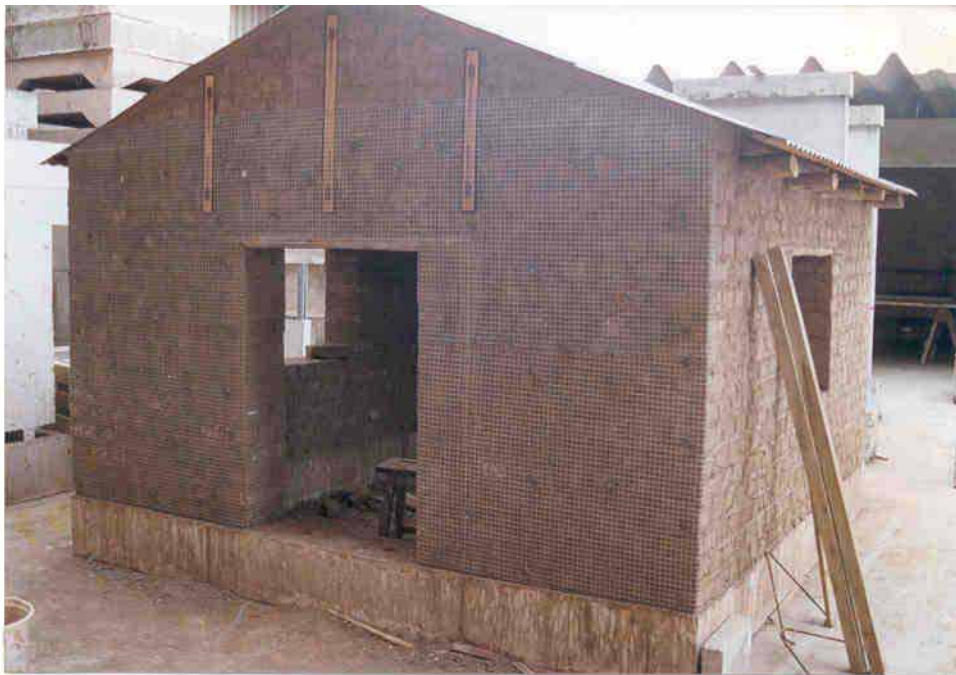




*Ingénieurs Assistance Internationale
Ingénieurs sans Frontières
a.s.b.l.*



Guide technique sur la protection parasismique des constructions en terre

Diego Hock

Ingénieurs Assistance Internationale – Ingénieurs sans Frontières

<http://www.isf-iai.be>

mail@isf-iai.be

Avenue du Marly 48, 1120 Bruxelles – Belgique

TABLE DES MATIERES

<i>I.</i>	<i>Présentation de l'aléa sismique.....</i>	<i>3</i>
<i>II.</i>	<i>Conseil en matière d'implantation.....</i>	<i>7</i>
<i>III.</i>	<i>Conception de la structure : principes généraux</i>	<i>9</i>
<i>IV.</i>	<i>Techniques de renforcement pour les constructions en terre.....</i>	<i>14</i>
<i>V.</i>	<i>Conclusion.....</i>	<i>21</i>
	<i>Bibliographie.....</i>	<i>41</i>

Nous tenons tout d'abord à remercier les personnes suivantes pour leur aide et leur collaboration :

- Madame Gladys Villa Garcia de l'Université Catholique du Pérou qui nous a fait parvenir les travaux publiés par son Laboratoire des Structures Antisismiques
- Le Professeur André Plumier de l'Université de Liège pour avoir mis à notre disposition le guide technique qu'il a élaboré.
- Monsieur Christian Delvaux pour son travail de relecture et ses conseils judicieux.
- Vincianne Gillard pour (entre autre) un coup de pied au derrière tout à fait à propos suite à un coupable engourdissement de notre part!

I. Présentation de l'aléa sismique

1) Description du phénomène

La croûte terrestre est composée d'une quinzaine de « plaques » qui se meuvent les unes par rapport aux autres. Ces mouvements engendrent des contraintes le long des lignes de contact des plaques. Les roches dans l'écorce terrestre vont rester sous tension pendant des dizaines voire des centaines d'années puis cèderont brusquement comme un ressort trop tendu. Il se produit une brutale libération d'énergie et la rupture va se propager dans le sous-sol en faisant glisser les blocs de roche les uns contre les autres. Il y a alors séisme jusqu'à ce qu'un nouvel état d'équilibre soit atteint une fois la rupture bloquée. Ce nouvel équilibre est atteint assez rapidement : de quelques secondes à plusieurs minutes maximum pour les séismes de grande ampleur.

2) Définitions

Le **foyer** d'un séisme est l'endroit en profondeur où s'amorce la rupture décrite plus haut. Plus le foyer est proche de la surface, plus le tremblement de terre risque d'être ravageur. Les secousses les plus violentes peuvent provoquer des ruptures jusqu'à la surface de la Terre si le foyer n'est pas trop profond.

L'**épicentre** d'un séisme est le point en surface situé à la verticale du foyer.

La **magnitude** est une évaluation de l'énergie libérée au foyer du séisme. Elle ne tient pas compte des conséquences du séisme à la surface du globe. Elle est évaluée la plupart du temps sur l'échelle de Richter. C'est une échelle logarithmique : un accroissement d'une unité sur l'échelle de Richter revient à multiplier l'amplitude des vibrations (mesurées sur sismographe) par un facteur 10 et l'énergie libérée par un facteur 30.

L'**intensité** est quant à elle une estimation subjective de l'ampleur du séisme fondée sur l'observation des dégâts qu'il a occasionnés. Les échelles d'intensité varient en fonction des différentes zones concernées par les séismes. Elle est surtout utile à l'étude de la sismicité historique.

3) Déformations du sol

Les frictions se produisant lors des déplacements des masses rocheuses engendrent des ondes sismiques qui se propagent dans la croûte terrestre dans toutes les directions à partir du foyer.

Ces ondes sont initialement de deux types : les ondes P (Primaires) compriment et détendent alternativement les roches (comme un accordéon) tandis que les ondes S (Secondaires), les plus dévastatrices, cisailent le milieu traversé. Les ondes P se propagent deux fois plus vite que les S, ce qui signifie qu'une fois l'onde P ressentie (mouvement vertical du sol) on doit s'attendre à l'arrivée des ondes S (mouvement horizontal du sol). Ce réflexe aurait déjà permis de sauver des vies. Ces ondes P et S (dites ondes de volume car elles se propagent dans toute la terre) peuvent être réfléchies ou réfractées par les

hétérogénéités du sol et donner naissance à des amplifications des vibrations pour certaines natures de sol. De plus, guidées par le relief du sol, elles peuvent produire des ondes de surface qui se propagent plus lentement et de manière complexe. Les ébranlements ressentis en un point donné sont donc le résultat de la superposition des ondes décrites ci-dessus. Notons toutefois que toutes ces vibrations vont globalement s'amortir et perdre leur énergie à mesure qu'elles s'éloignent du foyer du séisme. Les conséquences sur un bâtiment seront donc directement liées à son éloignement du foyer.

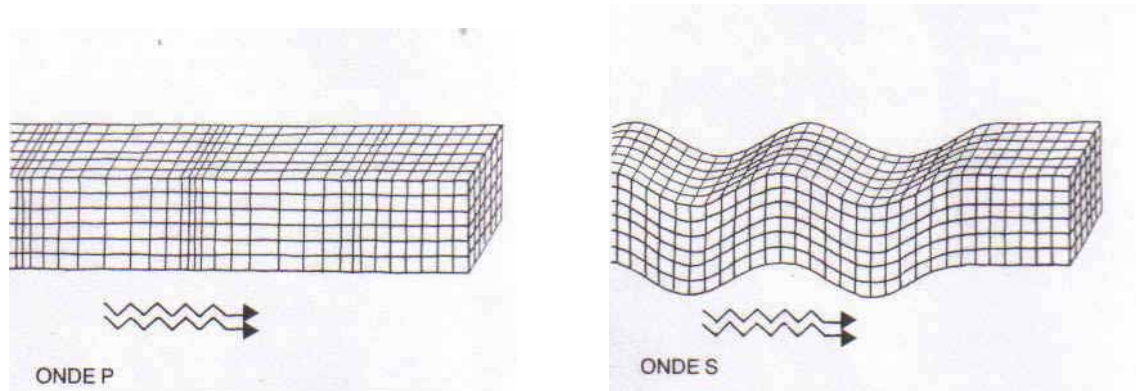


Figure 1

Les secousses sismiques peuvent également provoquer des phénomènes de compactage et de tassements des sols peu denses et même engendrer des liquéfactions de sols gorgés d'eau avec perte de capacité portante et glissements de terrain si le relief s'y prête.

