} \delta g \\ \delta \sigma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta g \\ \delta \sigma \end{pmatrix}^T}{\begin{pmatrix} \delta f \\ \delta \sigma \end{pmatrix}^T D \begin{pmatrix} \delta g \\ \delta \sigma \end{pmatrix}}$$

Modelo constitutivo de Mohr-Coulomb

El modelo de Mohr-Coulomb representa una primera aproximación al comportamiento de los suelos y queda definida por cinco parámetros: Módulo de Young, coeficiente de Poisson, cohesión, ángulo de fricción interna, ángulo de dilatancia. Se basa en plasticidad perfecta e incluye un rango elástico lineal, una función de fluencia y una regla de flujo no asociativa.

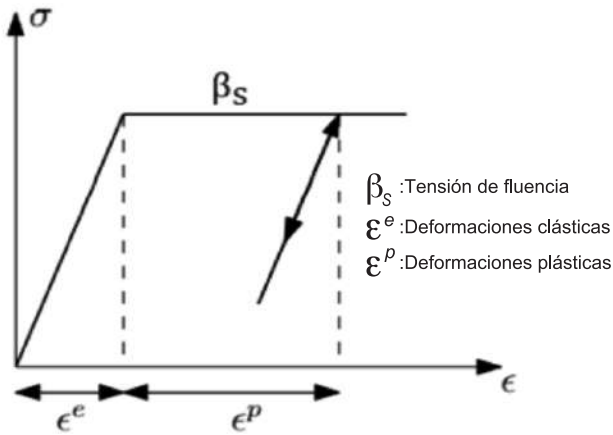


Figura 4. Modelo constitutivo de Mohr-Coulomb
Fuente: Geotecnia Numérica I. (FIUBA-Geotecnia, 2020)

Función de fluencia

La transición desde el comportamiento elástico al comportamiento plástico es determinada por la función de fluencia, que en el caso del modelo de Mohr-Coulomb es una extensión del criterio de falla de Mohr-Coulomb

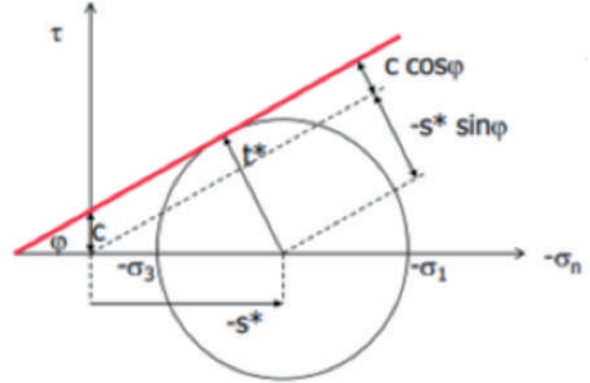


Figura 5. Criterio de falla de Mohr-Coulomb
 Geotecnia Numérica I. (FIUBA-Geotecnia, 2020)

Criterio completo de Mohr-Coulomb

$$f_1 = (\sigma_1 - \sigma_2) + (\sigma_1 - \sigma_2) \sin(\varphi) - 2c \cdot \cos(\varphi), \text{ si } \sigma_1 \geq \sigma_3 \geq \sigma_2$$

$$f_2 = (\sigma_1 - \sigma_3) + (\sigma_1 - \sigma_3) \sin(\varphi) - 2c \cdot \cos(\varphi), \text{ si } \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$$

$$f_3 = (\sigma_2 - \sigma_3) + (\sigma_2 - \sigma_3) \sin(\varphi) - 2c \cdot \cos(\varphi), \text{ si } \sigma_2 \geq \sigma_1 \geq \sigma_3$$

$$f_4 = (\sigma_2 - \sigma_1) + (\sigma_2 - \sigma_1) \sin(\varphi) - 2c \cdot \cos(\varphi), \text{ si } \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq \sigma_1$$

$$f_5 = (\sigma_3 - \sigma_1) + (\sigma_3 - \sigma_1) \sin(\varphi) - 2c \cdot \cos(\varphi), \text{ si } \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$$

$$f_6 = (\sigma_3 - \sigma_2) + (\sigma_3 - \sigma_2) \sin(\varphi) - 2c \cdot \cos(\varphi), \text{ si } \sigma_3 \geq \sigma_1 \geq \sigma_2$$

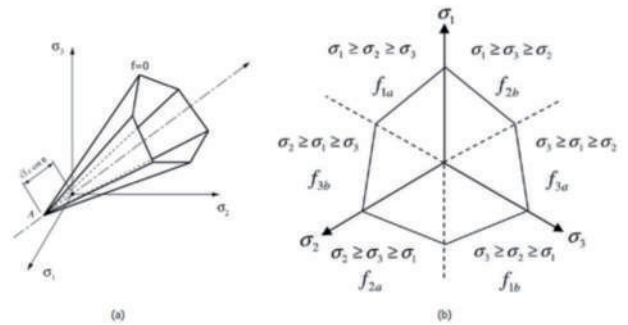


Figura 5. Superficie de fluencia (a) en el espacio de esfuerzos principales y (b) en la proyección sobre el plano desviatorio

Fuente: Desarrollo de un código de elementos finitos para modelar la respuesta sísmica de suelos (Kungur G., 2016, p. 68)

Limitaciones del Modelo de Mohr-Coulomb

Debido a su simplicidad, el modelo de Mohr-Coulomb presenta varias limitaciones:

- No considera endurecimiento, lo cual no se ajusta a la realidad de los ensayos de suelos.

- Considera un ángulo de fricción interna constante, aunque los ensayos sugieren que es variable.
- Asume un ángulo de dilatación constante, mientras que en la realidad la dilatación tiende a cero a medida que el suelo alcanza el estado crítico.

Modelación en suelos saturados

El suelo es un medio trifásico (sólido, líquido, gas) cuyo comportamiento requiere modelar la interacción entre flujo de poros y deformación del esqueleto. Según Terzaghi, la tensión total se divide en tensión efectiva del sólido y presión de poro del fluido.

$$\sigma = \sigma' + m p_w$$

Donde: para el caso general (tridimensional)

$$\sigma = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{xy} \ \tau_{yz} \ \tau_{xz}]^T$$

$$\sigma' = [\sigma'_x \ \sigma'_y \ \sigma'_z \ \tau'_{xy} \ \tau'_{yz} \ \tau'_{xz}]^T$$

$$m = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

En este último vector “m” tiene sus últimas tres componentes nulas debido a que el agua no ofrece resistencia al corte.

Factor de Seguridad por Métodos Numéricos

En el método de reducción de resistencia (SSR-FEM), los parámetros de resistencia del suelo se reducen progresivamente hasta que el talud se vuelve inestable. La falla se define como el punto donde las deformaciones aumentan rápidamente con el incremento del factor de reducción de resistencia (SSR).

$$SSR = \frac{c'}{c'_{reducido}} = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi'_{reducido}}$$

Donde:

- $c'_{reducido}$: es el valor de cohesión reducido
- $\phi'_{reducido}$: es el valor del ángulo de fricción

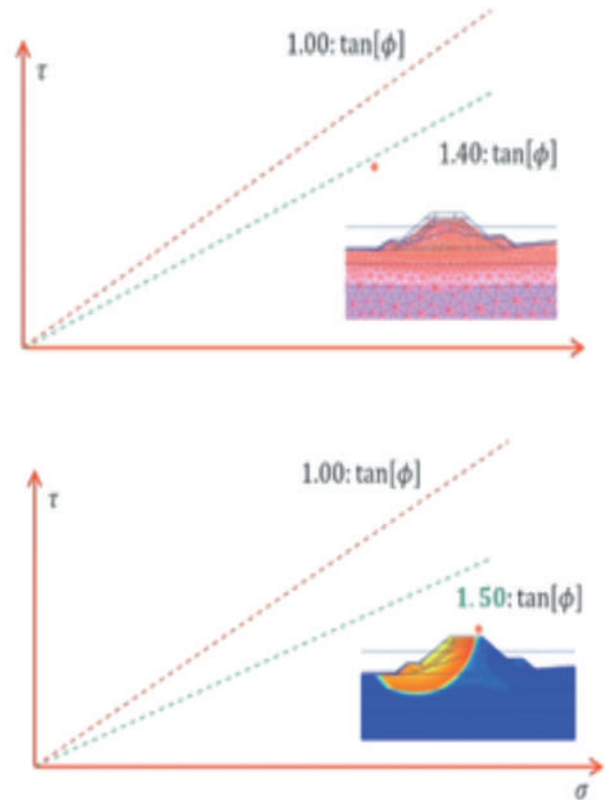
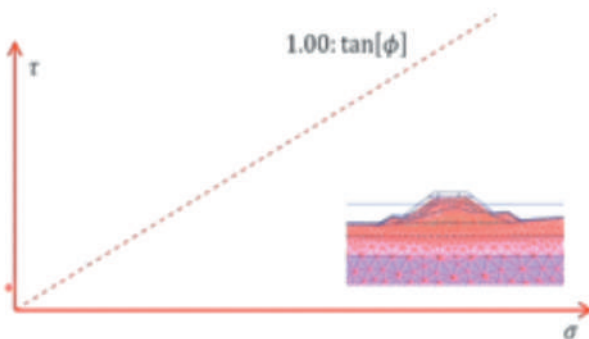


Figura 6. Método del SSR

Fuente: Geotecnia Numérica I. (FIUBA-Geotecnia, 2020)

ANÁLISIS NO LINEAL

Para el presente proyecto se utilizará el método de Newton-Raphson modificado de rigidez inicial.

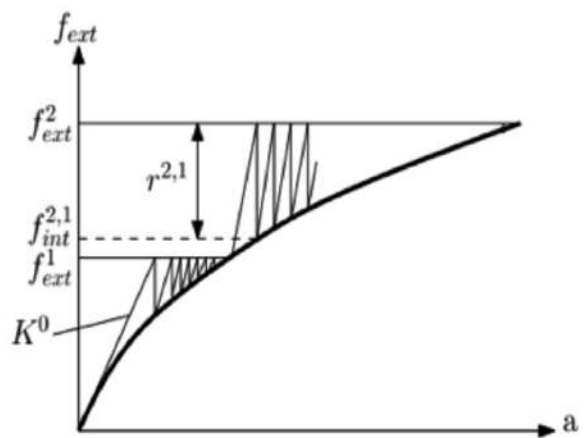


Figura 7. Algoritmo de Newton-Raphson modificado de rigidez inicial

Fuente: Desarrollo de un código de elementos finitos para modelar la respuesta sísmica de suelos (Kungar G., 2016, p. 58)

La convergencia numérica puede ser lenta, pero se mejora con algoritmos simétricos y variantes adaptativas. Para resultados físicamente coherentes, son esenciales incrementos pequeños, especialmente con leyes constitutivas dependientes de la historia.

Formulación incremental del problema

El análisis las fuerzas externas son aplicadas lo suficientemente lento para que las fuerzas de inercia sean consideradas nulas. Para el caso lineal elástico equivale a:

$$\mathbf{K}^0 \cdot \mathbf{u} = \mathbf{f}_{\text{ext}}$$

$$\mathbf{f}_{\text{int}} = \mathbf{f}_{\text{ext}}$$

El análisis no lineal requiere aplicar la carga en incrementos, ya que las propiedades del material cambian con el aumento de esfuerzos. Por ello, la fuerza externa debe introducirse paso a paso, verificando el equilibrio en cada etapa.

$$\mathbf{f}_{\text{ext}}^i = \mathbf{f}_{\text{ext}}^{i-1} + \mathbf{V} \mathbf{f}_{\text{ext}}$$

Y se deberá verificar el equilibrio global

$$\mathbf{f}_{\text{ext}}^i - \mathbf{f}_{\text{int}}^i = \mathbf{0}$$

Donde:

$\mathbf{f}_{\text{ext}}^i$: Vector global de fuerzas externas nodales en el paso i.

$\mathbf{f}_{\text{int}}^i$: Vector global de fuerzas internas nodales en el paso i.

Aplicando la aproximación por el método de elementos finitos, esta formulación puede ser expresada en los siguientes términos:

$$\int_{\Omega} \mathbf{B}^T \cdot \Delta \boldsymbol{\sigma} d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{N}^T \mathbf{b}^i d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{N}^T \mathbf{t}^i d\Gamma - \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}^{i-1} d\Omega$$

representado la estructura

$$\mathbf{K}^0 \Delta \mathbf{u} = \mathbf{f}_{\text{ext}}^i - \mathbf{f}_{\text{int}}^{i-1} = \mathbf{r}^{ij}$$

la actualización de deformaciones se realiza según:

$$\Delta \boldsymbol{\varepsilon}^i = \sum_{j=1}^n \delta \boldsymbol{\varepsilon}^j = \mathbf{B}^c(\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\eta}) (\Delta \mathbf{u}^c)^i$$

el estado de tensiones en el punto se debe calcular mediante

$$\boldsymbol{\sigma}^{ij} = \boldsymbol{\sigma}^{i-1} + \Delta \boldsymbol{\sigma}^i$$

resolviendo la integral:

$$\Delta \boldsymbol{\sigma}^i = \int_{\boldsymbol{\varepsilon}^{i-1}}^{\boldsymbol{\varepsilon}^{i-1} + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^i} \mathbf{D}^{ep} d\boldsymbol{\varepsilon}$$

Donde: $\boldsymbol{\sigma}^{ij}$ corresponde al último estado de tensión aceptado del paso anterior (i-1), $\boldsymbol{\varepsilon}^{i-1}$ es la deformación asociada a ese estado de tensión y \mathbf{D} es la matriz constitutiva de tensión-deformación del material.

Actualización del vector de fuerzas nodales internas

El vector de fuerzas internas se obtiene a nivel de elemento según

$$\mathbf{f}_{\text{int}}^{ij} = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}^{ij} d\Omega$$

Criterio de convergencia

Para definir cuándo se ha cumplido el equilibrio, se puede definir el error global según un criterio de fuerzas, como

$$\mathbf{e}^{i,j} = \frac{\|\mathbf{r}^{i,j}\|}{\|\mathbf{f}_{\text{ext}}^i\|}$$

Si $\mathbf{e}^{i,j} > \mathbf{e}_{\text{tol}}$: Sigue iterando (j=j+1)

Si $\mathbf{e}^{i,j} \leq \mathbf{e}_{\text{tol}}$: Se pasa al siguiente paso de carga (i=i+1)

Algoritmos de retorno

Fundamentos de plasticidad y mapeo de retorno

Estos comprenden una fase de predicción elástica, donde la ecuación constitutiva elástica es integrada considerando un incremento en las deformaciones totales, y otra de corrección plástica, donde el estado de tensiones es devuelto, iterativamente, a la superficie de fluencia (en el caso de ocurrir plasticidad).

$$\boldsymbol{\sigma}^c = \boldsymbol{\sigma}^B - \Delta \boldsymbol{\sigma}^p \quad (141)$$

Donde:

$\boldsymbol{\sigma}^B$: es el predictor elástico

$\Delta \boldsymbol{\sigma}^p$: es el corrector plástico

$\boldsymbol{\sigma}^c$: es el estado de tensión actualizado

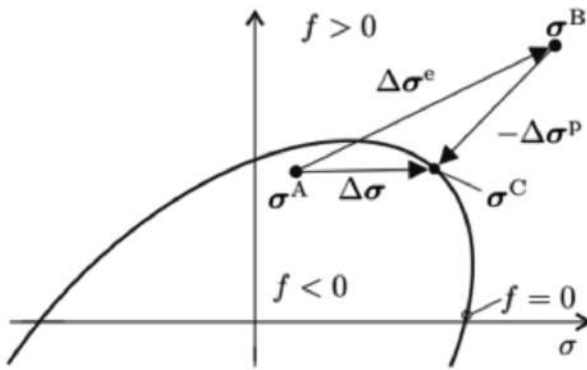


Figura 8. Mapeo de retorno

Fuente: An efficient return algorithm for non-associated plasticity with linear yield criteria in principal stress space (Clausen et al., 2007)

donde:

$$\Delta \sigma^p = \int_{\lambda^p}^{\lambda^p + \Delta \lambda^p} \mathbf{D} \frac{\delta g}{\delta \sigma} d\lambda^p = \Delta \lambda^p \mathbf{D} \frac{\delta g}{\delta \sigma}$$

Algoritmo de retorno aplicado al modelo de Mohr-Coulomb

Las superficies de fluencias lineales, como la de Mohr-Coulomb, son visualizadas como planos en el espacio de tensiones principales.

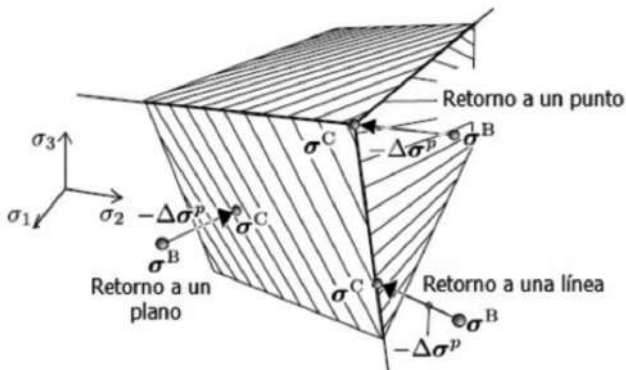


Figura 9. Mapeo de retorno en tensiones principales

Fuente: Desarrollo de un código de elementos finitos para modelar la respuesta sísmica de suelos (Kungur G., 2016)

El modelo de Mohr-Coulomb comprende de seis planos en el espacio de tensiones principales. Las mismas se ordenan de forma que:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$$

Por lo que la función de fluencia se reduce a

$$f = (\sigma_1 - \sigma_3) + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin(\varphi) - 2c \cdot \cos(\varphi) = 0$$

Y el potencial plástico a

$$g = (\sigma_1 - \sigma_3) + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin(\varphi)$$

De esta forma, las tensiones solo tienen la posibilidad de retornar a uno de los seis planos de fluencia, a dos de las seis líneas (l_1 y l_2), o al punto como se visualiza en la figura 32.

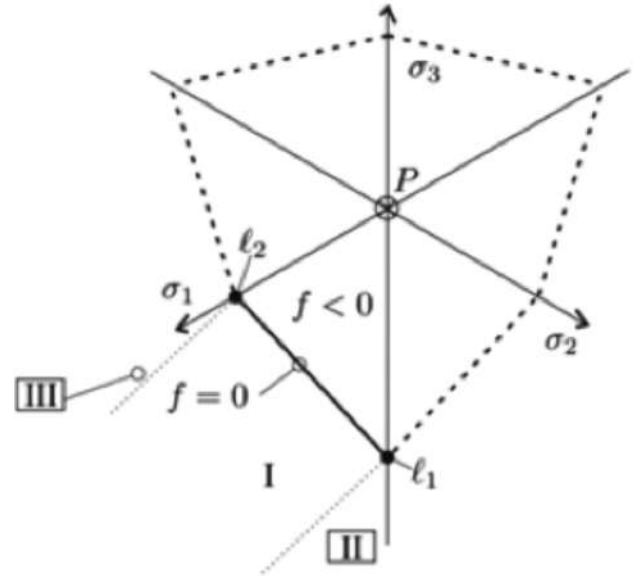


Figura 10. Superficie de fluencia

Fuente: An efficient return algorithm for non-associated plasticity with linear yield criteria in principal stress space (Clausen et al., 2007)

Retorno a un plano de fluencia

La superficie de fluencia y el potencial plástico del modelo de Mohr-Coulomb puede expresarse como:

$$f(\sigma) = \mathbf{g}_{f_1}^T (\sigma - \sigma_a) = k \sigma_1 - \sigma_3 - 2c\sqrt{k} = 0$$

$$f(\sigma) = \mathbf{g}_g^T \sigma = m \sigma_1 - \sigma_3$$

donde

$$\mathbf{g}_{f_1} = [k \ 0 \ -1]^T, \quad k = \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)}$$

$$\mathbf{g}_g = [m \ 0 \ -1]^T, \quad m = \frac{1 + \sin(\psi)}{1 - \sin(\psi)}$$

y se utiliza como punto sobre el plano, el punto vértice de la superficie de fluencia

$$\sigma_a = \frac{2c\sqrt{k}}{k-1} [1 \ 1 \ 1]^T$$

El corrector plástico puede determinarse mediante:

$$\Delta\sigma^p = \frac{f(\sigma^B)}{g_{g_1}^T D g_{g_1}} D g_{g_1} = f(\sigma^B) r_1^p$$

donde

$$r_1^p = \frac{D g_{g_1}}{g_{g_1}^T D g_{g_1}}$$

Corresponde a la dirección del corrector plástico, que coincide con la dirección de las deformaciones plásticas, es decir, con la dirección del vector g_{g_1} .

Retorno a una línea

En términos generales, la intersección entre dos planos de fluencia, $f_1 = 0$ y $f_2 = 0$ define una determinada línea, como se muestra en la figura 34.

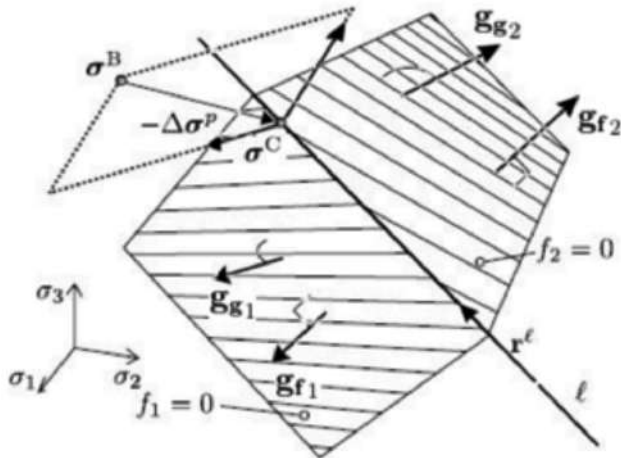


Figura 11. Retorno a una línea

Fuente: Desarrollo de un código de elementos finitos para modelar la respuesta sísmica de suelos (Kungur G., 2016)

En el caso particular del modelo de Mohr-Coulomb, el plano de fluencia activo está delimitado por las líneas l_1 y l_2 , como lo muestra la Figura 34, las cuales pueden ser definidas por las ecuaciones:

$$l_1: \sigma = \sigma^c = t_1 r_1^l + \sigma_a, r_1^l = [1 \ 1 \ k]^T$$

$$l_2: \sigma = \sigma^c = t_2 r_2^l + \sigma_a, r_2^l = [1 \ k \ k]^T$$

donde l_1 está asociada al ensayo triaxial en compresión y l_2 al ensayo triaxial en tracción.

Las direcciones del potencial plástico vienen dadas, respectivamente, por

$$r_{g_1}^l = [1 \ 1 \ m]^T$$

$$r_{g_2}^l = [1 \ m \ m]^T$$

Con lo cual, los parámetros t_1 y t_2 pueden ser obtenidos según

$$t_1 = \frac{(r_{g_1}^l)^T D^{-1} (\sigma^B - \sigma_a)}{(r_{g_1}^l)^T D^{-1} r_1^l}$$

$$t_2 = \frac{(r_{g_2}^l)^T D^{-1} (\sigma^B - \sigma_a)}{(r_{g_2}^l)^T D^{-1} r_2^l}$$

Retorno a un punto

caso de retorno a un punto, para el modelo de Mohr-Coulomb, este simplemente corresponde a punto del vértice

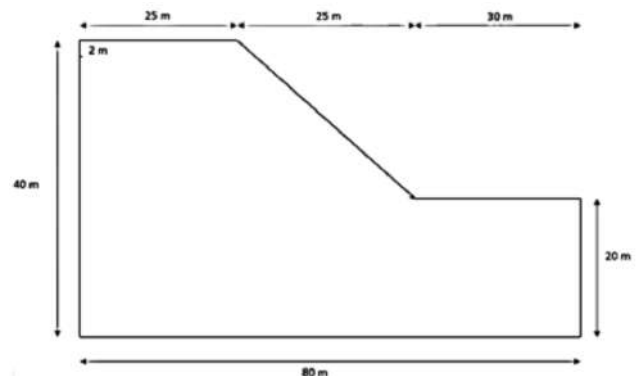
$$\sigma^c = \sigma_a$$

VALIDACIÓN

Se realiza dos análisis de la estabilidad talud. Primero, se introduce datos al código desarrollado en MATLAB. Luego, los resultados son comparados con los del programa comercial de elementos finitos, llamado Plaxis 2D.

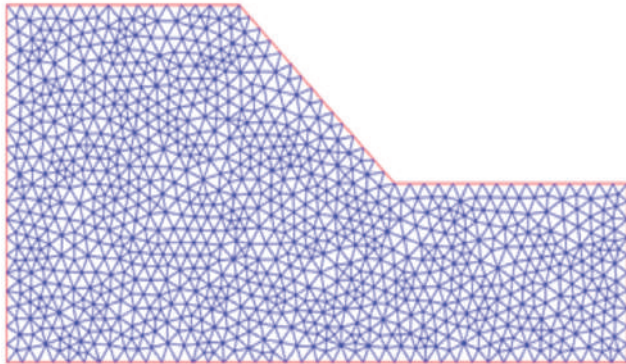
Análisis 1

Parámetros	Valor
Peso específico Natural [kN/m ³]	17
Peso específico Saturado [kN/m ³]	20
Módulo de Elasticidad [kN/m ²]	30000
Coefficiente de Poisson	0.3
Ángulo de fricción [°]	30
Cohesión [kN/m ²]	25
Ángulo de dilatación [°]	0

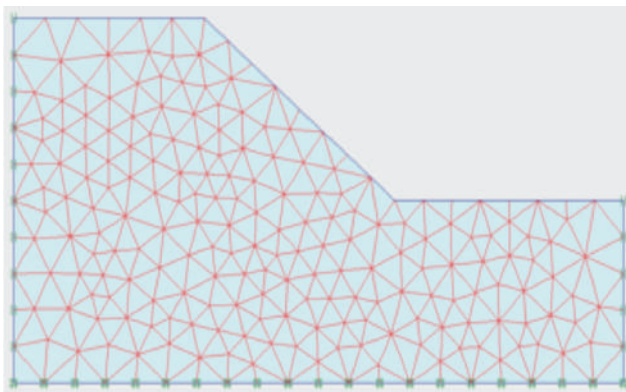


Generación de la malla de elementos finitos:

Con el fin de obtener resultados similares, se realizó una malla muy fina en MATLAB, debido a que Plaxis emplea elementos isoparamétricos triangulares con 6 puntos de Gauss.



(a)

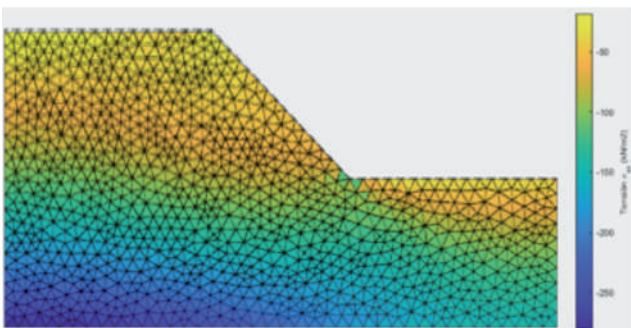


(b)

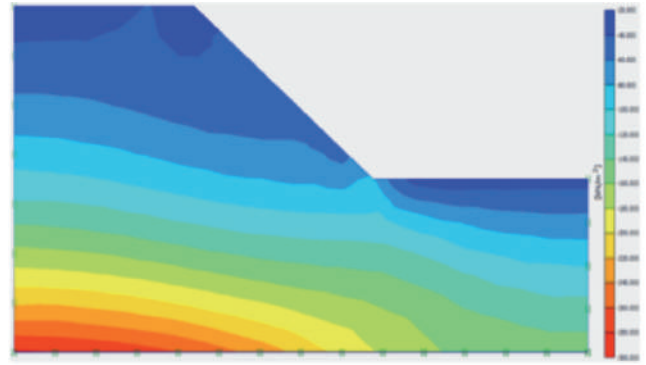
Figura 11. Refinamiento de la malla a) Matlab b) Plaxis
Fuente: elaboración propia.

• **Cálculo de las tensiones efectivas**

Tensión en la dirección en “x”



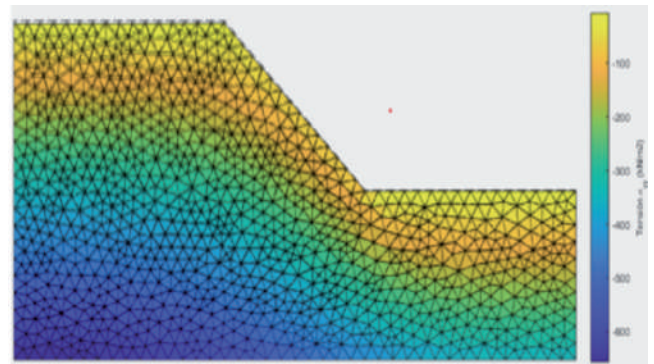
(a)



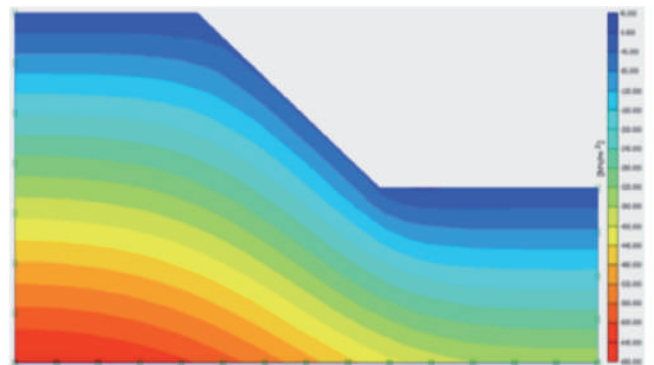
(b)

Figura 12. Tensiones Efectivas en la dirección “x” a) Matlab b) Plaxis
Fuente: elaboración propia.

Tensión en la dirección en “y”



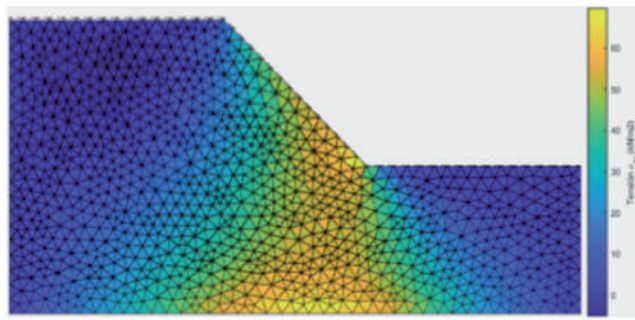
(a)



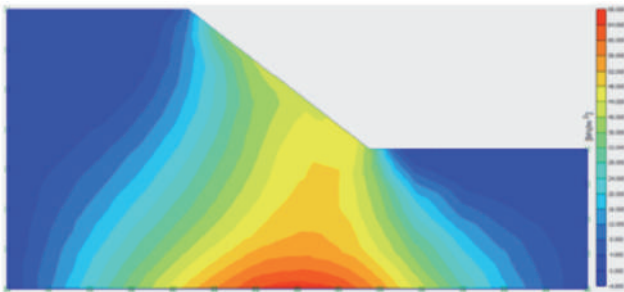
(b)

Figura 13. Tensiones Efectivas en la dirección “y” a) Matlab b) Plaxis
Fuente: elaboración propia.

Tensión de corte “xy”



(a)

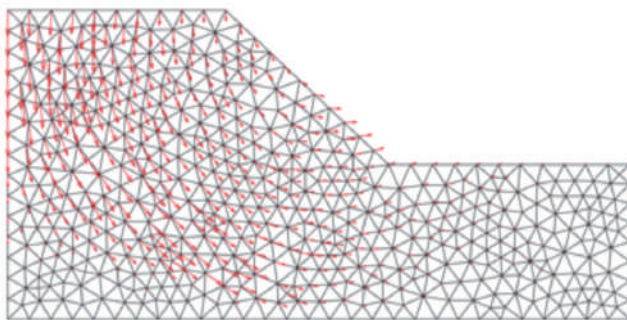


(b)

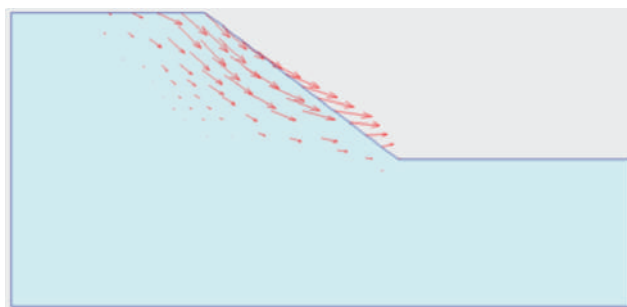
Figura 14. Tensiones Efectivas de corte “xy” a) Matlab
b) Plaxis

Fuente: elaboración propia.

• Vectores desplazamientos



(a)



(b)

Figura 15. Dirección de los vectores desplazamientos a) Matlab b) Plaxis

Fuente: elaboración propia

		GeoC-FEM	PLAXIS
FACTOR DE SEGURIDAD	SSR=	1.47	1.6

CONCLUSIONES

El uso del método de elementos finitos permitió no solo comparar resultados con métodos analíticos tradicionales, sino también **visualizar la distribución de esfuerzos y deformaciones en todo el dominio**, lo cual aporta una comprensión más profunda del mecanismo de falla en taludes. Esta capacidad de representación espacial constituye una ventaja significativa frente a los métodos clásicos.

Como resultado del desarrollo del código computacional en MATLAB, el cual permite modelar y la estabilidad de taludes. Su validación se realizó mediante ejemplos comparativos con Plaxis y casos reportados en literatura científica, obteniendo factores de seguridad con diferencias menores al 10 %, lo que confirma la confiabilidad del programa.

Asimismo, la implementación del modelo constitutivo de Mohr-Coulomb demostró ser adecuada para estudios preliminares de estabilidad, aunque se reconoce que su simplicidad puede limitar la representación de comportamientos más complejos del suelo. En consecuencia, se abre la posibilidad de incorporar en futuras etapas modelos avanzados, como el Hardening Soil o el Cam-Clay, para mejorar la precisión en condiciones específicas.

