

11

REPOSICIÓN DE VOLÚMENES Y PROTECCIÓN DE TALUDES EN EDIFICACIONES DEL ÁREA MAYA EN LAS TIERRAS BAJAS DE PETÉN

*Raúl Noriega
Hugo Galindo*

Las superficies exteriores de las edificaciones en el área Maya han estado expuestas durante mucho tiempo a la erosión provocada por la lluvia y el viento. El daño ocasionado ha sido progresivo y ha ido exponiendo sucesivamente nuevas superficies, dando como resultado la pérdida de volúmenes, principalmente en los taludes. Estas pérdidas en algunos casos han sido considerables y produjeron socavaciones y deslizamientos que eventualmente podrían poner en peligro la estabilidad de las edificaciones. Aún más grave es el daño que causan los buscadores de tesoros mayas con los túneles que los rompen indiscriminadamente.

La cantidad de edificios con este problema en toda el área Maya es innumerable, y el recurso destinado para su protección se reduce cada día más. Esta situación generó la necesidad de buscar alternativas para una conservación preventiva que retarde el proceso de deterioro a bajo costo, con materiales locales y de fácil adquisición o recolección. Buscando alternativas factibles de ejecutar un programa de carácter experimental, se utilizó el material recuperado en los alrededores de los edificios y el extraído en los diferentes trabajos de investigación arqueológica, dando tan buen resultado que se optó por combinar esta técnica con la tradicional. La conservación preventiva es objetivo primordial de esta actividad.

En el presente trabajo se describe la investigación desarrollada planteando el procedimiento que permita realizar esos trabajos de conservación, una propuesta de solución y además algunas experiencias en el campo, ensayando el procedimiento propuesto. Consistió fundamentalmente en definir el problema, establecer criterios para limitar la solución, formular hipótesis de apoyo, hacer algunas consideraciones para una solución preliminar, hacer ensayos de laboratorio e investigación de campo, para finalmente presentar una propuesta de solución.

El problema planteado trata de:

- a) darle estabilidad a los volúmenes nuevos (volúmenes a ser repuestos).
- b) dar continuidad (integrar) a los volúmenes nuevos con el volumen original deteriorado. Esta es la situación usual, que cobra singular importancia en edificios donde la superficie de falla es profunda.
- c) darle a los nuevos volúmenes protección contra la erosión.
- d) reestablecer volúmenes perdidos con la finalidad de interpretar fácilmente un edificio o conjunto arquitectónico.

- e) proteger los elementos originales de las inclemencias del ambiente o de la acción destructiva de hombre.

La solución que se proponga no necesita resolver el problema en forma definitiva, sino que permita detener el deterioro durante un periodo razonablemente aceptable, de unos 20 años, para que cuando haya transcurrido ese tiempo, nuevas tecnologías y recursos más abundantes permitan encontrar mejores soluciones. La solución también debe ser reversible, esto es, que permita regresar al estado actual de las edificaciones, sin causarles daño y sin tener que hacer erogaciones fuertes en tiempo y dinero. Finalmente, la solución que se proponga debe ser ecológicamente limpia y estéticamente aceptable para el entorno.

Los criterios anteriores hacen necesario reducir al mínimo la solución tradicional de reponer los volúmenes perdidos empleando piedra caliza unida con mortero de cal, mientras es una buena solución, el material utilizado no es renovable. Se descarta también el uso de técnicas más modernas como gaviones con mallas de acero o plástico por su alto costo y por ser estéticamente inaceptables. Para proponer alguna solución al problema se aceptan las siguientes hipótesis.

HIPÓTESIS DE APOYO

1. Un suelo compactado es un suelo estable que puede tener taludes con paramentos muy inclinados. Esta hipótesis ha sido confirmada en la realidad, cuando se observan suelos naturales con taludes verticales; y en la práctica, cuando con controles adecuados de compactación y contenido de humedad se han logrado construir estructuras de suelo, sin ningún refuerzo, con paramentos verticales y con alturas de varios metros.
2. Los suelos normalmente tienden a consolidarse con el tiempo. Esta hipótesis puede verificarse al observar cualquier terreno natural y en rellenos artificiales con suficiente edad.
3. Al incluirle al suelo algún tipo de fibras se incrementa su capacidad al esfuerzo cortante, ya que éstas actúan como un refuerzo tridimensional. Esta hipótesis ha sido ampliamente confirmada en la práctica, en países industrializados con el uso de fibras como las de polipropileno inerte que se comercializan con el nombre de “*Fibergrids*”, y, en los países en vías de desarrollo con el uso de fibras vegetales en la fabricación de adobe.
4. Al incluirle al suelo algún refuerzo horizontal se incrementa su capacidad de resistencia a los desplazamientos. Esta hipótesis ha sido ampliamente confirmada en la práctica con el uso de geomallas, geotextiles, etc.
5. La erosión puede controlarse en forma natural mediante la hierba y la vegetación bien plantadas.