4) Action sur les structures

Les différentes ondes sismiques décrites plus haut vont générer à la surface du sol des déplacements à trois composantes de translation (2 horizontales et 1 verticale) et trois de rotation (2 d'axes horizontaux et 1 d'axe vertical).

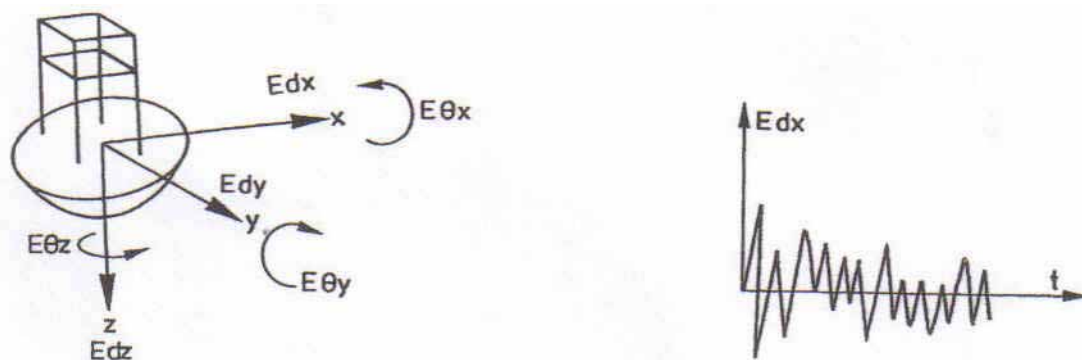


Figure 2

Les mouvements horizontaux du sol vont entraîner les fondations des immeubles qu'ils supportent. Les parties supérieures des ouvrages vont à leur tour être entraînées mais avec un certain retard. Des sollicitations de **flexion** vont donc naître dans **les éléments porteurs verticaux** (murs, poteaux) et des efforts **normaux** dans **les éléments porteurs horizontaux** (plancher, poutre).

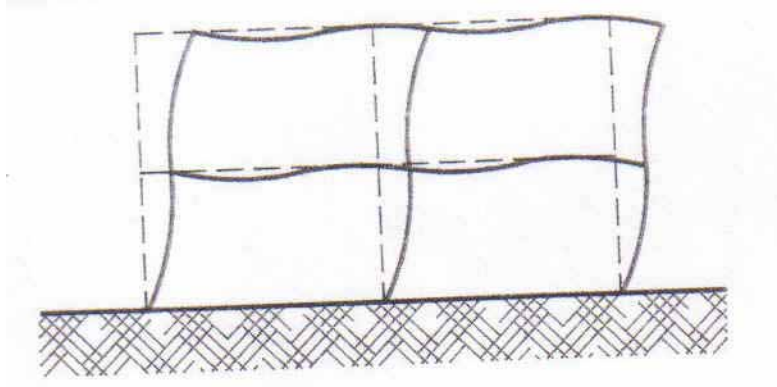


Figure 3

On comprend d'ores et déjà ici que les composantes horizontales des déplacements du sol seront les plus nuisibles car les structures classiques ne sont pas dimensionnées pour reprendre des sollicitations horizontales importantes (seules les actions du vent sont en général prises en compte pour les bâtiments).

Les constructions étant (normalement !) conçues pour reprendre les actions verticales dues à la pesanteur avec une sécurité suffisante, les mouvements verticaux du sol seront en eux-mêmes moins destructeurs. On en tiendra compte pour la conception **des éléments porteurs horizontaux** qui peuvent subir des suppléments de flexions pour lesquels ils n'ont pas été conçus.

Les rotations d'axe horizontal peuvent être négligées contrairement à la rotation d'axe vertical. Celle-ci peut être due à des déplacements horizontaux de deux zones de sol dans des sens contraires.

Des sollicitations de torsion peuvent également apparaître si la ligne d'action de la sollicitation horizontale ne passe pas par le centre de torsion de la construction.

5) Accélérogrammes – sceptres de réponse

Toutes les données citées plus haut donnent une bonne idée (du moins nous l'espérons !) de la nature des sollicitations sismiques mais ne sont pas directement utilisables par un ingénieur souhaitant concevoir une structure risquant d'être soumise à un tremblement de terre. Il aura besoin pour ce faire des sollicitations subies par la structure que l'on pourra déduire de l'accélération du sol au moyen de la loi de Newton ($F=m*a$). Cette accélération pourra s'élever jusqu'à $0.4*g$ en zone très sismique. L'accélérogramme d'un tremblement de terre (accélération du sol en fonction du temps - $a(t)$) est déjà directement exploitable par la dynamique des structures : si la structure est infiniment rigide, l'accélération de chaque point de la structure sera celle du sol. Cependant, pour une structure flexible, les caractéristiques mécaniques des éléments de la structure influenceront l'accélération qu'ils

subiront : il y a réponse dynamique. C'est pourquoi, la caractérisation la plus couramment utilisée par le concepteur est le spectre de réponse.

Nous explicitons cette notion ci-dessous pour les structures simples, qui peuvent être modélisées par une console portant toute la masse de la structure concentrée en un point.

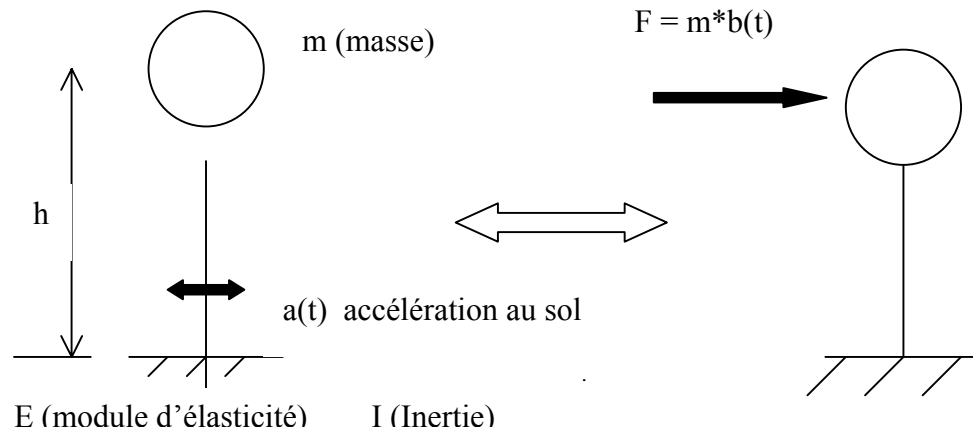


Figure 4

Supposons cette console soumise à un tremblement de terre d'accélérogramme $a(t)$. Ceci revient à dire que la masse m de notre console subit une accélération $b(t)$, qui dépendra des caractéristiques mécaniques de la console, en particulier de sa période propre T ($T=2\pi\sqrt{mh^3/EI}$). Des valeurs de $b(t)$, seule la plus élevée a de l'importance pour le dimensionnement de la structure : nous la nommons S . La structure devra donc être capable de reprendre une force $F=m*S$ pour résister au séisme d'accélérogramme $a(t)$.

Si l'on fait varier les caractéristiques de la console (h , m , E , I), on obtiendra une courbe $S(T)$ appelée spectre de réponse correspondant à l'accélérogramme du tremblement de terre considéré. Pour une structure simple, la démarche est donc la suivante : calcul de T , lecture de la valeur S en ordonnée sur le spectre de réponse, calcul de la sollicitation $F=m*S$ subie par la structure. Les courbes $S(T)$ sont publiées par les organismes compétents de chaque pays.