REFERENCIAS

- [1] Clausen, J. (2007). Efficient Non-Linear Finite Element Implementation of Elasto-Plasticity for Geotechnical Problems [Tesis de Doctorado, Esbjerg Institute of Technology Faculty of Engineering, Science and Medicine].
- [2] Clausen, J., Lars, A., & Lars, D. (2007). An efficient return algorithm for non-associated plasticity with linear yield criteria in principal stress space.
- [3] Delft University of Technology & PLAXIS b.v. (2004). Manual de Referencia de Plaxis.

- **[4] FIUBA-Geotecnia. (19 de marzo de 2020).** Clase N 03 - Geotecnia Numerica I - Universidad de Buenos Aires[video]. YouTube. <https://www.youtube.com>
- **[5] Griffiths, D. V. (1999).** Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, 43(3), 387-403. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.3.387>
- **[6] Kungar G., F. (2016).** Desarrollo de un código de elementos finitos para modelar la respuesta sísmica de suelos [Universidad Técnica Federico Santa María-Departamento de Obras Civiles, tesis para el grado de Magíster].
- **[7] Potts, D. M., & Zdravkovic, L. (1999).** Finite element analysis in geotechnical engineering. Londres.
- **[8] Puzrin, A. (2012).** Constitutive Modelling in Geomechanics. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-27395-7>
- **[9] Rahman, M., & Can Ülker, M. (2018).** Modeling and Computing for Geotechnical Engineering.
- **[10] Sfriso O., A. (2015).** El coeficiente de seguridad en la geomecánica computacional.
- **[11] Zienkiewicz, O., & Taylor, R. (2000).** The Finite Element Method . Butterworth-Heinemann.

SUELO LIMO ARCILLOSO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO CON FIBRAS PET Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN (RCD) PARA APLICACIONES SOSTENIBLES EN INGENIERIA CIVIL

Victor Eduardo Bermejo Franco M.Sc.

vbermejo@umsa.bo

RESUMEN

El contraste entre la producción y la adecuada capacidad de gestión de residuos plásticos, así como de los derivados de la construcción (RDC A-2), sumada a la existencia de suelos limo arcillosos caracterizados por su baja capacidad portante y elevada deformabilidad, plantean la necesidad de determinar dosificaciones óptimas de fibras Pet y/o de residuos de la construcción (RCD) que, incorporadas al suelo procedente de la Comunidad de Ajaría Grande del Municipio de Achacachi, mejoren su comportamiento físico mecánico para su empleo en subrasantes de obras viales o como bloques con resistencia estructural destinados a la construcción de viviendas de interés social. La investigación con enfoque cuantitativo de tipo explicativo y diseño experimental con base en las Normativas AASHTO y E.080, ha permitido establecer que las combinaciones de suelo+RCD entre 50% y 70%; suelo+50%RCD+1,5% Fibras Pet y suelo+70% RCD+ 1,5% Fibras Pet, incrementan el Índice CBR 95, en más del 100%, respecto al valor inicial. Los bloques constituidos por la combinación de suelo+ 50% de RCD, reportan resistencias de compresión superiores a 12 (kg/cm²), considerando como valor admisible; en tanto que, las combinaciones de suelo+50% RCD y suelo+1% Fibras Pet, alcanzan resistencias a la compresión de muretes mayores a 7,0 (kg/cm²), superando el requisito técnico de 5,0 (kg/cm²); estos resultados demuestran la factibilidad técnica del reúso significativo de los pasivos ambientales combinados con el suelo.

Palabras clave: Suelo limo arcilloso, Relación Soporte California, bloque, murete.

ABSTRACT

The contrast between the production and adequate management capacity of plastic waste as well as those derived from construction (RDC A-2), and the existence of silty clayey soils characterized by their low bearing capacity and high deformability, have raised the need to determine optimal dosages of PET fibers and / or construction waste that, incorporated into the soil from the Community of Ajaría Grande of the Municipality of Achacachi, improve its physical and mechanical behavior for use in subgrades of road works or as blocks with structural resistance destined for the construction of social interest housing. Research with a quantitative approach of an explanatory type and experimental design based on the AASHTO and E.080 Regulations, has allowed to establish that the combinations of soil + RCD between 50% and 70%; Soil + 50% RCD + 1.5% Pet Fibers and soil + 70% RCD + 1.5% Pet Fibers increased the CBR Index 95 by more than 100% compared to the initial value; the blocks made up of the soil + 50% RCD combination reported compressive strengths greater than 12 (kg/cm²), considered an admissible value; while the combinations of soil + 50% RCD and soil + 1% Pet Fibers achieved low-wall compressive strengths greater than 7.0 (kg/cm²), exceeding the technical requirement of 5.0 (kg/cm²). These results demonstrate the technical feasibility of significantly reusing the environmental liabilities combined with the soil.

Keywords: Silt clay soil, California Bearing Ratio, block, low-wall.

INTRODUCCIÓN

El plástico, un material sintético que emergió como un "gran descubrimiento" en la década de 1950, se ha arraigado profundamente en la vida cotidiana debido a su durabilidad y versatilidad. Sin embargo, esta misma durabilidad, combinada con su uso extensivo y la mala

gestión de residuos, ha generado una acumulación masiva de desechos plásticos, posicionándose como uno de los desafíos ambientales más apremiantes del siglo XXI.

El tereftalato de polietileno, más conocido como Pet, es uno de los materiales plásticos más utilizados,

especialmente para la fabricación de envases. A partir de la década de los ochentas se empezó a generalizar su uso en sustitución de los envases de vidrio retornables; siendo este uno de los motivos por los cuales aumentó considerablemente el volumen de la basura urbana no biodegradable convirtiéndose en una fuente de contaminación ambiental. Las fibras Pet son el resultado del reciclaje de los envases y su modificación para ser reutilizados; en este proceso existen mermas y sobrantes que generan los equipsos.

Según el diario (Opinión, 2022), la contaminación por plásticos en Bolivia, es un problema latente y se estima que al menos 142.699 toneladas de este material son desechadas anualmente. De esta cantidad, alrededor del 5% termina en botaderos a cielo abierto o cuerpos de agua, contaminando la naturaleza y afectando los ecosistemas; asimismo, refiere que el país importa anualmente alrededor de 285.000 toneladas de plásticos (60% material manufacturado; 20% material primario; y 20% material no primario) con un costo aproximado de 560 millones de dólares.

Los residuos de construcción y demolición (RCD) son restos y desechos provenientes de la construcción, reparación, remodelación y demolición de cualquier tipo de obra, ya sea de carácter público o privado y en general no suelen tener un destino adecuado para su disposición final.

De acuerdo a la Guía para el Manejo Integral de Residuos de Construcción y Demolición del Municipio de El Alto y el Plan de gestión de residuos de construcción y demolición en obras de edificación, estos materiales se clasifican en las siguientes categorías: a) Por su origen y procedencia, como Residuos de demolición, Residuos de excavación, Residuos de la construcción y Residuos de la remodelación y/o mantenimiento de una obra; b) Por su condición y naturaleza: Susceptibles de ser aprovechados y No susceptibles de ser aprovechados. Los primeros contemplan a los Reciclables, es decir, residuos que pueden ser reincorporados como materia prima o insumo, y pueden necesitar o no, uno o varios procesos previos de tratamiento para su reincorporación. Entre ellos se citan a los metales, madera, vidrio, cristales, telas, papeles, cartones, plástico y otros. Asimismo, se incluyen en este grupo a los Reutilizables, representados por residuos de hormigón, mampostería, cerámica cocida y residuos

pétreos naturales procedentes de excavaciones. Los Residuos no susceptibles de ser aprovechados engloban a los materiales contaminados por otros residuos y/o deteriorados, así también, a aquellos que presentan alguna característica de peligrosidad, como son los materiales corrosivos, reactivos, explosivos, tóxicos, inflamables y patógenos.

El suelo se forma a partir de la meteorización y desintegración de las rocas preexistentes, un proceso que puede ser físico (fragmentación), químico (disolución, oxidación) o biológico (acción de organismos) y está compuesto por una fase sólida representada por partículas minerales de diferentes tamaños (grava, arena, limo, arcilla); una fase líquida, en la que el agua puede ocupar parcial o totalmente los espacios vacíos (poros) y una fase gaseosa en la que el aire también ocupa los vacíos del material.

El comportamiento del suelo es complejo y depende de sus propiedades físicas y mecánicas, el estado de esfuerzos al que está sometido, la presencia de agua y su historia geológica.

La respuesta ingenieril de los suelos granulares (arenas y gravas) está fundamentado en la fricción entre partículas. En general, estos materiales son permeables, poco compresibles (si están densos) y su resistencia al corte aumenta con el confinamiento. Sin embargo, pueden ser susceptibles a la licuefacción bajo cargas sísmicas si están sueltos y saturados.

El desempeño de los suelos finos (arcillas, limos arcillosos, arcillas limosas), se encuentra influenciado por fuerzas de cohesión entre sus partículas. Son menos permeables, más compresibles, su resistencia al corte depende del contenido de humedad y la historia de esfuerzos y presentan cambios volumétricos significativos con la variación de la humedad (hinchamiento/contracción).

El agua juega un papel crucial en la aptitud geomecánica de las arcillas y limos, puesto que su presencia en elevadas cantidades, junto con la aplicación de esfuerzos significativos, amplifica los problemas relacionados con su reducida capacidad portante y la generación de altas deformaciones (hinchamientos y asentamientos).

F. Simoni et al. "Propiedades mecánicas e hidráulicas de un suelo residual con adición de Fibra Pet y RCD",

2023, estudiaron las propiedades mecánicas e hidráulicas de un suelo mejorado con fibra de PET y RCD, mediante la realización de ensayos de caracterización, compactación, permeabilidad, pH, resistencia a la compresión uniaxial y resistencia a la compresión diametral. En la investigación consideraron cuatro composiciones: suelo natural, suelo + 1% Fibra Pet, suelo + 15% RCD y suelo + 1% Fibra Pet + 15% RCD, habiendo constatado un incremento de la resistencia a la tracción y compresión, alrededor de tres veces mayor a las obtenidas con el suelo puro. En cuanto a la permeabilidad, demostraron que la mezcla de suelo + 15% RCD, presentaba un coeficiente en torno a 10-6 (cm/s), material que podría ser empleado en capas impermeabilizantes de vertederos, en tanto que las otras mezclas resultaban más permeables.

M. Auza y G. Chambi en su trabajo titulado “Evaluación del efecto de la adición de fibras Pet en un suelo arcilloso, aplicado a la subrasante de la carretera Lahuachaca - Cruce San José (tramo 35+700 - 37+100)”, 2022, investigaron el efecto de la adición de fibras Pet en un suelo arcilloso A-6, procedente de la subrasante de la Carretera Lahuachaca - Cruce San José, sector con características físico mecánicas desfavorables. Consideraron la adición de fibras de 60 mm de largo y 4 mm de diámetro, distribuidas aleatoriamente en el suelo y con dosajes de 0,8%, 1,0%, 1,5% y 2%, respecto al peso del suelo con humedad higroscópica, determinando que el porcentaje de adición óptimo de fibras Pet correspondía a 1.5%, dosificación que incrementaba el valor del CBR 95 en un 81.85% respecto a la magnitud obtenida con el suelo natural.

A. Cabral, “Desempeño técnico de mezclas de diferentes tipos de suelos con RCD para uso en obras de pavimentación”, 2020, contempló un programa experimental a partir de muestras de RCD obtenidas en una empresa privada, así como de muestras de suelos extraídas de tres grandes regiones del estado de Río Grande del Norte, Brasil.

Los métodos de investigación en laboratorio se basaron en ensayos de caracterización física, compactación, CBR y análisis de rotura de los granos. Para ello, se añadieron a los suelos porcentajes de RCD del 25%, 50% y 75% con el objetivo de verificar los beneficios que este incremento podría causar en las características de los materiales.

Los resultados obtenidos evidenciaron que, dependiendo del porcentaje de residuo y del tipo de suelo, la incorporación de RCD no solo eleva los valores de CBR, sino que también mejora las propiedades de los suelos, concluyendo que la sustitución de parte del material natural por RCD es una posible alternativa para su aplicación en obras de pavimentación.

P. Sernaqué, “Elaboración de bloque de tierra comprimida (BTC) con adición de residuos de construcción y demolición (RCD) como material de construcción sostenible en la ciudad de Piura, 2020, analizó ocho bloques por cada dosificación, cinco de ellos se utilizaron para realizar los ensayos de resistencia a la compresión y los demás para determinar la absorción, en bloques normales y en bloques empleando residuos provenientes de la construcción y demolición, que previamente fueron triturados hasta obtener partículas similares a las del agregado tradicional para su posterior reemplazo. Concluyó que el suelo empleado según el Sistema SUCS se clasificó como limo inorgánico ML (limos arcillosos de baja plasticidad) por lo que se incorporó arena para mejorar su granulometría y realizar la estabilización suelo- cemento de forma eficiente, siendo el bloque que obtuvo el mejor comportamiento ante los esfuerzos de compresión, el que estuvo compuesto por 20% de suelo, 65% de arena y 15% de cemento (BTC1). Asimismo, constató que el bloque constituido por residuos como reemplazo del agregado tradicional fue el que alcanzó a una resistencia de 52 (kgf/cm²), superando al valor mínimo requerido para su uso con fines estructurales según la norma E.070 de Albañilería.

A través de los párrafos precedentes se ha establecido, por una parte, la problemática de los suelos finos (arcillas, limos arcillosos, arcillas limosas) cuyo comportamiento físico y mecánico está influenciado por el efecto del agua y, por otro lado, se ha destacado el preocupante incremento de la contaminación ambiental producida por la acumulación de plásticos PET y Residuos de la Construcción y Demolición (RCD).

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se ha desarrollado considerando un suelo limo arcilloso procedente de la Comunidad de Ajaria Grande del Municipio de Achacachi, ubicada en el Altiplano Norte, a 87 km de la ciudad de La Paz y a orillas del Lago Titicaca.

En la zona fueron tomadas cuatro muestras de material de 200 kg, obtenidas de cuatro pozos distribuidos en el sector.

Las fibras Pet de $6,0 \pm 0,04$ (cm) longitud, $2,9 \pm 0,04$ (mm) de diámetro y Densidad igual a $0,9$ (g/cm³), se obtuvieron de la fábrica de envases y preformas “MARECBOL”, empresa productora de plásticos localizada en la ciudad de El Alto, La Paz.

Los residuos de la construcción y demolición (RCD) fueron obtenidos de la Planta Piloto de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) dependiente de la Dirección de Prevención y Control Ambiental del Gobierno Autónomo Municipal de La Paz. En particular, se empleó gravilla de 3/8 de pulgada y arena, obtenidas de restos de hormigón, clasificación A-2, según Frías (2018), resultado de la remodelación de la Plaza San Miguel, ubicada en la zona Sur de la ciudad de La Paz. En total, se acopiaron 138 kg de gravilla y 97 kg de arena para la ejecución de los ensayos de laboratorio.

Considerando que el diseño de la investigación fue de

carácter experimental, en el laboratorio de mecánica de suelos del Instituto de Ensayo de Materiales de la UMSA, se emplearon los siguientes procedimientos basados en las Normas AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y en la norma peruana E.080: Contenido de Humedad (AASHTO T265), Granulometría por Tamizado (AASHTO T 27), Hidrometría (AASHTO T88), Gravedad específica (AASHTO T100), Densidad de los suelos por el método de trozos inalterados (AASHTO T233), Límites de Atterberg (AASHTO T89 y T90), Compactación Proctor Modificado (AASHTO T 180), Relación Soporte California (C.B.R.) (AASHTO T193), Resistencia a la compresión de bloques (E.080), Resistencia a la compresión de muretes (E.080).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los ensayos de mecánica de suelos permitieron establecer propiedades físico - mecánicas del suelo natural, detalladas en la Tabla No.1.

Humedad promedio	Granalometría				Gravedad específica Gs	Densidad húmeda (g/cm ³)	Límites de Atterberg			Compactación T180A		C.B.R.(%)			Compresión bloque (Kg/cm ²)	Compresión murete (Kg/cm ²)	Clasificación Unificada
	Grava	Arena	Limo	Arcilla			LL	LP	IP	Dsmax	Hopt	100%	97%	95%			
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)			(%)	(%)	(%)	(Kg/dm ³)	(%)	100%	97%	95%	(Kg/cm ²)	(Kg/cm ²)	ML-CL
31,6	0,0	0,5	75,0	24,5	2,74	2,07	33	23	10	1,85	17,3	5,6	4,7	4,4	15,5	4,9	
Dimensiones del bloque: a=22,7cm,b=10,7cm,e=7,5 cm							Murete: h= 25,5cm, a= 35,7cm, e=0,7 cm										

Tabla No.1 Propiedades Físico-Mecánicas del suelo natural
Elaboración propia, 2025.

Asimismo, los residuos de la construcción y demolición (RCD), presentaron características físicas que se muestran en la Tabla No.2.

Humedad promedio	CRD Gravilla 3/8"				RCD Arena		
	Grava	Arena	Finos	Desgaste Los Ángeles	Grava	Arena	Finos
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
2,7	99,4	0,6	0,0	30	13,3	86,4	0,3

Tabla No.2. Características Físicas del los Residuos de Construcción y Demolición (RCD)
Elaboración propia, 2025.

Con la finalidad de investigar la influencia de la adición de los Residuos de la Construcción y Demolición (RCD) y de las Fibras Pet sobre el suelo natural, se consideraron las siguientes combinaciones de materiales: CB1: Suelo limo arcilloso + RCD, CB2: Suelo limo arcilloso +

Fibras Pet, y CB3: Suelo limo arcilloso + RCD + Fibras Pet.

Los ensayos de laboratorio arrojaron los resultados que se detallan en la Tabla No.3.

Nº	DOSIFICACIÓN	RCD	PET	100% Comp.		R. 97% Comp.		95% Comp.	
				Ds kd/dm ³	C.B R. [%]	Ds kd/dm ³	C.B R. [%]	Ds kd/dm ³	C.B.R [%]
1	S	0%	0%	1.85	5.78"	1.79	4.88	1.76	4.36
2				1.85	5.41	1.79	4.26	1.76	3.96
3	S+RCD1	10%	0%	1.91	4.58	1.85	4.52	1.81	4.48
4				1.91	--	1.85	--	1.81	3.00
5	S+RCD2	15%	0%	1.97	--	1.91	--	1.87	6.00
6				1.97	--	1.91	--	1.87	6.00
7	S+RCD3	20%	0%	1.94	7.47	1.88	7.40	1.84	8.21
8				1.94	7.85	1.88	7.22	1.84	8.22
9	S+RCD4	30%	0%	2.00	--	1.94	10.20	1.90	8.30
10				2.00	--	1.94	10.30	1.90	10.10
11	S+RCD5	50%	0%	2.06	--	2.00	8.60	1.96	9.75
12				2.06	--	2.00	7.35	1.96	9.80
13	S+RCD6	70%	0%	2.06	--	2.00	35.80	1.96	31.30
14				2.06	--	2.00	49.50	1.96	42.50
15	S+PET1	0.0%	1.0%	1.86	9.32**	1.80	7.38	1.77	6.67
16				1.86	9.20	1.80	7.80	1.77	6.80
17	S+PET2	0.0%	1.5%	1.88	11.77**	1.82	10.00	1.79	8.60
18				1.88	11.54**	1.82	9.65	1.79	8.50
19	S+PET3	0.0%	2.0%	1.86	5.78**	1.80	4.90	1.77	4.00
20				1.86	6.00	1.80	5.00	1.77	4.40
21	S+RCD5+=PET2	50.0%	1.5%	2.01	12.87	1.95	13.06	1.91	12.90
22				2.01	12.73	1.95	13.06	1.91	12.90
23	S+RCD6+=PET2	70.0%	1.5%	2.10	43.50	2.04	23.70	2.00	23.70
24				2.10	43.50	2.04	24.40	2.00	23.70

Tabla No3. Propiedades Físico Mecánicas de las Combinaciones
Elaboración propia, 2025.

MATERIAL	RCD	PET	b [cm]	c [cm]	Carga 1ra fisura		Carga Rotura		Garga Admisible		Observaciones
					kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	
S	0%	0%	10.7	22.5	7.96	0.78	14.40	1.41	12.00	1.18	Cumple
			10.6	22.6	9.58	0.94	15.79	1.55	12.00	1.18	Cumple
			10.7	22.5	10.72	1.05	16.39	1.61	12.00	1.18	Cumple
S+RCD4	30.0%	0.0%	10.9	22.8	15.02	1.47	17.32	1.70	12.00	1.18	Cumple
			10.8	22.7	13.81	1.35	16.51	1.62	12.00	1.18	Cumple
S+RCD5	50.0%	0.0%	10.7	22.7	3.57	0.35	18.77	1.84	12.00	1.18	Cumple
			10.8	22.6	4.34	0.43	19.01	1.86	12.00	1.18	Cumple
S+RCD6	70.0%	0.0%	10.9	22.7	19.58	1.92	19.99	1.96	12.00	1.18	Cumple
			10.8	22.7	16.64	1.63	19.88	1.95	12.00	1.18	Cumple
S+PET1	0.0%	1.0%	10.7	22.5	10.29	1.01	17.41	1.71	12.00	1.18	Cumple
			10.8	22.7	10.19	1.00	17.39	1.71	12.00	1.18	Cumple
S+PET2	0.0%	1.5%	10.8	22.6	9.40	0.92	17.76	1.74	12.00	1.18	Cumple
			10.7	22.6	10.42	1.02	18.05	1.77	12.00	1.18	Cumple
S+PET3	0.0%	2.0%	INCOMPRESIBLE								

Tabla No.4. Resistencia a la Compresión de bloques de suelo con adiciones
Elaboración propia, 2025.

MATERIAL	RCD	PET	h [cm]	em [cm]	a [cm]	Carga 1ra fisura		Carga Rotura		Garga Admisible		Observaciones
						kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	
S	0%	0%	25.5	10.7	35.7	2.88	0.28	4.91	0.48	5.00	0.49	No Cumple
			25.4	10.6	35.7	2.83	0.28	4.86	0.48	5.00	0.49	No Cumple
S+RCD4	30.0%	0.0%	25.7	10.8	35.4	3.25	0.32	7.25	0.71	5.00	0.49	Cumple
			25.6	10.7	35.5	3.49	0.34	7.41	0.73	5.00	0.49	Cumple
S+RCD5	50.0%	0.0%	24.4	10.8	35.3	4.44	0.44	8.75	0.86	5.00	0.49	Cumple
			24.5	10.8	35.1	4.57	0.45	8.68	0.85	5.00	0.49	Cumple
S+RCD6	70.0%	0.0%	24.7	10.8	35.9	5.26	0.52	6.05	0.59	5.00	0.49	Cumple
			24.7	10.7	36.0	5.08	0.50	6.62	0.65	5.00	0.49	Cumple
S+PET1	0.0%	1.0%	24.7	10.7	35.5	4.62	0.45	7.57	0.74	5.00	0.49	Cumple
			24.8	10.8	36.0	4.46	0.44	7.76	0.76	5.00	0.49	Cumple
S+PET2	0.0%	1.5%	24.8	10.7	36.0	3.12	0.31	7.39	0.72	5.00	0.49	Cumple
			24.8	10.7	35.5	3.22	0.32	7.36	0.72	5.00	0.49	Cumple
S+PET3	0.0%	2.0%	INCOMPRESIBLE									

Tabla No.5. Resistencia a compresión de muretes de suelo y adiciones
Elaboración propia, 2025.

Los resultados de los ensayos de caracterización del suelo natural indicados en la Tabla No.1, permitieron ratificar su clasificación como material limo arcilloso (ML-CL). En todo caso, su empleo como material destinado a capa de subrasante no es adecuado puesto que su CBR 95 de 4,4% resultó menor al intervalo de especificación comprendido entre 6% a 12%. Por otro lado, su comportamiento como bloque comprimido, si bien reveló una magnitud en compresión de 15,5 (kg/cm²) mayor al valor admisible de 12 (kg/cm²), según la norma peruana E.080, no cumplió el requisito de resistencia a la compresión de murete, cuyo valor en el límite, fue inferior a 5,0 (kg/cm²) de acuerdo a la misma norma.

La Tabla No.3 refiere que la combinación de suelo natural y adición de RCD entre 50% y 70%, mejoró el Índice CBR 95, entre un 122% a 866%, respecto al valor inicial. Este incremento sustantivo del CBR posibilita que el material mecánicamente estabilizado podría ser empleado como subrasante de categoría regular a buena y en su caso como material de subbase (CBR_{min}=40%). El mismo criterio resultó ser válido para las dosificaciones de suelo+50%RCD+1,5% Fibras Pet y suelo+ 70% RCD+1,5% Fibras Pet. Los porcentajes de adición de RCD son similares a los obtenidos por A. Cabral el año 2020.

La combinación de suelo con 1,5% de Fibras Pet, incrementó el CBR 95 en un 94,3%, de esta manera, la mezcla de materiales tendría aplicación en subrasantes de categoría regular. Al respecto, M. Auza y G.Chambi,

2022, estudiando la combinación de suelo arcilloso con 1,5% de Fibras Pet, constataron un incremento del 81,9% del CBR₉₅ para el material analizado. De acuerdo a la Tabla No. 4, el bloque constituido por la combinación de suelo natural y 50% de RCD, alcanzó una resistencia a la compresión de 19 (kg/cm²), en tanto que para la mezcla de suelo y 70% de RCD, la magnitud de dicha resistencia fue de 20 (kg/cm²); en ambos casos los valores mencionados fueron superiores al valor admisible de 12 (kg/cm²). P. Sernaque, 2020, obtuvo una resistencia a la compresión 52 (kg/cm²) en bloques conformados por 20% de suelo limoso (ML), 65% de arena y 15% de cemento. En este caso es indudable que la resistencia alcanzada fue propiciada principalmente por el contenido de cemento, sin embargo, el porcentaje de arena comprendido en el intervalo de 50% a 70%, tiene relación con similares proporciones encontradas en la investigación realizada.

Finalmente, la Tabla No.5 permite establecer que las combinaciones de suelo+50% RCD y suelo+1% Fibras Pet, alcanzaron resistencias a la compresión de muretes de 8,7 (kg/cm²) y 7,7 (kg/cm²) respectivamente, ambas magnitudes resultaron ser mayores a 5 (kg/cm²) considerado como valor admisible.

CONCLUSIONES

- Se logró cumplir con el objetivo general de la investigación, logrando la estabilización mecánica de un suelo limo arcilloso procedente de la Comunidad de Ajaria, Municipio de Achacachi,

incorporando Fibras Pet de $6,0 \pm 0,04$ (cm) longitud, $2,9 \pm 0,04$ (mm) de diámetro y Densidad igual a $0,9$ (g/cm^3), además, residuos de construcción y demolición (RCD A-2), compuestos por gravilla de $3/8''$ y arena.

- Los ensayos de laboratorio basados en las Normas ASTM y E.080, permitieron establecer que el suelo limo arcilloso no cumplía los requerimientos técnicos para ser empleado a nivel de capa subrasante de obras viales en términos del índice CBR 95; asimismo, su resistencia a la compresión de muretes constituidos por bloques prensados resultó ser inferior a 5 (kg/cm^2), considerado como valor admisible.
- Fueron definidas las siguientes combinaciones de materiales:
Combinaciones 1: suelo + (10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 50%, 70%) RCD.
Combinaciones 2: suelo + (1%, 1,5%, 2,0%) Fibras Pet.
Combinaciones 3: suelo + (50%,70%) RCD + 1,5% Fibras Pet.
- La combinación de suelo y adición de RCD entre 50% y 70%, mejoró el Índice CBR 95 , entre un 122% a 866%, respecto al valor inicial; mientras que las dosificaciones de suelo + 50%RCD + 1,5% Fibras Pet y suelo + 70% RCD + 1,5%, incrementó dicho Índice en 190% y 438%, respectivamente.
- La combinación de suelo + 1,5% de Fibras Pet, incrementó el CBR 95 en un 94,3%.
- Las mezclas de suelo + 50% de RCD, y suelo + 70% de RCD, alcanzaron una resistencia a la compresión en bloques prensados de 20 (kg/cm^2), superior a 12 (kg/cm^2) considerado como valor admisible.
- El suelo con 50% de RCD logró una resistencia a la compresión de muretes de $8,7$ (kg/cm^2), mayor a la magnitud admisible de 5 (kg/cm^2).
- Considerando el comportamiento mecánico de las combinaciones y la reducción de la contaminación ambiental, la mezcla de suelo + 70% RCD constituye la dosificación óptima para uso como material destinado a capa subrasante de obras viales, en tanto que la mezcla de suelo + 50% RCD cumple con el requerimiento técnico para su empleo como bloques

prensados destinados a la construcción de viviendas de interés social.

BIBLIOGRAFÍA

- **[1] Quispe Calderón, D. G.,** Cussi Paredes, P. M., Bermejo Franco, V. E., & Portillo Miranda, G. A. (2025). Estabilización mecánica de suelo limo arcilloso mediante la incorporación de fibras pet y residuos de construcción y demolición (RCD), para aplicaciones sostenibles en ingeniería civil. (Proyecto de Grado). Universidad Mayor de San Andrés. Repositorio Institucional.
- **[2] Auza, M, Chambi G. (2022).** Evaluación del efecto de la adición de fibras Pet en un suelo arcilloso, aplicado a la subrasante de la carretera Lahuachaca - Cruce San José (tramo 35+700 - 37+100). (Proyecto de Grado). Universidad Mayor de San Andrés. Repositorio Institucional.
- **[3] Cabral, A. (2020).** Desempeño técnico de mezclas de diferentes tipos de suelos con RCD para uso en obras de pavimentación.
- **[4] Simoni, F. et al. (2023)** Propiedades mecánicas e hidráulicas de un suelo residual con adición de fibra Pet y RCD.
- **[5] Sernaqué, P. (2020).** Elaboración de bloque de tierra comprimida (BTC) con adición de residuos de construcción y demolición (RCD) como material de construcción sostenible en la ciudad de Piura.
- **[6] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2015).** AASHTO T 27, T 89, T 90, T265, T88, T100, T180, T193, T233. Norma Peruana E. 080.

EFFECTOS DE ESCALA EN ENSAYOS DE CORTE DIRECTO: INTEGRACIÓN DE EVIDENCIA EXPERIMENTAL, PRÁCTICA ESTÁNDAR Y FUNDAMENTOS MECÁNICOS

Franz Asistiri Cusi
asistiri.cusi.franz@usfx.bo

Ángel Ramos Maita
aramos@umsa.bo

RESUMEN

Este estudio investiga los efectos de escala en ensayos de corte directo aplicados a suelos granulares. Se demuestra que los ensayos realizados con cajas estándar (60 mm) subestiman sistemáticamente los parámetros de resistencia al corte en suelos con partículas gruesas. Mediante ensayos comparativos en cajas de 60 mm y 100 mm en muestras de depósitos aluviales del campus universitario de la UMSA de la zona de Cota Cota, se identificaron variaciones significativas en el ángulo de fricción (φ), con incrementos de hasta 5° al utilizar cajas de mayor tamaño (100mm). Los resultados justifican la necesidad de equipos a mayor escala para caracterización precisa de suelos granulares locales. Se propone un protocolo de selección de equipos basado en el tamaño máximo de partícula y la importancia del proyecto, con aplicabilidad específica para condiciones geotécnicas de La Paz.

Palabras clave: Ensayo de corte directo, efectos de escala, suelos granulares, ASTM D3080, parámetros de resistencia a corte

ABSTRACT

This study investigates scale effects in direct shear tests applied to granular soils. The research demonstrates that tests conducted with standard (60 mm) shear boxes systematically underestimate shear strength parameters in coarse-grained soils. Through comparative testing using 60 mm and 100 mm boxes on samples from alluvial deposits at the UMSA university campus in the Cota Cota area, significant variations in the friction angle (φ) were identified, with increases of up to 5° when using larger (100 mm) boxes. The results justify the need for larger-scale equipment for accurate characterization of local granular soils. A equipment selection protocol based on maximum particle size and project importance is proposed, with specific applicability for geotechnical conditions in La Paz.

Keywords: Direct shear test, scale effects, granular soils, ASTM D3080, shear strength parameters.

INTRODUCCIÓN

Varias zonas de la ciudad de La Paz están asentadas sobre depósitos aluviales. Estos suelos tienen la característica general de ser suelos granulares gruesos con matriz areno limosa con presencia de partículas de sobretamaño. En la práctica local, la resistencia al corte de estos materiales se lo determina mediante ensayos de corte directo solo con la fracción fina y de manera indirecta con el ensayo de penetración estándar (SPT) y correlaciones empíricas. Los resultados con estos procedimientos no son representativos de todo el material, sino solo de una fracción (material que pasa

el tamiz N°4), estos métodos subestiman sistemáticamente los parámetros de resistencia al corte (Trujillo, 2022).

El ensayo de corte directo, estandarizado en ASTM D3080-23, es uno de los métodos más utilizados para caracterizar la resistencia al corte de suelos granulares. Su popularidad deriva de su simplicidad operativa, costo relativamente bajo y repetibilidad. Sin embargo, como señalan Mitchell y Soga (2005), la interpretación de sus resultados requiere comprender las complejidades del estado tensional y mecanismos de deformación involucrados.

Estudios recientes (Cerato y Lutenegger, 2006) han cuestionado la validez universal de los resultados obtenidos con cajas de tamaño estándar (60 mm), demostrando dependencias significativas entre el ángulo de fricción y las dimensiones del espécimen. Este trabajo sintetiza evidencia de ensayos a diferente escala que proporcionan un marco integral que explique estos fenómenos y proponga mejoras a la práctica actual.

MARCO TEORICO

Para la ejecución del ensayo de corte directo usualmente se emplea la norma ASTM D 3080-23. Las restricciones en cuanto al tamaño máximo de partícula están dadas por la geometría de la caja de corte. En esta norma se encuentra tres restricciones:

1. Tamaño mínimo de la caja de corte (diámetro o ancho): 2.0 pulgadas [50 mm] o 10 veces el diámetro máximo de las partículas del suelo, lo que sea mayor.
2. Altura inicial mínima del espécimen: 0.75 pulgadas [20 mm] o 6 veces el diámetro máximo de las partículas.
3. Relación diámetro/ancho a altura del espécimen: debe ser ≥ 2.0

Sin embargo, Cerato & Lutenegger (2006) demostraron que estas especificaciones son insuficientes para evitar efectos de escala, particularmente en arenas angulares y bien gradadas.