CONSIDERACIONES PRELIMINARES

En primer lugar y congruente con lo expresado arriba, se pensó que era necesario principiar por resolver la estabilidad inicial de los nuevos volúmenes lo que podría lograrse utilizando:

- a) Refuerzo tridimensional consistente en algún tipo de fibras distribuidas en la masa, que podría ser como el zacate “*Estrella*” (*Paspalum notatum*), que ha tenido un uso difundido en la fabricación de adobe.
- b) Refuerzo horizontal colocado en capas, a distancias que dependerían de la resistencia de ese refuerzo. Este refuerzo podría lograrse con mallas fabricadas con bejuco “*Blanco*” (*Amphilophium molle*) o bejuco “*Pimienta*” (*Banisteriopsis cornifolia*), plantas locales, que crecen abundantemente en los bosques de las Tierras Bajas Mayas.

En segundo lugar y tan importante como lo expresado con anterioridad, concierne a la integración de los nuevos volúmenes con los volúmenes existentes. Si se tiene resuelto el problema de la estabilización del volumen a ser repuesto, debe entonces pensarse en la forma de integrar ese volumen con el volumen original deteriorado. Esto es particularmente importante porque la unión entre esos dos volúmenes es una superficie de falla y, consecuentemente, los trabajos de consolidación deberían ser iniciados en ella. Esos volúmenes tendrían edades diferentes, y estarían conformados con materiales no homogéneos, y la única forma que actualmente puede visualizarse para su integración es usar entre ellos alguna unión mecánica, que estuviera anclada en cada uno de los volúmenes. Para el problema que se está tratando, en la propuesta de solución se propone una unión mecánica.

Finalmente, es necesario hacer algunas consideraciones sobre la protección de los nuevos volúmenes contra la erosión. En la actualidad se le está dando la importancia que merece al problema generalizado de la erosión del suelo y, más concretamente, a la necesidad de reducir las pérdidas del mismo causadas por el viento y la lluvia. La erosión del suelo es un problema mundial y consecuentemente, la necesidad de su conservación ha cobrado importancia en muchos países.

Se sabe que la hierba y la vegetación bien plantadas, con raíces fuertes, controlan la erosión del suelo en forma natural. Partiendo de esto, en países industrializados el problema ha sido atacado mediante el uso de geotextiles fabricados con diferentes materiales, desde productos sintéticos hasta materiales orgánicos como la fibra de coco, el yute, otros. Estos geotextiles se colocan sobre el suelo, con lo que lo protegen y ayudan al crecimiento de vegetación nueva, conservando la humedad y la temperatura. Finalmente el geotextil se degrada en forma natural llegando a formar parte del mismo suelo.

En regiones tropicales y semitropicales, el problema económico ocupa un lugar fundamental y, consecuentemente, se ha hecho necesario buscar soluciones acordes con su realidad. De esta forma se ha experimentado con la creación de sistemas vegetales de conservación del suelo y de la humedad, que de alguna manera provean barreras contra la erosión.

ENSAYOS DE LABORATORIO E INVESTIGACIONES DE CAMPO

Previo a usar el bejuco en la fabricación de las mallas se pensó que, debería conocerse la resistencia real de ese material en pruebas a la tracción paralela a las fibras y además su durabilidad bajo tierra, que sería el lugar donde estaría trabajando. Dado que para determinar esas propiedades se requiere de algún laboratorio de resistencia de materiales, se solicitó la colaboración del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala (CII).

Para ensayar los bejucos se diseñó el siguiente experimento: en el campo se fabricaron con bejuco recién cortado, doce pequeñas mallas cuadradas de aproximadamente 50 cm por lado con lianas de diámetros en los nudos variando de 8 a 15 mm y en los tallos de 6 a 10 mm, separadas de 100 a 150 mm. Estas mallas fueron enterradas a profundidades de 300, 600 y 900 mm, que deberían ser ensayadas con intervalos aproximados de un mes (a cada plan de trabajo). La mitad de las mallas serían regadas diariamente y la otra mitad se dejaría únicamente con la humedad propia del suelo. Con esto podría constatarse fehacientemente su deterioro si lo hubiera y además, las variaciones en su resistencia tomando como patrón de comparación el ensayo hecho con una malla de bejuco fresco (recién cortado).