II. Conseil en matière d'implantation du bâtiment

1) Principales zones sismiques dans le monde

Nous avons vu au chapitre précédent que les séismes étaient dus aux contraintes apparaissant le long des lignes de contact entre les différentes plaques composant la croûte terrestre.

Les zones à forte sismicité dans le monde sont par conséquent concentrées aux frontières de ces plaques (*voir carte*).

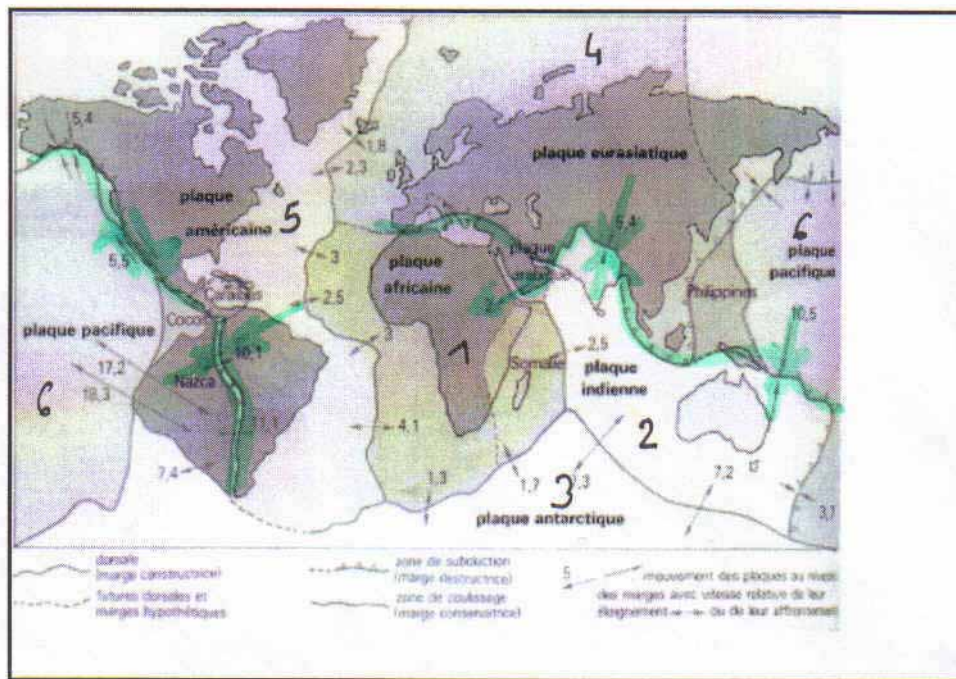


Figure 5

Ces frontières entre plaques sont de trois types auxquels correspond une activité sismique plus ou moins intense :

- écartement des plaques entre elles : le long des dorsales océaniques. Tremblements de terre nombreux mais relativement peu intenses dont les foyers se situent au milieu des océans entre 1000 et 2000m de profondeur. Ces séismes sont de ce fait peu gênant pour l'homme. Par contre les effets induits peuvent être dévastateurs (Tsunami).
- collision entre plaques (zones de subduction). Ces régions sont le siège des tremblements de terre les plus violents. Comme ces zones sont fortement peuplées, les séismes y sont particulièrement meurtriers.
- Les zones coulissage le long des failles. L'exemple le plus connu est la faille de San Andreas siège du séisme de San Fransisco en 1906.

2) Principes généraux d'implantation en fonction de la topographie locale.

Nous reprenons ici les recommandations d'application dans la région des Antilles qui peuvent être généralisées à l'ensemble des zones sismiques :

- terrain en pente : construction interdite sur des pentes supérieures à 35% ; déconseillée sur des pentes supérieures à 10%.
- Talus : distance minimale de 10m à respecter aussi bien en crête de talus qu'en pied de talus.
- Eviter les zones liquéfiables : l'appréciation précise du risque de liquéfaction d'un sol pourrait faire l'objet d'un guide à part entière. Notons toutefois les types de sol à risque suivants : alluvions, tourbes, argiles molles, vase, limons. Il s'agit de sols déjà difficiles en zone non sismique. L'aléa de liquéfaction d'un site ne peut se déterminer qu'en consultant des documents cartographiques locaux s'ils existent et/ou par des études in situ.
- D'une manière générale les sols de mauvaise qualité mécanique auront la propriété d'amplifier les mouvements dus aux séismes.
- Présence d'une faille active : éviter de construire sur la faille ainsi que sur une bande de 50m de part et d'autre de son tracé.
- Ne pas construire près de poteaux élevés ou d'arbres vétustes.
- Ne pas bâtir près de bâtiments existants surtout si ceux-ci ne sont pas construits suivant des recommandations anti-sismiques. Une règle de bon sens serait de laisser une distance minimale égale à la hauteur du plus haut des bâtiments voisins.

III. Conception de la structure : principes généraux

Nous nous attarderons sur trois aspects généraux :

- 1) la forme géométrique des bâtiments
- 2) la répartition des masses, la position du centre de gravité des ouvrages, le degré d'hyperstaticité.
- 3) les moyens d'assurer la reprise des efforts horizontaux.

1) la forme géométrique des bâtiments :

Il faudra veiller à respecter les points suivants :

- simplicité et régularité de la structure : on ne peut que conseiller de simplifier au maximum la conception de l'ouvrage et d'éviter le plus possible toute discontinuité brusque afin tout d'abord d'en faciliter au maximum l'étude. Ceci permettra d'éviter des problèmes locaux comme des concentrations de contraintes ou des interactions entre des parties du bâtiment de raideurs différentes.
- Symétrie en plan : la mise en œuvre de structures symétriques dans leur plan horizontal permet de respecter les principes de simplicité et de continuité favorables à leurs bonnes tenues aux séismes. L'AFPS propose les formes suivantes :

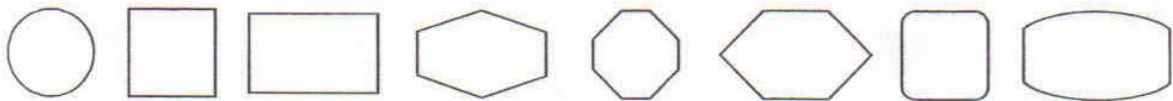


Figure 6

La symétrie en plan suivant deux axes permet de réduire fortement les sollicitations de torsion.

Les formes en L, T, U, V ou Z sont de ce point de vue nettement plus défavorables.

Les raideurs différentes en fonction de la direction des sollicitations horizontales induiront dans les angles rentrants des concentrations de contraintes souvent néfastes pour les constructions.

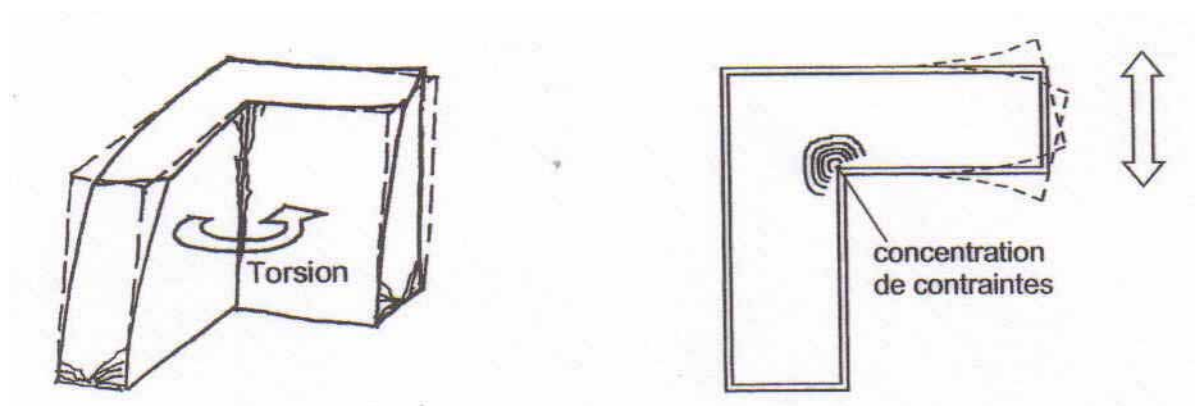


Figure 7

Si ce type de structure est malgré tout mis en œuvre, des joints parasismiques judicieusement implantés permettront de réduire les désordres.