Parámetro	Caja 6x6x2.5 cm	Caja 10x10x2.5 cm	Caja 30x30x15 cm
Ancho x largo x altura	6x6x2.5 cm	10x10x2.5 cm	30x30x15 cm
Altura de la muestra	2.5 cm	2.5 cm	15 cm
Ancho/altura	2.4:1	4:1	2:1
Tamaño máximo de partícula (1/6 de la altura)	4.16 mm	4.16 mm	25 mm
Tamiz de referencia (ASTM D3080)	No. 4 (4.75 mm)	No. 4 (4.75 mm)	No. 4 (4.75 mm) o mayores
Límite práctico de partículas	≤ 4.75 mm	≤ 4.75 mm	≤ 25 mm

Tabla N° 1. Relaciones geométricas de la caja de corte y el tamaño máximo de las partículas, considerando tres tamaños de caja de corte diferentes.

Mecanismos de Resistencia en Suelos Granulares

Como establecen Holtz y Kovacs (2010), la resistencia al corte en arenas deriva principalmente de:

- Fricción interpartícula
- *Interlocking* o trabazón mecánica
- Reordenamiento de partículas durante la deformación

Mitchell y Soga (2005) enfatizan que el interlocking es particularmente sensible a las condiciones de confinamiento y a la libertad para desarrollar mecanismos completos de deformación.

Teoría de Bandas de Corte

La formación de bandas de corte, descrita teóricamente por Roscoe (1970) y observada experimentalmente por Scarpelli y Wood (1982), representa un aspecto crítico. El espesor de la zona de corte (t) se relaciona con el tamaño de partícula (D_{50}):

$$t \approx 10 = 16 \times D_{50}$$

Esta relación tiene implicancias directas sobre los requisitos mínimos de tamaño de espécimen.

Limitaciones críticas de los equipos estándar de corte directo

Restricciones físicas y mecánicas

- Altura insuficiente: Como señala Head (1994), la altura de 20-25 mm en cajas estándar no permite el desarrollo completo del mecanismo de dilatación en arenas densas
- Ancho inadecuado: El ancho de 60 mm restringe la propagación de bandas de corte, particularmente en arenas gruesas

Efectos de bordes acentuados

- La relación área de corte/perímetro es desfavorable en cajas pequeñas

- El confinamiento artificial generado por las paredes afecta desproporcionadamente el comportamiento en cajas estándar

Limitaciones en aplicación de tensiones

- Sistemas de carga por pesas limitan el rango de tensiones normales aplicables
- Dificultad para simular condiciones de alta confinamiento presentes en prototipos reales

METODOLOGÍA

Muestra

Se han tomado muestras de suelo en terrazas aluviales del campus universitario de la UMSA en la zona de Cota Cota.

En este sector los suelos corresponden a aluvios torrenciales o de espesor variable. Predominan gravas arenosas bien gradadas hasta limosas, con lentes de toda clase (arenas, limos o arcillas). La forma de las partículas es subredondeadas.

Campaña Experimental

Los ensayos de laboratorio siguieron protocolos estandarizados ASTM de versiones recientes, incluyendo análisis granulométrico por tamizado (ASTM D422), ensayos de corte directo (ASTM D3080), determinación de límites de Atterberg (ASTM D4318), ensayos de densidad (ASTM D1556) y gravedad específica (ASTM D854).

Equipo de corte directo

El equipo automatizado de corte directo Wykeham Farrance AutoShear Mod.27-WF2160 (Figura 3.1) fue seleccionado para esta investigación debido a su capacidad de determinar con precisión los parámetros de resistencia al corte en suelos (c y ϕ). Su automatización garantiza la repetitividad y comparación de ensayos. Con el mismo equipo se puede realizar ensayos de corte residual.

Su automatización, versatilidad en tamaños de muestra

y cumplimiento con normas internacionales lo hacen esencial para proyectos de ingeniería civil, minería e investigación académica.



Figura 3.1 Equipo automatizado de corte directo Wykeham Farrance AutoShear Mod.27-WF2160 del Instituto de Ensayo de Materiales de la UMSA

Descripción técnica

Parámetro	Especificación
Fuerza horizontal máxima	5000 N
Fuerza vertical máxima	5000 kN (con brazo de palanca 10:1)
Desplazamiento máximo	19 mm
Velocidad de corte	0.00001-11 mm/min (control por microprocesador)
Tamaño de muestra estándar	60x60 mm ² , 100x100 mm ² , o diámetro de 50 - 63.5 mm
Memoria	Almacena hasta 5000 registros en 50 bloques.
Sensores	1 canal para celda de carga (resolución: 130,000 puntos). 2 canales para transductores de desplazamiento (horizontal y vertical).
Software	Compatible con protocolos ASCII, CONTROLS y Geolab2000.

Tabla 3. Resumen de las especificaciones clave del equipo, extraídas del manual técnico del fabricante

Se han realizado ensayos de corte directo en cajas cuadradas de 6cm y de 10cm de lado, en la figura 2 se muestran las cajas empleadas.



Figura 2. Cajas de corte de forma circular y cuadrada de diferente tamaño del equipo automatizado de corte directo Wykeham Farrance AutoShear Mod.27-WF2160

Caja cuadrada convencional (60 mm)

Descripción: Configuración estándar descrita por Head (1994), con área de 60 x 60 mm y altura de 25 mm

Aplicaciones típicas:

- Control de calidad en proyectos de mediana escala
- Caracterización inicial de arenas finas a medias
- Estudios paramétricos con limitaciones de material

Ventajas:

- Simplicidad operativa (Head, 1994)
- Requiere menor volumen de muestra
- Consolidación rápida por pequeño espesor
- Amplia disponibilidad en laboratorios comerciales

Caja cuadrada (100mm)

Aplicaciones:

- Arenas con contenido limitado de gravas

- Materiales con partículas hasta 15 mm
- Proyectos de mayor importancia

Ventajas:

- Mejor representatividad que cajas de 60 mm
- Menor efecto de bordes relativos

Caja grande (300 mm o superior)

Configuración: Descrita por Head (1994) y utilizada por Cerato & Lutenecker (2006)

Aplicaciones críticas:

- Suelos gravosos con partículas hasta 37.5 mm (Head, 1994)
- Arenas bien gradadas y angulares
- Proyectos de alta responsabilidad (presas, puentes)
- Investigación de mecanismos fundamentales de falla

Ventajas específicas:

- Permite el desarrollo completo de bandas de corte
- Minimiza efectos de bordes
- Mejor representatividad de condiciones de campo

RESULTADOS

Los resultados obtenidos de la campaña experimental permiten cuantificar y visualizar de manera clara la influencia del tamaño de la caja de corte en los parámetros de resistencia al corte de los suelos granulares analizados.

Caracterización física de las muestras

Las muestras obtenidas de los depósitos aluviales de la zona de Cota Cota se clasificaron como GP-GM (Grava pobremente gradada con limos y arenas), lo que confirma la naturaleza granular y gruesa del material de estudio. Los valores de humedad natural fueron bajos (entre

3.28% y 6.23%), y los límites de Atterberg indicaron la no plasticidad de la fracción fina, siendo coherentes con el comportamiento típico de estos suelos. Los pesos unitarios secos se mantuvieron en un rango estrecho entre 18.0 y 19.0 kN/m³, como se resume en la Tabla 3.

Muestra N°	Humedad natural %	Límite líquido %	Límite plástico %	Clasificación SUSC
M1	5.48	21	NP	GP - GM
M2	4.23	-	NP	GP - GM
M3	3.28	-	NP	GP - GM
M4	3.50	18	NP	GP - GM
M5	6.23	15	NP	GP - GM

Tabla 3. *Parámetros de caracterización física*

Envolventes de falla y parámetros de resistencia

La resistencia a corte pico se obtuvo a través de las envolventes de falla de Mohr-Coulomb para los conjuntos de datos de cada tamaño de caja. Se han empleado las siguientes cargas normales: 50 kN/m², 100 kN/m² y 200 kN/m².

Parámetros de resistencia al corte: efecto del tamaño de la caja

La comparación directa de los parámetros de resistencia al corte obtenidos con las cajas de 60 mm y 100 mm revela una tendencia sistemática y significativa. Como se presenta en la Tabla 4, en todos los casos se observó un incremento en el ángulo de fricción (φ) cuando se utilizó la caja de mayor dimensión.

Muestra N°	Peso Unitario seco kN/m ³	Cohesión kN/m ²	Angulo de Fricción ϕ° L=6cm	Angulo de Fricción ϕ° L=10cm
M1	18.5	10	28	33
M2	19	14	30	32
M3	18	0	28	30
M4	18.5	10	29	30
M5	18	15	30	33

Tabla 4. *Parámetros de resistencia a corte*

El incremento promedio en el ángulo de fricción fue de 3°, con un valor máximo de 5° registrado en la muestra M1. Este resultado consolida la evidencia de que la caja estándar de 60 mm subestima la resistencia al corte del material intacto.

DISCUSIÓN

Los resultados de esta investigación confirman la influencia significativa de los efectos de escala en la determinación de los parámetros de resistencia al corte en suelos granulares. El aumento sistemático del ángulo de fricción (φ), de hasta 5°, observado al utilizar una caja de corte de 100 mm en comparación con la caja estándar de 60 mm, es un fenómeno respaldado por las limitaciones inherentes del ensayo de corte directo.

El núcleo de esta diferencia radica en los principios fundamentales del propio ensayo. Como detallan Germaine y Germaine (2009), el ensayo de corte directo induce un estado de tensión y deformación altamente no uniforme. Se desarrolla una banda de corte en lugar de un solo plano de falla, y esta banda es más grande en el centro del espécimen y se afila hacia los bordes. En una caja estándar de 60 mm, las dimensiones físicas restringen severamente el desarrollo natural de esta zona de corte. Los límites rígidos de una caja de corte de dimensiones reducidas generan una restricción desproporcionada en la microestructura interna del suelo, limitando significativamente la movilización completa de los mecanismos de trabazón interpartícula (interlocking) y dilatación, los cuales resultan críticos para el desarrollo de la resistencia máxima, especialmente en suelos granulares densos con partículas de morfología angular (Holtz y Kovacs, 2010). Los resultados reflejan directamente esta restricción; la caja más grande de 100 mm proporciona un volumen de suelo más representativo, permitiendo una formación de la banda de corte más completa y menos afectada por los bordes, produciendo así ángulos de fricción mayores y precisos.

Esta observación se alinea con el trabajo de Cerato y Lutnegger (2006), quienes demostraron que los requisitos de tamaño mínimo estipulados por la norma ASTM D3080 son insuficientes para eliminar los efectos de escala, especialmente en arenas bien gradadas y angulares. Ellos atribuyeron esto a que el espesor de la zona de corte (t) es una función del tamaño de partícula (D_{50}), típicamente en el rango de $t \approx 10-16 \times D_{50}$. Cuando la altura del espécimen es solo marginalmente mayor que el mínimo requerido (25 mm), toda la altura de la muestra puede ser consumida por la banda de corte y sus zonas de transición asociadas, sin dejar una masa de suelo "estable". Esto conduce a una medición

de la resistencia conservadora y no representativa. Este estudio, proporciona una validación empírica de este principio en un contexto geotécnico específico y crítico.

Además, la reducción en el ángulo de fricción medido en cajas más pequeñas puede explicarse por los efectos exacerbados de la falla progresiva. Germaine y Germaine (2009) identifican las concentraciones de tensión en la brecha entre las mitades de la caja como una fuente clave de incertidumbre, promoviendo la falla progresiva y haciendo que la medición de la fuerza máxima sea imprecisa. En un espécimen más pequeño, esta falla progresiva se inicia y propaga más rápidamente en relación con el tamaño del espécimen, impidiendo la movilización simultánea de la resistencia en toda la superficie de falla potencial. En consecuencia, la resistencia máxima registrada es menor de lo que el suelo es realmente capaz de movilizar bajo un campo de tensión más uniforme.

Las implicaciones prácticas de estos resultados son profundas para la práctica geotécnica en La Paz. La práctica común de determinar la resistencia al corte únicamente a partir de la fracción fina de estos suelos aluviales gruesos, o depender únicamente de correlaciones con el SPT, ahora se demuestra cuantitativamente como conservadora. Los parámetros de diseño derivados de los ensayos estándar de 60 mm subestiman sistemáticamente la resistencia in-situ de la matriz real del suelo, que incluye partículas gruesas. Esto puede conducir a diseños excesivamente conservadores y costosos.

El protocolo propuesto para seleccionar el tamaño de la caja de corte en función del tamaño máximo de partícula y la importancia del proyecto es un paso necesario hacia una caracterización más confiable. Como argumenta Head (1994), el uso de dispositivos de corte más grandes es esencial para suelos que contienen gravas para asegurar que el espécimen sea un volumen elemental representativo del material. Para infraestructuras críticas como presas, puentes y taludes escarpados en La Paz, el uso de dispositivos de corte directo a gran escala (≥ 300 mm) debería considerarse obligatorio. Esta inversión está justificada por la mejora significativa en la confiabilidad de los parámetros de diseño y la consiguiente reducción del riesgo geotécnico.

A continuación se presenta un protocolo de selección

de equipos basado en el tamaño máximo de partícula y la importancia del proyecto

Criterios para selección de escala

Caja estándar (60 mm) - aplicable solo cuando:

- Arenas finas a medias ($D_{max} \leq 2$ mm)
- Proyectos de baja responsabilidad
- Estudios preliminares

Caja intermedia (100-150 mm) - recomendada para:

- Arenas con $D_{max} \leq 10$ mm
- Proyectos de mediana importancia
- Verificación de resultados de cajas estándar

Caja grande (mayor a 300 mm) - obligatoria para:

- Suelos con $D_{max} > 10$ mm
- Arenas angulares y bien gradadas
- Proyectos críticos (presas, puentes, estructuras esenciales)
- Investigación científica de mecanismos de falla

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Las cajas de corte estándar (60 mm) presentan limitaciones fundamentales que las hacen inadecuadas para caracterizar suelos granulares.
- La evidencia experimental y los fundamentos mecánicos convergen en demostrar la necesidad imperativa de equipos a mayor escala para proyectos críticos.
- Se propone un protocolo de selección basado en criterios técnicos que considera el tamaño máximo de partícula, angularidad e importancia del proyecto.
- La inversión en equipos de mayor escala se justifica técnicamente por la mejora en confiabilidad de

parámetros de diseño y reducción de riesgos en proyectos de ingeniería.

REFERENCIAS

- [1] **ASTM D3080-90**. Standard Test Method for Direct Shear Tests of Soils Under Consolidated Drained Conditions.
- [2] **Cerato, A. B. & Lutenecker, A. J.** (2006). Specimen Size and Scale Effects of Direct Shear Box Tests of Sands. *Geotechnical Testing Journal*.
- [3] **Head, K. H.** (1994). *Manual of Soil Laboratory Testing*, Volume 2. Wiley.
- [4] **Holtz, R. D. & Kovacs, W. D.** (2010). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Pearson.
- [5] **Mitchell, J. K. y Soga, K.** (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*. Wiley.
- [6] **Roscoe, K. H.** (1970). The influence of strains in soil mechanics. *Géotechnique*, 20(2), 129-170. <https://doi.org/10.1680/geot.1970.20.2.129>
- [7] **Scarpelli, G. y Wood, D. M.** (1982). Experimental Observations of Shear Band Patterns in Direct Shear Tests.
- [8] **Trujillo, M.** (2022). Diseño y construcción del edificio Green Tower en La Paz [Videoconferencia vía Zoom]. Universidad Católica Boliviana San Pablo.
- [9] **Germaine, J. T., & Germaine, A. V.** (2009). *Geotechnical laboratory measurements for engineers*. John Wiley & Sons, Inc.

COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE TINGLADOS EXISTENTES CONTRUIDOS CON PERFILES METÁLICOS CONFORMADOS EN FRÍO EN LAS CIUDADES DE LA PAZ Y EL ALTO

Diego Fernando Chambi Fernández

Max Oliver Maquera Patzi

Marcelo Gonzalo Delgadillo Zurita

Eliseo Jahdiel Villafuerte Oporto

ejvillafuerte@umsa.bo

RESUMEN

El presente estudio analiza el comportamiento estructural y las manifestaciones patológicas en tinglados metálicos contruidos con perfiles conformados en frío ubicados en las ciudades de La Paz y El Alto, Bolivia. Estas estructuras, ampliamente utilizadas por su economía y facilidad constructiva, han presentado fallas recurrentes durante eventos de granizo y viento, lo que evidencia deficiencias en diseño, mantenimiento y ejecución. La investigación tuvo como objetivo evaluar la capacidad resistente y el estado de conservación de quince tinglados seleccionados mediante el SICOES, utilizando una metodología descriptiva y analítica basada en inspecciones visuales, modelación estructural y comparación de resultados numéricos.

Se aplicaron fichas de evaluación estructural para registrar lesiones físicas, mecánicas y químicas, y se elaboraron modelos tridimensionales con RAM Elements y SAP2000, considerando las combinaciones de carga de acuerdo con la norma AISI S100-16 y las recomendaciones de la ASCE/SEI 7-16. Los resultados mostraron que los elementos más críticos son las correas y cordones superiores, con relaciones demanda/capacidad (D/C) superiores a 1,05, lo que indica una sobredemanda estructural significativa. Las lesiones más frecuentes corresponden a corrosión superficial, pandeo local, deformaciones excesivas y deficiencias en soldaduras.

Se concluye que las causas principales del deterioro estructural se relacionan con la exposición ambiental agresiva del altiplano, la falta de mantenimiento preventivo y el uso de perfiles delgados sin protección anticorrosiva. Se recomienda desarrollar estudios climáticos específicos sobre la carga de granizo y ejecutar proyectos de refuerzo estructural en los tinglados que presentan deficiencias, a fin de mejorar la seguridad, durabilidad y resiliencia de las estructuras metálicas ligeras en condiciones andinas.

Palabras clave: Evaluación, Tinglado, Carga, Riesgo, Granizo, Viento, Norma AISI 100-16, LRFD.

ABSTRACT

This study analyzes the structural behavior and pathological manifestations of cold-formed metal sheds located in the cities of La Paz and El Alto, Bolivia. These structures, widely used due to their cost-effectiveness and ease of construction, have repeatedly failed during hail and wind events, revealing deficiencies in design, maintenance, and execution. The objective of this study was to evaluate the load capacity and state of conservation of fifteen sheds selected through SICOES, using a descriptive and analytical methodology based on visual inspections, structural modeling, and comparison of numerical results.

Structural evaluation sheets were applied to record physical, mechanical, and chemical damage, and three-dimensional models were developed using RAM Elements and SAP2000, considering load combinations in accordance with the AISI S100-16 standard and the ASCE/SEI 7-16 recommendations. The results showed that the most critical elements are the purlins and upper chords, with demand-to-capacity (D/C) ratios greater than 1.05, indicating significant structural over-demand. The most frequent damage is surface corrosion, local buckling, excessive deformation, and weld deficiencies.

It is concluded that the main causes of structural deterioration are related to the aggressive environmental exposure of the highlands, the lack of preventive maintenance, and the use of thin profiles without anti-corrosion protection. Specific climatic studies on hail loading and structural reinforcement projects for deficient sheds are recommended, in order to improve the safety, durability, and resilience of light steel structures in Andean conditions.

Keywords: Evaluation, Shed, Load, Risk, Hail, Wind, AISI 100-16 Standard, LRFD.

INTRODUCCION

En los últimos años, las ciudades de La Paz y El Alto han experimentado un incremento en los colapsos de tinglados metálicos, especialmente durante eventos de granizadas intensas. Estos siniestros han evidenciado deficiencias en el diseño estructural, en el mantenimiento y en la calidad de las uniones soldadas, ocasionando pérdidas materiales y humanas. Ante esta problemática, se desarrolló una investigación orientada a evaluar la capacidad resistente de los tinglados construidos con perfiles metálicos conformados en frío, material ampliamente utilizado por su ligereza, economía y facilidad de montaje.

El estudio se enmarca en el contexto del cambio climático y el aumento de fenómenos meteorológicos extremos en Bolivia. Las cargas de viento, granizo y ocasionalmente nieve representan las principales acciones que afectan la estabilidad de estas estructuras ligeras. En ese sentido, la evaluación estructural constituye una herramienta esencial para diagnosticar el estado real de los tinglados y proponer medidas correctivas y preventivas.

La investigación se desarrolló bajo los criterios de la norma AISI S100-16 (North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members) y se complementó con las normas ASCE/SEI 7-16 y NEC-SE-CG, a fin de considerar los efectos del viento y del granizo en la región andina. Este trabajo pretende contribuir al fortalecimiento del conocimiento técnico en el ámbito de las estructuras metálicas livianas, enfatizando la importancia de su diseño resiliente y de su mantenimiento periódico.

En el proceso de investigación se plantearon los siguientes objetivos:

- Seleccionar 15 diferentes tinglados metálicos conformados en frío que se encuentran en las ciudades de La Paz y El Alto para realizar la evaluación estructural, considerando la información técnica disponible en el SICOES (Sistema de Contrataciones Estatales).
- Recopilar información disponible de los diferentes

tinglados elegidos y verificar las dimensiones de los perfiles conformados en frío.

- Observar el estado de la soldadura de las uniones de los elementos que componen los tinglados metálicos mediante una ficha de evaluación estructural.
- Realizar el modelo estructural de cada uno de los tinglados metálicos utilizando los programas RAM Elements (licencia educativa) y SAP 2000 (licencia educativa) para realizar una comparación de los resultados.
- Determinar los esfuerzos y el factor demanda /capacidad de acuerdo con la norma AISI.

Es importante aclarar que no se han realizado ensayos patológicos de ningún tipo para la evaluación estructural de los tinglados. El enfoque del proyecto está principalmente en el análisis de posibles lesiones a través de la inspección visual, así como en el análisis estructural basado en los resultados del diseño y su análisis correspondiente. Esta decisión se basa en la necesidad de maximizar la eficiencia del proyecto y centrarse en métodos de evaluación que permitan una comprensión integral del estado de los tinglados sin la necesidad de realizar pruebas adicionales con equipos y materiales especializados.

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.

• Materiales y métodos de investigación.

La metodología aplicada en la presente investigación corresponde a un tipo descriptiva y analítica, estructurada en tres fases principales: levantamiento de información, modelación estructural y evaluación de resultados, que se desglosan en los siguientes puntos a tratar

• Selección de los casos de estudio

Se seleccionaron 15 tinglados metálicos ubicados en distintas zonas de La Paz y El Alto, priorizando edificaciones de uso educativo, deportivo y comunitario. La selección se basó en información técnica disponible en el SICOES y en inspecciones in situ. Cada tinglado fue identificado mediante fichas que incluyeron

dimensiones, tipología estructural, antigüedad, grado de corrosión y tipo de cubierta. La Tabla 1 contiene la información respectiva de cada uno de los casos de estudios seleccionados, así como su ubicación geográfica. En la Figura 1, se muestra un mapa de ubicación de los tinglados seleccionados descritos en la Tabla 1.

N°	Nombre	Código	Ciudad	Coordenadas	Uso o ambiente
1	TINGLADO UE HORIZONTES L/DISTRITAL D-2	T67	El Alto	16°32'27.47" S 68°11'5.02" O	Cancha Deportiva Escolar
2	CANCHA MULTIFUNCIONAL MAS TINGLADO L/JANKO KALANI	T71	El Alto	16°32'49.05" S 68°11'58.48" O	Cancha Deportiva Municipal
3	TINGLADO CANCHA U. E. KOLLASUYO Z/ MRSCAL. SANTA CRUZ DISTRITO 8	T95	La Paz	16°29'33.09" S; 68°9'30.77" O	Cancha Deportiva Escolar
4	TINGLADO VILLA VICTORIA L/ VILLA VICTORIA	T102	El Alto	16°32'37.83" S; 68°10'47.57" O	Cancha Deportiva Municipal
5	TINGLADO (MANCOMUNIDAD) FASE I LOCALIZACION: PLAN 129- 97	T114	El Alto	16°31'20.02" S; 68°9'15.33" O	Cancha Deportiva Municipal
6	TINGLADO EN SEC.B LOCALIZACION: C. SATELITE PLAN 405	T128	El Alto	16°31'29.50" S; 68°9'10.04" O	Cancha Deportiva Municipal
7	TINGLADO CANCHA DE FUTSAL LOCALIZACION/ LOZA CHARAPAQUI	T1128	El Alto	16°31'25.91" S; 68°9'10.04" O	Cancha Deportiva Municipal
8	TINGLADO CANCHA MULTIFUNCIONAL LOCALIZACION/ DELICIAS II	T129	El Alto	16°33'28.55" S; 68°11'57.52" O	Cancha Deportiva Municipal
9	TINGLADO U.E. ROSEMARY G. DE BARRIENTOS	T172	La Paz	16°31'31.15" S; 68°5'13.16" O	Cancha Deportiva Municipal
10	TINGLADO CANCHA MULTIPLE L/ NUEVOS HORIZONTES III	T59	El Alto	16°32'42.03" S; 68°11'23.10" O	Cancha Deportiva Municipal
11	TINGLADO U.E. GRAN BRETAÑA DISTRITO D-6 DISTRITAL	T1059	El Alto	16°29'36.05" S; 68°11'17.68" O	Cancha Deportiva Municipal
12	TINGLADO CANCHA DE FUTBOL DE SALON LOCALIZACION: SAN MARTIN DE PORRES	T1129	El Alto	16°33'51.78" S; 68°13'33.27" O	Cancha Deportiva Municipal
13	TINGLADO CANCHA MULTIPLE (FASE III) LOCALIZACION/ 21 DE DICIEMBRE	T149	El Alto	16°32'59.68" S; 68°11'12.01" O	Cancha Deportiva Municipal
14	CANCHA DEPORTIVA SEGUNDO BASCONES ZONA EL TEJAR	T1160	La Paz	16°30'1.36" S; 68°9'28.49" O	Cancha Deportiva Municipal
15	CANCHA LAS RAMAS 16 DE JULIO 3ERA SEC. DISTRITO 6	T1150	El Alto	16°29'44.50" S; 68°10'52.15" O	Cancha Deportiva Municipal

Tabla 1. Tinglados metálicos seleccionados para la evaluación estructural
Fuente: Elaboración propia.



Figura 1. Ubicación de los tinglados seleccionados
Fuente: Google Earth.

• Visitas técnicas, inspección visual y registro de lesiones

Para la etapa de inspección se empleó una ficha de evaluación estructural (Tabla 2) elaborada conforme a criterios de patología estructural, mantenimiento industrial y evaluación de estructuras metálicas existentes, siguiendo los lineamientos establecidos por la norma AISI S100-16 y las recomendaciones del Instituto de Ensayo de Materiales (IEM-UMSA). Esta ficha permitió registrar de manera sistemática las lesiones físicas, mecánicas y químicas observadas en los tinglados objeto de estudio. Dentro de las lesiones físicas se identificaron deformaciones, fisuras y deflexiones locales en correas y cordones, evidenciando pérdida de rigidez estructural; las lesiones mecánicas correspondieron a pandeos locales, fallas en uniones soldadas y desprendimientos de elementos secundarios; mientras que las lesiones químicas se asociaron a procesos de corrosión superficial y avanzada, principalmente en zonas expuestas y sin protección anticorrosiva. De igual manera, se evaluó el estado de los pedestales de hormigón armado, verificando la adherencia entre placas base y anclajes, la integridad del concreto y la presencia de fisuras por esfuerzos de tracción o retracción. En las uniones soldadas de cordones y correas se observaron discontinuidades, grietas por fatiga y deterioro del cordón de soldadura debido a la falta de mantenimiento. Toda la información recolectada fue sistematizada mediante fichas normalizadas y registros fotográficos, permitiendo establecer una clasificación del estado de conservación y su incidencia directa en la capacidad estructural global de cada tinglado analizado. El trabajo descrito anteriormente se visualiza en las Figuras 2 y 3.

FICHA DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL

Fecha:		Localización: <div style="border: 1px solid black; height: 60px; width: 100%;"></div>
Nombre del tinglado:		
Ciudad:		
Dirección:		
N° de ficha:		
Elaborado por:	Chambi Fernandez Diego Fernando Maquera Patzy Max Oliver	

Pedestales de HoAo											
Pórtico	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Dimensiones											
Altura											
Lesiones físicas	Humedad										
	Suciedad										
Lesiones mecánicas	Erosión										
	Grietas y fisuras										
Lesiones químicas	Desprendimientos										
	Eflorescencia										
Lesiones biológicas	Hongos,mohos,etc										
	Excremento de aves										
Otros											

Estructuras metálicas (perfiles, cercha)											
Pórtico	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Dimensiones											
Espesor											
Lesiones físicas	Humedad										
	Suciedad										
Lesiones mecánicas	Grietas y fisuras										
	Deformación										
Lesiones químicas	Corrosión										
	Hongos,mohos,etc										
Lesiones biológicas	Excremento de aves										
	Alta										
Corrosión	Media										
	Baja o nula										
Otros											

Placas base (unión pedestal y estructura metálica)											
Pórtico	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Dimensiones											
Número de pernos											
Lesiones físicas	Humedad										
	Suciedad										
Lesiones mecánicas	Grietas y fisuras										
	Desprendimientos										
Lesiones químicas	Deformación										
	Aplastamientos										
Lesiones biológicas	Corrosión										
	Hongos,mohos,etc										
Lesiones biológicas	Excremento de aves										
	Otros										

		Mantenimiento										
Estado	Mala											
	Regular											
	Buena											

Comentarios:

Tabla 2. Ficha de evaluación estructural
Fuente: Elaboración propia.



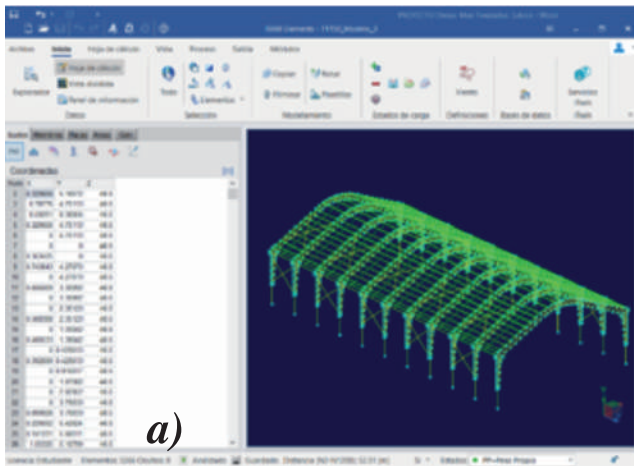
Figura 2. Toma de datos de las a) geometría y b) lesiones en los pedestales de hormigón armado
Fuente: Elaboración propia.



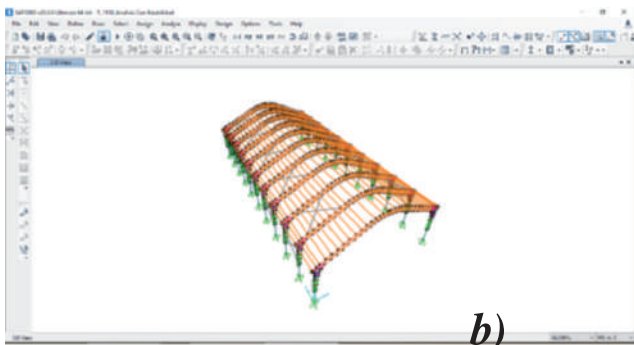
Figura 3. Toma de datos de las a) geometría y b) lesiones de los perfiles conformados en frío
Fuente: Elaboración propia.

• **Modelación y análisis estructural**

Los modelos tridimensionales fueron generados en RAM Elements y SAP2000 (ver Figura 4), programas reconocidos internacionalmente para el análisis y diseño de estructuras metálicas. En ambos casos se consideraron las mismas condiciones de contorno, materiales y combinaciones de carga. Las acciones gravitacionales incluyeron peso propio, carga viva y carga de granizo; las acciones laterales fueron las del viento. El análisis estructural se efectuó por el método LRFD (Load and Resistance Factor Design).



a)



b)

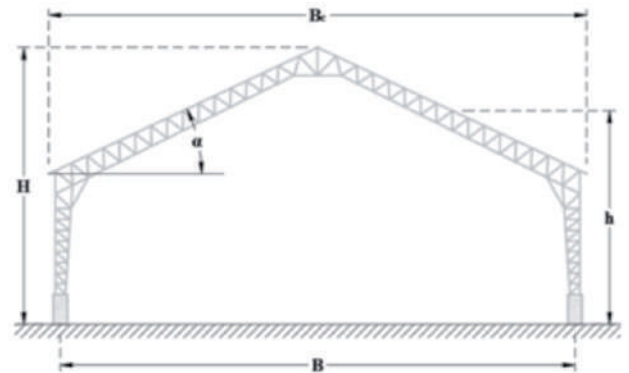
Figura 4. Modelo numérico estructural a) RAM Elements y b) SAP2000

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la Tabla 3 se presenta un resumen de los parámetros geométricos fundamentales correspondientes a los tinglados seleccionados para el estudio, los cuales constituyen la base de comparación estructural dentro de la investigación. En dicha tabla se incluyen dimensiones globales como luz libre, altura de cumbrera, separación de pórticos, pendiente de cubierta, tipo de sección estructural y sistema de

arriostramiento, variables que influyen directamente en la rigidez global, el comportamiento ante cargas gravitacionales y la distribución de esfuerzos. La sistematización de estos datos permitió establecer criterios de homogeneidad tipológica, garantizando que la muestra analizada sea representativa de las tipologías constructivas más comunes empleadas en las ciudades de La Paz y El Alto

Código Tinglado	B (m)	B _C (m)	L (m)	H (m)	h (m)	a (°)
T59	28,30	30,08	36,00	13,52	10,14	24,2
T67	17,80	18,20	30,00	10,90	8,85	24,2
T71	18,98	20,25	39,55	11,74	9,44	24,4
T95	16,55	17,88	25,90	9,63	7,80	30,0;19,0
T102	18,43	19,30	29,80	11,28	8,90	26,3
T114	22,25	22,80	33,60	13,59	10,22	Variable
T128	23,80	24,61	17,85	13,00	9,69	Variable
T129	21,41	22,64	33,02	11,24	8,70	24,2
T149	25,55	26,72	36,00	12,93	9,77	25,3
T172	22,80	23,22	39,75	12,97	10,14	39;13,0
T1059	24,10;21,30	26,30;22,63	36,14	11,00	8,36	22,0
T1128	16,17	16,62	30,80	10,72	8,74	25,5
T1129	24,00	25,57	34,40	12,10	9,22	24,2
T1150	22,94	23,96	46,50	10,82	8,44	Variable
T1160	Variable	Variable	Variable	10,39	8,71	16,3



- B = Ancho de pórtico
- B_C = Ancho de cubierta
- L = Longitud de pórtico
- H = Altura máxima de pórtico
- h = Altura media de pórtico
- a = Pendiente de cubierta

Tabla 3. Resumen de la geometría general de los tinglados metálicos

Fuente: Elaboración propia.