En la siguiente tabla se presenta el resultado del primer ensayo hecho con bejuco fresco en el CII (Figura 1). Los ensayos posteriores dieron resultados similares.

LIANA	ϕ tallo (mm)	ϕ nudo (mm)	P (kN)	f tallo (kN/mm ²)	f nudo (kN/mm ²)
1	8.40	11.84 (máx)	1.422	0.0257	0.0129
2	6.59	8.43 (mín)	1.138	0.0334	0.0204

DONDE:

φ tallo = diámetro de la liana, en milímetros, medido en la parte más delgada de su tallo.

φ nudo = diámetro de la liana, en milímetros, medido en su nudo más delgado.

P = carga de ruptura, por liana, en tracción paralela a las fibras, medida en kilonewton

1 kilogramo = 9.807 N (Newton) = 0.009807 kN (kilonewton).

f tallo = esfuerzo de ruptura en tracción, calculado tomando el área de la sección transversal del tallo, en kN sobre milímetro cuadrado.

f nudo = esfuerzo de ruptura en tracción, calculado tomando el área de la sección transversal del nudo, en kN sobre milímetro cuadrado.

De lo anterior puede concluirse que: a) deben considerarse únicamente los valores relacionados con los tallos; b) a menor diámetro del tallo, el esfuerzo de ruptura de las lianas es mayor; 3) para efectos de cálculo se asumirá que cada liana se rompe con 1.00 kN.

En los meses sucesivos pudo comprobarse en el campo que las mallas no se deterioraron sino que más bien revivieron ya que les brotaron raíces nuevas. De esto podría inferirse que su resistencia debería ser cuando menos igual a la resistencia del primer ensayo que se hizo con bejuco recién cortado. Las muestras fueron enviadas al CII para su ensayo.

De acuerdo con lo anterior se acepta que la carga de ruptura de cada liana es de 1.00 kN. Entonces, si se fabricaran las mallas con lianas separadas a 150 mm, en el sentido del esfuerzo, se tendría una resistencia a la ruptura en tracción de 6.67 kN por metro de ancho de malla, lo que se considera suficiente para el propósito que se persigue. Por lo tanto puede concluirse que si es aceptable usar el bejuco para la fabricación de mallas para reforzar horizontalmente los taludes. Los detalles de ese refuerzo se describen adelante.

PROPUESTA DE SOLUCIÓN

La solución que aquí se presenta ha sido experimentada por cerca de tres años, usando el procedimiento descrito a continuación. Contempla tres renglones: 1) la estabilización propiamente dicha de los nuevos volúmenes; 2) la integración de nuevos volúmenes con los volúmenes existentes; y 3) la protección de los nuevos volúmenes contra la erosión.

Se supone que los rellenos no estarán sujetos a ningún empuje horizontal ajeno al propio relleno, por lo que no será necesario tomar precauciones especiales para darle estabilidad contra el deslizamiento ni contra el volteo.

ESTABILIZACIÓN DE LOS VOLÚMENES NUEVOS

El material principal es la tierra y piedra que se encuentra suelta en las cercanías de los rellenos a ser construidos y que proviene de excavaciones arqueológicas y la liberación de muros. La tierra se mezcla con agua para formar un lodo fácil de manejar, al que se le añade zacate "*Estrella*" (*Paspalum notatum*), como si se fuera a construir adobe. Este es el refuerzo tridimensional que incrementa la resistencia de la mezcla al esfuerzo cortante. Paralelamente o un poco antes, se habrían fabricado mallas de bejuco "*Blanco*" (*Amphilophium molle*), o con bejuco "*Pimienta*" (*Banisteriopsis cornifolia*), que son los elementos de refuerzo horizontal que dan estabilidad contra los deslizamientos horizontales. El tamaño de las mallas varía de acuerdo al ancho del talud a ser construido y las separaciones de las lianas serían de 150 mm en la dirección del esfuerzo y unos 250 mm en la otra dirección (Figura 2).

