

ENSAYOS DE DESEMPEÑO PARA UNIDAD DE REHABILITACIÓN

Segura, Luis (1); Dosantos, Eneas (2)

(1) Doctor Ingeniero; (2) Bachiller

Facultad de Ingeniería - Universidad de la República - Uruguay

lsegura@fing.edu.uy ; edosantos@fing.edu.uy

RESUMEN

En el marco de la ampliación prevista del Centro de Rehabilitación “Penal de Libertad” (N° 25) en San José, Uruguay, se ha decidido implementar la construcción de las celdas a partir de módulos prefabricados de hormigón reforzado con fibras (HRF). Esta solución busca reducir la utilización de barras de acero debido al potencial riesgo de ser utilizadas como armas blancas por parte de los reclusos. A falta de regulación específica local, se han tomado como lineamiento las normas del Comité ASTM F33 (American Society for Testing and Materials), encargado de las “Instalaciones de Detención y Correccionales” en EE. UU. (1989). Este comité tiene por objetivo desarrollar normativas relacionadas con la definición de materiales, productos y sistemas constructivos aplicados en centros de rehabilitación y detención, con el fin de establecer criterios confiables y estandarizados para el diseño y funcionamiento de este tipo de instalaciones. Tomando como punto de partida la experiencia brasilera en la construcción de centros de rehabilitación con HRF, especialmente los desarrollados por la patente Siscopen®, se buscará su adaptación a la producción local y a las exigencias normativas del comité ASTM F33. Consecuentemente, se realizaron ajustes y mejoras del anteproyecto inicial y su marco regulatorio-normativo.

ABSTRACT

As part of the planned expansion of the “Penal de Libertad” Rehabilitation Center (No. 25) in San José, Uruguay, it has been decided to implement the construction of cells using prefabricated fiber-reinforced concrete (FRC) modules. This solution aims to reduce the use of steel bars due to the potential risk of them being used as weapons by inmates. In the absence of specific local regulations, the standards of the ASTM F33 Committee (American Society for Testing and Materials), responsible for “Detention and Correctional Facilities” in the USA (1989), have been adopted as guidelines. This committee aims to develop standards related to the definition of materials, products, and construction systems applied in rehabilitation and detention centers, in order to establish reliable and standardized criteria for the design and operation of such facilities. Based on the Brazilian experience in constructing rehabilitation centers with FRC, especially those developed under the Siscopen patent, efforts will be made to adapt these practices to local production and to the standards of the ASTM F33 committee. Consequently, adjustments and improvements were made to the initial preliminary project and its regulatory framework.

INTRODUCCIÓN

Una de las problemáticas recurrentes en los centros penitenciarios en Uruguay, es la capacidad de los reclusos para elaborar armas blancas a partir de elementos constructivos o mobiliarios de las celdas. Por ejemplo, se han observado numerosos objetos punzantes fabricados a partir de las barras de acero de refuerzo del hormigón armado de las paredes de las celdas, donde los reclusos pican la pared y cortan las barras. El Ministerio del Interior se encuentra en la necesidad de ampliación de sus plazas, en uno de los centros penitenciarios más reconocidos de Uruguay. Buscando mejorar las condiciones de las nuevas celdas se busca construir unidades resistentes con poco potencial para la fabricación de armas punzantes.

En esta búsqueda intensiva, se destaca la experiencia en Brasil, con más de 94 centros penitenciarios construidos utilizando un sistema patentado de módulos prefabricados de hormigón reforzado con fibras (HRF) denominado Siscopen®. Dicho diseño estructural elimina la posibilidad de crear objetos cortantes a partir de las piezas constructivas de las unidades. A nivel mundial, el Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) ha experimentado grandes avances tecnológicos en su uso como sustituto parcial o total del refuerzo en el hormigón armado. Aunque algunos aspectos de esta tecnología todavía se encuentran en fase de investigación y desarrollo, su utilización se ha vuelto común en elementos con poco compromiso estructural como el caso de los pavimentos o sostenimiento de terrenos. A su vez, incluso localmente se está avanzando en aplicaciones de mayor responsabilidad estructural¹.