Los materiales empleados en el análisis estructural de los tinglados corresponden principalmente al acero conformado en frío utilizado en los elementos metálicos y al hormigón armado empleado en los pedestales y

fundaciones. Conforme a la documentación técnica y a los planos estructurales revisados, se adoptaron las resistencias características especificadas en el diseño original: acero ASTM A36 para los perfiles metálicos y hormigón con resistencia a compresión $f'_c = 21 \text{ MPa}$ para los elementos de apoyo. Estas propiedades se consideraron representativas de las construcciones típicas ejecutadas en las ciudades de La Paz y El Alto, donde predomina el uso de acero laminado en frío de bajo carbono y concreto elaborado con áridos locales.

En función de lo anterior, se definieron los parámetros mecánicos asumidos para el análisis numérico, incluyendo el módulo de elasticidad, el límite de fluencia y la densidad de los materiales, de acuerdo con los valores de referencia establecidos por las normas AISI S100-16, ACI 318-19 y la norma boliviana NB 1225001. La caracterización de los materiales permitió garantizar la coherencia entre los modelos estructurales y las condiciones reales de los tinglados, asegurando la confiabilidad de los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas con los programas RAM Elements y SAP2000

a) Hormigón armado

Resistencia característica de planos:	$f_{ck} = 21 \text{ (MPa)}$
Coefficiente de Poisson:	$\nu = 0.2$
Peso específico:	$\gamma_{HoAo} = 25 \text{ (kN/m}^3 \text{)}$
Módulo de elasticidad del hormigón	$E = \gamma_{HoAo}^{1.5} * 34 * \sqrt{f'_c} = 19475 \text{ (MPa)}$
Tensión de fluencia del acero de refuerzo	$f_y = 420 \text{ (MPa)}$
Módulo de elasticidad del acero	$E_s = 200000 \text{ (MPa)}$

b) Acero conformado en frío

Tensión de fluencia del acero (AISI):	$f_y = 36 \text{ (ksi)} = 248.21 \text{ (MPa)}$
Resistencia última del acero (AISI):	$f_u = 58 \text{ (ksi)} = 399.89 \text{ (MPa)}$
Módulo de elasticidad del acero (AISI):	$E_s = 29500 \text{ (ksi)} = 203000 \text{ (MPa)}$
Módulo de corte del acero (AISI):	$G = 11300 \text{ (ksi)} = 78000 \text{ (MPa)}$
Coefficiente de Poisson:	$\nu = 0.3$
Peso específico:	$\gamma_s = 77 \text{ (kN/m}^3 \text{)}$

Del conjunto de tinglados seleccionados para la investigación, se registró una variedad significativa de secciones conformadas en frío, tanto en geometría (secciones tipo C, Z, L y tubos rectangulares) como en espesores, lo que refleja la heterogeneidad constructiva característica de las estructuras metálicas ligeras empleadas en el altiplano boliviano. En la Tabla 4 se presenta el resumen de las secciones medidas y verificadas, que sirvieron como referencia directa para

el modelado estructural y la evaluación comparativa del desempeño resistente de los distintos tinglados analizados.

SECCIONES DE PERFILES BASE		
Descripción	Sección de perfil conformado en frío	Esquema
C	C 100x50x15x2	
C + 2L	C 100x50x15x2 + 2L 25x25x5	
2C	2C 100x50x15x2	
2C + 2L_1	2C 100x50x15x2 + 2L 38x38x3_1	
2C + 2L_2	2C 100x50x15x2 + 2L 50x50x5_2	
2C + 4L	2C 100x50x15x2 + 4L 25x25x2	
3C	3C 100x50x15x2	
3C_ab	3C_ab_100x50x15x2	

Tabla 4. Secciones de los perfiles conformados en frío utilizados en los tinglados

Fuente: Elaboración propia.

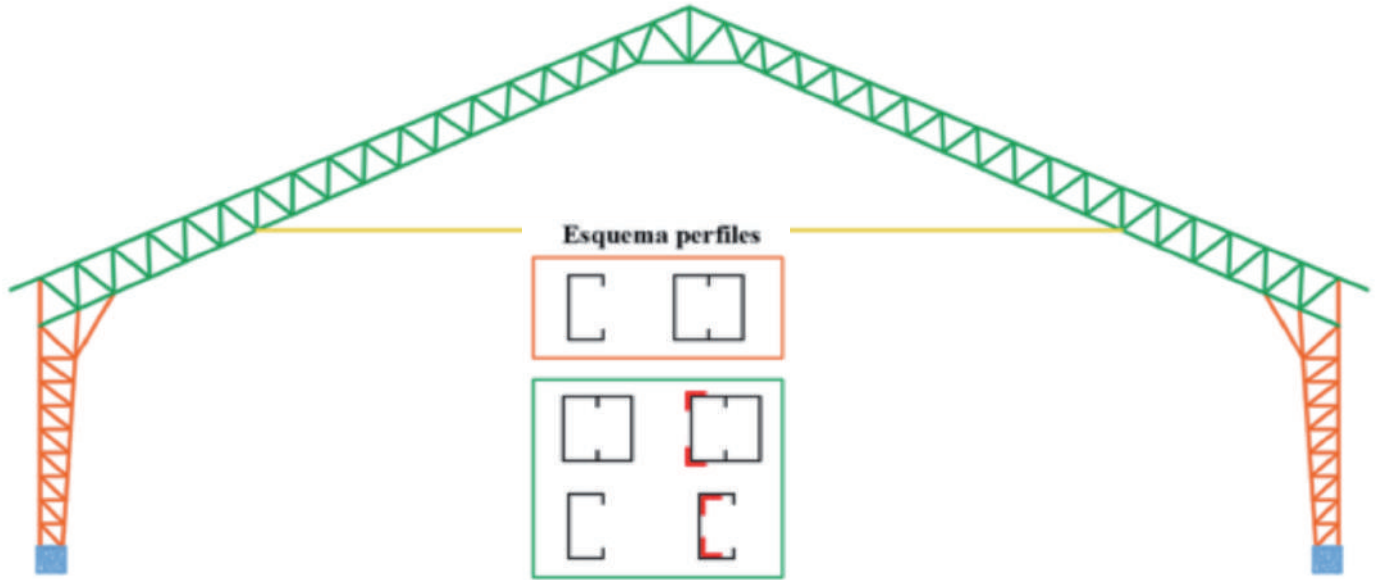
En numerosos tinglados se constató la presencia de distintas secciones estructurales dentro de una misma zona de la edificación, situación común en construcciones que han sido ampliadas, reforzadas o modificadas con el tiempo. En tales casos, se estableció un sistema de designación secuencial para facilitar la identificación y el registro de los elementos, asignando una numeración correlativa (1, 2, 3, etc.) a cada componente según su posición y función estructural. Para los perfiles de columna, la numeración se dispuso de abajo hacia arriba, mientras que para los elementos de cubierta se siguió el mismo criterio jerárquico, lo que permitió mantener un orden lógico y coherente en la sistematización de los datos.

Considerando esta metodología, en la Tabla 5 se presenta de manera detallada las dimensiones y características geométricas tanto de los pedestales de hormigón armado

como de los perfiles metálicos conformados en frío utilizados en los tinglados. Esta información constituye la base para el modelado estructural y el análisis comparativo del comportamiento resistente de los

distintos tipos de configuración observados, garantizando la trazabilidad entre los datos de campo, los planos estructurales y los resultados de simulación.

TINGLADO - T59



Pedestal de pórtico		Elementos de columna	
Pedestal de HoAo	30 x 59 cm	Columna externa 1	2C 100x50x15x2 + 2L 50x50x5_2
Elementos de cubierta		Columna externa 2	2C 100x50x15x1,9
Correas	C 100x50x15x2	Columna interna 1	2C 100x50x15x1,8
Cordón superior	C 100x50x15x1,8	Columna interna 2	2C 100x50x15x1,9 + 2L 50x50x5_2
Cordón inferior	C 100x50x15x1,9	Diagonales columna 1	C 100x50x15x1,8 + 2L 25x25x4,7
Cordón inferior externa	2C 100x50x15x2	Diagonales columna 2	C 100x50x15x1,9
Diagonales cubiertas	C 100x50x15x1,9	Montantes columna 1	C 100x50x15x1,9 + 2L 25x25x4,7
Diagonales externas	2C 100x50x15x2	Montantes columna 2	C 100x50x15x1,8
Montante central	2C 100x50x15x2	Pie de apoyo	2C 100x50x15x2
Montantes	C 100x50x15x1,8	Base	2C 100x50x15x2
Cruces y tirantes			
Cruces de cubierta	φ 11,5 mm		
Cruces laterales	φ 11,5 mm		
Tirantes	φ 9 mm		

Tabla 5. Secciones de los elementos del tinglado T59

Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS DE LA INVESTIGACION.

• **Análisis de lesiones en los tinglados**

Para la determinación del grado de lesión estructural de los tinglados se adoptó una metodología cuantitativa basada en criterios de frecuencia y severidad, desarrollados a partir de la información registrada en las fichas de evaluación estructural. De acuerdo con la escala proporcionada (Figura y las consideraciones descritas, se presentan las siguientes tablas de análisis

del grado de lesión para los diferentes tipos de lesiones en las tres secciones definidas anteriormente. En primera instancia, se procedió a contabilizar todas las marcas registradas en cada ficha para los distintos pórticos de la estructura. Esta cuantificación permitió establecer la proporción entre el número de pórticos afectados y el total de pórticos existentes, generando un porcentaje representativo del nivel de afectación de la estructura en su conjunto. Posteriormente, el porcentaje obtenido se calculó de

manera independiente para cada una de las tres secciones que conforman la ficha de evaluación -pedestales de hormigón armado, placas base y estructura metálica superior-, lo que permitió identificar con mayor precisión los sectores más comprometidos del sistema estructural.

Finalmente, para facilitar la interpretación visual y comparativa de los resultados, se elaboró una escala

cromática de severidad, en la cual cada intervalo porcentual de lesión se asocia a un color distintivo (por ejemplo, verde para lesiones leves, amarillo para moderadas y rojo para severas). Esta codificación permitió representar gráficamente el estado estructural global y sectorial de los tinglados, facilitando su análisis y priorización de intervenciones.

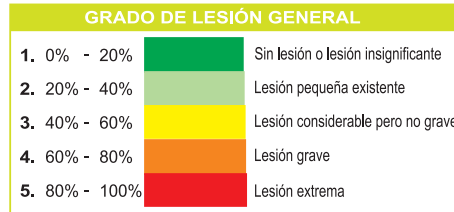


Figura 5. Escala de colores para el grado de lesión general

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la escala proporcionada y las consideraciones descritas, se presentan las siguientes

tablas de análisis del grado de lesión para los diferentes tipos de lesiones en las tres secciones definidas anteriormente y se puede visualizar en la Tabla 6.

Tipo de lesión →	Pedestales de HoAo								Placas base								Estructura metálica							
	Físicas			Mecánicas		Químicas	Biológicas		Físicas		Mecánicas			Químicas	Biológicas		Físicas		Mecánicas		Químicas	Biológicas		
	a	b	c	a	b	a	a	B	a	b	a	b	c	d	a	a	b	a	b	a	b	a	a	b
Tinglado ↓																								
T59	Green	Red	Green	Green	Green	Yellow	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
T67	Orange	Red	Yellow	Yellow	Light Green	Green	Orange	Green	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Red	Orange	Light Green	Yellow	Red	Green	Light Green	Red	Red	
T71	Yellow	Orange	Green	Light Green	Green	Green	Light Green	Green	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Orange	Green	Green	Green	Yellow	Green	Orange	
T95	Orange	Red	Green	Green	Red	Green	Light Green	Green	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Orange	Green	Orange	Orange	Red	Green	Red	Green	Red	
T102	Yellow	Red	Green	Light Green	Green	Yellow	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Red	Green	Light Green	Green	Light Green	Light Green	
T114	Red	Light Green	Red	Yellow	Green	Orange	Orange	Red	Red	Red	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Orange	Yellow	Green	Red	Green	Red	Red	
T128	Red	Red	Light Green	Green	Red	Green	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Light Green	Red	Red	Red	Red	Red	Red	
T129	Green	Orange	Green	Green	Red	Green	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Light Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	
T149	Yellow	Red	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Red	Green	Green	Orange	Green	Orange	Green	Green	Green	
T172	Green	Red	Green	Yellow	Green	Green	Orange	Green	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Orange	Green	Red	Green	Green	Red	Green	Red	Red	
T1059	Orange	Orange	Orange	Green	Red	Orange	Green	Light Green	Light Green	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Orange	Green	Green	Yellow	Green	Yellow	Yellow	
T1128	Light Green	Red	Green	Green	Green	Light Green	Light Green	Light Green	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Red	Light Green	Green	Red	Green	Red	Green	Red	Red	
T1129	Green	Red	Green	Light Green	Green	Yellow	Green	Green	Light Green	Red	Green	Green	Green	Yellow	Green	Light Green	Green	Red	Green	Red	Green	Light Green	Light Green	
T1150	Yellow	Red	Green	Yellow	Green	Green	Green	Light Green	Red	Red	Green	Green	Green	Red	Green	Green	Green	Red	Green	Yellow	Green	Green	Green	
T1160	Red	Red	Green	Yellow	Green	Green	Red	Green	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Red	Green	Red	Green	Red	Red	

<p>- Pedestales de HoAo:</p> <p>Lesiones físicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Humedad b) Suciedad c) Erosión <p>Lesiones mecánicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Grietas y fisuras b) Desprendimiento <p>Lesiones químicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Eflorescencia <p>Lesiones biológicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Hongos, mohos, etc. b) Excremento de aves 	<p>- Placa base:</p> <p>Lesiones físicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Humedad b) Suciedad <p>Lesiones mecánicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Grietas y fisuras b) Desprendimiento c) Deformación d) Aplastamiento <p>Lesiones químicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Corrosión <p>Lesiones biológicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Hongos, mohos, etc. b) Excremento de aves 	<p>- Estructura metálica:</p> <p>Lesiones físicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Humedad b) Suciedad <p>Lesiones mecánicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Grietas y fisuras b) Deformación <p>Lesiones químicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Corrosión <p>Lesiones biológicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Hongos, mohos, etc. b) Excremento de aves
---	---	--

Tabla 6. Secciones de los elementos del tinglado T59

Fuente: Elaboración propia.

•Análisis estructural y evaluación de resultados

Con el propósito de obtener una visión integral del desempeño estructural de cada componente, se realizó un análisis individualizado de la relación D/C (demanda/capacidad) correspondiente a los elementos que conforman los tinglados metálicos como se aprecia

en la Tabla 7. Este procedimiento permitió identificar cuáles presentan mayores niveles de exigencia estructural y, por tanto, una mayor probabilidad de falla o sobreesfuerzo, así como aquellos que mantienen márgenes de seguridad adecuados dentro de los límites normativos establecidos.

ELEMENTO		Método LRFD														Cumple	No Cumple	Cumple
		Relación D/C máximos																
ELEMENTO ESPECÍFICO		T59	T67	T71	T95	T102	T114	T128	T129	T149	T172	T1059	T1128	T1129	T1150	T1160		
Correas	Correa	1,50	2,87	3,44	1,70	2,99	3,43	3,03	1,70	1,73	1,84	4,09	2,95	2,53	5,49	3,02	0/15	15/15
Cordón superior	Cordón superior 1	2,26	2,05	1,66	2,37	1,53	1,34	3,34	2,45	2,54	0,54	3,08	1,46	3,53	1,23	1,09	1/15	14/15
	Cordón superior 2	-	1,46	1,51	-	-	-	1,65	-	-	-	5,57	-	-	-	-	0/4	4/4
Cordón superior externa	Cordón superior externa	-	-	0,63	-	-	-	-	-	-	-	-	0,97	-	-	-	2/2	0/2
Cordón inferior	Cordón inferior 1	1,43	1,25	1,43	0,83	1,16	1,21	-	1,67	1,19	0,50	1,94	1,38	2,49	2,35	1,42	3/15	12/15
	Cordón inferior 2	-	-	-	-	0,44	-	2,44	-	-	0,48	1,84	-	0,24	-	-	3/5	2/5
Cordón inferior externa	Cordón inferior externa	1,90	1,45	-	3,03	-	0,95	2,44	-	1,73	-	-	-	0,84	0,35	1,57	3/9	6/9
	Cordón inferior externa 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,71	-	-	1/1	0/1
Diagonales de cubierta	Diagonales cubierta	1,20	1,78	1,08	1,45	0,81	0,84	2,40	0,74	1,02	0,20	1,35	1,35	0,81	1,99	0,79	6/15	9/15
	Diagonales externas	0,88	-	0,27	-	0,46	-	0,39	0,60	0,56	-	1,49	0,57	0,81	1,42	0,80	9/11	2/11
	Diagonales externas 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,43	-	-	1/1	0/1
Montantes	Montantes	0,22	1,42	0,65	-	0,78	-	-	1,13	-	0,32	0,54	-	-	0,68	0,68	6/8	2/8
Montante central	Montante central	0,11	0,38	0,44	0,14	0,30	-	-	0,20	0,57	0,22	0,39	0,33	0,18	0,10	0,08	13/13	0/13
Columna externa	Columna externa 1	1,39	1,58	0,90	2,95	1,15	1,62	0,67	1,16	1,06	0,33	1,12	1,45	2,78	1,50	1,14	3/15	12/15
	Columna externa 2	1,12	1,49	-	-	-	-	0,95	0,67	0,89	-	1,97	-	-	-	1,17	3/7	4/7
	Columna externa 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,36	1/1	0/1
	Columna externa 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,44	1/1	0/1
Columna interna	Columna interna 1	1,40	2,10	1,19	2,41	0,83	1,90	-	1,02	1,09	0,75	1,59	1,83	2,61	3,22	1,94	3/14	11/14
	Columna interna 2	1,27	-	-	-	-	1,94	-	0,82	0,88	-	2,84	0,44	-	-	1,97	3/4	4/7
	Columna interna 3	-	-	-	-	-	-	-	0,66	0,64	-	0,54	0,44	-	-	1,54	1/1	1/4
	Columna interna 4	-	-	-	-	-	-	-	0,35	0,88	-	-	-	-	-	-	1/1	0/1
Diagonales de columna	Diagonales columna 1	0,63	1,46	1,20	1,05	0,66	0,55	-	0,74	0,86	0,21	2,03	1,04	2,33	1,36	0,76	9/14	5/14
	Diagonales columna 2	0,97	-	-	-	-	1,41	-	-	0,92	-	-	-	-	0,67	-	3/4	1/4
	Diagonales columna 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,70	-	1/1	0/1
Montantes de columna	Montantes columna 1	0,98	1,38	0,98	1,08	0,86	-	-	1,00	1,06	0,21	1,83	-	1,96	0,47	-	6/11	5/11
	Montantes columna 2	0,74	-	-	-	-	-	-	-	1,11	-	-	-	-	0,58	-	2/3	1/3
	Montantes columna 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,37	-	1/1	0/1
	Montantes columna 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,60	-	1/1	0/1
Pie de apoyo	Pie de apoyo	1,16	1,19	-	-	0,68	1,34	-	1,10	0,78	0,43	1,08	1,02	1,80	1,75	1,16	4/12	8/12
	Pie de apoyo 2	-	-	-	-	0,09	-	-	-	-	-	1,09	-	-	-	-	1/12	1/12
	Pie de apoyo interno_1	-	-	-	-	-	0,58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1/1	0/1
	Pie de apoyo interno_2	-	-	-	-	-	0,53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1/1	0/1
	Pie de apoyo interno_3	-	-	-	-	-	0,31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1/1	0/1
	Pie de apoyo interno_4	-	-	-	-	-	0,31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1/1	0/1
	Pie de apoyo externo	-	-	-	-	-	1,17	-	-	-	-	-	-	-	0,32	0,22	2/3	1/3

Tabla 7. Relaciones D/C máximas de cada elemento con el método LRFD
Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Durante el proceso de verificación se constató que, en algunos casos, las secciones de los perfiles no coincidían con las especificadas en los planos. En consecuencia, para la modelación estructural se priorizaron los perfiles observados in situ, incorporando sus dimensiones reales. De igual manera, se adoptaron las medidas registradas en campo para la geometría global (ancho, largo y altura), observándose que las diferencias respecto a los planos fueron mínimas y no representaron variaciones significativas en el comportamiento estructural.

En el caso de los elementos de hormigón armado -vigas y pedestales-, las dimensiones obtenidas en campo coincidieron, en general, con las establecidas en los planos originales. En los tinglados donde la tabiquería presenta incidencia estructural, se consideraron las dimensiones y materiales de los muros (principalmente ladrillo de seis huecos y ladrillo gambote) para su inclusión en los modelos de análisis.

Del procesamiento de las fichas de evaluación se determinó que los tinglados T114 y T128 presentan un grado de lesión clasificado como grave, mientras que los tinglados T67, T95, T172, T1128 y T1160 presentan lesiones considerables, pero no graves. El resto de las estructuras evaluadas se clasifican dentro de un grado de lesión leve o menor, sin riesgo inmediato de falla estructural.

En cuanto al estado de las uniones soldadas, el análisis mostró que en 12 de los 15 tinglados las soldaduras fueron calificadas como buenas, mientras que en los tinglados T71, T128 y T1150 se observó una condición regular, asociada principalmente a discontinuidades superficiales y oxidación localizada.

Respecto al estado de corrosión, los resultados indican que 8 de los 15 tinglados presentan una corrosión moderada, mientras que los tinglados T114, T128 y T129 exhiben un nivel de corrosión alto, evidenciando pérdida de sección metálica y degradación de recubrimientos protectores.

Con el fin de validar los resultados de análisis estructural, se compararon los modelos obtenidos en los programas SAP2000 y RAM Elements, considerando las diferencias metodológicas entre ambos. Los resultados de las solicitaciones axiales mostraron una diferencia porcentual promedio del 5,6 %, lo que refleja una consistencia satisfactoria entre los dos programas. Sin embargo, en el caso de los momentos flectores, la diferencia general se incrementó a 6,4 %, atribuible a las variaciones en los algoritmos de cálculo y en la formulación de los elementos finitos empleados por cada software.

El análisis de las relaciones D/C (demanda/capacidad) reveló que, en ninguno de los casos, las correas cumplen con los criterios de diseño bajo acción combinada, registrándose valores superiores a 1,05, lo que indica un estado de sobredemanda estructural. Esta condición puede estar asociada a las sobrecargas por granizo consideradas en el presente estudio, las cuales no se encuentran definidas en la normativa boliviana vigente.

El análisis individualizado de los elementos permitió identificar que las correas son los componentes más críticos, con relaciones D/C superiores a 1,05 en la totalidad de los tinglados analizados (15 de 15). Los elementos que presentan un comportamiento estructural deficiente en la mayoría de los casos son el cordón superior (14/15), la columna externa (12/15), la columna interna (11/14), el cordón inferior (12/15) y el cordón inferior externo (6/9). Este resultado se asocia a su mayor longitud libre no arriostrada y a la disminución de rigidez derivada del uso de secciones delgadas.

Se recomienda desarrollar investigaciones específicas orientadas al estudio del granizo como acción climática relevante en el diseño estructural de edificaciones ligeras del altiplano boliviano. Estos estudios deberían enfocarse en caracterizar las condiciones meteorológicas locales -intensidad, frecuencia, granulometría, densidad y acumulación del granizo- con el propósito de establecer valores de carga representativos y factores de seguridad apropiados. La incorporación de estos parámetros en futuras actualizaciones de las normas bolivianas de diseño estructural permitirá ajustar los criterios de

cálculo y mejorar la seguridad, funcionalidad y durabilidad de los tinglados metálicos frente a eventos climáticos extremos.

Asimismo, se recomienda realizar estudios de refuerzo y rehabilitación estructural en los tinglados que presentan relaciones demanda/capacidad (D/C) superiores a los límites normativos, ya que estos elementos representan un riesgo potencial de falla parcial o total ante la acción combinada de cargas gravitacionales y climáticas, especialmente las asociadas al granizo. Dichos estudios deberían incluir modelos de refuerzo eficientes y de bajo costo, considerando técnicas como aumento de secciones, incorporación de arriostamientos adicionales, refuerzo de uniones soldadas y protección anticorrosiva integral, a fin de prolongar la vida útil de las estructuras y garantizar condiciones adecuadas de seguridad para los usuarios.

REFERENCIAS

- [1] **AISI S100. (Octubre de 2016).** AISI Standard. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. EE.UU.
- [2] **Alvarado Cordero, J. (2014).** Los tinglados del puerto de Valencia: Análisis histórico y evaluación estructural. Universitat Politecnica de Valencia, Máster en Arquitectura Avanzada, Paisaje, Urbanismo y Diseño Especialidad en Tecnología, Valencia.
- [3] **ANSI/AISC 360. (Julio de 2016).** Specification for Structural Steel Buildings. Chicago, Illinois, EE.UU.
- [4] **Basset Salom, L. (2021).** Patología de las estructuras metálicas: lesiones. Universitat Politècnica de Valencia, Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Valencia.
- [5] **Brito Ponce. (2018).** Diseño y modelación de galpón de estructuras metálicas y análisis estructural en base a elementos finitos mediante SAP2000. Universidad Técnica Federico Santa María.
- [6] **Carles Broto. (2005).** Enciclopedia broto de patologías de la construcción. Links.
- [7] **Chinga Cornejo, J. (1994).** Diseño de elementos estructurales de perfiles doblados en frío según normas del AISI, utilizando un programa de computación y comparación con las normas del AISC. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Mecánica, Guayaquil.
- [8] **Durán Mendoza, M. (2022).** Diseño para Estabilidad: El método del Análisis Directo vs El método de la Longitud Efectiva. XXVII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural.
- [9] **Flores Ruiz, J. (s.f.).** Estructuras de Acero. México.
- [10] **García, J. M. (1998).** Fundamentos para el cálculo y diseño de estructuras metálicas de acero laminado. Madrid: McGraw Hill.
- [11] **García, M. (2014).** Eventos extremos a partir de escenarios climáticos. Teleioo SRL.
- [12] **Jiménez Torres, A. (2007).** Cargas de granizo en Colombia. Universidad de Los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Bogotá.
- [13] **Lessing, H. (2013).** Estructuras Metálicas. Tecnología Hoy.
- [14] **McCormac, J. (2012).** Diseño de estructuras de acero. New Jersey: Alfaomega.
- [15] **Merino y Castro. (Agosto de 2021).** Beneficios del Uso del Software RAM Elements en la Automatización del Diseño de Naves Industriales. Peru.

•[16] **Ministerio de Planificación del Desarrollo. (2015).** Vulnerabilidad Poblacional al Riesgo de Desastres en Bolivia. Fondo de Población de las Naciones Unidas - Unidad de Análisis de Políticas Sociales y Económicas, La Paz.

•[17] **Nunilo G. y otros. (2018).** Conservación de Edificación. Ecuador: 3Ciencias.

•[8] **Peña Ramos, C. (2000).** Diseño Básico de Perfiles Laminados en Frio. Universidad de Sonora, Sonora.

•[19] **Ralph D. Pierce. (1970).** Algunos aspectos de la formación del granizo. El correo geográfico.

•[20] **Sriramulu Vinnakota. (2006).** Estructuras de acero: comportamiento y LRFD. México: Mc Graw Hill.

•[21] **Universidad de Sonora. (s.f.).**

•[22] **Wei-Wen Yu. (2020).** Cold-Formed Steel Design (Fifth ed.). USA: Wiley.

ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE ESTRUCTURAS PATRIMONIALES DE MAMPOSTERÍA DE ADOBE

Nicanor Polo Cruz
npolo@umsa.bo

RESUMEN

El estudio Patológico de una Edificación Patrimonial que se encuentra ubicado en la zona de Sopocachi calle Víctor Sanjinés esquina Gregorio Reynolds, se analizó todos los elementos estructurales mediante ensayos de laboratorio, para determinar las resistencias mecánicas del adobe, ensayos no destructivos (control de fisuras mediante deformímetros, esclerometría) y Ensayos destructivos (Ensayo de Carga y extracción de núcleos).

El diagnóstico de estos procesos patológicos se efectuó mediante inspecciones visuales, recopilación de datos y de una documentación fotográfica para cada caso. Se elaboraron fichas de diagnóstico, en las cuales se precisa el agente causal de la lesión encontrada y el proceso de rehabilitación sugerido según la naturaleza de cada caso.

El estudio nos muestra, una amplia variedad de técnicas de reparación o refuerzo para mejorar la respuesta estructural de construcciones antiguas. Algunas de estas técnicas de intervención han sido específicamente implementadas para mejorar la capacidad de las estructuras antiguas para resistir fuerzas externas. El uso de estas técnicas, se debe considerar tanto en la acción sobre la estructura original como el modo en que afectan la integridad y la autenticidad de los materiales originales y las características estructurales.

Del estudio realizado, se recomienda el tratamiento, mediante refuerzos estructurales, como ser, mejoramiento del drenaje pluvial y alcantarillado sanitario, refuerzos con malla electrosoldada, cambio de cubierta en su totalidad. Los refuerzos recomendados deben garantizar su correcto comportamiento ante sucesos posteriores de deterioro.

Palabras Clave: Patologías estructurales, Diagnóstico, Estabilidad, Sismo, Edificaciones Patrimoniales, Mampostería de Adobe e Intervenciones estructurales.

ABSTRACT

The Pathological study of a Heritage Building that is located in the area of Sopocachi Calle Víctor Sanjinés corner Gregorio Reynolds, all structural elements were analyzed through laboratory tests, to determine the mechanical resistance of the adobe, non-destructive tests (crack control using deformimeters, sclerometry) and destructive tests (Load Test and extraction of cores).

The diagnosis of these pathological processes was carried out through visual inspections, data collection and photographic documentation for each case. Diagnostic sheets were prepared, which specify the causal agent of the injury found and the rehabilitation process suggested according to the nature of each case.

The study shows us a wide variety of repair or reinforcement techniques to improve the structural response of old constructions. Some of these intervention techniques have been specifically implemented to improve the ability of ancient structures to resist external forces. The use of these techniques must be considered both in the action on the original structure and in the way in which they affect the integrity and authenticity of the original materials and structural characteristics.

From the study carried out, treatment is recommended through structural reinforcements, such as improving storm drainage and sanitary sewage, reinforcements with electro-welded mesh, and changing the entire roof. The recommended reinforcements must guarantee their correct behavior in the event of subsequent deterioration events.

Keywords: Structural pathologies, Diagnosis, Stability, Earthquake, Heritage Buildings, Adobe Masonry and Structural Interventions.

INTRODUCCIÓN

Las edificaciones patrimoniales son construcciones que podemos ver en casi todos los países y ciudades. Son elementos y símbolos tangibles, importantes de la historia de un pueblo, donde queda la huella de una serie de eventos que constituyen las memorias del nacimiento de una sociedad, que sobreviven en medio del ambiente urbano y las construcciones modernas. Esto las convierte en un gran atractivo turístico para los visitantes, una insignia característica de cultura para el lugar y en un nuevo foco de atención para el mercado y la economía.

Instrumentos y técnicas de recopilación de información

Los instrumentos y técnicas para la recopilación de información de la estructura antigua patrimonial, se ha adoptado la siguiente metodología que consiste en tres etapas:

Trabajos de campo

- Levantamiento geométrico y representación gráfica: plantas, secciones y elevaciones.
- Analizar el sistema estructural, estudiar las reparaciones y alteraciones hechas en el pasado.
- Realizar Levantamiento detallado de todos los defectos y daños visibles, en el inmueble.
- Revisar las causas del deterioro.
- Levantamiento estructural (consiste en realizar en la edificación un levantamiento de información lo más completo posible para verificar, la geometría, forma, medidas, dimensiones y localización de todos los elementos estructurales como ser: cimentación, sobrecimiento, muros de adobe, entrepiso, gradas de acceso, cubiertas interior y exterior).
- Control de verticalidad de las cuatro fachadas y de las cuatro esquinas de muros exteriores e interiores

Trabajos de laboratorio

- Determinación de las propiedades mecánicas del ladrillo Gambote.

- Propiedades mecánicas de la madera.
- Control de fisuras, ensayos de carga, extracción de núcleos y estudio geológico.

Trabajos de gabinete

- Elaboración de fichas patológicas
- Elaboración de planos arquitectónicos, secciones, elevaciones y vistas 3D.
- Elaboración de planillas, para el seguimiento de fisuras y grietas.
- Modelación de estabilidad estructural actual.
- Recomendaciones de refuerzo

Sintomatología

En el presente estudio se analizarán defectos estructurales detectados en la infraestructura de estudio, tales defectos describen un conjunto de síntomas las cuales posteriormente darán el diagnóstico del estado actual de la edificación.

Las lesiones son cada una de las manifestaciones de un problema constructivo, es decir que si una patología es una enfermedad en las lesiones son los síntomas finales del proceso patológico.

Es de primordial importancia conocer la tipología de las afectaciones o lesiones, porque es el punto de partida de todo estudio patológico, y de su correcta identificación depende la elección adecuada del tratamiento que se va a dar a la lesión.