Previo a iniciar la conformación de los taludes se colocan formaletas, para darle al talud su forma final en cuanto a pendientes, dimensiones, etc. La conformación de los taludes se logra depositando sucesivamente capas de tierra preparada, de unos 200 mm de alto sobre las que se van colocando horizontalmente las mallas de bejuco. Este procedimiento se repite hasta llegar a la altura que debe tener el talud. Teóricamente, para conformar un talud de unos 6 m de altura, se deberían colocar esas mallas a

las siguientes separaciones, en milímetros, a partir del terreno de sustentación: en el primer metro a cada 200, en el segundo a cada 250, en el tercer metro a cada 300 y en el resto de la altura a cada 400. En el caso de los taludes que se están tratando, las alturas no serán mayores de tres metros, pero por seguridad se recomienda no usar separaciones mayores de 250 mm.

La formaleta se deja en su lugar el tiempo necesario para que el talud adquiera una dureza que le permita sostenerse por sí mismo. Se estima que ese tiempo deberá ser entre una o dos semanas. En la experimentación que se ha llevado a cabo la formaleta se ha dejado un poco más de una semana (Figura 3).

FABRICACIÓN Y USO DE LAS MALLAS DE BEJUCO

El bejuco para la fabricación de las mallas deberá ser cuidadosamente seleccionado, cuidando que esté en buen estado de salud y que los diámetros de sus lianas no sean menores que los siguientes valores

φ tallo = 6 mm

φ nudo = 8 mm

El bejuco podrá cortarse en cualquier época del mes, excepto cuando la luna esté en cuarto menguante, ya que la experiencia ha mostrado que las plantas cortadas en esa época se deterioran rápidamente. Las mallas deberán siempre fabricarse con bejuco fresco, recién cortado. Bajo ninguna circunstancia se permitirá usar bejuco que tenga más de 36 horas de haber sido cortado. Las mallas deberán ser colocadas en el volumen de tierra que conformará el talud, inmediatamente después de haber sido fabricadas. No deberán usarse mallas que tengan más de 48 horas después de haber sido fabricadas.

Los volúmenes de tierra que conformarán el relleno deberán conformarse cuidadosamente, cuidando que el lecho para colocar las mallas esté lo más horizontal posible. Cuando el talud sea inclinado, el lecho de tierra deberá ser asimismo horizontal. Cuando debido a la longitud de los rellenos sea necesario traslapar las mallas, el traslape deberá tener como mínimo 500 mm.

Tratándose de reponer volúmenes, hay que tener presente que la superficie actual del talud, la que estará en contacto con el volumen nuevo a ser restituído, es una superficie de falla, ya que sobre ella se efectuó el deslizamiento que deformó al talud original. Esto significa que sobre tal superficie deberían ser iniciados los trabajos como se recomienda en el párrafo siguiente y, luego se continuaría con la conformación del nuevo talud en la forma descrita arriba.

Primero habría que hincar horizontalmente en la superficie, estacas de madera dura por ejemplo del árbol “Tinto” (*Haematoxylum campechianum*), de unos 50 mm de diámetro con largo mínimo de un metro. La profundidad de hincado sería de unos 500 mm y se colocarían horizontalmente a cada metro y verticalmente a cada separación de las mallas, la que gobierne. Las estacas servirían como elementos trabajando tanto a tracción como al esfuerzo cortante, uniendo el talud existente con el nuevo volumen a ser restituído, y además, ayudarían a dar anclaje a la malla horizontal de refuerzo. Previo a hincar las estacas habría que perforar agujeros cuando menos de unos 30 cm de largo, para lo que podrían usarse brocas de acero operadas a mano. Luego de colocar las estacas habría que completar el hincado martillándolas con almádanas. Para completar el anclaje de las mallas de refuerzo habría que hincar otras estacas, de material y sección transversal similares a las estacas horizontales, hundiéndolas solo unos 300 mm y dejando que sobresalgan del suelo lo suficiente para anclar las mallas de refuerzo.

Luego de ser hincadas las estacas se procedería a colocar el primer estrato de suelo, de 200 mm de alto sobre el que se colocaría la primera capa de malla anclándola a las estacas de madera. Todos los estratos siguientes, cuyo alto sería determinado por la separación de las mallas horizontales, se conformarían en forma similar (Figura 4).