El diseño de los paneles de los módulos cumple con las normativas estructurales para edificaciones convencionales, pero es necesario cuantificar si resulta una solución efectiva a implementar en sistemas carcelarios ya que se carece de normativa específica en el país.

Por esto, resulta necesaria la consulta al Comité F33² de la norma ASTM dedicado a regular los estándares que deben tener los sistemas carcelarios en Estados Unidos. Dentro de los diferentes grupos normativos que elaboran se encuentran los requisitos que deben cumplir la estructura y el equipamiento de una celda penitenciaria para su implementación.

Para el cumplimiento de los requisitos de la ASTM, la misma establece una serie de ensayos a fin de evaluar la capacidad de los elementos que conforman la celda para resistir ataques violentos en su interior, incluyendo tanto los paneles estructurales como el equipamiento de la celda. Estos ensayos, se caracterizan por su enfoque tanto cualitativo como cuantitativo, basándose en la simulación de posibles acciones de los reclusos y ajustándose a parámetros alcanzables por seres humanos.

En este marco, el Ministerio del Interior, asesorado por la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República del Uruguay, elaboró un pliego de condiciones³ que considera los aspectos mencionados anteriormente: una estructura basada en la experiencia brasileña conformada por paneles de hormigón reforzado con fibras y los estándares de las normas americanas para el diseño de sistemas carcelarios.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y DE LOS ENSAYOS

El proyecto consiste en la construcción de una nueva Unidad Penitenciaria, N° 25, de media-alta seguridad, ubicada junto al actual Penal de Libertad en San José, Uruguay. La instalación tendrá capacidad para 1440 reclusos, con las plazas repartidas en tres subunidades iguales. Cada subunidad contará con 180 módulos, de los cuales 140 tienen capacidad para 3 reclusos por módulo y los 40 restantes tienen capacidad para 1 recluso por módulo, sumando un total de 460 plazas por subunidad. En la Figura 1, se aprecia un esquema en planta de cada subunidad.