Insistons également sur le fait que symétrie et simplicité géométriques peuvent être neutralisées par une asymétrie ou une complexité importante des systèmes porteurs.

Il y aura lieu de faire correspondre le plus possible les centres de masses (par où passera la résultante des actions sismiques) et de rigidité de l'ouvrage afin d'éviter les sollicitations de torsion. Nous y reviendrons en détail plus loin.

- Symétrie et régularité en élévation : les principes énoncés plus haut sont également valables pour la configuration en élévation des bâtiments. Il est recommandé de respecter une régularité dans l'élévation de la structure de manière à lui assurer un comportement uniforme sous séisme. Des variations brusques de section conduiront à une structure composée de blocs de fréquences propres différentes réagissant de manière fort variables sous l'effet des tremblements de terre (voir partie 1 § 5 - accélérogrammes). Des joints de désolidarisation peuvent être mis en œuvre pour pallier à ces problèmes, toutefois ceux-ci feront augmenter la complexité et le coût de la construction. À éviter également : les cheminées hautes (leur chute pourrait endommager le reste de l'habitation) ainsi que les mâts, antennes ... posés sur les toits.

2) la répartition des masses, la position du centre de gravité des ouvrages, le degré d'hyperstaticité :

D'une manière générale, la construction aura intérêt à être la plus légère possible, les sollicitations sismiques étant proportionnelles à la masse en mouvement ($F=m*a$).

Le centre de gravité de l'ouvrage devra se situer le plus bas possible. Les constructions ne devront pas excéder deux niveaux (au-delà, on sort du cadre de ce manuel) et respecter le plus possible certaines règles : par exemple, mise en œuvre d'étages enterrés, toiture légère combinée à une structure lourde dans les étages inférieurs.

La résultante des actions sismiques passant par le centre de masse de la construction, ce dernier devra être le plus proche possible du centre de torsion de la structure afin de minimiser le moment de torsion. Il faut donc essayer de placer les charges lourdes le plus près possible du centre de torsion de la construction.

Enfin, les structures hyperstatiques (càd où les éléments porteurs sont en excès par rapport au strict minimum nécessaire) seront préférées aux isostatiques, la rupture d'un élément porteur n'entraînant pas obligatoirement la ruine complète de l'ouvrage.

3) les moyens de reprendre les sollicitations horizontales

Nous avons vu plus haut que le principal enjeu de la conception parasismique est de faire en sorte que les sollicitations horizontales induites par les séismes soient convenablement supportées par les structures. Il y aura donc lieu d'être attentif à la conception et à l'exécution des systèmes de contreventement.

Le but d'un système de contreventement est d'assurer le transfert des charges horizontales (vent, séismes, ...) aux fondations de l'ouvrage. Les efforts transitent d'abord par des éléments horizontaux avant d'être repris par des éléments verticaux qui assureront leurs transferts jusqu'aux fondations.

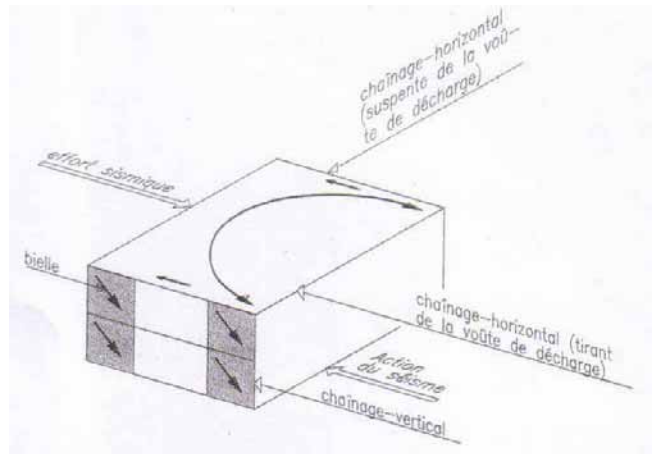


Figure 7.1

Dans les structures à ossature ou à charpente (hangars, bâtiment de type industriel, charpente de toiture) les contreventements sont souvent assurés par des triangulations en bois ou en acier. Les plus courantes sont les « Croix de Saint-André ». Nous développerons la mise en pratique de ces techniques dans les chapitres consacrés aux constructions en acier et en bois.

Dans les constructions traditionnelles, les **contreventements horizontaux** sont assurés par les planchers et les toitures qui font office de diaphragme. Ceux-ci devront être suffisamment rigides dans leur propre plan afin de reprendre les sollicitations de flexion et de cisaillement. Il faudra être également attentif aux ancrages de ces éléments horizontaux dans les éléments verticaux afin d'assurer le bon transfert des efforts.

Dans les habitations, les **contreventements verticaux** seront en général assurés par des panneaux de contreventement faisant souvent office de murs porteurs. L'usage de ce principe de contreventement impliquera d'être attentif aux points suivants :

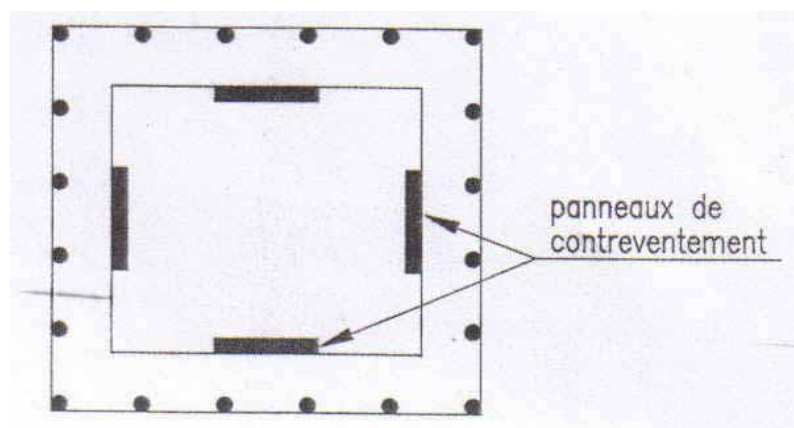


Figure 7.2

- rigidité suffisante
- les panneaux de contreventement ne doivent pas comporter d'ouvertures. Eviter en particulier les «niveaux transparents» souvent mis en œuvre au rez-de-chaussée pour réaliser des surfaces de type commercial. Si de telles configurations s'avèrent malgré tout nécessaires, des précautions particulières sont à prendre (voir chapitres suivants).