Como se apuntó arriba, una forma eficiente de controlar la erosión sería mediante la siembra de alguna variedad de planta de la región, que sea de raíces profundas, capaz de soportar tanto sequías como inundaciones, capaz de crecer en cualquier tipo de suelo prescindiendo de su fertilidad y asimismo no ser susceptible a los cambios extremos de temperatura. Mientras que se determina cual es la planta adecuada, se está experimentando actualmente en los paramentos inclinados de los taludes con una rastrera, que aunque no tiene raíces muy profundas, prolifera rápidamente y no permite el crecimiento de otra vegetación: se trata de la planta conocida en la región como “Cucaracha” (*Hippocratea floribunda*).

La parte superior de los taludes, que es horizontal, es particularmente susceptible a erosionarse por el escurrimiento del agua pluvial, por lo que se protegería con una capa de piedra caliza unida con mortero en base de cal. Esta capa sería construida en forma de canal para conducir el agua hacia los extremos, los que igualmente serían protegidos con una capa de piedra.

RESULTADOS

La experimentación se inició en marzo del año 1998 construyendo algunos taludes con alturas máximas de 3 m, con el procedimiento descrito arriba. Con la intención de estudiar el comportamiento de los taludes a la intemperie, se decidió dejarlos abandonados, sin ninguna protección ni tratamiento adicional durante un período de 18 meses, periodo en el cual estarían expuestos a la acción del sol, viento, lluvias y presencia humana. En la realidad, fueron abandonados un poco más de un año y luego se examinaron cuidadosamente para medir cual habría sido su deterioro. El resultado fue sorprendente: el material prácticamente no sufrió ningún desgaste, salvo una pequeña erosión provocada por el escurrimiento del agua de lluvias, que hubiera sido fácil de evitar con un manejo adecuado de pendientes para drenar el agua, pero eso no formaba parte de la investigación. Por otro lado pudo observarse que el material adquirió bastante firmeza y dureza.

Puede aseverarse que hasta la fecha el comportamiento de los taludes conformados con el sistema propuesto ha sido altamente satisfactorio, por las siguientes razones: La tierra que se usa se obtiene fácilmente de las investigaciones arqueológicas y/o de la liberación de muros, con lo que se reduce considerablemente el tiempo necesario para su obtención. Por otro lado, al usarse este material, se ayuda en la limpieza evitando la acumulación de tierra en los alrededores de los edificios y, además, su costo es solo el de recogerla.

El material empleado es de fácil manejo y se presta fácilmente a ser manipulado en cualquier parte de las pirámides, donde se pueda colocar la formaleta que ayuda a conformar los taludes. Cuando el material pierde humedad adquiere la dureza suficiente para cumplir con las funciones para las que fue creado: proteger las superficies originales; sugerir las formas que permitan interpretar las que el edificio pudo haber tenido originalmente.

El personal que se emplea en la fabricación de los taludes se reduce si se compara con el personal necesario para la solución tradicional de reponer volúmenes usando piedra caliza unida con morteros de cal. Asimismo, su costo tiene que ser más bajo que el de esa solución tradicional. La extracción de piedra, recurso natural no renovable, de entre la selva se reduce considerablemente, lo que significa que la alteración al entorno natural del monumento también se reduce. Todos los materiales que intervienen en la fabricación de los taludes son naturales: tierra, zacate, bejuco y agua, lo que significa que dan una solución ecológicamente limpia y estéticamente agradable para el entorno.

El procedimiento es fácilmente reversible.

Si técnicamente se evalúa la solución propuesta tomando como base los parámetros establecidos para definirla, puede aseverarse que los resultados obtenidos han sido plenamente satisfactorios. El trabajo realizado se encuentra enmarcado entre las principales normas internacionales de conservación. A la fecha se ha desarrollado el método durante cerca de tres años, reponiendo exitosamente volúmenes en taludes con características diferentes. Sin embargo y a pesar del éxito obtenido, se recomienda seguir observándolo cuidadosamente, para que en lo posible, se mejore el procedimiento.

Llave	φ tallo	φ nudo (mm^2)	P f tallo	f nudo	(mm)	(mm)	(kN)	(kN/mm^2)
1	8.40	11.84 (máx)	1.422	0.0257	0.0129			
2	6.59	8.43 (mín)	1.138	0.0334	0.0204			



SECCION DE BEJUCO.