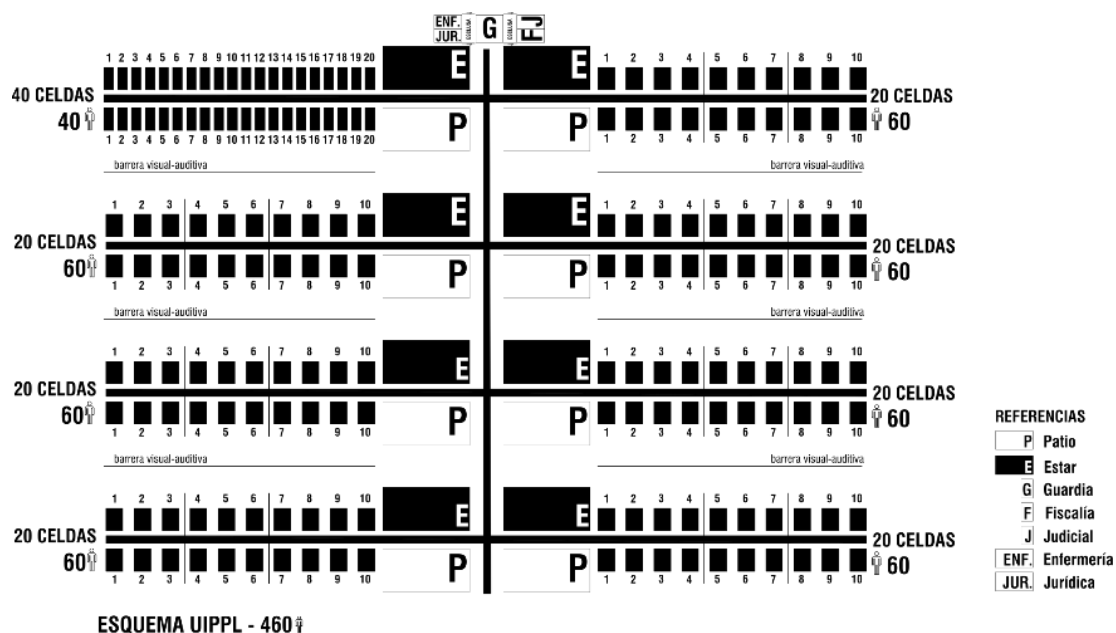


Figura 1. Esquema en planta de subunidad a ejecutar.
[Fuente: Licitación Pública N.º 26/2022³]

Cada subunidad se compone de una hilera de celdas enfrentadas con una pasarela superior destinada a la circulación y vigilancia de los guardias de seguridad. Los módulos están contruidos con paneles de hormigón reforzado con fibras plásticas (HRF) a excepción del techo que incorpora barras de acero adicionales. Cada módulo está equipado con camas, escritorio, bancos, baha de lavado y una cabina de ducha (ver Figura 2). Todo el equipamiento se fabrica con hormigón reforzado con fibras de vidrio (GRC) en una planta de prefabricados.

Para asegurar la calidad de los componentes del proyecto, se siguieron las normativas del Comité ASTM F33, que proporcionan directrices para el diseño de establecimientos penitenciarios.

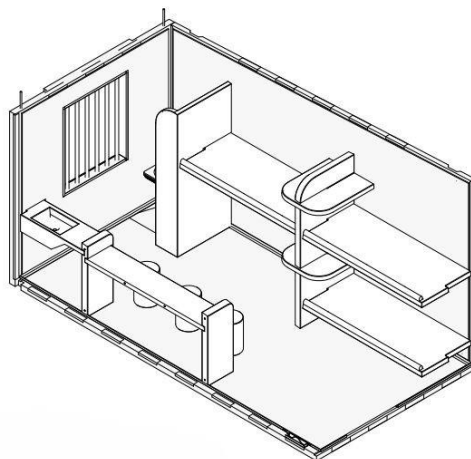


Figura 2. Ejemplo de módulo con capacidad de 3 plazas

Los ensayos se clasifican según los elementos del proyecto:

- Paneles de Hormigón Reforzado con Fibras (HRF)
- Aberturas (Puertas)
- Equipamiento de Hormigón Reforzado con Fibras de Vidrio (GRC)

Estos procedimientos buscan garantizar que las piezas cumplan con los estrictos requisitos de seguridad establecidos para establecimientos penitenciarios marcando un precedente para el control de calidad a nivel nacional. En la primera etapa, se utilizaron los ensayos para evaluar el diseño del prototipo propuesto por el consorcio a cargo de la construcción. Si cada ensayo es exitoso, se aprueba el diseño en este aspecto. En caso contrario, el elemento debe ser rediseñado y vuelto a ensayar hasta lograr un ensayo exitoso.

PANELES

El proyecto incluye varios tipos de paneles prefabricados de HRF divididos en dos categorías: paneles de techo y paneles de pared. Para evaluar los paneles de pared, se siguió la normativa ASTM F2322-12 (2019) "*Standard Test Methods for Physical Assault on Vertical Fixed Barriers for Detention and Correctional Facilities*"⁴. Para los paneles de techo, se utilizó la normativa ASTM F2697-15 "*Standard Test Methods for Physical Assault on Overhead Horizontal Fixed Barriers for Detention and Correctional Facilities*"⁵.

Paneles de pared

Ensayo de impacto - 7.2 (ASTM F2322 – 12(19))

Este ensayo, consiste en impactar una zona potencialmente frágil del panel,

seleccionada por el responsable del ensayo, con una energía especificada utilizando un dispositivo metálico con dos tipos de punta. El ensayo de impacto evalúa la capacidad del panel para resistir golpes repetitivos en puntos específicos simulando un ataque en un entorno penitenciario. Se realizan 12 series de 50 impactos cada una con dos energías diferentes: 271.2 J usando la punta *Blunt* y 135.6 J usando la punta *Sharp* (ver Figura 3). Para los ensayos en paneles sin aberturas se establecerá el punto de impacto en el centro del panel (ver Figura 4). En el caso de paneles con aberturas, el punto de impacto se determinará en la zona más desfavorable, siguiendo la recomendación de la normativa, que sugiere que sea en la esquina de la abertura.