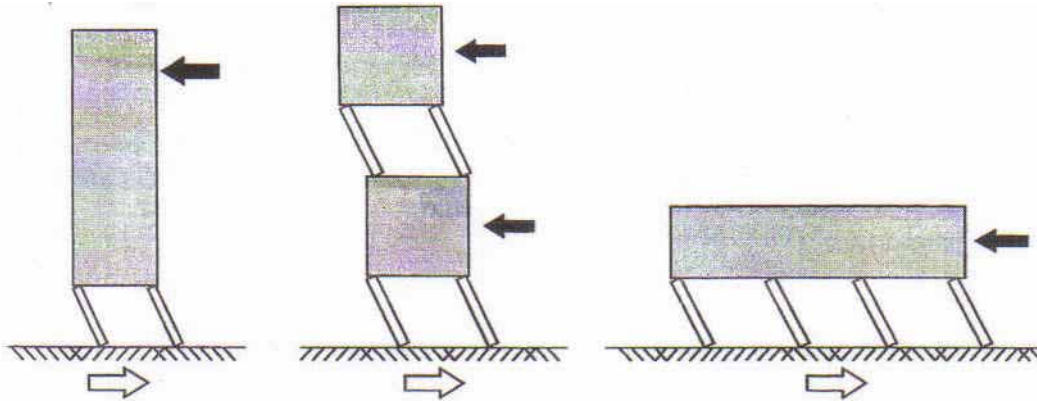


Figure 8

- Ancrage suffisant au droit des fondations et des planchers
- Disposition en plan symétrique permettant une reprise des efforts dans les deux directions horizontales orthogonales.
- Implantation le plus à l'extérieur possible de la construction afin d'augmenter la résistance à la torsion par augmentation des bras de levier.
- Panneaux les plus larges possibles et continus sur la hauteur

Figures 9 : exemple de dispositions idéales

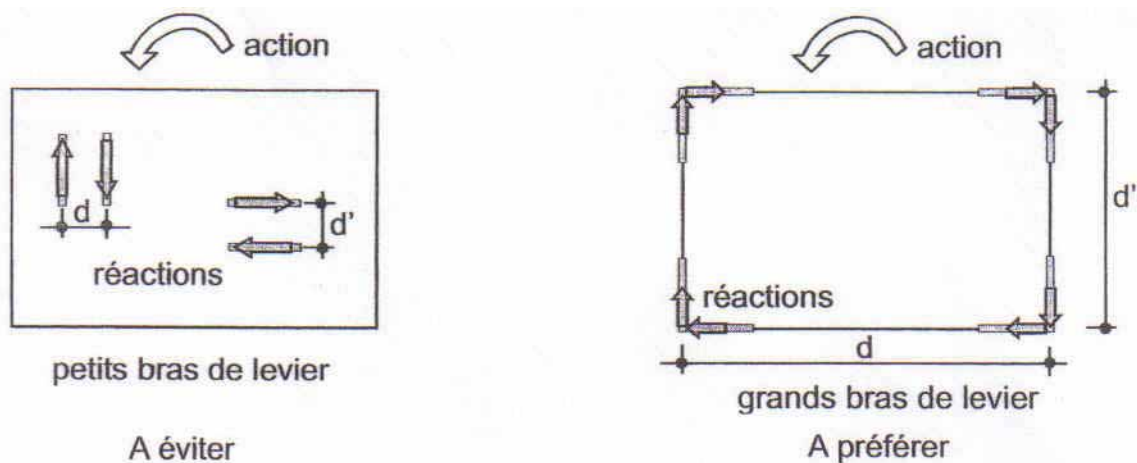


Figure 9.1

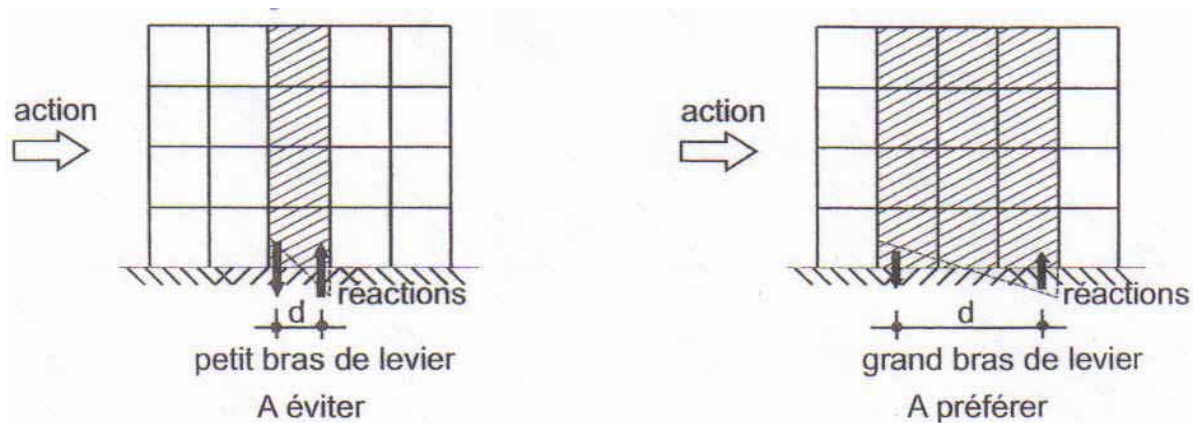


Figure 9.2

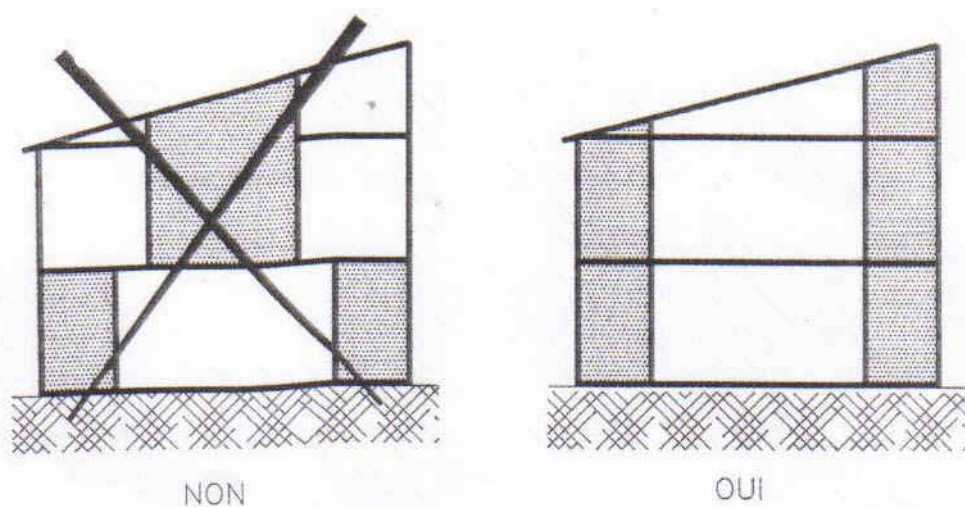


Figure 3-27 : Superposition des panneaux de contreventement

Figure 9.3

Les moyens pratiques de mettre en œuvre ces recommandations seront développés dans les chapitres suivants en fonction des matériaux utilisés.

Note :

L'effet diaphragme d'un plancher peut être compris au moyen d'une simple expérience : une boîte en carton parallélépipédique se déformera moins facilement sous sollicitations horizontales couvercle fermé qu'ouvert.

IV. Techniques de renforcement pour les constructions en terre

Nous présenterons dans ce chapitre les moyens de renforcer les constructions pour les rendre plus résistantes aux séismes. Si les principes généraux abordés plus haut seront d'application, leur mise en œuvre dépendra des matériaux utilisés, des disponibilités des matériaux de renforcement, des traditions constructives de chaque région ainsi que des mentalités des autochtones (seront-ils prêts à assumer un surcoût si faible soit-il). Nous aborderons ici les constructions en terre (typiques entre autre des régions andines). Les autres matériaux feront éventuellement l'objet d'addendum.

Dans un bâtiment d'habitation de faibles dimensions (rez + 2 max.), le contreventement est assuré par les murs. Au sein de ces murs naissent des bielles de traction et de compression. Si les parois maçonnées résistent plutôt bien à la compression, leur résistance à la traction est très faible. Il y aura donc lieu de renforcer les murs au moyen de matériaux résistant bien à la traction soient essentiellement l'acier et le bois.

Nous distinguerons deux thèmes principaux :

- 1) renforcement des habitations existantes
- 2) nouvelles constructions

1) renforcement des habitations existantes

Nous reprenons pour l'essentiel les résultats des études menées par l'Université Catholique du Pérou (PUCP) et par le Centre Régional de Sismologie pour l'Amérique du Sud (CERESIS).

Insistons tout d'abord que le but premier de ces études est d'aboutir à des techniques de renforcement bon marché et faciles à mettre en œuvre permettant à la construction de résister suffisamment longtemps pour assurer l'évacuation des occupants en cas de séismes.