Gráfica 1



Mallas de bejuco "Blanco" (*Amphilophium malle*) o con bejuco "Pimienta" (*Banisteriopsis cornifolia*)

MALLA HECHA CON BEJUCO

Gráfica 2

Figura 1 Sección de bejuco y Figura 2 Malla hecha con bejuco

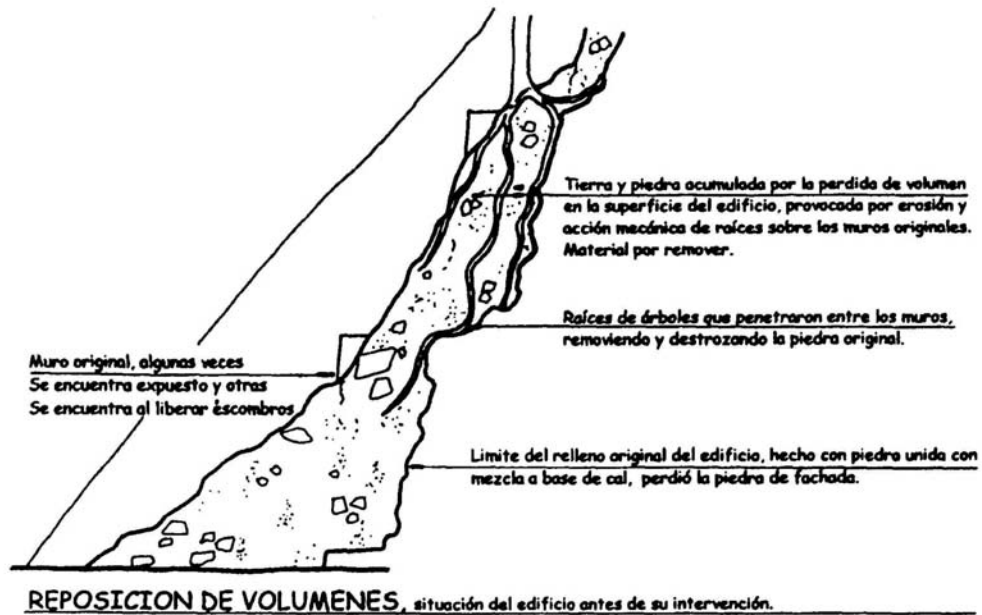


Gráfico 3

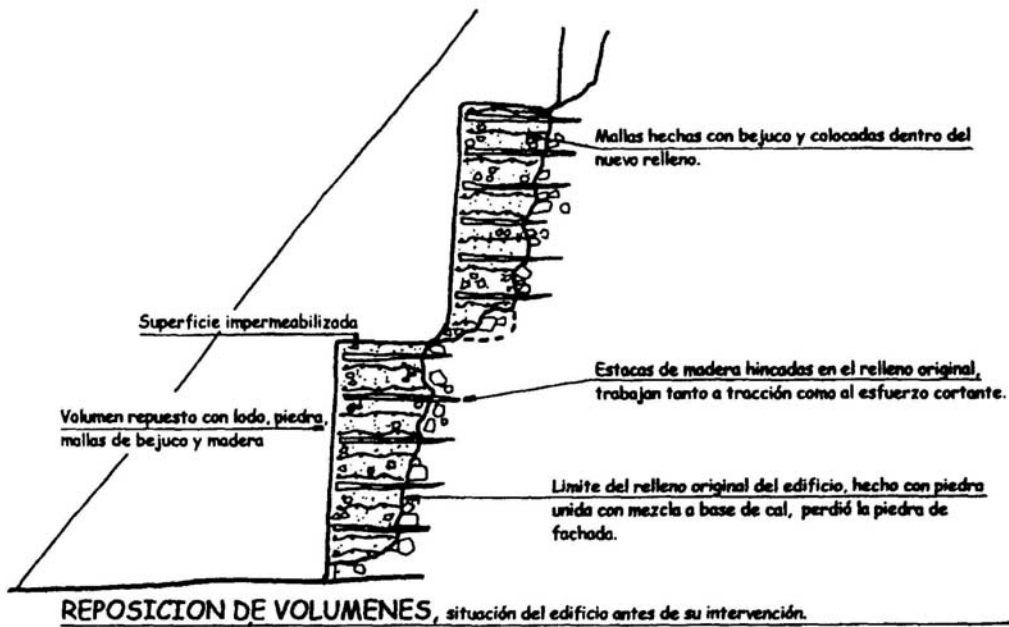


Gráfico 4

Figura 3 Reposición de volúmenes, situación del edificio antes de su intervención
Figura 4 Reposición de volúmenes, situación del edificio después de su intervención