Los tipos de punta utilizados son:

- *Blunt* (desafilada): Diámetro de aproximadamente 10 cm, se utiliza para impactos que requieren 271,2 Joules de energía produciendo un efecto más generalizado sobre el panel.
- *Sharp* (afilada): Filo más pronunciado, se utiliza con 135,6 Joules de energía, la mitad de la requerida para la punta *Blunt* generando un daño más localizado en la zona de impacto.

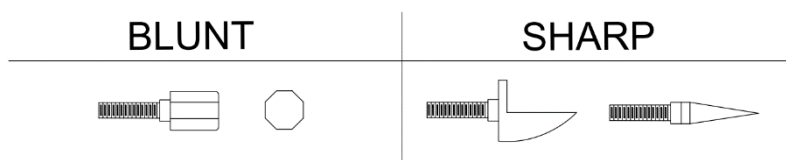


Figura 3. Tipos de punta requeridos para ensayos de impacto

Durante el ensayo se registran imágenes del daño ocasionado y se verifica que en caso de generarse una abertura pasante el tamaño no permita una “*salida forzosa*” (“*forcible egress*” según la norma). La salida forzosa se da si la abertura generada permite el paso de una caja prismática de 203 x 203 x 127 mm. En ese caso, el ensayo se considera fallido.



Figura 4. Ensayo de impacto sobre panel de pared

Paneles de techo

Ensayo de impacto - 7.1 (ASTM F2697 - 15)

La metodología es similar a la utilizada para los paneles de pared, ejecutando 12



Figura 5: Ensayo de impacto sobre panel de techo

series de 50 golpes e intercambiando el tipo de punta al finalizar cada serie. La principal diferencia, es que los impactos se aplican en tres ubicaciones del panel: la esquina, a la mitad de un borde y el centro del panel. Los golpes se realizan con la misma energía que en los paneles de pared, pero el sistema de aplicación es diferente. Para lograr el impacto en dirección ascendente, se utiliza una viga que pivotea en su punto central, con las puntas de impacto en un extremo y un contrapeso en el otro (ver Figura 5). Cada serie consiste en 50 impactos alternando entre las dos puntas. El ensayo se repite hasta completar un total de 600 impactos necesarios para cumplir con el nivel de seguridad Grado 1. Si en cualquier momento del ensayo un prisma con las dimensiones especificadas anteriormente atraviesa el panel se considera fallido.

Ensayo de carga estática - 7.2 (ASTM F2697 - 15)

El ensayo de carga estática simula un esfuerzo de empuje desde el interior de la celda hacia el exterior como si se intentara levantar el techo. Se aplica una carga puntual con un gato hidráulico (ver Figura 6) en tres ubicaciones del panel: la esquina, a la mitad de un borde y el centro del panel y se mide el desplazamiento con un comparador en la misma posición, pero ubicado externamente al panel. Se aumenta la carga en escalones iguales de 45 kg hasta llegar al grado de seguridad requerido (en este caso, Grado 1: 450 kg). Si se produce la rotura de alguna zona de unión de paneles o se observan desplazamientos no lineales significativos el ensayo se considera fallido y se rechaza la serie de paneles fabricados de la misma manera.



Figura 6. Ensayo de carga estática sobre panel de techo

PUERTAS

Las aberturas se clasifican en dos tipos: basculantes y corredizas. Para este proyecto, se prevé la utilización de puertas corredizas por lo que se siguen los lineamientos establecidos por la norma ASTM F1643-05 "*Standard Test Methods for Detention Sliding Door Locking Device Assembly*"⁶. Esta norma especifica los requisitos de instalación, mantenimiento y pruebas de desempeño que aseguran la funcionalidad y durabilidad de las puertas corredizas en diversas aplicaciones.