Voyons tout d'abord en guise d'exemple comment se comporte un élément d'habitation (mur de façade + 2 refends – conditions d'appui les plus courantes) soumis à une sollicitation horizontale :

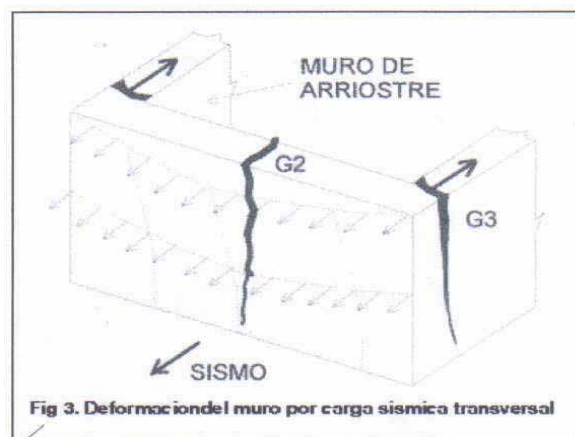


Figure 10

Nous observons la naissance d'une fissure verticale à mi-longueur du mur de façade (celui-ci se comporte en fait comme une poutre sur deux appuis) et une désolidarisation des murs de refend. Ces phénomènes sont dus à la faible résistance à la traction de la maçonnerie de terre. D'où l'idée des ingénieurs péruviens d'armer les parois au moyen d'un fin treillis soudé (diam. fils 1mm ; maille +/- 25mm) appliqué de part et d'autre du mur (voir figure 12). Cette méthode a pu être testée en laboratoire sur bancs sismiques et en grandeur nature au cours d'un tremblement de terre de 7,9 de magnitude qui a eu lieu le 23 juin 2001 dans le sud du Pérou. Les maisons renforcées ont particulièrement bien résisté alors que les habitations voisines ont été fortement endommagées et se sont révélées irrécupérables (source : rapport du XIV^e Congrès National d'Ingénierie Sismique).

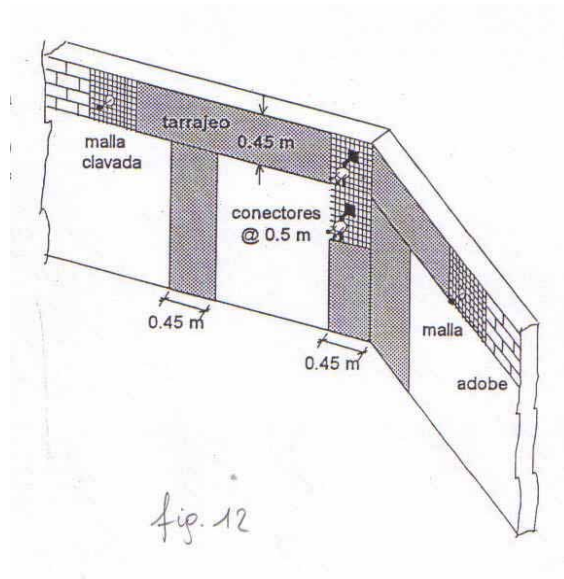


Figure 11

Détaillons plus précisément les étapes de mise en œuvre :

- Elimination du crépi dans les zones à renforcer et brossage de la maçonnerie pour la débarrasser de toute poussière.
- Réalisation d'ouvertures traversantes de 3*3 cm tous les 50cm au droit des bandes de renfort verticales.
- Insertion du connecteur (tige en acier flexible diam. 8mm) et fermeture de l'ouverture au moyen de mortier. La longueur du connecteur sera égale à l'épaisseur du mur augmentée de 2 fois 10cm.
- Fixation du treillis au moyen de clous de 75mm et de rondelles métalliques de diamètre 30mm. Prévoir un clou tous les 25cm. Commencer par les bandes verticales et poursuivre par les horizontales (en recouvrement).
- Plier les connecteurs à 90° et les fixer au moyen de 3 clous à deux pointes (l=25mm).
- Application du mortier de façade sur le treillis (intérieur et extérieur). Epaisseur 2 cm.



Figure 12

Zones d'implantation des treillis

Il s'agit de reconstituer un système poteau-poutre au moyen de bandes de treillis de 45cm de large. Les dits treillis seront implantés dans les zones sensibles (coins, jonctions entre murs, haut des murs). L'entredistance entre les bandes ne doit pas excéder 5m en plan et en élévation. Par exemple, dans le cas d'un mur de 7m de long ne comprenant pas de refend, une bande verticale devra être ajoutée au milieu.

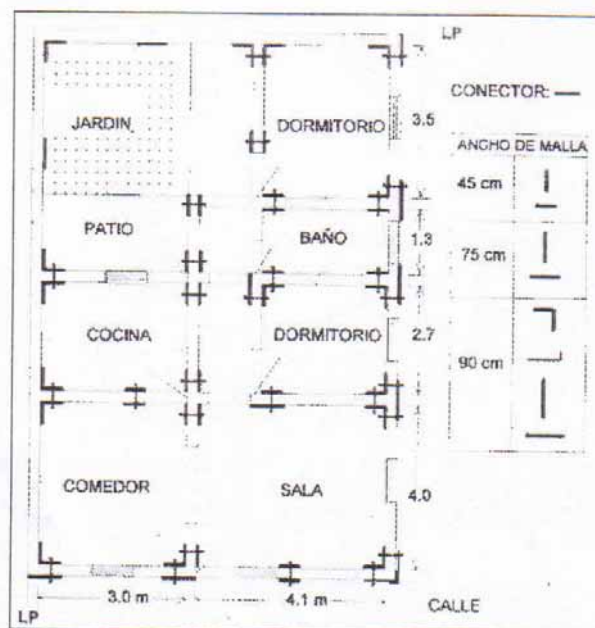


Figure 13 : exemple d'implantation

Les murs mitoyens porteurs doivent être renforcés de part et d'autre. Dans le cas où un voisin ne souhaiterait pas que l'on renforce de son côté, on couvrira entièrement le mur d'un seul côté.

Une zone particulièrement sensible est la zone de jonction entre la pointe et le mur pignon. En effet, la pointe n'est en général pas raidie par un mur de refend. Il s'agit par conséquent de renforcer cette liaison au moyen d'une bande de treillis plus large (90 cm) appliquée selon les mêmes procédures que citées plus haut.

Pour les murs pignons de plus de 4m de hauteur, il est de plus fortement conseillé d'ajouter de part et d'autre du mur des planches verticales de 20mm d'épaisseur, 60mm de large et 60cm de long espacées entre elles de 1m.

Détaillons la mise en oeuvre :

- réalisation de rainures de la dimension des planches dans l'épaisseur de la maçonnerie
- intégration des planches dans l'épaisseur de la maçonnerie
- liaison au moyen de connecteurs (idem que décrits plus haut) ;
- recouvrement par les bandes de treillis puis application du crépi de mortier

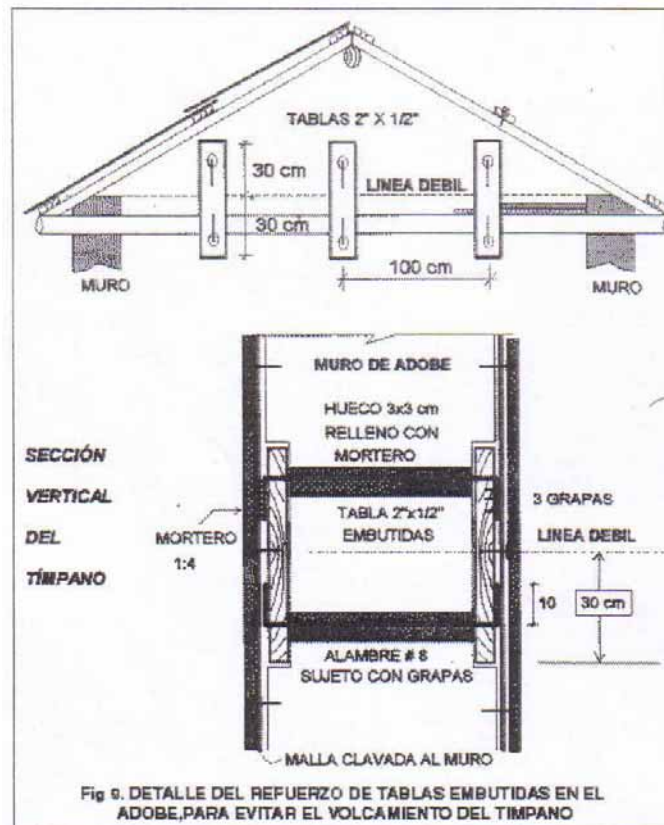


Figure 14

Cas des maisons à 2 étages

Il n'existe pas, à notre connaissance, d'essais en laboratoire pour des maisons de plus d'un étage en adobe.