Por lo general las lesiones también pueden ser origen de otras lesiones que no fueron tratadas a tiempo. Para el presente estudio se clasifican las lesiones en 2 grupos:

- Lesiones físicas o químicas
- Lesiones mecánicas

Humedad por capilaridad

Este tipo de humedades aparecen en los muros, en la parte inferior del sobrecimiento de la fachada exterior,

se transmiten por capilaridad y provienen del terreno en el que se encuentra la vivienda y provoca que el agua ascienda por el contacto de este elemento con el terreno de fundación.

Lesiones físicas



Figura 1. Gráfico de humedad por capilaridad

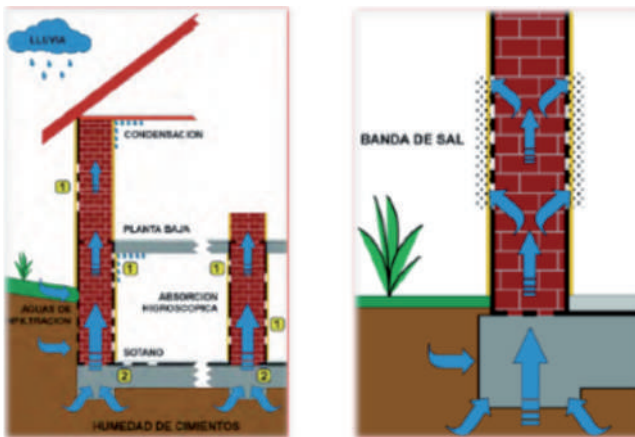


Figura 2. Esquema de ascenso de humedad en paredes

Lesiones químicas

El origen de las lesiones químicas suele ser la presencia de sales, ácidos o álcalis que reaccionan provocando descomposiciones que afectan a la integridad del material y reducen su durabilidad.

Las Eflorescencia es un proceso patológico que suele tener como causa directa previa la aparición de humedad es decir por exceso de agua en los materiales.



Figura 3. Aparición de eflorescencias superficial en muros

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

El diagnóstico se basa en el estudio de las patologías de origen físico, mecánico, y químico, en base a inspecciones visuales y prospecciones estructurales.

El diagnóstico de las patologías de una edificación patrimonial es la parte de la ingeniería que estudia los síntomas, las causas y los orígenes de los defectos de las obras civiles. Este diagnóstico puede aplicarse a construcciones recientes que no se ejecutaron correctamente; o para el caso de las construcciones tradicionales, en las cuales el envejecimiento de los elementos estructurales o las intervenciones sin criterio profesional han provocado falencias en las mismas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Inmueble Patrimonial en estudio

El inmueble se encuentra en la zona de Sopocachi de la ciudad de La Paz, localizado exactamente en la Plaza España entre las calles Víctor Sanjinés esquina Gregorio Reynolds

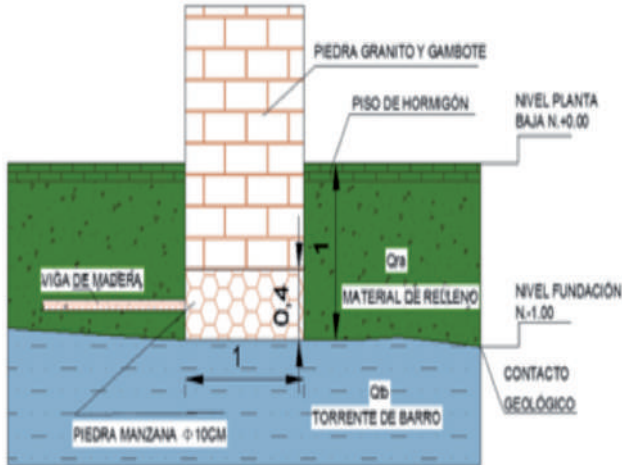
El acceso principal se realiza por la Calle Víctor Sanjinés, sin embargo, el acceso al garaje se realiza por la calle Gregorio Reynolds.



Figura 4. Fachada principal del inmueble

Fundación Tipo

En la fundación tipo de la planta baja nivel N°+0.00, se encuentran las fundaciones aisladas de dimensiones de 1.0x1.0m de base y profundidad variable.



Espesores de Muros de adobe

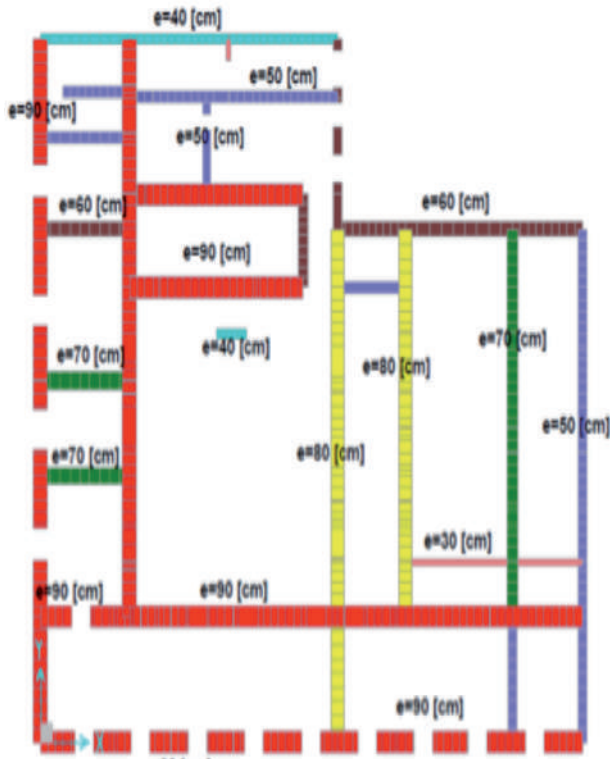
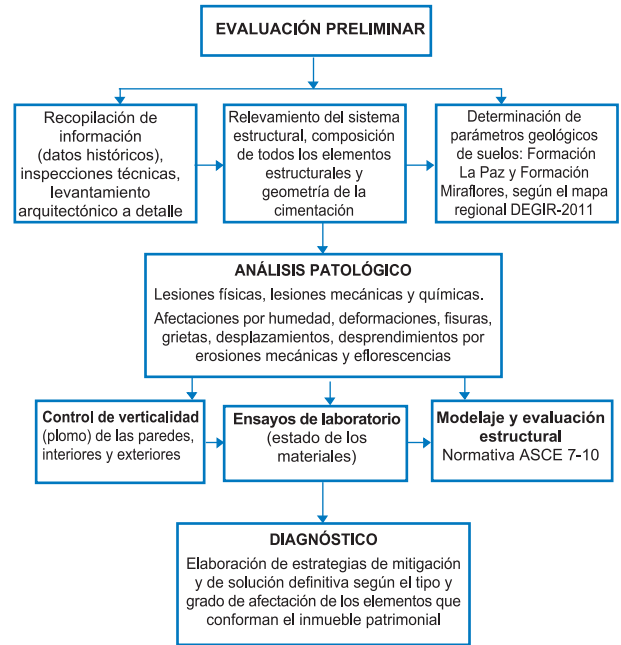


Figura 6. Esquema de muros de adobe

Diagrama de flujo del diagnóstico patológico del inmueble patrimonial en estudio



Esquema 1. Diagrama de flujo del diagnóstico patológico

Ensayos mediante laboratorio

a) Medición de deformaciones

Los deformímetros o extensómetros son aparatos medidores de alta sensibilidad, que sirven para determinar las flechas producidas en los incrementos de carga, las sensibilidades y tiene una precisión de 0.01 mm.

En función a los valores obtenidos de cada uno de los extensómetros y que además dichos valores fueron corregidos en función a la precisión del instrumento, analizando los resultados varían desde 0.0013mm hasta 0.005 mm, por lo que se considera como microfisuras muertas, que se establecen estabilizadas en su estado final.

b) Ensayos de Esclerometría

El martillo para ensayos de hormigón Original Schmidt es la herramienta más utilizada en todo el mundo para realizar ensayos no destructivos de hormigón.

Esencialmente el aparato está destinado a medir el índice de rebote, y por lo tanto la dureza superficial del hormigón, mediante un muelle que se carga apretando el aparato contra la superficie del hormigón hasta su carga completa.

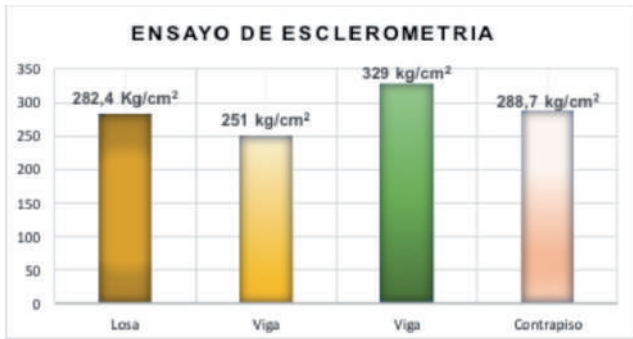


Figura 7. Resultados del ensayo de Esclerometri

c) Escáner de Barras

Este aparato determina la ubicación del acero y el diámetro aproximado de varilla utilizado en una estructura de concreto reforzado (con una precisión de ± 1/8”), también nos indica un valor aproximado del espesor de recubrimiento de concreto (en cm o pulgadas) en dicho elemento estructural a evaluar.

El método para recabar la información de disposición de barras de refuerzo es la resistividad mediante la formación de campos magnéticos.

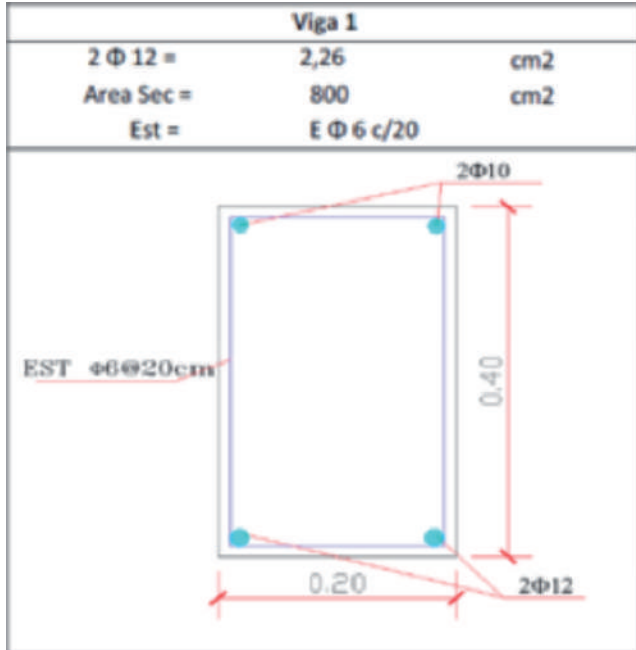


Figura 8. Resultados del Escáner de barras

d) Ensayo de carga

La deflexión máxima admisible en vigas de entresijos está en función al uso que se destine el elemento

estructural. Esto es para evitar daños a elementos no estructurales y acabados. Las consideraciones que se deben hacer para el cálculo de las deflexiones máximas admisibles están en función de la presencia de cielo raso y el cálculo se realiza para:

- Combinación más desfavorable de cargas permanentes y sobrecargas de servicio
- Sobrecargas de servicio actuando solas.

DEFLEXIONES MÁXIMAS ADMISIBLES		
Carga Actuante	a) con cielo raso de yeso	b) sin cielo raso de yeso
Cargas permanentes + sobre cargas	L/300	L/250
Sobre cargas	L/350	L/350

TABLA SEGÚN: Manual de Diseño para maderas del grupo andino

Esquema 2. Deflexiones máximas admisibles

Análisis de carga actuante

$$\Delta_{max} = \frac{L_c}{k}$$

Para la carga total K=250

$$\Delta_{max} = \frac{L_c}{k} = \frac{5.04}{250} = 20.16 [mm]$$

Para la sobrecarga carga viva K=350

$$\Delta_{max} = \frac{L_c}{k} = \frac{5.04}{350} = 14.4 [mm]$$

La deflexión máxima se calcula con la siguiente ecuación:

$$\Delta_{max} = \frac{5}{384} \frac{q_c L_c}{EI} = 87.6 [mm]$$

ENSAYO DE CARGA N°1 RESUMEN DE FLECHAS MÁXIMAS Y ADMISIBLES					
DEFORMINMETRO	ELEMENTO	Carga Máxima Aplicada (kg)	Deformación Máxima (mm)	Deflexiones Máximas admisibles (mm) k=350 $\Delta_{max} = \frac{L_c}{K}$	Deflexión Máxima (mm) $\Delta_{max} = \frac{5}{384} \frac{q_c L_c}{EI}$
1	ENTRE PISO 2º PLANTA	600	3,1	14,4	87,6
2	ENTRE PISO 2º PLANTA	600	4,4	14,4	87,6
3	ENTRE PISO 2º PLANTA	600	2,3	14,4	87,6

Tabla 1. Tabla resumen de deflexiones máximas admisibles

e) Ensayo de extracción de núcleos normativa C-42 y ASTM C- 39 (ensayo destructivo)

Esta evaluación se realiza cuando se desea conocer la resistencia a la compresión del concreto de una estructura existente, (Asociación Americana de Ensayo de Materiales C-39 ASTM C-39, 1998)

La resistencia de los núcleos de concreto depende del grado de humedad al que está sometido, de la orientación hacia la cual fue extraído, de la ubicación del núcleo. En la zona donde será extraído el núcleo se procede a determinar la distribución de acero de refuerzo existe de manera que en el momento de la perforación no se atraviese ninguna barra. El taladro se coloca de manera perpendicular a la superficie donde será extraído el núcleo y se inicia el proceso de corte. Una vez que extraído el núcleo, este se mide y se registra cualquier peculiaridad que esté presente.



Figura 8. Extracción de núcleos

f) Propiedades mecánicas del adobe

La obtención de los esfuerzos admisibles de diseño para las edificaciones elaboradas con los hormigones de tierra se efectuará mediante la realización de los ensayos adecuados, sobre todo en el caso de edificaciones de importancia.

RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE ADOBES				
Nº DE MUESTRA	ELEMENTO	CARGA APLICADA	RESISTENCIA (Kg/cm ²)	PROMEDIO
2	ADOBE 2	53,8	14,7	
3	ADOBE 3	51,5	14	
4	ADOBE 4	55,7	12,6	
			PROMEDIO	13,76 KG/cm²

Tabla 2. Tabla de resultados de Resistencia a compresión en adobe

El dispositivo para el ensayo a flexión, dispone de dos rodillos de apoyo en acero, distantes uno del otro y un tercer rodillo de carga, de acero del mismo diámetro que los anteriores y equidistantes de los otros dos. La longitud “a” de estos rodillos estará comprendida al tamaño de la pieza de adobe.

FLEXO TRACCIÓN EN ADOBE					
Nº DE MUESTRA	ELEMENTO	CARGA APLICADA (KN)	FLEXOTRACCIÓN EN ADOBES (Mpa)	FLEXOTRACCIÓN EN ADOBES (Kg/cm ²)	PROMEDIO (Kg/cm ²)
1	ADOBE 1	2,6	0,6	6	6,25
2	ADOBE 2	3	1,3	13	
4	ADOBE 3	1,9	0,6	6	
				PROMEDIO	6,25 Kg/cm²

Tabla 3. Tabla de resultados Flexotracción en adobe

Ensayo a corte directo

En el inmueble patrimonial se realizaron cuatro ensayos a corte de adobes, las muestras se obtuvieron de diferentes sectores, todo esto con el propósito de obtener parámetros de cohesión, Angulo de fricción interna, porcentaje de humedad y densidad seca y húmeda.

CORTE DIRECTO DE MUESTRA REMOLDEADA						
Nº DE ENSAYO	MUESTRA	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA(°)	COHESIÓN (Kg/cm ²)	PESO ESPECIFICO HUMEDAD (gr/cm ³)	PORCENTAJE DE HUMEDAD (%)	DENSIDAD SECA (gr/cm ³)
1	ADOBE 1	26,55°	0.108	1,427	2	1,399
2	ADOBE2	28,26°	0.145	1,844	1,4	1,818
3	ADOBE3	28,65	0.154	1,861	1,6	1,832
4	ADOBE4	30,78	0.151	2,028	1,7	1,994

Tabla 4. Tabla de resultados del ensayo a corte en adobe

g) Propiedades mecánicas de la Madera

La madera presenta gran resistencia a los esfuerzos de compresión paralela a sus fibras, debido a que las fibras están orientadas con su eje longitudinal en esa dirección y a su vez éste coincide o está muy cerca de la orientación de las microfibrillas que constituyen la capa media de la pared celular (capa de mayor espesor).

COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA DE MADERA					
Nº DE MUESTRA	Ancho (cm)	Largo (cm)	Densidad (gr/cm ³)	Deformación de Rotura (%)	Esfuerzo de Rotura (kg/cm ²)
LISTON TECHO	5	5,7	0,495	8,77	256

Tabla 5. Tabla de ensayo a compresión paralela a la fibra en madera

COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA DE MADERA					
Nº DE MUESTRA	Ancho (cm)	Largo (cm)	Densidad (gr/cm ³)	Deformación de Rotura (%)	Esfuerzo de Rotura (kg/cm ²)
VIGA TECHO	5,1	6,2	0,654	8,06	602

Tabla 6. Tabla de ensayo a compresión paralela a la fibra en madera

COMPRESIÓN PERPENDICULAR A A LA FIBRA DE MADERA					
Nº DE MUESTRA	Ancho (cm)	Largo (cm)	Densidad (gr/cm ³)	CARGA APLICADA (KN)	Esfuerzo de Rotura (kg/cm ²)
VIGA LOSA	5,2	7,3	0,34	64,2	172,6

Tabla 7. Ensayo a compresión perpendicular a la fibra en madera

h) Propiedades resistentes del ladrillo

Resistencia a flexo tracción

El esfuerzo resistente a la tracción de la mampostería depende totalmente de la adherencia entre el mortero y las piezas, este valor es bajo y muy variable.

FLEXIÓN EN LADRILLO GAMBOTE				
Nº DE MUESTRA	ELEMENTO	CARGA APLICADA (KN)	FLEXOTRACCIÓN EN LADRILLO GAMBOTE (Mpa)	FLEXOTRACCIÓN EN LADRILLO GAMBOTE (Kg/cm ²)
1	LADRILLO GAMBOTE	3,9	3,8	38
2	LADRILLO GAMBOTE	6,1	8	80
3	LADRILLO GAMBOTE	1,8	3,2	32
4	LADRILLO GAMBOTE	5,3	7,5	75
TOTAL				56,25

Tabla 8. Ensayo a flexión en ladrillo

Resistencia a compresión

La resistencia básica está formada por la resistencia combinada de las piezas y del mortero, el ingeniero estructural debe obtener en laboratorio la resistencia mínima de la mampostería básica (piezas y mortero).

RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN LADRILLO GAMBOTE				
Nº DE MUESTRA	ELEMENTO	CARGA APLICADA	RESISTENCIA (Kg/cm ²)	PROMEDIO (Kg/cm ²)
1	LADRILLO GAMBOTE1	312,5	182,3	
2	LADRILLO GAMBOTE 2	225,7	135,7	
3	LADRILLO GAMBOTE 3	235,1	142,5	
4	LADRILLO GAMBOTE4	235,1	146,4	
Valor mínimo			135,7 (Kg/cm²)	

Tabla 9. Ensayo a compresión en ladrillo

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

El análisis de la estructura patrimonial se realiza mediante programas basados en métodos matriciales y mediante el análisis por el método de los elementos finitos M.E.F. de acuerdo a las necesidades de diseño.

El análisis se realiza de acuerdo al procedimiento descrito en los siguientes incisos.

Igualmente, se utilizan programas de cálculos por pórticos tridimensionales.

Los tipos de análisis a ser considerados en el presente cálculo son:

- Análisis por cargas propias y cargas permanentes.
- Análisis por cargas de servicio o cargas vivas.
- Análisis por acciones de viento.
- Análisis por acciones de sismo.

Asignación de cargas

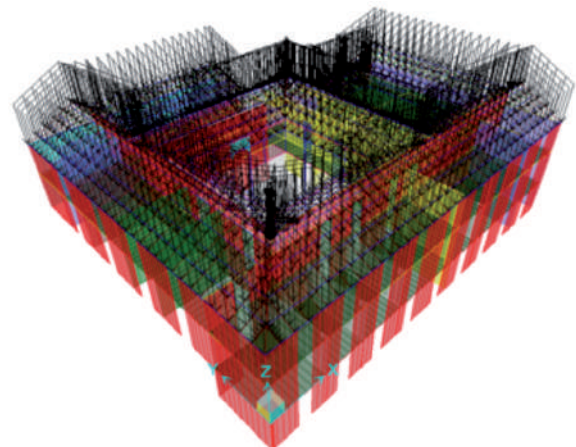


Figura 9. Patrón de carga - Carga Muerta "CM q=300 kg/m²"

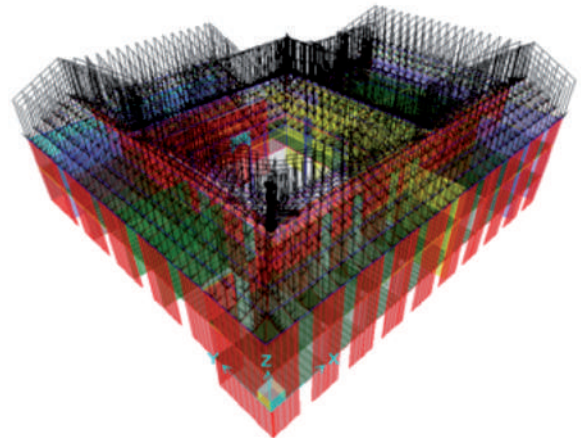


Figura 10. Patrón de carga - Sobrecarga de Uso "SC =500 kg/m²"

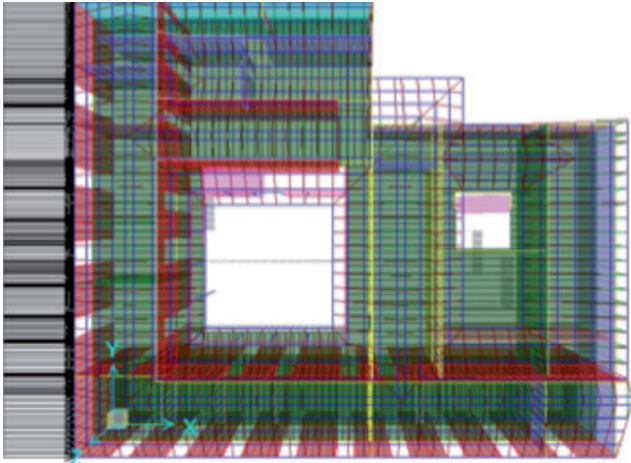


Figura 2. Patrón de carga - Viento en dirección X positivo "VL1"

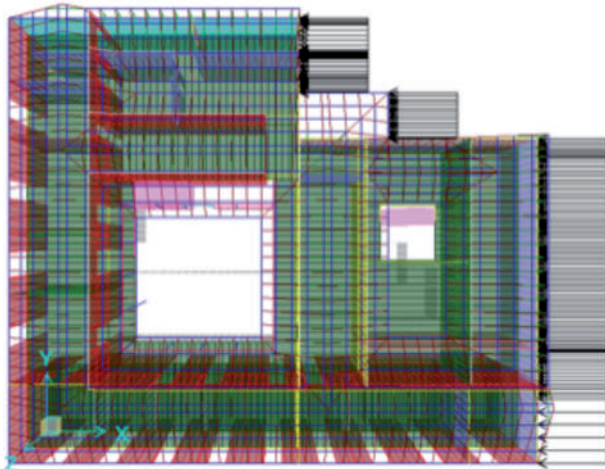


Figura 11. Patrón de carga - Viento en dirección X negativo "VL2"

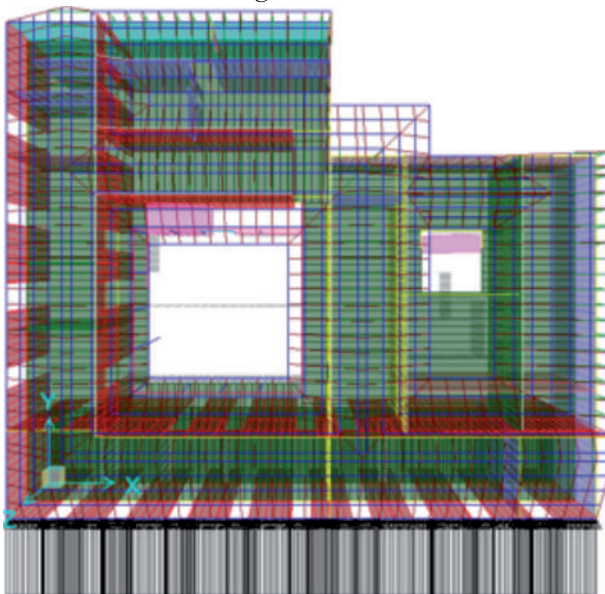


Figura 12. Patrón de carga - Viento en dirección Y positivo "VT1"

Estructuración del inmueble patrimonial



Figura 13. Vista de corte interno del inmueble patrimonial

Secciones de Placas

MURO TIPO	ESPESOR
Muro portante de adobe e=90	90
Muro portante de adobe e=80	80
Muro portante de adobe e=70	70
Muro portante de adobe e=60	60
Muro portante de adobe e=50	50
Muro portante de adobe e=40	40
Muro portante de adobe e=30	30

Esquema 3. Secciones de placas

Resultados obtenidos del estructural

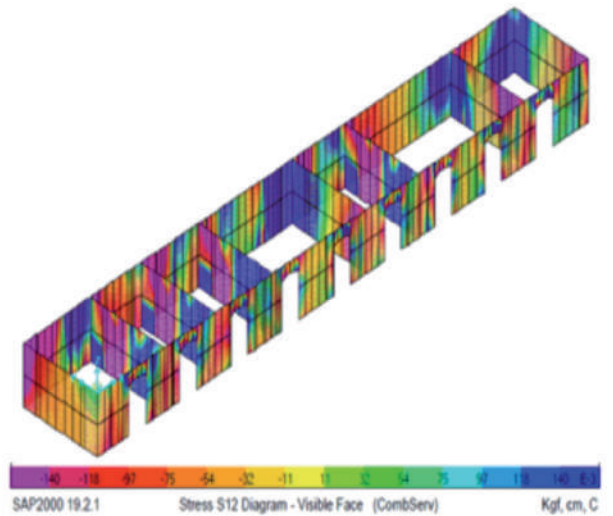


Figura 14. Valores máximos de esfuerzos de corte S12 -Planta sótano

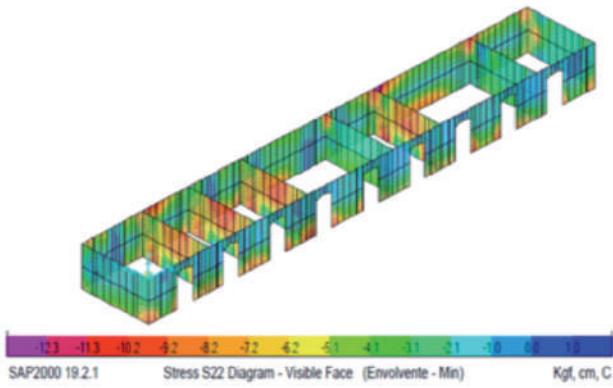


Figura 15. Valores de esfuerzos de tracción S22-Planta sótano

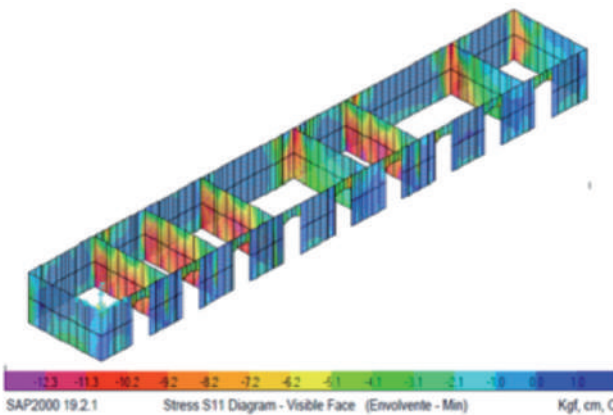


Figura 16. Valores de esfuerzos de compresión S11

$f_c = +13.76$ [kg/cm²] - Resistencia a compresión y

$f_c = 6.25$ [kg/cm²] resistencia a tracción, resistencia

a corte =0.37 [kg/cm²]

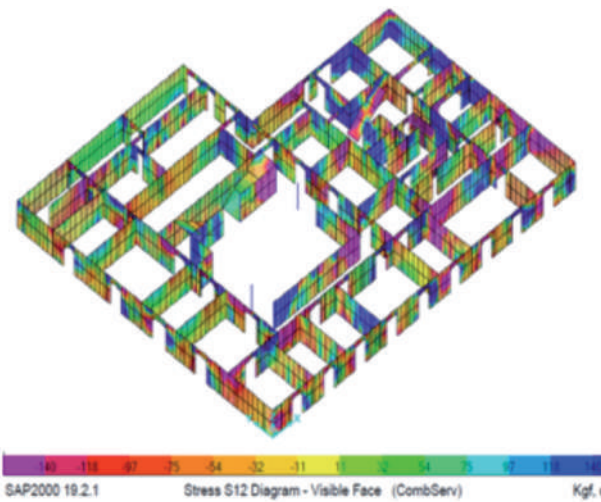


Figura 17. Valores de esfuerzos de corte S12, Planta baja y alta

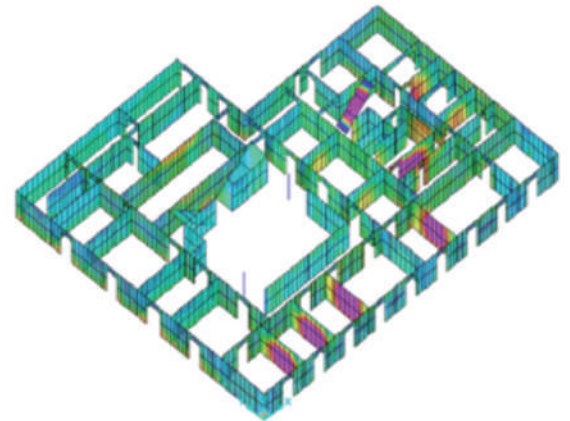


Figura 18. Valores de esfuerzos de tracción S22, Planta baja y alta

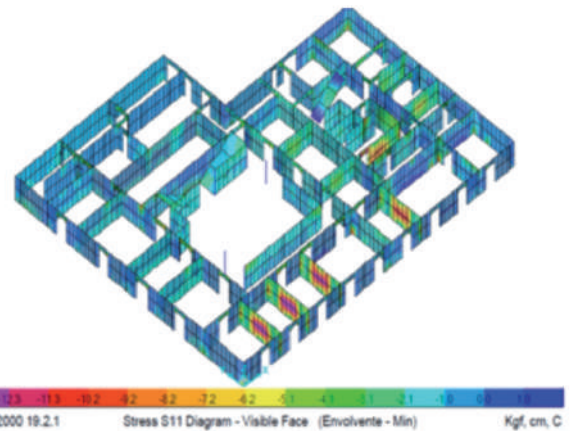


Figura 19. Valores de esfuerzos de compresión S11, Planta baja y alta

Intervención Estructural

Una vez realizado la descripción del inmueble patrimonial mediante evaluación geotécnica, geofísica, el análisis del sistema estructural, el análisis patológico, el diagnóstico (mediante fichas patológicas y ensayos de laboratorio) y finalmente la evaluación estructural mediante un modelo matemático, se plantea la intervención estructural al inmueble patrimonial tanto estructural como una intervención superficial. En el que se considera nuevos elementos estructurales con el objetivo de mejorar la resistencia de los materiales.

a) Calzadura de cimientos y drenaje pluvial

El trabajo de calzadura, se deberá realizar en ambos lados del muro, el espesor de la calzadura será de 0.50m a cada lado de la sección del muro de adobe, el material

a utilizar es hormigón ciclópeo con una resistencia característica de $F_{ck}=180 \text{ kg/cm}^2$ y una dosificación de 1:3:4.

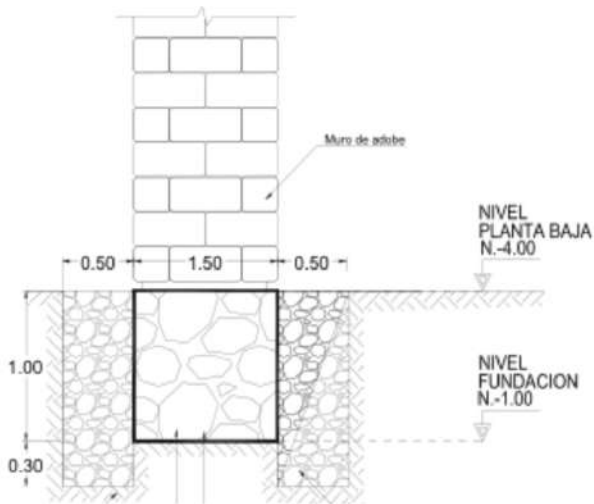


Figura 20. Calzadura en cimentación tipo- planta baja nivel N.+0.00

b) Refuerzo con malla Electrosoldada en muros portantes.

Se aplica a construcciones de adobe existentes y nuevas. Debe considerarse que las mallas están compuestas por alambres de 1mm de diámetro, espaciados de forma cuadrada, presentan una resistencia a la rotura de 220 kg/m; asimismo, si una capa de malla no fuese suficiente, puede emplearse 2 y hasta 3 capas.

Las mallas electrosoldadas, compuestas de alambre galvanizado de 1mm de diámetro. Las aberturas más comunes y los más utilizados en nuestro medio son:

$$1 \frac{1}{2} \quad 1 \frac{1}{2} = 1.5 \text{ [pulg]},$$

$$1 \quad 1 = 1.0 \text{ [pulg]}, \quad \frac{3}{4} \quad \frac{3}{4} = 0.75 \text{ [pulg]},$$

$$\frac{1}{2} \quad 1 \frac{1}{2} = 0.50 \text{ [pulg]},$$

Estas mallas por lo general son de acero grado 60 (clasificación ASTM), lo cual las hace aptas para el trabajo requerido, las capacidades mecánicas para las mallas indicadas son.