Ensayo de impacto horizontal - 7.2 (ASTM F1643 - 05)

Este ensayo simula un posible intento de derribar la puerta desde adentro mediante golpes. Se utiliza el mismo sistema que para los paneles de pared, empleando la punta *Blunt* y realizando la cantidad de golpes establecida según el grado de seguridad. Para el nivel de seguridad Grado 1, se deben realizar 600 golpes distribuidos en las cuatro esquinas de la puerta (150 golpes por esquina, ver Figura 7). Durante el ensayo, la puerta debe permanecer cerrada mediante su sistema de bloqueo.



Figura 7. Ensayo de impacto horizontal sobre puerta

El ensayo se considera válido si al finalizar los golpes requeridos la puerta puede abrirse sin esfuerzo y el sistema de bloqueo funciona correctamente. En caso contrario, el ensayo se considera fallido.

EQUIPAMIENTO DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE VIDRIO (GRC)

El equipamiento y mobiliario de las celdas se componen de piezas prefabricadas de hormigón reforzado con fibras de vidrio (GRC). Para evaluar estos elementos, se aplica la normativa ASTM F3277-19 "Standard Specification for Cantilevered Steel Bunks Used in Detention and Correctional Facilities"⁷. Se adoptó esta norma a pesar de haber sido concebida para evaluar equipamiento carcelario hecho de acero.

Ensayo de impacto vertical – 7.1 (ASTM F3277 – 19)

El objetivo de este ensayo es evaluar diferentes componentes del equipamiento ante dos cargas de impacto que simulan el salto de personas. Se utilizan dos sacos rellenos de balines metálicos con dimensiones específicas y un peso aproximado de 90.7 kg cada uno. Por simplicidad en la implementación del ensayo, se utilizaron agregados gruesos como relleno. Los sacos se dejan caer desde una altura determinada (45.7 cm) respecto a la placa a evaluar, debiendo permanecer a una distancia específica (91.4 cm) entre si, y posicionados en la zona media de la placa a ensayar. En la Figura 13 se aprecia un ejemplo de la configuración del ensayo.

Luego de dejar caer los sacos se retira la carga y se mide el desplazamiento en cuatro puntos distribuidos en las aristas de la placa. El ensayo se da por finalizado cuando las medidas de desplazamiento se estabilizan para una serie de golpes que lo determina el responsable del ensayo.

En el caso de elementos de hormigón, un factor diferencial es la fisuración de las piezas. Si la resistencia a la flexotracción del hormigón se alcanza durante el impacto, el material se fisura y la inercia de la sección se debilita, lo que puede causar la propagación de la fisura y dificultar la estabilización de los desplazamientos.

Ensayo de carga estática – 7.2 y 7.3 (ASTM F3277 – 19)

El objetivo de este ensayo es evaluar la capacidad del equipamiento para resistir esfuerzos que podrían realizar los internos en las celdas. Consiste en aplicar 10 escalones de carga, de aproximadamente 45 kg de fuerza cada uno, en puntos críticos y medir en la cara opuesta la deflexión asociada a cada valor. El ensayo es satisfactorio si ninguna parte del equipamiento sufre roturas, desprendimientos o movimientos no deseados.

La norma divide los ensayos de carga estática según el tipo de esfuerzo generado sobre el equipamiento:

- Carga gravitatoria en el centro de la pieza (Figura 8a)
- Carga gravitatoria en el borde de la pieza en ménsula (Figura 8b)
- Carga de izado en el borde de la pieza en ménsula (Figura 8c)
- Carga lateral en el punto más desfavorable de la pieza (Figura 8d)



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 8: Configuraciones de carga estática: (a) en el centro; (b) gravitatoria en ménsula; (c) izaje en ménsula; (d) lateral

ENSAYOS REALIZADOS

Se presentan los resultados iniciales más significativos de los ensayos mencionados anteriormente, para la implementación del proyecto local del centro de reclusión con HRF.