Il est dès lors conseillé de couvrir de treillis l'ensemble du rez et de renforcer les points sensibles du 1^{er} étage comme décrit plus haut.

Il y a lieu également de vérifier le bon ancrage aux maçonneries du plancher de l'étage afin d'éviter sa chute en cas de déplacement important des murs. En particulier, les longueurs d'appui des poutres porteuses ne devront pas être inférieures à 20cm. Si tel n'est pas le cas, il faudra maçonner une tête de mur liée au mur principal qui rallongera la longueur d'appui.

Limitations de la technique

Les méthodes décrites plus haut doivent s'appliquer à des constructions ne présentant pas de défauts majeurs auxquels cas les renforcements n'auraient aucune utilité.

En particulier, il y aura lieu d'être attentif aux désordres suivants :

- pallier à toutes les entrées d'eau en restaurant la toiture et si possible assurer les évacuations d'eau pluviale au moyen de gouttières et de descentes (à tout le moins éviter que les eaux de pluie ne ruissellent sur les façades).
- crevasses aux pieds des façades dues à l'humidité : restaurer au moyen de béton afin de réaliser un support correct pour le treillis de renforcement futur. Vérifier si des canalisations situées en pied d'habitation n'ont pas été rompues.
- faiblesses structurelles importantes au niveau de la charpente de toiture : rappelons que la toiture joue un rôle de contreventement ('couvercle de la boîte' du chapitre précédent). On vérifiera dès lors son bon ancrage à la maçonnerie (cfr § précédent). Si l'ajout d'un contreventement par diagonalisation peut se faire facilement, on ne pourra que le recommander. Il y aura surtout lieu de remplacer les pièces de charpente trop affaiblies. Si elle se trouve en trop mauvais état, il faudra prévoir son remplacement. La nouvelle toiture devra alors tenir compte des conseils énoncés dans le paragraphe suivant (nouvelles constructions). En particulier, on coulera une poutre de ceinture en béton sur la périphérie de la maison sur laquelle la nouvelle charpente pourra reposer.
- fissures dans les murs $> 3\text{mm}$: à restaurer au mortier après les avoir vidées, nettoyées et humidifiées.
- Remplacer les adobes endommagées reprenant des linteaux ou des éléments de charpente par des asselets de béton ou de bois dur.
- S'assurer que la densité de murs est suffisante dans les deux directions horizontales.¹ Maçonner des nouveaux murs jusqu'à la charpente de toit connectés à cette dernière si ce n'est pas le cas.
- En cas de hors aplomb de plus de 1cm d'un mur, démonter et reconstruire celui-ci en utilisant les mêmes briques mais posées au mortier. Assurer la jonction avec les murs existants au moyen d'une colonne de béton.
- Enfin, le renforcement sera inutile en cas de constructions sur sols dangereux (argiles expansives, sables bouillants, sols liquéfiables), de constructions non fondées sur sols de mauvaise qualité, de maisons à plus de deux étages ne présentant pas une densité de murs suffisante.

2) Nouvelles constructions

Pour les nouvelles constructions en terre, il est tout d'abord indispensable de respecter les principes généraux de conception et d'implantation énoncés dans les chapitres précédents.

Pour ce qui est de la mise en œuvre, la technique de renforcement au moyen de treillis décrite plus haut semble présenter le plus d'efficacité au niveau de la pratique chantier. Dans les régions andines le treillis se procure facilement dans les chefs-lieux de chaque

¹ Densité murs dans les 2 directions $D_s > 0.07\text{m}^2/\text{m}^2$. D_s = Somme ($L \cdot \text{ép.}$) de tous les murs / Surface au sol

département, la mise en œuvre de la technique est quant à elle aisée et rapide. Nous conseillerons donc de l'appliquer également aux nouvelles constructions.

Les constructions neuves pourront en plus bénéficier d'améliorations supplémentaires :

- Fabrication des briques d'adobe respectant toutes les procédures lui garantissant une bonne qualité (voir document PUCP en annexe).
- Prévision d'un système d'évacuation des eaux de pluies de manière à ce que les façades ne soient pas systématiquement détrempées.
- réalisation systématique de fondations et de soubassement en béton « cyclopéen » (la tranchée est préalablement remplie de grosses pierres, le béton maigre est coulé ensuite).
- Les murs auront 40cm d'épaisseur minimum.
- humidification des adobes au moment de leur mise en œuvre
- attention particulière à la réalisation de joints d'épaisseurs constantes
- réalisation d'une poutre de ceinture en béton armé sur toute la périphérie du bâtiment ; celle-ci pourra même servir de linteau pour les différentes baies de portes et de fenêtres. Le but de cette poutre est de solidariser les murs entre eux et de soutenir la charpente de toiture en cas de défaillance locale d'un mur porteur. Sauf en cas de baies anormalement larges (>2m-à éviter autant que possible), cette poutre aura une hauteur d'au moins 30 cm et pourra être armée par deux barres à béton diam.12. posée 3cm au-dessus du niveau de fond de poutre. On assurera un recouvrement de 80cm à la jonction entre deux barres (y.c. dans les angles). Pour des portées plus importantes, un calcul sera nécessaire.
- Contreventement de la charpente de toiture dans les deux directions au moyen d'une triangulation adaptée.
- Les toitures en terre seront à éviter ; on préférera des toitures légères afin d'abaisser au maximum le centre de gravité de l'ouvrage.

Concluons sur cette méthode en disant que l'implantation des bandes de renfort doit faire l'objet d'une analyse spécifique pour chaque projet. Une série d'exemples pratiques sont donnés en annexe de manière à ce que l'utilisateur du manuel puisse bien comprendre l'application des principes généraux cités plus haut à une série de cas particuliers.

Des améliorations à la tenue aux séismes peuvent également être réalisées au moyen de tiges de bambous posées dans les joints de maçonnerie. Il semble toutefois que ce matériau ne soit pas disponible en quantité suffisante pour des programmes à grande échelle. Il peut d'après nous être intéressant localement. Une procédure complète de mise en œuvre a été développée par l'Université Catholique du Pérou (voir annexe).

Une autre piste serait de remplacer le bambou par des bandes de treillis (à l'image du « murfor » utilisé chez nous en maçonnerie en blocs de béton ou de terre cuite). Nous ne connaissons toutefois aucun exemple pratique et ignorons si cela s'adapte bien à la maçonnerie d'adobe.

Citons également une technique de renforcement utilisée en Afrique consistant à réaliser une ossature en bambou de part et d'autre des parois de briques de terre séchées. De cette

manière, l'ossature reste visible et peut être facilement remplacée en cas de détériorations (termite, ...). Nous ne connaissons toutefois aucune étude poussée sur cette méthode.