Figura 21. Malla electrosoldada, instalación y recubrimiento

c) Calzaduras en muro de adobe

Se emplearán adobes nuevos los que se producen en nuestro medio con el fin de reemplazar los fisurados, erosionados o intemperizados, utilizando un mortero de la misma calidad que la utilizada para la elaboración de los adobes. La reconstrucción se realizó siguiendo los dentados del muro para una mejor traba y adherencia, esto se hizo adobe por adobe, acuñando con elementos sólidos con pedazos de teja o piedras pequeñas. Los adobes deben ser asentados de manera que el mortero de barro rellene íntegramente al adobe previamente humedecido, no se colocaron más de 5 hiladas por día para evitar agrietamientos y expulsión del mortero en las partes bajas (sobrepeso).

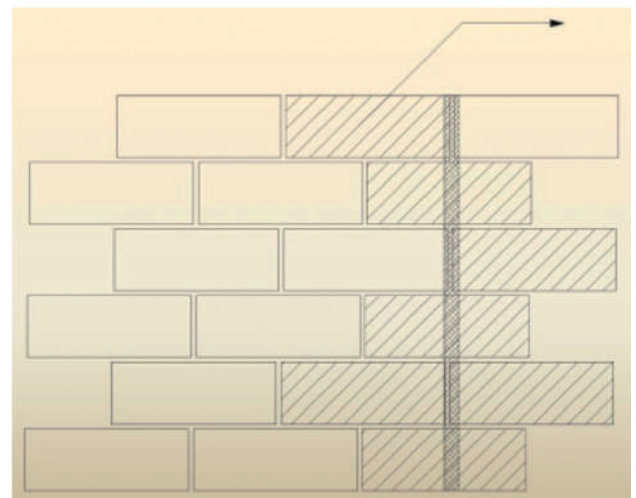


Figura 22. Calzadura de muro de adobe

d) Refuerzo con tensores de acero horizontales

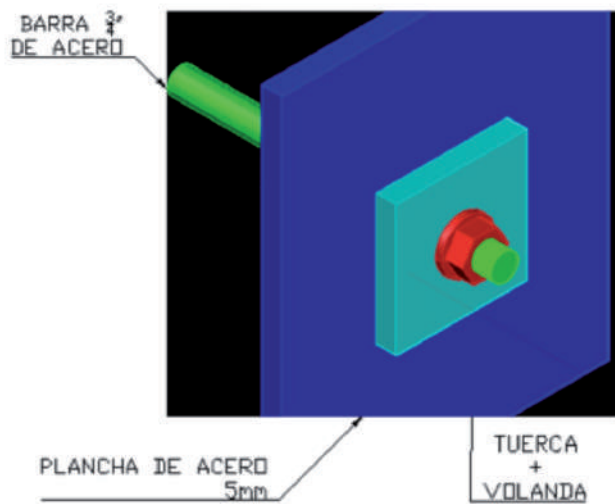


Figura 23. Calzadura de muro de adobe

Los refuerzos con tensores de acero en forma horizontal, tiene la función de mantener la verticalidad de los muros de adobe.

El diámetro a utilizarse en el inmueble patrimonial es de $3/4'' = 20$ mm de acero corrugado, los cuales deben atravesar en forma perpendicularmente los dos muros de adobe.

El acero debe estar sujeto con dos planchas de anclaje espesor de 5mm, los cuales debe contar con tuerca y volanda.

e) Drenaje Pluvial

Actualmente en el inmueble patrimonial, todo el sistema de alcantarillado pluvial, se encuentra deteriorado, como también las bajantes internas y fachadas externas, por lo que cuando se inicie las obras se debe verificar todo el sistema de conexiones, todo esto con el propósito de evitar filtraciones y humedecimiento del suelo, lo que provoca los deterioros en los sobrecimientos y muros de adobe.

CONCLUSIONES FINALES

El estudio de estabilidad, realizado con respecto a las evaluaciones de las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la construcción patrimonial, evaluación de verticalidad, control de fisuras, verificación

de deformaciones mediante el ensayo de carga y el levantamiento de lesiones producidos a causa de la falta de mantenimientos preventivos o correctivos. Todos estos parámetros permiten plantear una intervención inmediata a corto plazo con el propósito de reducir los efectos de los fenómenos naturales y los deterioros por factores medio ambientales.

REFERENCIAS

- [1] Alva J., (2000). Diseño de cimentaciones, Profesor Principal de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima: Perú. Fondo Editorial Instituto de la construcción y gerencia ICG.
- [2] Araoz E. (2016). Expresiones Artísticas de Estilo Arquitectónicos en el Periodo Republicano entre 1900-1930, (Maestría en conservación del patrimonio cultural), Universidad Mayor de San Andrés -Facultad de arquitectura Arte Diseño y Urbanismo, La Paz-Bolivia.
- [3] Asociación Americana de Ensayo de Materiales C-39 (ASTM), (1998). Determinación del esfuerzo de compresión en especímenes cilíndricos de concreto. Posgrado en ingeniería estructural- Universidad de Costa Rica.
- [4] Asociación Colombiana de ingeniería sísmica AIS & Presidencia de la Republica Red de Solidaridad Social (2005). Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada. Recuperado de <http://www.asosismica.org>
- [5] Astorga, A. & Rivero, P. (2009). Patología en las edificaciones Modulo III, Sección IV, Publicado por CIGIR, (Centro de investigación en gestión integral de riesgo).
- [6] Bjerrum L. (1963), "Some Notes on Terzaghi's Method of Working", From Theory to Practice in Soil Mechanics. Selections from the Writings of Karl Terzaghi, pp 22-25, John Wiley, New York.
- [7] Blondet, M., Vargas, J. & Tarque, N. (2003). "Reflexiones sobre la Normatividad para la construcción sismorresistente de edificaciones de adobe". Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Lima, Perú.

ESTUDIO PATOLÓGICO EMPLEANDO ENSAYOS DE ULTRASONIDO APLICADO A ESTRUCTURAS EN CONSTRUCCIÓN

G. A. ERGUETA¹*, M. V. QUINO¹

gustavo.ergueta@gmail.com

DOI: [HTTPS://DOI.ORG/10.21041/RA.V14I1.715](https://doi.org/10.21041/RA.V14I1.715)

RESUMEN

El estudio discute los resultados de la evaluación de estructuras de hormigón armado utilizando ensayos no destructivos (END) basados en la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) con el objetivo de determinar la integridad y uniformidad del hormigón, así como detectar posibles anomalías causadas durante la construcción o por factores externos. Los resultados mostraron la distribución de daños en una estructura afectada por el fuego, la medición de la profundidad de fisuración en un elemento de hormigón y la uniformidad en diferentes componentes estructurales, que posteriormente permitieron elaborar el procedimiento de rehabilitación estructural correspondiente. El estudio demuestra la eficacia de los END y la VPU en la evaluación de estructuras de hormigón armado, permitiendo tomar decisiones inmediatas de reparación y rehabilitación.

Palabras clave: ensayos no destructivos; velocidad de pulso ultrasónico; anomalías; rehabilitación; hormigón.

El presente artículo fue presentado inextenso en el Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y en el Congreso de Control de Calidad en la Construcción en su versión 2023, y posteriormente publicado en la Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, como se cita a continuación: Ergueta, G. A.; Quino, M. V. (2024), “Estudio patológico empleando ensayos de ultrasonido aplicado a estructuras en construcción”, Revista ALCONPAT, 14 (1), pp. 82 - 95, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i1.715>

¹ Steel Concrete Test, La Paz, Bolivia.

Contacto: gustavo.ergueta@gmail.com +591 76796983

INTRODUCCIÓN

Dentro del estudio patológico en las estructuras de hormigón armado, el uso de ensayos no destructivos (END) se ha convertido en una herramienta útil para evaluar la calidad y el estado de las edificaciones. El avance tecnológico en este campo ha permitido obtener resultados confiables prácticamente en tiempo real, mediante el uso de equipos que ya incorporan inteligencia artificial (IA) para el procesamiento de datos.

Los resultados de estos estudios y la detección de anomalías a temprana edad en las estructuras, antes de que se detecten daños visibles, permiten reducir significativamente los costos de reparación e incrementar su vida útil, disminuyendo el deterioro del hormigón y el riesgo de la integridad de la estructura.

El origen de estas anomalías puede producirse durante la etapa de construcción de la estructura por un control insuficiente, o durante la vida útil de la misma, debido

a la falta de un plan de mantenimiento adecuado. Por esta razón la evaluación estructural se ha convertido en una buena práctica para garantizar la seguridad y la estabilidad de las edificaciones.

Dentro de los END, el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) puede ser empleado para determinar la uniformidad del hormigón. Este método se basa en que, un cambio en la VPU medida a través del elemento está fundamentalmente relacionado con un cambio en el módulo elástico del hormigón. Este método permite obtener información en todo el espesor del elemento a diferencia de otros métodos que solo permiten evaluar la superficie. Sin embargo, se debe considerar de manera especial la heterogeneidad del hormigón.

Un adecuado uso de múltiples equipos puede evitar distorsiones en la lectura de los valores de la VPU. Asimismo, los sectores a ser evaluados deben ser analizados previamente con pacómetro para identificar las zonas con presencia de armaduras de refuerzo.

Este trabajo busca compartir los resultados obtenidos mediante la aplicación de diferentes métodos de VPU aplicados a casos reales, con el objetivo de determinar el nivel de daño en estructuras de hormigón armado evaluadas en etapa de construcción.

EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO MEDIANTE ENSAYOS DE VPU

El principal objetivo de las evaluaciones está relacionado con la determinación del grado de integridad y uniformidad del hormigón afectado por factores externos originados en la etapa de construcción o acciones externas que pueden disminuir sus características mecánicas.

La posibilidad de contar con esta información durante la ejecución de una obra permite tomar decisiones inmediatas relacionadas con la restitución de los elementos dañados o con la rehabilitación estructural de los mismos. Para los casos propuestos, todas las estructuras fueron rehabilitadas luego de su evaluación toda vez que los resultados obtenidos confirmaron que los daños existentes una vez rehabilitada la estructura no afectaban su capacidad estructural.

La metodología utilizada para la toma de datos de VPU, así como los documentos de referencia para el análisis de resultados, está descrito en este trabajo.

Según lo establecido en el acápite 5.2 de la norma ASTM C 597-02, el ensayo de VPU es válido para evaluar la uniformidad y la calidad relativa del hormigón, así como para detectar vacíos y fisuras en las estructuras. Además, permite evaluar la eficacia de las reparaciones realizadas en las fisuras. También es útil para indicar cambios en las propiedades del hormigón y en la evaluación de estructuras, lo que permite estimar la severidad del deterioro causado por la fisuración.

Con base en lo anterior, una clasificación del hormigón según su VPU empleada ampliamente, es la elaborada por Feldman (1977).

CLASIFICACIÓN DEL HORMIGÓN SEGÚN SU VPU	
Velocidad ultrasónica (m/s)	Clasificación del hormigón
$V > 4575$	Excelente
$4575 > V > 3660$	Bueno
$3660 > V > 3050$	Cuestionable
$3050 > V > 2135$	Pobre
$V < 2135$	Muy pobre

Tabla 1. Clasificación del hormigón según su velocidad ultrasónica
 CBD-187 Non-Destructive Testing of Concrete

RESULTADOS EMPLEANDO VPU EN LA EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS

Los tres casos prácticos de evaluaciones de estructuras de hormigón armado mediante ensayos de VPU fueron realizados en distintos proyectos en La Paz - Bolivia; proyectos que se encontraban en la etapa de construcción.

- Evaluación de estructura sometida a la acción del fuego.

La estructura corresponde a un edificio de 13 niveles según el esquema de la Figura 4:

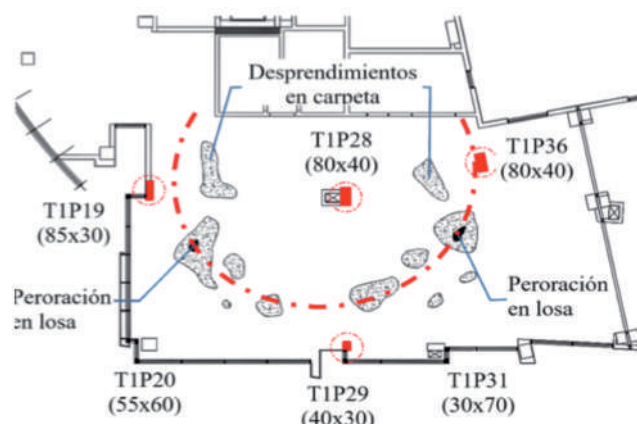


Figura 1. Esquema del edificio y daños en losa.

En la Figura 1 se puede observar la distribución de los daños en la losa producto de la acción del fuego, presentando una configuración radial con centro aproximado en la columna T1P28, esta situación confirma el hecho de que la columna y ábaco correspondientes a esta ubicación son los elementos con mayor daño superficial y los elementos T1P20 y T1P31 no presentan daño visual debido a que se encuentra a una mayor distancia.

Se realizaron lecturas directas e indirectas de VPU en la columna más afectada (T1P28) con el objetivo de evaluar la uniformidad del hormigón en todo el espesor del elemento, así como para determinar el espesor del hormigón dañado por la acción del fuego. En la Figura 2(a) se puede observar el estado de la columna después del incendio, la Figura 2(b) es la representación de la VPU en la cara mayor a través de todo el espesor de la columna, y la Figura 2(c) corresponde a las lecturas de velocidad en línea en las caras mayores de la columna.

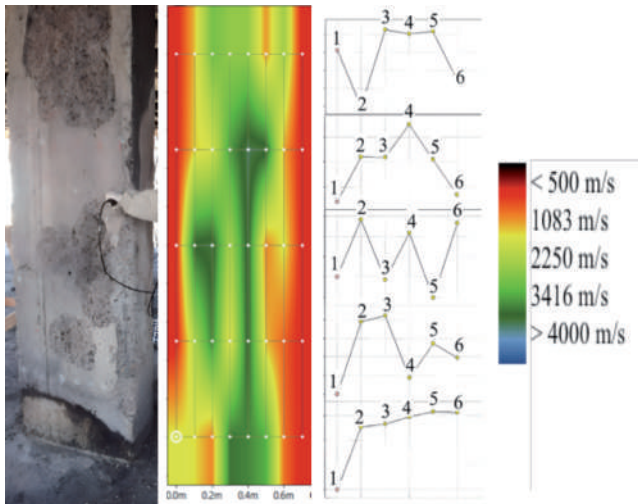


Figura 2. Estado de la columna T128 y lectura de VPU.

El máximo valor del espesor dañado se determinó a través del análisis de una serie de lecturas de VPU de acuerdo con lo descrito en ACI 228.2R-13. Con el máximo valor del espesor dañado y su correlación con la velocidad de línea Figura 2(c), se determinó el espesor dañado en cada nivel del elemento. Estos resultados son representados de forma tridimensional (Figura 7), logrando la apreciación completa del elemento, permitiendo de esta forma la elaboración del plan de reparación estructural.

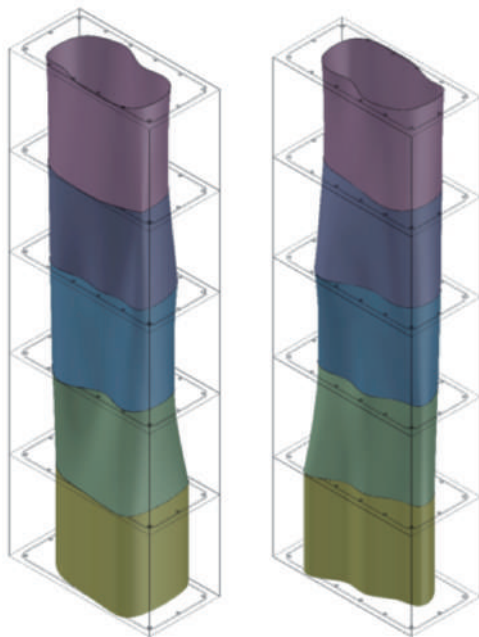


Figura 3. Porción uniforme de la columna en formato tridimensional.

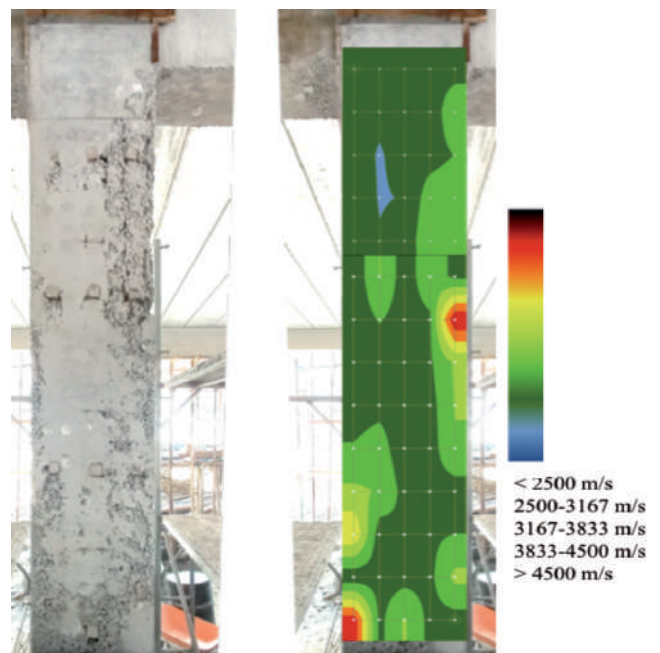
• Evaluación de uniformidad a elementos de H°A°.

Los elementos evaluados corresponden a componentes estructurales de una edificación de H°A° como son columnas, vigas y pantallas, mismas que presentaron diferentes anomalías percibidas al momento de retirar las formaletas, como son: presencia de nidos, asentamiento plástico, segregación y armaduras expuestas.

Para el documento nos limitamos al análisis de la columna que presentaba mayores afectaciones, realizando el estudio antes y después de haber ejecutado el proceso de rehabilitación estructural correspondiente.

En la Figura 4, la mayor parte de la superficie de la dimensión mayor del elemento presenta valores altos de pulso ultrasónico, correspondiendo a un hormigón con clasificación “buena”, según lo establecido en la Tabla 1. Sin embargo, existen sectores con lecturas bajas de ultrasonido, correspondiendo a un hormigón con clasificación principalmente “cuestionable”, existiendo algunos puntos localizados con una clasificación “pobre”.

Considerando que la mayor parte del elemento presenta un hormigón con clasificación “buena”, se realizaron mediciones con lecturas directas e indirectas para determinar el espesor correspondiente al hormigón segregado. En la Figura 5, se representa con bastante aproximación la situación real de la columna.



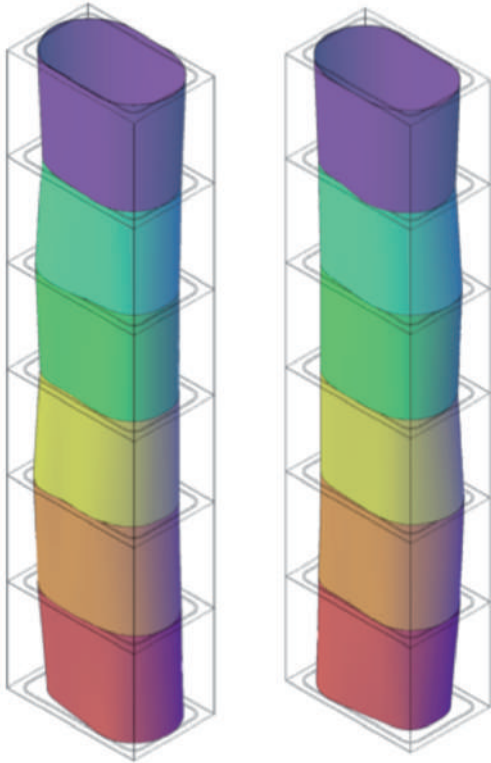


Figura 4. Anomalías en columna y mapa de VPU, antes de la rehabilitación. **Figura 5.** Porción uniforme de la columna.

Durante los trabajos de rehabilitación estructural, se evidencia la precisión a la que se ha llegado en los estudios de patología, siendo la parte media de la cara anterior y la parte inferior de la cara posterior los sectores más dañados y con mayor pérdida de sección, Figura 7.

Una vez rehabilitado el elemento se puede constatar que antes de la rehabilitación, los puntos con clasificación cuestionable tenían una velocidad de pulso promedio de 3496 m/s, luego de la rehabilitación, la velocidad de pulso promedio es de 3933 m/s, lográndose una mejora en la uniformidad de esos puntos de 13% aproximadamente.

En el caso de los puntos con clasificación pobre, antes de la rehabilitación, tenían una velocidad de pulso promedio de 2419 m/s, luego de la rehabilitación, la velocidad de pulso promedio es de 3950 m/s, lográndose una mejora en la uniformidad de esos puntos de 63% aproximadamente. Ver la Figura 6.

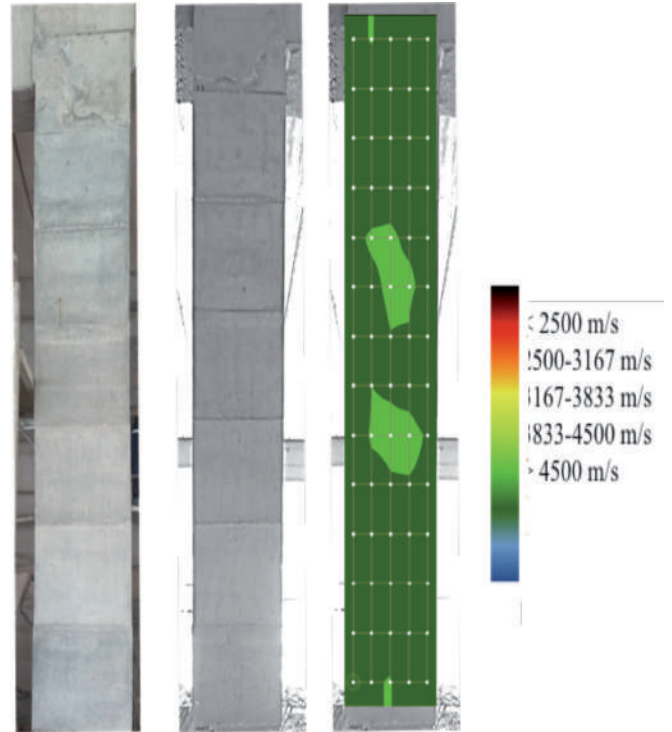


Figura 6. Estado de la columna y mapa de VPU, después de la rehabilitación.



Figura 7. Proceso de rehabilitación estructural.

• Evaluación de integridad y análisis de fisuración de un elemento de H^oA^o.

La estructura corresponde a un núcleo de H^oA^o según el esquema de la Figura 8. En varios sectores del elemento se constató la presencia de anomalías, de diverso origen, producidas en las primeras horas del hormigonado, y percibidas al momento de retirar las formaletas, las anomalías presentes fueron: asentamiento plástico, retracción plástica, segregación, presencia de nidos, armaduras expuestas y juntas frías de hormigonado.

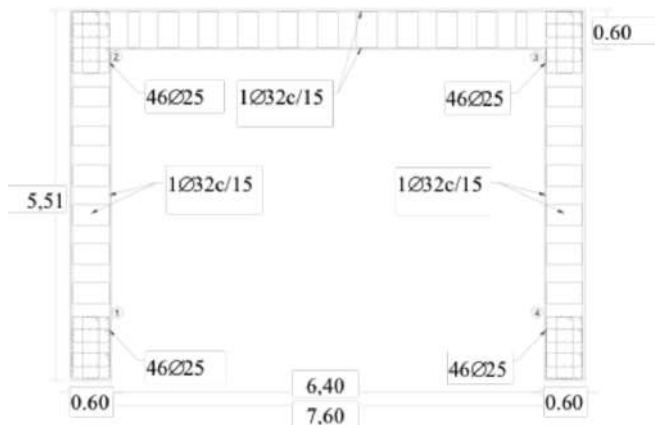


Figura 8. Núcleo de HªA°.

En el caso específico expuesto en este trabajo, se analizaron las juntas frías producidas entre niveles de hormigonado y las fisuras debido a la falta de continuidad en la superficie del elemento, ver Figura 9.

Una vez realizadas las lecturas de VPU a lo largo del eje longitudinal de las fisuras, se determinó que la profundidad máxima de fisuración es 14.7 cm y la mínima de 2.9 cm, siendo el valor medio de 7.0 cm, este valor puede ser adoptado como referencial para el resto de las fisuras.

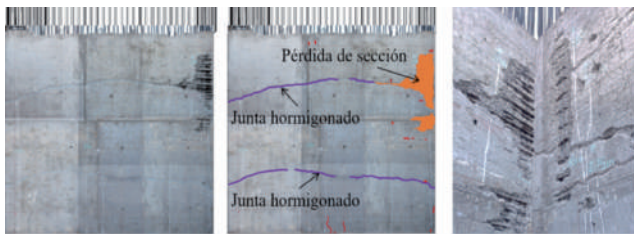


Figura 9. Anomalías en muro lateral del núcleo.

Una vez rehabilitado el elemento a través del sellado mediante la inyección de las fisuras con resina epóxica, se analizó el elemento reparado según lo establecido por Souza y Pinto (2020), quienes explican que la forma de onda ultrasónica representada por la amplitud, indica cambios en la onda de esfuerzo debido a la reflexión y refracción que ocurre en cualquier interfaz de materiales con diferentes propiedades acústicas. Es decir, una interfaz de hormigón-epoxi alteraría la forma de onda, pero no la velocidad. Por lo tanto, al analizar la forma de onda completa y su relación con la amplitud, se puede evaluar si la fisura fue correctamente reparada.

En este sentido, se determinó la amplitud de onda media del elemento y se comparó con la amplitud de onda de cada fisura evaluada a través de su eje longitudinal. En la Figura 10 se puede ver que los puntos con una amplitud por encima del valor medio del elemento habrían sido sellados adecuadamente y los que se encuentran por debajo de este valor habrían sido sellados parcialmente, esto se puede deber, entre otros aspectos, a la fluidez de la resina epóxica que normalmente permite sellar fisuras mayores a 0.5 (mm) de espesor.

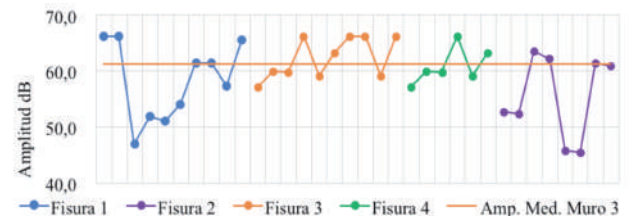


Figura 10. Amplitud de onda en fisuras.

DISCUSIÓN RESULTADOS

Los resultados de los tres casos demuestran la viabilidad del uso de END y equipos de VPU para la evaluación estructural. Estos casos corresponden a proyectos en etapa de construcción, lo que permite realizar ensayos complementarios, como calas exploratorias, para obtener una interpretación precisa de las lecturas obtenidas en los ensayos.

El manejo adecuado y la experiencia del operador en la toma de datos son de gran importancia para obtener resultados confiables, al igual que la interpretación correcta y la correlación con otros ensayos complementarios, así como la inspección de los elementos en obra, que son fundamentales para generar recomendaciones y procedimientos de rehabilitación estructural, en caso necesario.

La determinación con bastante aproximación del espesor dañado o de la sección sana de un elemento permiten tomar decisiones rápidas en obra respecto a su rehabilitación o restitución.

El análisis realizado para determinar los espesores dañados en el elemento estudiado tuvo niveles de precisión adecuados que fueron verificados durante la rehabilitación estructural.

Es importante evaluar cuantitativamente un elemento estructural rehabilitado para evitar criterios subjetivos que puedan afectar las decisiones. Esto se evidencia claramente en el tercer caso, donde se logró una mejora del 63% en la uniformidad de los sectores más afectados.

En el análisis de un elemento fisurado el método de amplitud de onda permite generar resultados satisfactorios al momento de evaluar su rehabilitación.

Los valores obtenidos en las lecturas están en concordancia con los valores establecidos en la documentación de referencia. En caso de requerir valores de referencia que reflejen resultados con materiales locales, es necesario realizar investigaciones que proporcionen la información adecuada, basada en estudios realizados en contextos similares.

CONCLUSIONES

Los ensayos de VPU son versátiles para evaluar elementos estructurales de hormigón armado. La correcta operación del equipo y la interpretación de los resultados son fundamentales para obtener información importante, que a su vez influye en la generación de planes de reparación y refuerzo estructural, adaptados a las necesidades específicas.

Las anomalías, como la segregación o la formación de nidos, pueden surgir durante los procesos constructivos. Es importante analizar las condiciones particulares del día en que se llevaron a cabo dichos procesos. El análisis de esta información permite desarrollar planes de contingencia para enfrentar eventos pasados.

Es importante tomar en cuenta que, aunque no se deseen, estos eventos pueden ocurrir. Por lo tanto, es necesario tener planes de evaluación mediante END para determinar las condiciones reales de los elementos afectados. Esto facilita el desarrollo de los mejores procedimientos de reparación estructural y también tiene un impacto en los plazos y costos finales de reparación.

Los END han experimentado un notable avance, impulsado por mejoras en la tecnología utilizada.

REFERENCIAS

- [1] **American Society for Testing and Materials (2002)**, ASTM C 597-02, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.
- [2] **American Concrete Institute (2013)**, Report on Nondestructive test Methods for Evaluation of Concrete in Structures, ACI 228, 2R-13. American Concrete Institute, EUA.
- [3] **American Concrete Institute (2001)**, Control of Cracking of Concrete Structures, ACI 224R-01. American Concrete Institute, EUA.
- [4] **American Concrete Institute (2014)**, Guide to Concrete Repair - Report by ACI Committee 546, ACI 546R-143. American Concrete Institute, EUA.
- [5] **American Concrete Institute (2009)**, Surface Repair Using Form-and-Pour Techniques - Field Guide to Concrete Repair Application Procedures, ACI RAP Bulletin 4. American Concrete Institute, EUA.
- [6] **Feldman R.F. (1977)**, CBD 187 Non-Destructive Testing of Concrete, Canadian Building Digest, Division of Building Research, National Research Council Canada,
- [7] **Malhotra V. M., Carino N. J. (2004)**, "Handbook on Nondestructive Testing of Concrete", Boca Raton, Florida, USA, cap 8, pp 8-1 - 8-19
Souza, F. C., Pinto R. C. A. (2020), Ultrasonic investigation on the effectiveness of crack repair in concrete. IBRACON Structures and Materials Journal.

DISCREPANCIAS EN EL MÓDULO DE DEFORMACIÓN LONGITUDINAL DEL HORMIGÓN IN SITU FRENTE A ECUACIONES PRESCRITAS EN LA NORMATIVA ESTRUCTURAL: CASO LA PAZ, BOLIVIA

Álvaro Sergio Gómez Conde

alvaro.cgomez@gmail.com

Fernando M. Cerruto Anibarro

fcerruto@umsa.bo

RESUMEN

El módulo de deformación longitudinal del hormigón elaborado in situ (a pie de obra), bajo dosificaciones volumétricas y características propias de la región, difiere de los valores calculados mediante las ecuaciones presentadas en la bibliografía especializada, en normas como el Código Boliviano del Hormigón Estructural NB1225001, y en estudios realizados por el IEM. Esta discrepancia genera mayores deflexiones y fisuras en elementos estructurales rígidos.

La ecuación $E_c = 2,000 \sqrt{f_c}$ para estimar el valor de “ E_c ” se adapta mejor a las condiciones de elaboración del hormigón mencionadas, contribuyendo a mitigar las deformaciones excesivas. Para ello, se prioriza el aumento del factor de rigidez “ EI ” mediante el incremento de la altura útil de la sección evaluada, compensando los valores bajos de “ E_c ”. Esta estrategia representa un ahorro económico frente a los gastos derivados de la reparación de elementos rígidos.

Cabe recordar que las prescripciones modernas a nivel internacional ya no contemplan la preparación del hormigón estructural a pie de obra. Sin embargo, en una gran cantidad de proyectos en nuestro medio, esta práctica sigue siendo habitual.

Palabras clave: hormigón, a pie de obra, módulo de deformación longitudinal.

ABSTRACT

The longitudinal deformation modulus of concrete prepared on-site (in situ), using volumetric mix ratios and regional-specific characteristics, differs from the values calculated using equations found in specialized literature or standards such as the Bolivian Structural Concrete Code NB1225001, as well as studies conducted by the IEM. This discrepancy leads to greater deflections and cracking in rigid structural elements.

The equation $E_c = 2,000 \sqrt{f_c}$ for estimating the value of “ E_c ” is better suited to the aforementioned concrete preparation conditions. It helps mitigate excessive deformations by prioritizing an increase in the stiffness factor “ EI ” through the enhancement of the effective height of the evaluated section, compensating for low “ E_c ” values. This approach results in economic savings by reducing repair costs for rigid elements.

It is worth noting that modern international standards no longer recommend preparing structural concrete on-site. However, in a vast number of construction projects in our region, this practice remains common.

Keywords: concrete, on-site preparation, longitudinal deformation modulus.

INTRODUCCIÓN

Entre las características mecánicas más importantes del hormigón se encuentran la resistencia a compresión, la resistencia a tracción, el coeficiente de Poisson y en

particular el **módulo de deformación longitudinal (E_c)**. Este parámetro regula la rigidez del material y, por ende, determina la magnitud de deformaciones que pueden experimentar los elementos de hormigón armado bajo cargas de servicio.

La literatura internacional y las normativas técnicas (ACI 318, Eurocódigo, NB 1225001) plantean ecuaciones empíricas para estimar E_c a partir de la resistencia característica a compresión. Dichas fórmulas han sido validadas en contextos donde el hormigón se produce de manera industrializada o en laboratorio, con dosificación por masa, materiales controlados y procedimientos estandarizados. Sin embargo, en Bolivia, y particularmente en la ciudad de La Paz, las condiciones de producción distan de este escenario. El hormigón se elabora **a pie de obra**, de manera artesanal, bajo **dosificaciones volumétricas**, con cemento **IP-30** con adiciones puzolánicas y con un control de calidad reducido.