Ensayo de impacto horizontal sobre panel de pared con abertura de puerta

El ensayo se realizó según las bases detalladas en la sección correspondiente. El punto de impacto se ubicó en la mitad vertical del panel y a 15 cm del borde de la abertura (ver Figura 9). Esta elección se justifica por considerar un punto desfavorable debido al borde libre y una mayor luz respecto a sus puntos de anclaje.



Figura 9. Posición inicial de dispositivo de impacto a panel con abertura

Se realizó una primera serie de 50 golpes con la punta “Blunt” a una energía de 271.2 J, según la norma. Al finalizar esta etapa, se cambió el tipo de punta y se repitió el proceso presentado anteriormente hasta completar la cantidad de golpes establecidos. A medida que avanzaban los impactos, se observó un deterioro considerable en la zona de impacto y fisuras en otras zonas débiles del panel (zona posterior y bordes angulosos de la abertura).

Al llegar al golpe N°550, se generó una apertura pasante por lo que se movió el punto de impacto para seguir provocando deterioro. Finalmente, se produjo un agujero pasante con posibilidad de salida forzada (“forcible egress”), conforme a la definición previamente establecida. En la Figura 10 se observa que el prisma atravesó el panel con facilidad sin requerir esfuerzo alguno.



Figura 10. Ejemplo de apertura pasante tipo “forcible egress”

Como resultado, el ensayo se consideró fallido y se rechazó el diseño para el prototipo. Esto llevó a una readaptación del diseño estructural del panel para ajustarse a las limitaciones del pliego de condiciones, permitiendo evaluar nuevamente y corroborar que efectivamente se pueda superar satisfactoriamente el ensayo.

La empresa constructora junto con sus calculistas de referencia evaluó diferentes opciones para el rediseño estructural del panel, teniendo en cuenta que el panel sin aberturas no había tenido inconvenientes en el ensayo de impacto. Concluyeron que la mejor solución sería realizar un recrecido, incrementando el espesor 5 cm respecto al espesor general en el entorno de todo el marco de la puerta (Figura 12). Finalmente, se realizó nuevamente el ensayo sobre el panel rediseñado y, como se aprecia en la Figura 11, no se generó una abertura pasante (“forcible egress”), por lo que se dio por validado el ensayo.

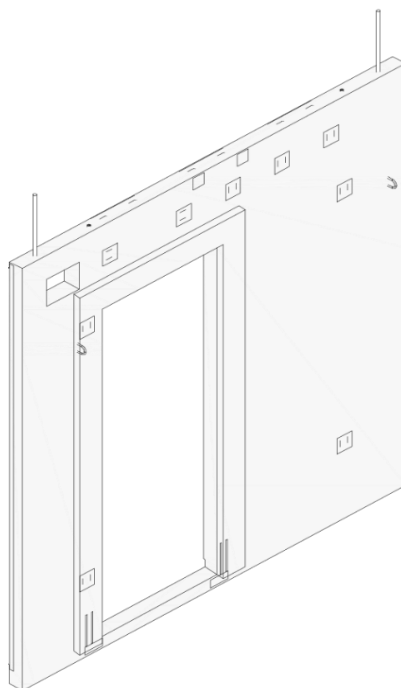


Figura 12. Rediseño de panel de pared con abertura



Figura 11. Ensayo de impacto finalizado sobre panel con abertura

Ensayo de impacto superior sobre equipamiento

Los elementos evaluados en este ensayo son las camas y las mesas de escritorio

(ver Figura 13), ya que, según los lineamientos normativos, estos elementos pueden ser dañados por saltar encima.