Este contexto genera discrepancias significativas: mientras las normas calculan valores relativamente altos de E_c , los ensayos locales demuestran valores más bajos, que se traducen en **mayores deflexiones, fisuración y fallas prematuras** en elementos estructurales. De hecho, se ha documentado que numerosas edificaciones de mediana y pequeña magnitud en la ciudad de La Paz presentan problemas recurrentes de grietas en losas, vigas y muros, evidenciando la manifestación de este fenómeno en la práctica.



La necesidad de contar con parámetros ajustados a la realidad local motivó esta investigación, cuyo propósito es **determinar experimentalmente el módulo de deformación longitudinal de hormigones producidos in situ en La Paz y compararlos con valores normativos** y de laboratorio. A partir de ello, se plantea un criterio de diseño más coherente con la práctica constructiva de Bolivia.

METODOLOGÍA

• Enfoque de la investigación

La investigación adoptó un enfoque experimental con alcance comparativo y crítico. Se buscó analizar la magnitud de las discrepancias entre valores normativos

de E_c y valores obtenidos en condiciones reales de obra, y plantear una ecuación alternativa que represente mejor el comportamiento del hormigón artesanal local.

Selección de obras

Se identificaron seis edificaciones en ejecución en diferentes zonas de la ciudad de La Paz. El muestreo se realizó mediante un esquema aleatorio simple, garantizando que las obras representaran condiciones típicas de construcción: viviendas unifamiliares, edificaciones medianas y estructuras en ladera. La selección respondió a criterios de accesibilidad, diversidad de condiciones ambientales y materiales utilizados.

Obtención de probetas

Se enmoldaron probetas cilíndricas de 15x30 cm con el hormigón producido en obra. El procedimiento siguió una secuencia estandarizada: recolección del material fresco, moldeo en cilindros metálicos, vibrado manual, desmoldado y curado. Una parte de las probetas se curó en laboratorio y otra parte bajo condiciones de obra, con el fin de evaluar el efecto del curado en el E_c .

Ensayos aplicados

Se realizaron los siguientes ensayos normalizados:

- **ASTM C39/C39M - NB 639:** resistencia a compresión.
- **ASTM C469-02:** módulo de deformación longitudinal y coeficiente de Poisson.

Las edades de ensayo fueron 7, 28 y 56 días, siguiendo los criterios establecidos en normas internacionales.

Definición de variables

Se analizaron:

- Resistencia a compresión (f_{cm} , $f_{ck,est}$, $f'_{c,est}$).
- Módulo de deformación longitudinal (E_{cm} , E_c,est).
- Coeficiente de Poisson (μ).

El tratamiento estadístico de datos siguió el criterio 2 de la **ACI 214** y se aplicaron modelos de regresión con

software EViews7 para corroborar correlaciones.

Comparación con normas y estudios previos

Los valores obtenidos fueron contrastados con:

Ecuaciones para estimar E_c	E_c según norma [Mpa]	E_c investigación IEM 2012[Mpa]	E_c investigación IEM 2022[Mpa]
CBH 87	$9,500 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}}$	$6,00 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}}$	$5,900 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}}$
NB 1225001	$3,830 \cdot \sqrt{f'_c}$	$3,830 \cdot \sqrt{f'_c}$	$3,580 \cdot \sqrt{f'_c}$
ACI 318	$4,700 \cdot \sqrt{f'_c}$	$3,830 \cdot \sqrt{f'_c}$	$3600 \cdot \sqrt{f'_c}$

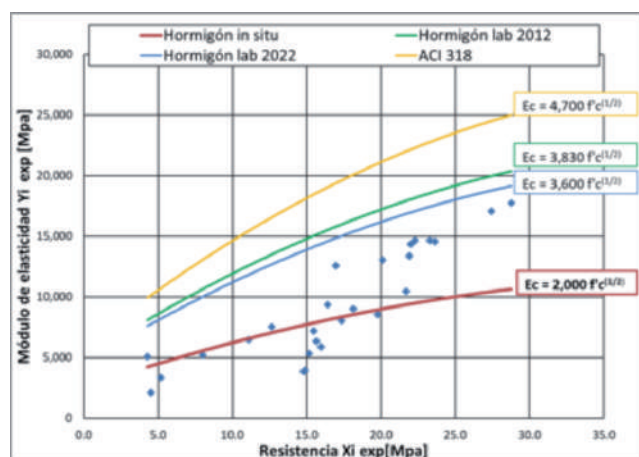
RESULTADOS

Los resultados experimentales confirman la hipótesis inicial del estudio: los modelos normativos sobrestiman la rigidez del hormigón artesanal producido localmente.

A partir de los datos experimentales obtenidos, la ecuación más representativa es:

$$E_c = 2,000 \cdot \sqrt{f'_c}$$

El análisis de la dispersión gráfica de los resultados corrobora que esta curva se ajusta mejor al valor promedio real de los datos experimentales. Por el contrario, las ecuaciones propuestas en las normativas y en estudios previos del IEM de los años 2012 y 2022 se sitúan consistentemente por encima del rango experimental.



Por otra parte, el coeficiente de Poisson (μ) se situó entre 0.14 y 0.20, en concordancia con referencias internacionales, lo cual sugiere que la principal diferencia en las propiedades mecánicas del hormigón local se concentra en el E_c .

Aplicación es un elemento estructural

En una aplicación de cálculos de esfuerzos en una viga estructural de una edificación, cambiando solamente el valor de E_c de la norma NB1225001 y la ecuación planteada para hormigones elaborados en pie de obra, se obtienen resultados por demás impactantes.

La Razón Modular $n = E_s/E_c$, cambia de $n=11$ a $n=21.5$. Las implicaciones de esta diferencia de valores significan que el acero tomará mucho mayor esfuerzo que el hormigón, en una relación de 21.5:1, y no de 11:1 para el caso de E_c de la norma NB1225001.

Ya en el elemento estructural, esto significa que, en la etapa de servicio de la estructura, el hormigón de la viga resistirá significativamente un menor esfuerzo al calculado utilizando otras ecuaciones para estimar E_c . Para esto se debe realizar los cálculos adecuados.

Inadecuado curado del hormigón

Se determinó que el curado inadecuado del hormigón provoca una disminución del valor de E_c experimental en un 47.1%. Esto significa que el módulo de elasticidad se reduce casi a la mitad de lo que podría alcanzar bajo condiciones óptimas de curado y un estricto control de calidad.

DISCUSIÓN

Los resultados de esta investigación invitan a una reflexión profunda sobre las diversas dimensiones de la problemática.

Impacto técnico

El uso de valores normativos de E_c en el diseño estructural en La Paz conduce a modelos de cálculo que **subestiman las deformaciones reales**. Esto genera:

- Deflexiones excesivas: vigas y losas presentan flechas superiores a las previstas, comprometiendo la funcionalidad de los espacios y la estética arquitectónica.
- Fisuración recurrente: como se observa en fotografías, grietas en muros, losas y uniones viga-columna responden directamente a la baja rigidez real del hormigón.

- Modelos estructurales irreales: softwares de diseño como SAP2000, al utilizar valores por defecto de E_c , simulan estructuras más rígidas de lo que realmente son. Esto impacta especialmente en análisis sísmicos y de cargas de servicio.

Dimensión económica

Los errores derivados de la sobreestimación de E_c se traducen en **costos adicionales** para los propietarios y constructores. Las fisuras y deformaciones requieren reparaciones periódicas, con intervenciones superficiales que no atacan la raíz del problema. El ajuste de los diseños considerando un E_c más bajo permite prevenir estos gastos, mejorando la economía del ciclo de vida de las estructuras.

Un recurso efectivo es compensar la baja rigidez del hormigón aumentando la **altura útil (h)** de los elementos estructurales, lo cual incrementa el producto EI (rigidez flexional). Esta medida permite mitigar los efectos de un E_c reducido, garantizando seguridad y reduciendo costos de mantenimiento.

Realizando este incremento de altura útil de las secciones estructurales, el presupuesto incrementa 2% aproximadamente. Sin embargo, este costo incrementado es definitivamente mucho menor a tener que realizar reparaciones superficiales periódicas, y menor aún que realizar una reparación estructural cuyos costos son muy elevados.

¿Qué ecuación utilizar?

internacionales no son adecuadas para la realidad local, dadas las particularidades en la elaboración del hormigón.

En la etapa de diseño y prediseño, no es prudente descartar ninguna de las ecuaciones, ya sea la planteada en la NB1225001 (derivada de la investigación del IEM de 2012), la del estudio del IEM de 2022 o la propuesta en este artículo. La elección de la ecuación más apropiada para estimar el valor de E_c debe basarse en los niveles de control previstos para la obra. Entre los factores a considerar se incluyen:

- Envergadura del proyecto.
- Forma de fabricación del hormigón: hormigón premezclado, hormigón fabricado in situ con dosificación por masa, hormigón elaborado in situ

con dosificación 1:2:3, hormigón elaborado con mezcla manual.

- Nivel de formación profesional del constructor.
- Presencia de supervisión calificada.
- Tipo de curado previsto para la obra.
- Etapa del proyecto: diseño (estimación de un valor de E_c) o ejecución (verificación del valor E_c). Norma vigente.

Se recomienda enfáticamente que la ecuación utilizada para la estimación del valor de E_c se especifique de manera clara tanto en la memoria de cálculo como en los planos de diseño estructural.

Diseño Vs Control

En la etapa de diseño, se debe seleccionar un valor de E_c a partir de las ecuaciones presentadas, tomando en cuenta los criterios de control previamente indicados. Como profesionales del cálculo estructural, cuanto más cerca se esté de la realidad de la futura ejecución, más preciso será el comportamiento estructural previsto en relación con las tensiones en los elementos.

Es fundamental determinar experimentalmente el valor de E_c del hormigón de la obra durante la etapa de ejecución. Para ello, se recomienda realizar los ensayos necesarios antes o durante la construcción. Este proceso permite verificar la adecuación de la ecuación de E_c utilizada para la estimación inicial en la fase de diseño. En caso de que los valores experimentales difieran significativamente de los estimados, el diseño estructural puede optimizarse para asegurar que la estructura se comporte de acuerdo con las consideraciones iniciales de prediseño y diseño.

Esta optimización no solo previene los problemas estructurales mencionados, sino que también evita gastos económicos en la reparación de defectos. La integración de estos procedimientos permite aplicar los conocimientos profesionales para mejorar significativamente la calidad de la construcción en la sociedad.

Implicaciones del inadecuado curado del hormigón

Como se observó en los resultados, el inadecuado curado del hormigón reduce el valor de E_c experimental en prácticamente a la mitad que un hormigón con niveles óptimos en el curado. Esto tiene implicaciones significativas.

- Si al hormigón fabricado con bajos niveles de control y por lo tanto bajos valores en sus características mecánicas, se añade un inadecuado curado, el valor de E_c en particular reducirá más aún, provocando problemas futuros.
- Por otra parte, si utilizamos hormigón premezclado proporcionado por algunas de las varias empresas nacionales, y este hormigón recibe un mal curado en obra, los resultados en el valor de E_c serán similar a las de un hormigón elaborado artesanalmente a pie de obra y con dosificaciones volumétricas.

Nuevamente, mencionar la importancia del curado del hormigón.

Un factor importante del hormigón premezclado

De esta investigación, también se observó que las empresas de hormigón premezclado tienen una ventaja en cuanto a calcular el valor de E_c .

Las empresas de hormigón premezclado poseen una ventaja distintiva en la determinación del valor de E_c .

Estas empresas realizan múltiples ensayos para verificar que la resistencia característica del hormigón cumpla con las especificaciones del cliente. Por lo tanto, también pueden llevar a cabo el ensayo del Módulo de Deformación Longitudinal y utilizar este dato, con un tratamiento estadístico apropiado, en la etapa de diseño. Este valor sería estadísticamente similar al módulo de deformación que se obtendría en la etapa de ejecución. Sin embargo, es fundamental recalcar que no se debe omitir la necesidad de verificar el valor de E_c mediante ensayos experimentales directamente en la obra durante la etapa de ejecución.

Problemática nacional

Aunque esta investigación se centró en la ciudad de La Paz, la temática abordada requiere un análisis, evaluación y discusión más amplios a nivel nacional, dado que las características de elaboración del hormigón varían significativamente en las diferentes regiones del país. No obstante, muchos de los criterios y hallazgos aquí presentados podrían aplicarse a nivel nacional e, incluso, considerarse para su inclusión en las normativas vigentes.

REFERENCIAS

- [1] **Cerruto, F. (2009).** Introducción al diseño de mezclas de hormigón. UMSA.
- [2] **American Concrete Institute (ACI). (2019).** Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19). ACI.
- [3] **Instituto de Ensayo de Materiales - IEM. (2012).** Relación entre el módulo elástico y la resistencia a compresión en hormigones elaborados con cemento Viacha IP-30. UMSA.
- [4] **Instituto de Ensayo de Materiales - IEM. (2022).** Relación entre el módulo de deformación longitudinal y la resistencia a compresión de hormigones elaborados con tres marcas de cemento tipo IP disponibles en la ciudad de La Paz. UMSA.
- [5] **Norma Boliviana del Hormigón Estructural (NB 1225001). (2018).** Instituto Boliviano de Normalización y Calidad.
- [6] **Código Boliviano del Hormigón (CBH-87). (1987).** Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

ESTUDIO DE MORTEROS DE JUNTA ELABORADOS CON ARENAS DE MALLASA Y CHACOMA, CON DIFERENTES CONDICIONES DE HUMEDAD Y DOSIFICACIONES BASADAS EN LA ASTM C 270

Edwin Huanca Mamani
ehuanca154@gmail.com

Ismael Franklin Apaza Kapa
Ismapop17@gmail.com

Erick Rodrigo Leños Poquechoque
erickle201412@gmail.com

Javier Quispe Huanca
javierqh26gmail.com

Verónica Gallardo Tapia
vgallardo@umsa.bo

Jorge Echazú Cortez
jchazuz@umsa.bo

RESUMEN

La investigación tiene como objetivo evaluar la influencia de la humedad de las arenas de Mallasa y Chacoma en las propiedades mecánicas de morteros de junta con dosificaciones basadas en la norma ASTM C270. Se prepararon mezclas de mortero con arenas con tres porcentajes de humedad, cemento Viacha IP30 y Cal Collana para determinar su resistencia a compresión; asimismo se evaluó la adherencia de las mezclas estudiadas al ladrillo cerámico. De manera general se puede indicar que, a mayor contenido de humedad de la arena, la resistencia a compresión se incrementa para la arena con mejores propiedades (Mallasa); en tanto que para la otra arena (Chacoma), es el contenido de humedad que genera el mayor esponjamiento, el que produce también la mayor resistencia. Se recomienda una profundización de la investigación para el caso de la adherencia. Los resultados hallados permiten obtener dosificaciones optimizadas desde el punto de vista técnico y económico, para morteros tipo M, N, S y O.

Palabras clave: arena, humedad de la arena, mortero de junta, resistencia a compresión, adherencia

ABSTRACT

The objective of this research is to evaluate the influence of the moisture content of sands from Mallasa and Chacoma on the mechanical properties of masonry mortars, with mix designs based on ASTM C270. Mortar mixes were prepared using sands with three different moisture percentages, Viacha IP30 cement, and Collana lime to determine their compressive strength; in addition, the adhesion of the studied mixes to ceramic brick was evaluated. In general, it can be stated that a higher moisture content of sand increases compressive strength for the sand with better properties (Mallasa), while for the other sand (Chacoma), the moisture content that generates the most bulking also results in the highest strength. Further research is recommended regarding adhesion. The findings allow for technically and economically optimized mix designs for mortar types M, N, S, and O.

Keywords: sand, moisture content of sand, masonry mortar, compressive strength, bond strength

INTRODUCCIÓN

En la industria de la construcción, los morteros de junta desempeñan un papel fundamental en la estabilidad y durabilidad de las estructuras de mampostería. La calidad

de esos morteros depende de diversos factores, entre los cuales destacan, las propiedades de la arena utilizada.

En el Instituto de Ensayo de Materiales (I.E.M.), dentro de la línea de investigación “Optimización de Materiales

de Construcción” se han llevado a cabo diversas investigaciones previas relacionadas con este material. Se desarrollaron caracterizaciones de morteros de junta utilizando arena proveniente de Mallasa y Chacoma (Quispe & Oropeza, 2011), arena de Chuquiaguillo (Apaza, 2012) y arena de Vilaque (Ramirez, 2012). En estas investigaciones se han determinado dosificaciones optimizadas para los diferentes tipos de morteros especificados en la norma internacional ASTM C270: Tipo O, Tipo N, Tipos S y Tipo M (ASTM, 2014). Como es sabido, esos morteros se distinguen por su resistencia a compresión, lo que a su vez determina sus aplicaciones específicas. La norma indicada, hace referencia al uso de arena en estado húmedo y suelto (“damp”), lo cual implica que tiene algo de humedad, pero no está “mojada” (ASTM, 2014).

El estudio tiene como propósito principal investigar el comportamiento mecánico y adherente de los morteros de junta elaborados con arenas de las zonas de Mallasa, en la ciudad de La Paz y Chacoma en la ciudad del El Alto, analizando el impacto de diferentes contenidos de humedad de esas arenas y varias dosificaciones sugeridas por la Norma de referencia (ASTM, 2014). La elección de las arenas mencionadas, se basa en su disponibilidad local y en investigaciones previas que mostraron a esas arenas como las de mejor (Mallasa) y peor (Chacoma) desempeño para ese propósito (Quispe & Oropeza, 2011).

Hasta ahora, en las investigaciones realizadas en el I.E.M. se ha utilizado arena húmeda natural o “seca al aire”. En este nuevo proyecto se estudió el comportamiento de los morteros elaborados con arenas en tres diferentes condiciones de humedad: 1%, 6% y 11% para la arena de Mallasa y 2%, 6% y 10% para la arena de Chacoma. Estos valores fueron seleccionados de acuerdo a la variación del volumen de la arena en función a su humedad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Además de las arenas indicadas en el acápite precedente, los materiales a utilizarse en la elaboración de los morteros fueron: cemento Viacha IP-30 y Cal Collana. Los ensayos de adherencia se efectuaron en ladrillos cerámicos de 6 huecos de la marca INCERBO. En cuanto a las normas de métodos de ensayo utilizadas para los ensayos de resistencia a compresión a la edad de 28 días y adherencia a esa misma edad, estas fueron la NB 470 (IBNORCA, 2015), y ASTM C1583 (ASTM,

2004) respectivamente. Los ambientes, equipos y dispositivos auxiliares utilizados en el proyecto fueron los disponibles en los laboratorios del Área de Materiales del I.E.M. La selección de los porcentajes de humedad de las arenas estudiadas se efectuó en base a las curvas Contenido de humedad vs. Volumen (esponjamiento) que se muestran a continuación para cada arena:

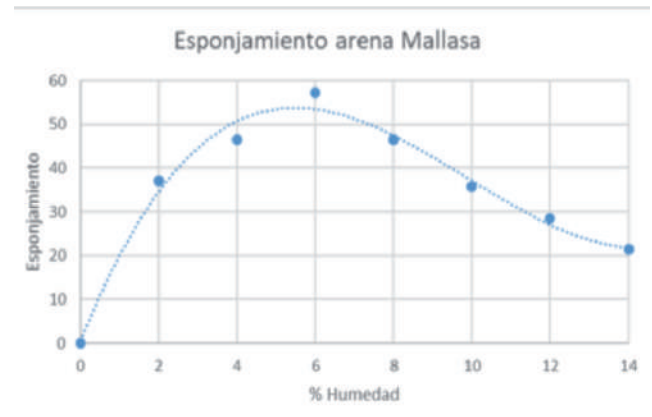


Figura N°1: Curva de esponjamiento para la arena de Mallasa

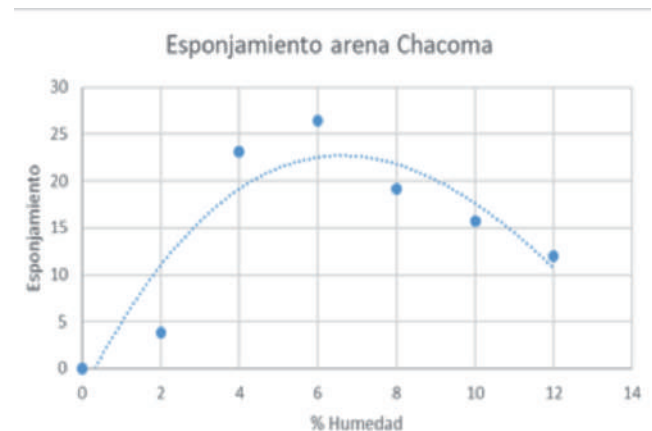


Figura N°2: Curva de esponjamiento para la arena de Chacoma

Fuente: Elaboración propia

El diseño experimental usado para la resistencia a compresión en la investigación fue un diseño ANOVA factorial con dos factores:

- el tipo de dosificación, con 10 niveles (representado por los contenidos de cemento:cal:arena).
- el contenido de humedad de la arena, con 3 niveles.

Se realizaron tres repeticiones como se muestra a continuación:

N° de Dosif.	Proporción por volumen	Humedad % 1	Humedad % 2	Humedad % 3
1	1:0:3	rep 1 rep 2 rep 3	rep 1 rep 2 rep 3	rep 1 rep 2 rep 3
2	1:0:4	rep 1 rep 2 rep 3	rep 1 rep 2 rep 3	rep 1 rep 2 rep 3
3	1:0:5	rep 1 rep 2 rep 3	rep 1 rep 2 rep 3	rep 1 rep 2 rep 3
4	1:0:0.25	rep 1 rep 2 rep 3	rep 1 rep 2 rep 3	rep 1 rep 2 rep 3
5	1:0.25:3	rep 1 rep 2 rep 3	rep 1 rep 2 rep 3	rep 1 rep 2 rep 3
6	1:0.5:4.5	rep 1 rep 2 rep 3	rep 1 rep 2 rep 3	rep 1 rep 2 rep 3
7	1:0.75:5	rep 1 rep 2 rep 3	rep 1 rep 2 rep 3	rep 1 rep 2 rep 3
8	1:1.25:6.75	rep 1 rep 2 rep 3	rep 1 rep 2 rep 3	rep 1 rep 2 rep 3
9	1:1.5:8	rep 1 rep 2 rep 3	rep 1 rep 2 rep 3	rep 1 rep 2 rep 3
10	1:2.5:7.5	rep 1 rep 2 rep 3	rep 1 rep 2 rep 3	rep 1 rep 2 rep 3

Figura N°3: Diseño del experimento
Fuente: Elaboración propia

La adherencia de los morteros estudiados fue determinada solamente para la tercera repetición de cada dosificación. La Figura N°4, muestra los tipos de probetas utilizados para cada ensayo: cubos vaciados en moldes, para la resistencia a compresión y, pastillas cilíndricas vaciadas en la superficie de un ladrillo cerámico, para la adherencia.

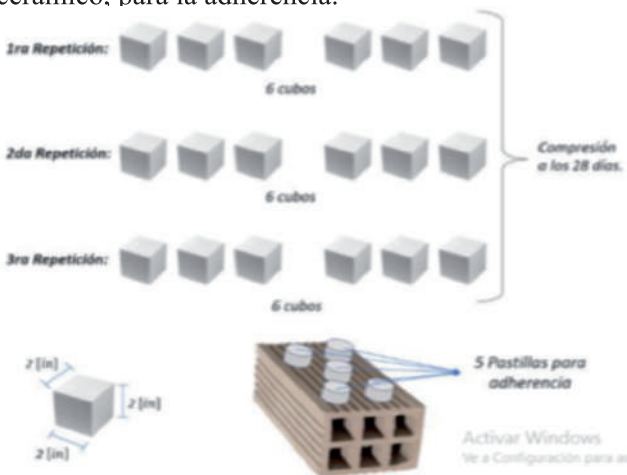


Figura N° 4: Tipos de probetas para los ensayos principales
Fuente: Elaboración propia

Las Figuras a continuación muestran fotografías del vaciado y subsiguiente procesado de probetas cúbicas para la resistencia a compresión en base al método de la norma nacional NB 470 (IBNORCA, 2015).



Figura N°5: Preparación para el amasado del mortero
Fuente: Elaboración propia

Las amasadas se prepararon con dosificaciones realizadas en peso. Para la conversión de las dosificaciones especificadas en la norma por volumen, se determinaron cuidadosamente los pesos unitarios de cada uno de los materiales cementantes y, para las arenas, se hallaron los pesos unitarios con cada uno de los contenidos de humedad.



Figura N°6: Conservación de las arenas para garantizar el contenido de humedad
Fuente: Elaboración propia

El contenido de humedad de las arenas fue rigurosamente garantizado mediante su almacenamiento en bolsas herméticamente cerradas hasta el momento del vaciado.



Figura N°7: Determinación de la fluidez del mortero
Fuente: Elaboración propia

La cantidad de agua fue controlada para obtener una trabajabilidad adecuada con el ensayo de fluidez en la mesa de flujo.

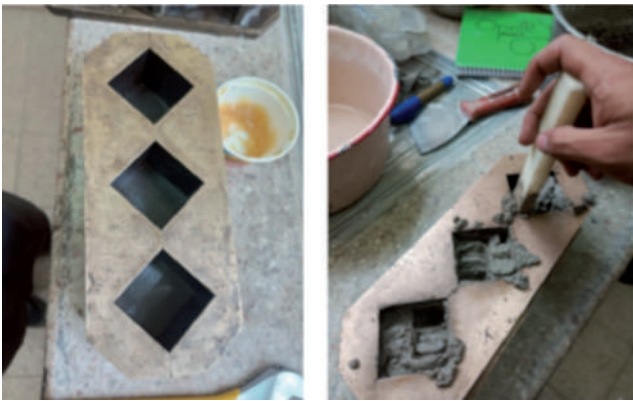


Figura N°8: Molde y compactación de las probetas
Fuente: Elaboración propia

Las probetas cúbicas fueron debidamente compactadas en los moldes siguiendo estrictamente las especificaciones de la norma de ensayo NB 470. (IBNORCA, 2015)



Figura N°9: Enrasado y curado de probetas
Fuente: Elaboración propia

Una vez enmoldadas, las probetas fueron curadas por

24 horas en una cabina con más de 95 % de humedad y temperatura regulada.



Figura N°10: Probetas listas para el ensayo
Fuente: Elaboración propia

Después de desmoldadas, las probetas fueron almacenadas en un tanque de curado con temperatura controlada hasta la edad de ensayo (28 días).



Figura N°11: Ensayo de compresión de probetas
Fuente: Elaboración propia

La resistencia a compresión fue determinada en una prensa específicamente destinada para el efecto. El ensayo de adherencia por tracción directa utilizando el equipo medidor de adhesión (“Bondtester”) de la norma internacional ASTM C 1583 (ASTM, 2004), fue realizado siguiendo el procedimiento que se ilustra en las Figuras N°12, N°13 y N°14 a continuación:

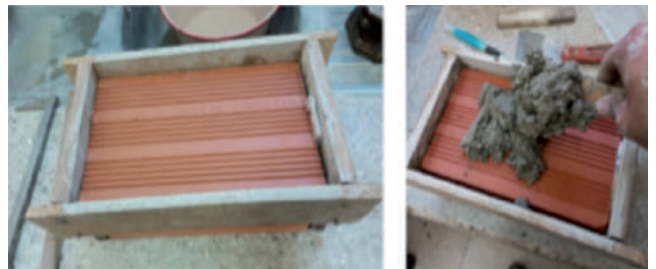


Figura N°12: Preparación de molde y vaciado de mortero
Fuente: Elaboración propia

Una vez colocado el pequeño molde de madera encima del ladrillo cerámico, se vació el mortero correspondiente a cada dosificación y se enrasó cuidadosamente.



Figura N°13: elaboración de probetas para ensayo de adherencia
Fuente: Elaboración propia

Antes de que el mortero pierda plasticidad, se elaboraron las probetas cilíndricas con ayuda de moldes hechos de tubería plástica, como se muestra en la Figura N°13.



Figura N°14: Ensayo de adherencia
Fuente: Elaboración propia

A la edad de 28 días, se tuvieron listas las probetas de ensayo y se procedió a ensayarlas con el equipo medidor de adherencia “Bondtester” que se muestra en la Figura N°14.

Resultados

• **Ensayos de Caracterización**

Los resultados de los ensayos de caracterización de los materiales utilizados se muestran en las Tablas N° 1 y N° 2 y los gráficos N°1 y N°2 a continuación:

Material	Densidad (g/cm ³)	Peso unitario (g/cm ³)
Cemento	2.82	1.08
Cal	2.45	0.73

Tabla N°1: Propiedades de los aglomerantes
Fuente: Elaboración propia

El ladrillo cerámico, de la marca INCERBO, presentó absorciones con un promedio entre 11 y 12 %.

La Tabla N°2 muestra las propiedades de las arenas estudiadas.

Propiedad	Arena Mallasa	Arena Chacoma
Peso Unitario (Kg/dm ³)	1.61 (al 1%)	1.44 (al 2%)
	1.56 (al 6%)	1.28 (al 6%)
	1.58 (al 11%)	1.41 (al 10%)
Peso Específico	2.58 (seco)	2.52 (seco)
	2.62 (sss)	2.58 (sss)
Absorción (%)	1.52	2.19
Equivalente Arena (%)	73.01	41.39

Tabla N°2: Propiedades de las arenas
Fuente: Elaboración propia

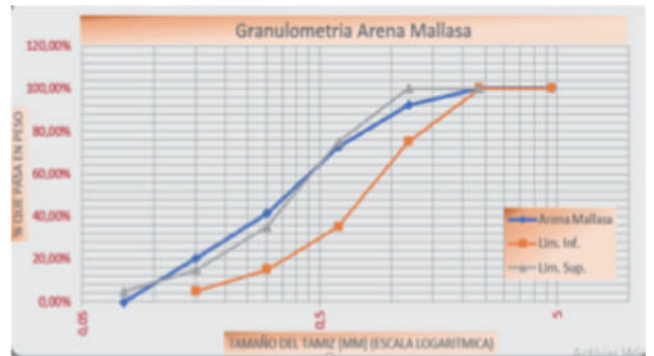


Gráfico N°1: Granulometría Arena Mallasa
Fuente: Elaboración propia

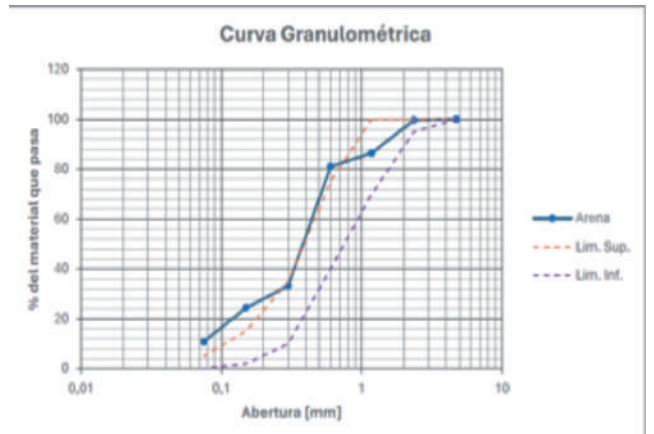


Gráfico N°2: Granulometría Arena Chacoma
Fuente: Elaboración propia

• Resultados del diseño del experimento

Los resultados de Resistencia a compresión para distintas dosificaciones y diferentes contenidos de humedad de las arenas, se muestran en las Tablas N°3 y N°4:

N° de Dosif.	Proporción por volumen	Humedad 1 %	Humedad 6 %	Humedad 11 %
1	1:0:3	11.53	14.38	15.25
2	1:0:4	6.00	7.13	8.01
3	1:0:5	3.39	4.18	4.83
4	1:0:0.25	20.11	22.9	23.61
5	1:0.25:3	13.16	14.58	14.97
6	1:0.5:4.5	5.02	6.31	6.80
7	1:0.75:5	4.46	5.09	5.10
8	1:1.25:6.75	2.44	2.72	2.99
9	1:1.5:8	1.58	2.15	2.03
10	1:2.5:7.5	1.60	2.42	2.08

Tabla N°3: Resistencias a Compresión con arena Mallasa (MPa)

Fuente: Elaboración propia

N° de Dosif.	Proporción por volumen	Humedad 2 %	Humedad 6 %	Humedad 10 %
1	1:0:3	11.44	13.59	12.02
2	1:0:4	6.93	8.49	6.67
3	1:0:5	4.73	5.71	4.37
4	1:0:0.25	17.92	19.74	18.22
5	1:0.25:3	10.59	13.01	9.42
6	1:0.5:4.5	4.50	4.99	4.60
7	1:0.75:5	4.27	4.21	3.62
8	1:1.25:6.75	2.20	2.02	1.77
9	1:1.5:8	1.78	1.67	1.39
10	1:2.5:7.5	1.64	1.75	1.41

Tabla N°4: Resistencias a compresión con arena Chacoma (MPa)

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los resultados de los ensayos de adherencia por tracción directa, estos se muestran en las Tablas N° 5 y N° 6 respectivamente.