Figura 13. Disposición inicial de bolsas de impacto

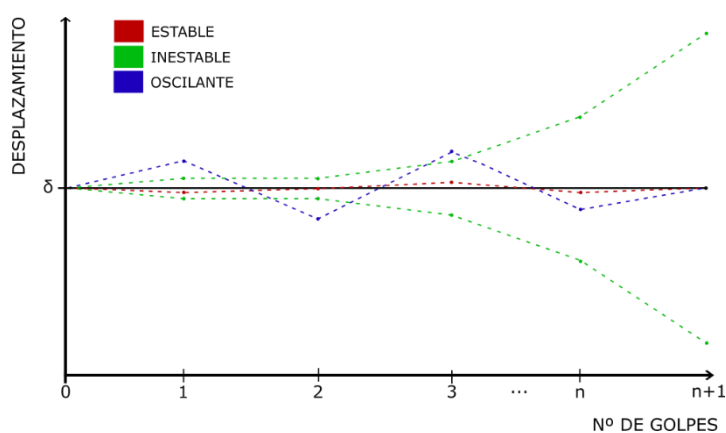
Para cumplir con los estándares normativos, el ensayo sobre una de las camas fue repetido cinco veces. Tras cada repetición, la empresa encargada de la fabricación fue ajustando el diseño estructural hasta resolver las fallas detectadas en la pieza.

A modo de ejemplo, se presenta la cronología de uno de los ensayos realizados sobre la cama:

- Medición inicial de los comparadores.
- Aplicación del Golpe N°1, retiro de la carga y medición de los desplazamientos.
- Análisis del responsable del ensayo identificando fisuras y evaluando posibles zonas debilitadas.
- Repetición del procedimiento de medición y análisis tras cada golpe, hasta que los desplazamientos se estabilicen y no se observen partes dañadas o móviles.

Se elaboró un gráfico (desplazamiento (δ) contra N.º de Golpes) para evaluar cuantitativamente la estabilización de los desplazamientos, ya que la norma deja a criterio del responsable del ensayo la definición del momento de finalización del

ensayo. Se busca que al aumentar la cantidad de golpes los valores oscilen o tiendan a una recta horizontal, indicando que los desplazamientos se mantienen en un rango aceptable respecto al desplazamiento inicial. En la Figura 14 se aprecia gráficamente el proceso del ensayo considerando los posibles comportamientos a evaluar.



*Figura 14. Gráfico δ (N.º de Golpes) del ensayo del
Ensayo de Impacto Superior*

El resultado se considera “Estable” si durante todos los impactos los desplazamientos tienden a mantenerse constante en un valor específico, dándose por validado el ensayo.

Se considera “Inestable”, cuando al aumentar la cantidad de golpes no se observa una tendencia a un valor específico y la curva es creciente o decreciente con el pasar de los golpes. En ese caso se considera fallido el ensayo.

Finalmente se considera “Oscilante”, si a lo largo del ensayo los valores de desplazamiento fluctúan por encima y por debajo de un valor específico. En este caso, si la variación de desplazamientos es menor a un milímetro se da por validado el ensayo, en caso contrario se considera fallido.

Independiente del criterio mencionado para los desplazamientos se debe verificar visualmente que la pieza no se fisure en ningún momento y, en caso de que esto suceda, que el ancho de fisura no puede supere los 0.5 mm de espesor.

Para el caso presentado anteriormente, se tienen los siguientes resultados:

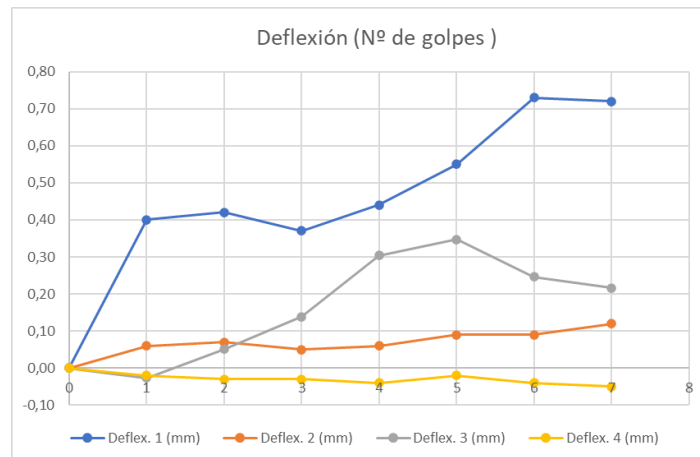


Figura 15. Gráfico Deflexión vs N° de Golpes asociado al ensayo de impacto superior