N° de Dosif.	Proporción por volumen	Humedad 1 %	Humedad 6 %	Humedad 11 %
1	1:0:3	0.26	0.39	0.40
2	1:0:4	0.12	0.19	0.26
3	1:0:5	0.13	0.14	0.19
4	1:0:0.25	0.27	0.31	0.38
5	1:0.25:3	0.19	0.29	0.37
6	1:0.5:4.5	0.14	0.19	0.27
7	1:0.75:5	0.32	0.34	0.35
8	1:1.25:6.75	0.12	0.13	0.17
9	1:1.5:8	0.21	0.25	0.26
10	1:2.5:7.5	0.17	0.19	0.28

Tabla N°5: Adherencias con arena Mallasa (MPa)

Fuente: Elaboración propia

N° de Dosif.	Proporción por volumen	Humedad 2 %	Humedad 6 %	Humedad 10 %
1	1:0:3	0.09	0.13	0.14
2	1:0:4	0.08	0.13	0.12
3	1:0:5	0.12	0.13	0.10
4	1:0:0.25	0.12	0.09	0.11
5	1:0.25:3	0.16	0.15	0.14
6	1:0.5:4.5	0.08	0.11	0.11
7	1:0.75:5	0.09	0.10	0.12
8	1:1.25:6.75	0.11	0.11	0.10
9	1:1.5:8	0.09	0.10	0.09
10	1:2.5:7.5	0.11	0.11	0.10

Tabla N°5: Adherencias con arena Chacoma (MPa)

Fuente: Elaboración propia

DISCUSIÓN

El balance de los resultados de resistencia a compresión de los morteros estudiados puede resumirse de la siguiente forma:

- De manera general, la clasificación por proporciones, en base a la norma ASTM C 270, (ASTM, 2014) no coincide con la clasificación por propiedades; nuestros morteros presentan menores resistencias que las que corresponderían a su clasificación por proporciones. Esto se debe, sin duda, al hecho de que el peso unitario de nuestro cemento Viacha IP-30, que contiene mucha adición de puzolana, es bastante menor que el peso unitario del cemento norteamericano tipo Portland referido en la norma. Al mismo tiempo, nuestras arenas Mallasa y Chacoma, tienen pesos unitarios mayores al valor indicado en la norma de referencia.
- Exceptuando las dosificaciones con altos contenidos de cal (las dosificaciones 7, 8, 9 y 10) donde prácticamente no se detectan diferencias significativas para los diferentes contenidos de humedad de la arena, las otras dosificaciones muestran que a mayor contenido de humedad de la arena se tiende a obtener mayor resistencia, en el caso de los morteros con arena Mallasa y, en el caso de la arena Chacoma, son los contenidos con mayor esponjamiento (6% de humedad) los que proporcionan mayores resistencias.
- Como producto de esta investigación y en base a un análisis complementario de costos, se recomiendan las siguientes dosificaciones para cada tipo de mortero de la norma de referencia:

- **Mortero tipo M** (17.2 MPa) 1:0:2.25 con arena Mallasa seca al aire (equivale aproximadamente al 1% de humedad) y 1:0:2.25 con arena Chacoma en igual condición.
- **Mortero tipo S** (12.4 MPa) 1:0.25:3 con arena Mallasa seca al aire (equivale aproximadamente al 1% de humedad) y 1:0:3 con arena Chacoma parcialmente húmeda, con máximo esponjamiento (equivalente al 6% de humedad).
- **Mortero tipo N** (5.2 MPa) 1:0.5:4.5 con arena Mallasa muy húmeda (equivale aproximadamente al 11 % de humedad) y 1:0:4 con arena Chacoma seca al aire.
- **Mortero tipo O** (2.4 MPa) 1:1.25:6.75 con arena Mallasa seca al aire (equivale aproximadamente al 1% de humedad) y 1:0:5 con arena Chacoma en igual condición.

El balance de los resultados de adherencia por tracción directa, nos permite indicar lo siguiente:

- Para el caso de la arena Mallasa, se tienen resultados interesantes para la adherencia (mayores a 0.2 MPa) para el caso de las dosificaciones 1:0:2.25, 1:0:3, 1:0.25:3, 1:0.75:5 y 1:1.5:8, en todos los contenidos de humedad estudiados. Se puede ver también que casi todas las dosificaciones superan ese valor para el contenido de humedad de 11 %.
- Para el caso de la arena Chacoma, no se tienen resultados mayores a 0.2 MPa.

Por lo expuesto se recomienda profundizar la investigación en lo referente a la resistencia a la adherencia para contar con un mayor número de datos y poder obtener conclusiones confiables.

REFERENCIAS

- [1] **Apaza, H. (2012)**. Caracterización de morteros de junta con arena Chuquiaguillo de acuerdo a la especificación por proporciones de la ASTM C270. La Paz: UMSA.
- [2] **ASTM. (2004)**. C1583 Standard test method for tensile strength of concrete surfaces and the bond strength or tensile strength of concrete repair and overlay materials by direct tension (pull-off method). West Conshohocken: ASTM International.
- [3] **ASTM. (2014)**. C270 Standard specification for mortar for unit masonry. West Conshohocken: ASTM International.
- [4] **IBNORCA. (2015)**. NB 470 Cementos-Determinación de la resistencia a compresión. La Paz: IBNORCA.
- [5] **Quispe, R., & Oropeza, J. (2011)**. Caracterización de morteros de junta con arenas Mallasa y Chacoma de acuerdo a la especificación por proporciones de la ASTM C270. La Paz: UMSA.
- [6] **Ramirez, A. (2012)**. Caracterización de morteros de junta con arena Vilaque de acuerdo a la especificación por proporciones de la ASTM C270. La Paz: ASTM.

PROPUESTA DE GUÍA TÉCNICA Y METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA PREPARADA EN CALIENTE APLICADA EN FRÍO

Wilmer Chambilla Medina

wilmergowiii@gmail.com

Angela Nicole Flores Panca

angela.flores.panca@gmail.com

Ronald Farid Pérez Butrón

rfperez@umsa.bo

M. Sc. Ing. Angel Ramos Maita

aramos@umsa.bo

Ing. Claudia Kelly Endara

clau.endara@gmail.com

RESUMEN

Este estudio aborda la falta de metodologías estandarizadas para el control de calidad de mezclas asfálticas preparadas en caliente pero aplicadas en frío. Mediante un enfoque experimental que combinó trabajo de campo y laboratorio, se evaluó el comportamiento de la mezcla EZ STREET (Bacheo SRL) aplicada en tramos transitados y no transitados. Se extrajeron núcleos a diferentes edades y se elaboraron briquetas en laboratorio bajo distintos protocolos de acondicionamiento. El análisis comparativo de resultados permitió desarrollar un método de acondicionamiento que simula fielmente el comportamiento en campo. Como producto principal, se propone una guía estandarizada para la evaluación y control de calidad de este tipo de mezclas, validada mediante ensayos en lotes nuevos y almacenados.

Palabras clave: mezcla fría, metodología, adherencia, trabajabilidad, cántabro, cohesión, acondicionamiento

ABSTRACT

This research addresses the lack of standardized methodologies for quality control and evaluation of hot-prepared, cold-laid asphalt mixtures. To bridge this gap, an experimental methodology combining field and laboratory work was developed. The study involved field application of the EZ STREET asphalt mixture (supplied by Bacheo SRL) on both trafficked and non-trafficked road sections. Cores were extracted at different curing ages from these sections for performance testing. Simultaneously, laboratory specimens (briquettes) were prepared using different conditioning protocols before compaction. Comparative analysis of results from field cores and laboratory specimens enabled the development of an optimal laboratory conditioning method that accurately simulates real-world field behavior. The methodology was successfully validated through evaluation of both new and stored mixture batches. As a key outcome, this study proposes a standardized quality control and evaluation guide for this type of asphalt mixture, providing a reliable framework to ensure consistent performance of cold-laid asphalt applications.

Keywords: cold mix, methodology, adhesion, workability, Cantabrian, cohesion, conditioning

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las mezclas asfálticas preparadas en caliente y aplicadas en frío son ampliamente utilizadas en proyectos de construcción y mantenimiento vial, como el Programa Social de Pavimentación, el Mantenimiento Vial Renuevavia-El Alto, y diversas intervenciones en La Paz y Trinidad. No obstante, la

carencia de una metodología estandarizada para su evaluación y control de calidad limita la capacidad de garantizar su desempeño. Este estudio aborda esta problemática mediante el desarrollo de una guía técnica que establece un procedimiento de evaluación basado en ensayos de laboratorio, con el objetivo de optimizar el control de calidad de este tipo de mezclas.

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

El estudio se centró en el análisis de las propiedades físico-mecánicas de mezclas asfálticas mediante ensayos de laboratorio.

El proyecto se ejecutó en dos sitios de prueba seleccionados: una vía transitada y otra no transitada, con el objetivo de evaluar la influencia de la compactación generada por el tráfico vehicular. En ambos sitios se aplicó la mezcla asfáltica suministrada por Bacheo SRL (EZ STREET), de la cual se extrajeron núcleos para su análisis posterior. Dicho análisis incluyó la determinación de sus dimensiones geométricas, gravedad específica, porcentaje de vacíos, así como estabilidad y flujo.

Paralelamente, en el laboratorio se elaboraron briquetas bajo distintas condiciones de compactación, temperatura y tiempo de acondicionamiento de la mezcla. El propósito de esta fase fue establecer una metodología de acondicionamiento que simule el comportamiento de la mezcla en condiciones reales, para lo cual se compararon los resultados de las briquetas con los obtenidos de los núcleos extraídos.

Una vez definida dicha metodología, se procedió a realizar los siguientes ensayos tanto en un lote nuevo como en uno almacenado de la mezcla:

Porcentaje de Cemento Asfáltico

- Estabilidad y Flujo
- Estabilidad Retenida
- Adherencia de la Mezcla
- Trabajabilidad
- Cohesión de la Mezcla
- Tracción Indirecta
- Ahuellamiento

Adicionalmente, se caracterizaron los materiales

componentes de la mezcla asfáltica, incluyendo el agregado, el asfalto convencional y el asfalto modificado “BLEND”

METODOLOGÍA

El proyecto se desarrolló mediante una metodología estructurada en dos etapas clave.

Etapa Preliminar

Esta etapa consistió en cuatro partes:

Parte 1: Puesta en Obra “In Situ”

La primera fase consistió en la colocación de la mezcla en dos sitios distintos: una vía transitada y un área no transitada. Esta actividad fue fundamental para establecer un marco de referencia que guió todas las actividades subsiguientes.



Figura 1. Puesta in Situ sin trafico



Figura 2. Puesta in Situ con trafico



Figura 3. Puesta in Situ con tráfico de hace 5 años

Parte 2: Extracción de Núcleos y Ensayos

Una vez concluida la puesta en obra, se procedió a la extracción de núcleos de la mezcla asfáltica. Estas muestras se llevaron al laboratorio para ser sometidas a una serie de ensayos, con el fin de evaluar su calidad y características físico-mecánicas in situ.

Se realizó un esquema de extracción en base a tiempos determinados para su análisis de acuerdo a la imagen a continuación

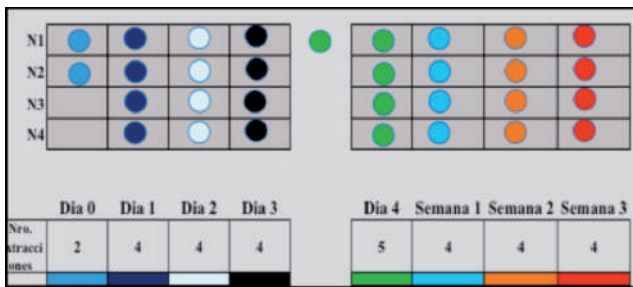


Figura 4. Esquema de extracción de la puesta en vía con tráfico

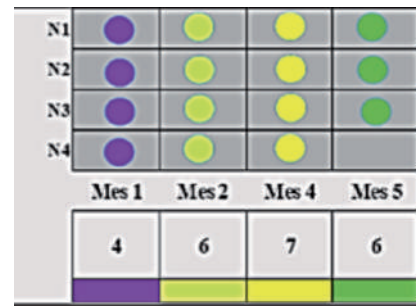
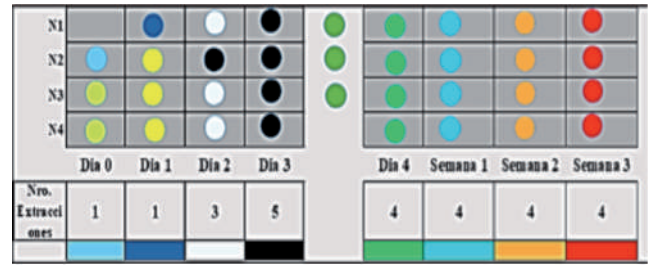


Figura 5. Esquema de extracción de la puesta en vía sin tráfico



Figura 6. Esquema de extracción de la puesta en vía sin tráfico imagen real

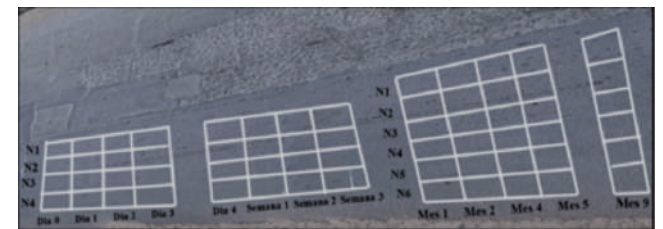


Figura 7. Esquema de extracción de la puesta en vía con tráfico imagen real

Parte 3: Elaboración de Briquetas y Ensayos de Laboratorio

En esta fase se elaboraron briquetas de laboratorio a partir de la mezcla asfáltica, fabricándolas bajo distintas condiciones de compactación, temperatura y tiempo de acondicionamiento. Una vez preparadas, las briquetas fueron sometidas a los mismos ensayos realizados sobre los núcleos extraídos.



Figura 8. Fabricación de briquetas en laboratorio IEM-UMSA

Golpes x cara	75	60	50	40	Golpes x cara
Temperatura					Tiempo
Ambiente	2.139	2.132	2.129	2.123	—
40° C	2.156	2.164	2.167	2.155	2 hrs
	2.170	2.156	2.149	2.155	3 hrs
	2.172	2.173	2.165	2.145	4 hrs
60°	2.216	2.202	2.191	2.189	2 hrs
	2.210	2.202	2.195	2.180	3 hrs
	2.177	2.201	2.181	2.184	4 hrs
110°	2.269	2.251	2.243	2.231	2 hrs
	2.261	2.248	2.239	2.233	3 hrs
	2.271	2.247	2.232	2.215	4 hrs
140°	2.290	2.261	2.250	2.245	2 hrs
	2.275	2.268	2.256	2.240	3 hrs
	2.266	2.249	2.234	2.238	4 hrs

Tabla 1. Esquema de acondicionamiento con diferentes golpes, temperatura y tiempos para obtención del peso específico bulk

Al igual que la tabla anterior se elaboraron diferentes briquetas para obtención de porcentaje de vacíos, espesores, estabilidad, flujo

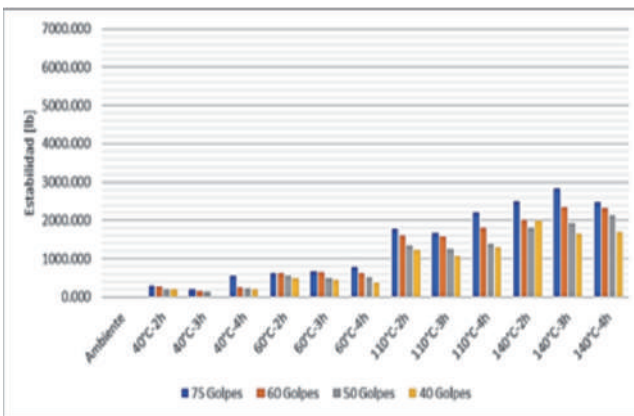


Figura 9. Resultado del ensayo de estabilidad de las briquetas elaboradas (Baño 60°C)

Parte 4: Determinación de la Metodología de Acondicionamiento

En esta parte se procesaron y analizaron todos los datos recabados en las fases anteriores. El enfoque estuvo en la interpretación de los resultados de los ensayos de laboratorio e in situ, mediante un análisis comparativo entre las briquetas y los núcleos. Este proceso permitió establecer una metodología de acondicionamiento que simula el comportamiento del material en condiciones reales.

Para establecer una metodología de acondicionamiento de la mezcla asfáltica, se consideraron las estabilidades finales obtenidas de la VIA en los diferentes tipos de condiciones (Baño 60°C, Aire 25°C y Baño 25°C). Estas estabilidades fueron determinadas a partir de las proyecciones en el análisis de los núcleos. Luego, los valores de las estabilidades finales se compararon con las estabilidades obtenidas de las briquetas fabricadas en el laboratorio.

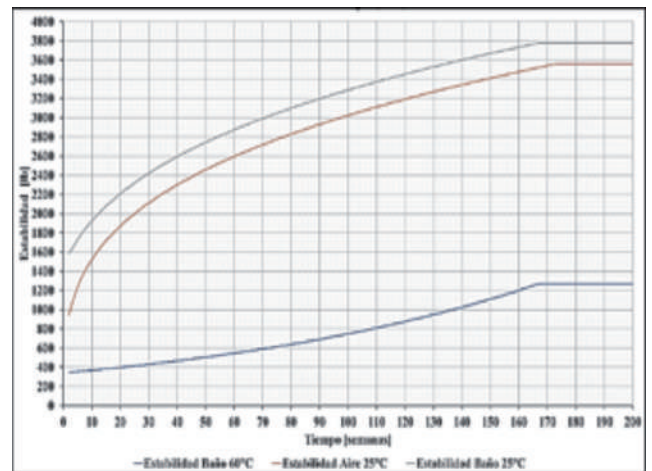


Figura 10. Estabilidades - Tiempo (VIA)

En la siguiente tabla se muestra los valores de estabilidades final para los distintos tipos de acondicionamiento (Baño 60°C, Aire 25°C y Baño 25°C) que fueron determinados a partir de las proyecciones

Tipo de Acondicionamiento	Estabilidad Final [lb]
Baño 60°C	1269.13
Aire 25°C	3559.20
Baño 25°C	3777.38

Tabla 2. Estabilidades finales para los diferentes tipos de acondicionamiento

Con las estabilidades finales podemos encontrar que metodología es la que mejor simula las condiciones reales.

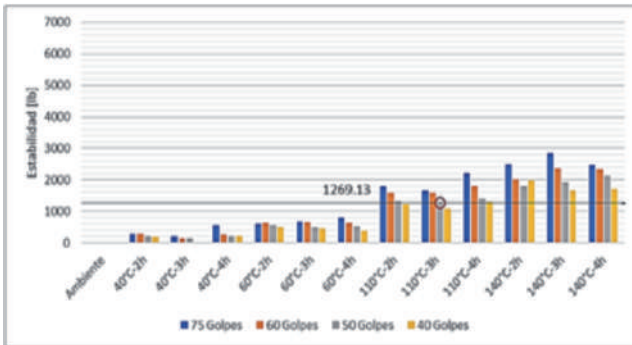


Figura 11. Determinación de la metodología de acondicionamiento de la mezcla (Baño 60°C)

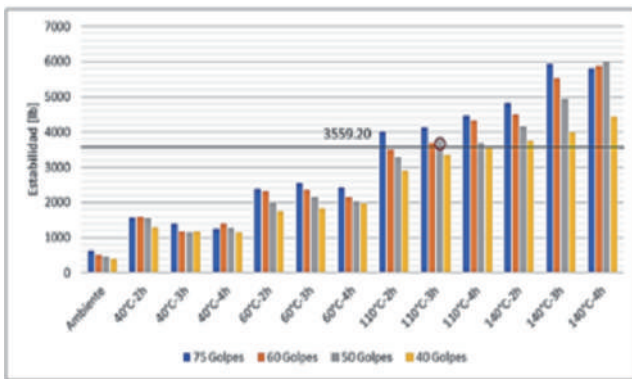


Figura 12. Determinación de la metodología de acondicionamiento de la mezcla (Aire a 25°C)

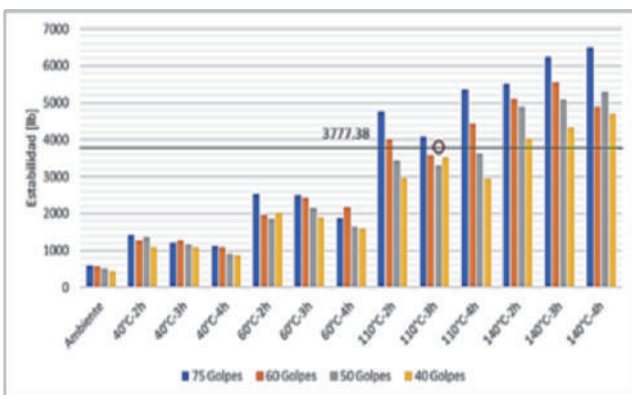


Figura 13. Determinación de la metodología de acondicionamiento de la mezcla (Baño a 25°C)

La metodología de acondicionamiento de la mezcla asfáltica que mejor simula las condiciones reales “In Situ” es la que se hizo a una temperatura de 110°C

durante 3 horas y elaborando las briquetas con 50 golpes por cara.

Temperatura de Acond. [°C]	tiempo de Acond. [hr]	Golpe por cara	tipo de Acond.	Estabilidad Promedio [lb]
110	3	50	Baño 60°C	1253.03
			Aire 25°	3766.86
			Baño 25°	3297.02

Tabla 3. Metodología de acondicionamiento encontrada

Etapas de Evaluación

Esta etapa constó de dos partes:

Parte 1: Ensayos de Evaluación

Se elaboraron briquetas aplicando la metodología de acondicionamiento determinada, las cuales fueron evaluadas mediante un conjunto de ensayos. Adicionalmente, se caracterizaron los materiales utilizados en la elaboración de la mezcla asfáltica, incluyendo el agregado, el asfalto convencional y el asfalto modificado “BLEND”.

Lote	N°	Tipo de Acond.	Estabilidad Saturada Corregida [lb]	Estabilidad Saturada Promedio	Estabilidad Marshall Promedio	Estabilidad Retenida [%]
NUEVO	1	Aire25°	3531.11	3452.91	3698.97	93.348
	2					
	3					
	4	Baño 60°	1262.39	1221.12	1648.37	74.080
	5					
	6	Baño 25°	1091.19	3214.60	3405.90	94.383
	7					
	8					
ALMACENADO	1	Aire25°	3982.20	4165.83	4595.71	90.646
	2					
	3					
	4	Baño 60°	1279.05	1265.42	1423.96	88.866
	5					
	6	Baño 25°	1214.72	3926.83	4057.14	96.788
	7					
	8					

Tabla 4. Tabla resumen de estabilidades encontradas y retenidas



Figura 14. Imagen de ensayo de adherencia de la mezcla

Lote	Nº	Evaluación cualitativa
ALMACENADO	1	99%
NUEVO	2	98%
	3	98%

Tabla 5. Evaluación cualitativa del ensayo de adherencia de la mezcla

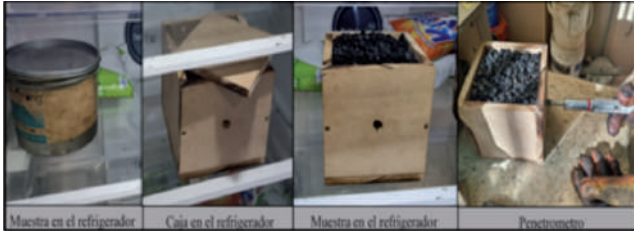


Figura 15. Imagen de ensayo de Trabajabilidad

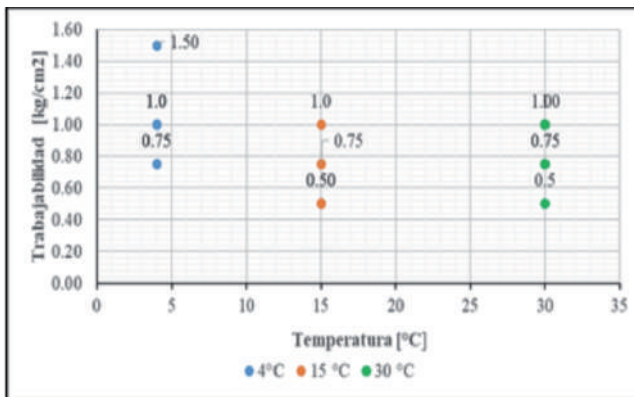


Figura 16. Trabajabilidad a diferentes temperaturas evaluadas



Figura 17. Imagen de ensayo de Cohesión

Lote	Nº	% Cohesión	Promedio
NUEVO	1	88.68	99.33
	2	91.03	
	3	91.28	
ALMACENADO	1	97.69	96.32
	2	96.13	
	3	95.15	

Tabla 6. Tabla resumen de del ensayo de cohesión de la mezcla asfáltica



Figura 18. Imagen de ensayo de cántabro en la máquina de Los Ángeles

Lote	Nº	% P	Promedio	% Cohesión cántabro	Promedio
NUEVO	1	11.75	12.74	88.24	87.26
	2	12.17		87.83	
	3	14.30		85.70	
ALMACENADO	1	6.07	5.94	93.93	90.66
	2	5.03		94.97	
	3	6.73		93.27	

Tabla 7. Tabla resumen del ensayo de cántabro de la mezcla asfáltica

Grupo	Rt[kPa] Lote Nuevo	RRT [%] Lote Nuevo	Rt[kPa] Lote Almacenado	RRT [%] Lote Almacenado
Hielo Deshielo	164.775	63.820	216.482	68.000
Humedo saturado	202.717	80.538	217.424	68.296
Seco	251.704	—	318.354	—

Tabla 8. Tabla resumen de los resultados de los grupos del ensayo de tracción indirecta

Descripción de los ensayos	Valores obtenidos en Laboratorio				Especificación ASSHTO M20	Verificación
	1	2	3	Prom.		
Peso Específico (gr/cm ³)	1.005	1.007	—	1.006	—	—
Penetración a 77°F (25°C) 100g 5s[0.1mm]	87	87	88	87	85 - 100	Cumple
Punto de inflamación (Vaso abierto de Cleveland) [°C]	292	283	—	287	Min 232	Cumple
Ductilidad de 77°F (25°C) 5 cm/min.[cm]	150+	—	—	150	Min. 100	Cumple
Punto de Ablandamiento (A y B) [°C]	45.75	—	—	45.75	—	—
Solubilidad en Tricloroetileno [%]	99.85	—	—	99.85	Min 99,0	Cumple
Viscosidad Cinemática a 135°C[cSt]	292.63	289.01	—	290.82	—	—
Viscosidad Rotacional a 135° [cSt]	207.3	194.8	—	201.05	—	—
Viscosidad Dinámica a 60° [cSt]	1093.65	—	—	1093.65	—	—

Tabla 8. Tabla resumen de los ensayos de evaluación para el cemento asfáltico convencional

Parte 2: Elaboración de Guía Técnica

Finalmente, se desarrolló una guía técnica para el control de calidad de la mezcla asfáltica preparada en caliente y aplicada en frío, basada en los resultados de la etapa de evaluación.

Dicha guía se encuentra en el documento completo de la investigación, el cual se encuentra en bibliotecas de la universidad o de la carrera.

CONCLUSIONES

- Se logró desarrollar una guía técnica que establece una metodología confiable con base en los ensayos realizados durante la etapa preliminar y la etapa de evaluación del proyecto, para la evaluación y control de calidad de una mezcla asfáltica preparada en caliente y aplicada en frío, lo cual podría mejorar la forma en que se evalúan estas mezclas en nuestro medio.
- La preparación y ejecución de tramos in situ permitió observar el comportamiento real de la mezcla aplicada en condiciones de campo, brindando información valiosa para la evaluación del desempeño de la mezcla.
- Las pruebas realizadas en las briquetas elaboradas bajo distintas condiciones de compactación, temperatura y tiempo de acondicionamiento mostraron que la variación de estos parámetros afecta significativamente las propiedades físico-mecánicas de la mezcla, destacando la importancia de un control riguroso en la fase de su elaboración.
- El análisis comparativo de los resultados obtenidos de los núcleos extraídos y las briquetas de laboratorio, permitió desarrollar una metodología basada en pruebas Marshall y de desempeño, dando como resultado una metodología de acondicionamiento de la mezcla de 110°C durante 3 horas elaborando briquetas con 50 golpes por cara, para simular el comportamiento de la mezcla en condiciones reales. A continuación, se muestra las comparaciones de estabilidades encontradas con la metodología de acondicionamiento y los resultados hallados mediante la proyección de los datos obtenidos “In Situ”.

RECOMENDACIONES

Si se requiere analizar la estabilidad y flujo en especímenes extraídos a edades tempranas se recomienda realizar el ensayo con el acondicionamiento de baño a 25°C o aire a 25°C, puesto que el acondicionamiento de baño a 60°C puede llegar a ocasionar degradación en el espécimen hasta el punto de deshacerlo. El acondicionamiento a 60°C se recomienda para especímenes extraídos a edades avanzadas (mayores a 4 meses)

Se recomienda implementar un control minucioso en planta de los materiales utilizados a la hora de elaborar la mezcla asfáltica tanto el ligante asfáltico como el agregado, ya que son factores muy importantes en el momento de su elaboración para que cumplan un desempeño adecuado

REFERENCIAS

- [1] **Ballena Tapia, C. J. (2016)**. Utilización de fibras de polietileno de botellas de plástico para su aplicación en el diseño de mezclas asfálticas ecológicas en frío. Perú: Universidad Señor de Sirpán. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.12802/2256>
- [2] **Bastidas Martinez, J. G., & Rondón Quintana, H. A. (2020)**. Caracterización de mezclas de concreto asfáltico. Bogotá, Colombia: Universidad Piloto de Colombia. Retrieved from <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/8146>
- [3] **Conde Tudela, R. H., & Mayner Machicado, N. F. (2023)**. EVALUACIÓN Y PROPUESTA DEL USO DE DIFERENTES SOLVENTES PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE ASFALTO PARA MEZCLAS EN CALIENTE. La Paz, Bolivia: UMSA. Retrieved from <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/34356>

- [4] **Dirección de Vialidad. (2012).** MANUAL DE CARRETERAS ESPECIFICACIONES Y MÉTODO DE MUESTREO, EMSAYE Y CONTROL (Vol. 8). Chile.
- [5] **Garnica Anguas, P.,** Flores Flores, M., Gómez López, J. A., & Delgado Alamilla, H. (2005). CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS. Querétaro, México: Instituto Mexicano del Transporte. Retrieved from <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt267.pdf>
- [6] **INVIAS. (2012).** SECCIONES 700 Y 800 - MATERIALES Y MEZCLAS ASFÁLTICAS Y PROSPECCIÓN DE PAVIMENTOS (PRIMERA PARTE). Colombia: INVIAS.
- [6] **INVIAS. (2017).** ESPECIFICACIÓN PARTICULAR MEZCLA ASFÁLTICA NATURAL Art. 442P. (INVIAS, Ed.) Colombia.
- [7] **Jugo B, A. (2013).** Propuesta de norma para elaboración de mezcla asfáltica almacenable, para bacheos y reparaciones de emergencia. Infraestructura Vial.
doi:<https://doi.org/10.15517/iv.v15i26.12174>
- [8] **Minaya Gonzales, S., & Ordóñez Huaman, A. (2001).** MANUAL DE LABORATORIO ENSAYOS PARA PAVIMENTOS VOLUMEN I. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería. Retrieved from https://www.academia.edu/6949871/MANUAL_DE_ENSAYOS_PARA_PAVIMENTOS
- [9] **Miranda Calderón, R. (2015).** DETERMINACIÓN DEL TIPO DE CEMENTO ASFÁLTICO SEGÚN EL GRADO DE DESEMPEÑO PARA EL DISEÑO DE LA CARPETA DE RODADURA, DE ACUERDO A LA ZONIFICACIÓN CLIMÁTICA DEL PAÍS DE GUATEMALA. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Retrieved from <http://www.repositorio.usac.edu.gt/3227/>
- [10] **Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2023).** Pavimentos Materiales, construcción y diseño (2 ed.). Bogotá, Colombia: Ecoe Ediciones. Retrieved from <https://www.ecoediciones.com/wp-content/uploads/2022/05/Pavimentos-materiales-construccion-y-diseno-contenido.pdf>

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN GESTIÓN 2025

Nº	RESPONSABLE	NOMBRE DEL PROYECTO	ÁREA
1	Msc. Ing. Oscar Luis Pérez Loayza	Análisis y evaluación de mezclas asfálticas con la adición de materiales orgánicos	ASFALTOS
2	Msc. Ing. Eliseo Jahdiel Villafuerte Oporto	Vulnerabilidad sísmica de edificios de hormigón armado en la ciudad de La Paz	PATOLOGÍA Y EVALUACIÓN ESTRUCTURAL
3	Ing. Claudia Kelly Endara Ing. Ronald Farid Pérez Butrón	Optimización en el desempeño del laboratorio de asfaltos en base a la implementación de la norma iso/iec 17025, proyecto de mejora de la calidad en la prestación de servicios	CALIDAD Y ASFALTOS
4	Msc. Ing. Gricel Alcira Portillo Miranda	Evaluación de la energía de compactación adecuada para utilizar un suelo limoso de baja plasticidad con adición de compost en una biocubierta de relleno sanitario	GEOTECNIA
5	Msc. Ing. Víctor Eduardo Bermejo Franco	Mejoramiento de un suelo arcilloso tipo "cl" existente en la urbanización sasari magisterio del municipio de Achocalla, mediante la adición de resina de pet, hojuelas de pat y cal, para su uso como subrasante	GEOTECNIA QUIMICA DE LOS MATERIALES
6	Ing. María del Carmen Cenzano Serrano Ing. Ronald Farid Pérez Butrón	Obtención de las fracciones Sara mediante la aplicación del método de cromatografía líquida de columna en asfaltos convencionales 60/70 y 85/100 sometidos a diferentes tipos envejecimiento	QUIMICA DE LOS MATERIALES
7	MSc.Ing. Verónica Tatiana Gallardo Tapia Ing. Jorge Echazú Cortez	Evaluación de morteros de junta predosificados disponibles en el mercado y optimización de una dosificación propia	MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN
8	MSc.Ing. Verónica Tatiana Gallardo Tapia Ing. Jorge Echazú Cortez	Evaluación de las propiedades mecánicas del acero de refuerzo para hormigón armado ACERBOL y de su comportamiento ante la corrosión	MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN
9	MSc.Ing. Verónica Tatiana Gallardo Tapia Ing. Jorge Echazú Cortez	Evaluación de las propiedades mecánicas del acero de refuerzo para hormigón armado Las Lomas y de su comportamiento ante la corrosión	MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN ASFALTOS
10	MSc. Ing. Ángel Ramos Maita	Bloque aligerado con hormigón celular	MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN HORMIGONES
11	Ing. Fernando Miguel Cerruto Anibarro	Propiedades de hormigón elaborado con relación gravimétrica y con dosificación gravimétrica (gestión 2025)	HORMIGONES
12	Ing. Fernando Miguel Cerruto Anibarro	Efecto de la saturación previa de los agregados en la resistencia a compresión de los hormigones	HORMIGONES