Como se observa en la Figura 15, el desplazamiento asociado al comparador N°1 (Deflex. 1 (mm)) no logró estabilizarse con el avance de los impactos, por lo que se considera “Inestable” a efectos de la clasificación previamente presentada. Además, en la Figura 16 se aprecia que en la zona adyacente al comparador N°1 se formaron fisuras que continuaron propagándose durante el ensayo, confirmando así el criterio cualitativo seleccionado.



Figura 16. Rotura generada en la pieza durante el ensayo. (a): vista general; (b): acercamiento

Ante esta situación, como se menciona anteriormente, el fabricante tuvo la necesidad de plantear un rediseño estructural en cada caso y volver a ensayar hasta que pudiera cumplir con los estándares requeridos por la norma. La cama está constituida por un sistema base y un revestimiento de GRC. El sistema base está conformado por un bloque de espuma de alta densidad reforzado con nervios. Se aplica un revestimiento multicapa de GRC para conformar la pieza monolítica. Ante las fallas detectadas, el fabricante se vio obligado a rediseñar la estructura y realizar nuevos ensayos hasta cumplir con los estándares normativos. En cada rediseño se optó por mejorar la calidad de la espuma o aumentar la cantidad de nervios para rigidizar la estructura.

CONCLUSIONES

La realización de los ensayos del Comité F33 ha sido fundamental para evaluar la resistencia y seguridad de los elementos constructivos de la nueva Unidad Penitenciaria N° 25. A pesar de que los materiales utilizados para la construcción no estaban inicialmente contemplados en el conjunto de normas, su adaptación fue exitosa y no implicó mayores dificultades. Estos ensayos permitieron validar el diseño estructural, identificar defectos y proceder al rediseño de los componentes necesarios.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Ministerio del Interior (especialmente a Leonardo Elizalde) a SACEEM (Gabriela Martínez), TEYMA (Mauricio Martínez, Juan Comesaña), CIEMSA y ASTORI (Emiliano Gascón) y todos los operarios, por su disposición y colaboración en el proyecto y los ensayos.

REFERENCIAS

1. Segura-Castillo L, García N, Figueredo D, Clavijo A, González E, Muniz B, et al. Recent FRC developments in Uruguay: Quality Control, Durability and Three Structural Applications. In: Al. PS et, ed. BEFIB2021 - RILEM Bookseries 36. ; 2022:739-748. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-83719-8_63

2. ASTM. Committee F33 on Detention and Correctional Facilities.
Recuperado el 13 de Agosto de 2024 de <https://www.astm.org/get-involved/technical-committees/committee-F33>
3. Ministerio del Interior de Uruguay. (2022) *Licitación Pública N.º 26/2022 - Anexo II D*. <https://www.comprasestatales.gub.uy/consultas/detalle/mostrar-llamado/1/id/985182>
4. ASTM. (2019). *F2322 – 12: Standard Test Methods for Physical Assault on Vertical Fixed Barriers for Detention and Correctional Facilities*.
5. ASTM. (2015). *F2697 – 15: Standard Test Methods for Physical Assault on Overhead Horizontal Fixed Barriers for Detention and Correctional Facilities*.
6. ASTM. (2019). *F1643 – 05: Standard Test Methods for Detention Sliding Door Locking Device Assembly*.
7. ASTM. (2019). *F3277 – 19: Standard Specification for Cantilevered Steel Bunks Used in Detention and Correctional Facilities*.
8. ASTM. (2019a). *F1450 – 12a: Standard Test Methods for Hollow Metal Swinging Door Assemblies for Detention and Correctional Facilities*.