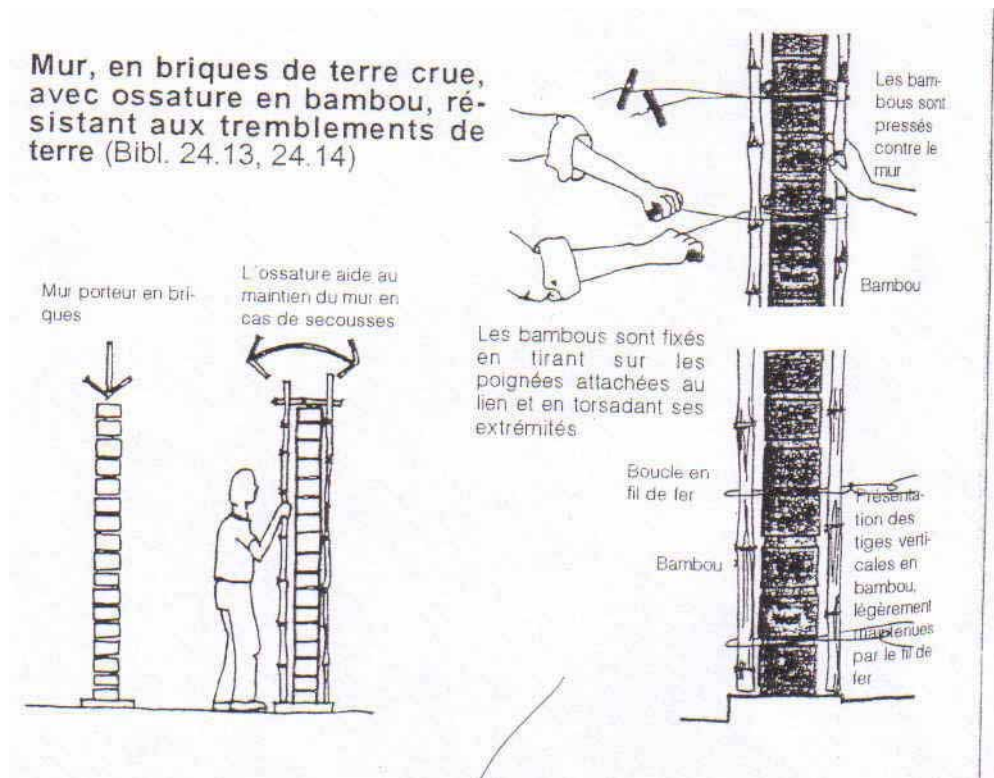


Figure 15

V. Conclusion

Une des spécificités du domaine de la construction est que les conséquences de malfaçons ou de mise en œuvre non adaptées aux réalités du terrain peuvent se révéler dramatiques.

C'est pourquoi nous nous sommes particulièrement attardés sur la technique de renforcement des constructions d'adobe au moyen de treillis métallique car c'est la seule, à notre connaissance, à avoir fait l'objet d'un programme d'essai en laboratoire et d'études techniques très poussées. En effet, si d'autres techniques plus intuitives peuvent être performantes, les conséquences d'un échec (même statistiquement très rare) sont telles que les développer ici nous semblait peu raisonnable. Dès lors, nous conseillerons aux acteurs de terrain de déroger à la 'méthode treillis' que s'ils ne peuvent faire autrement.

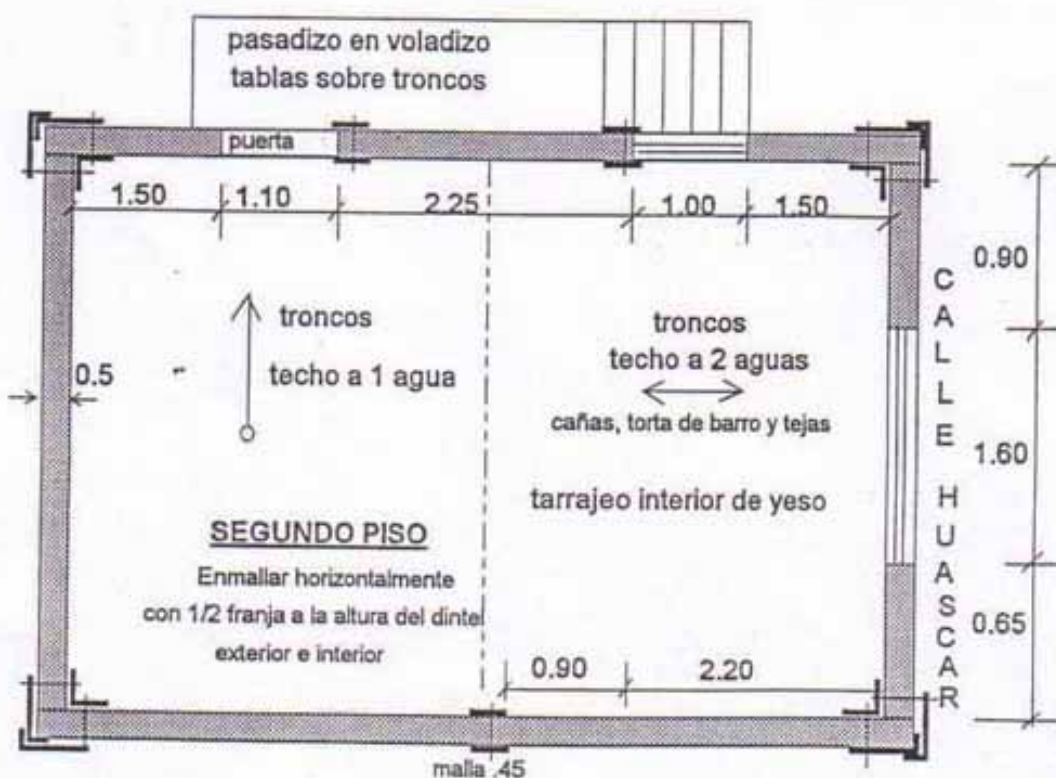
Une autre particularité du secteur est que chaque chantier est différent. Chaque bâtiment demande donc une analyse spécifique. Il s'agit donc de pouvoir appliquer des principes généraux à différents cas particuliers. La compréhension de ces principes généraux est donc fondamentale, c'est pourquoi ils prennent une place conséquente dans ce guide.

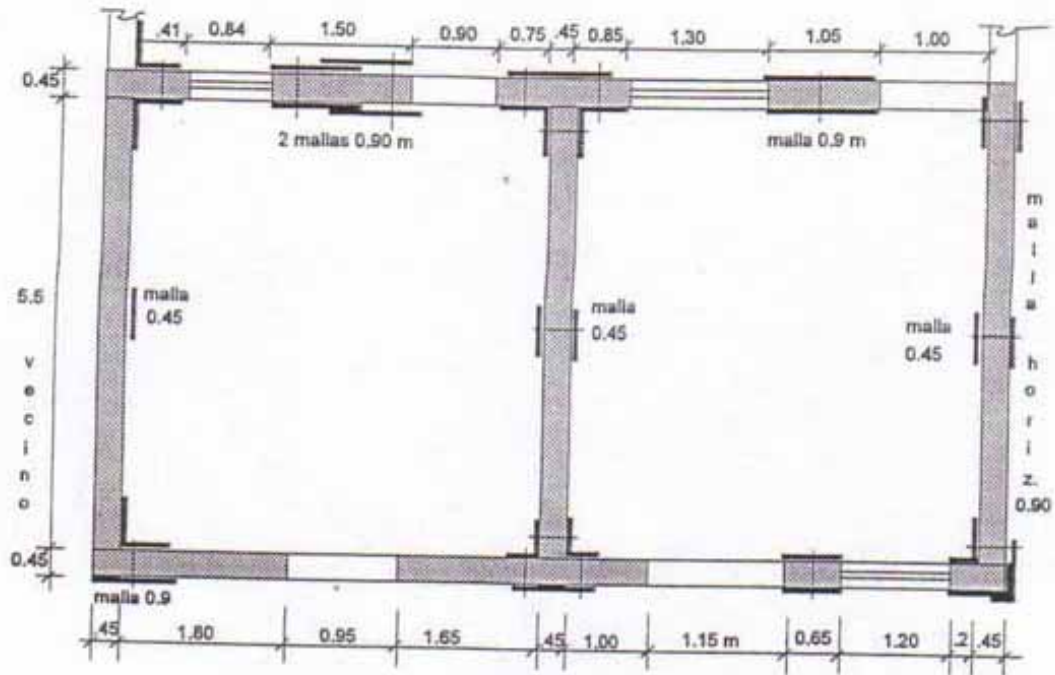
ANNEXES

Les annexes suivantes sont à la disposition du lecteur sur simple demande à ISF :

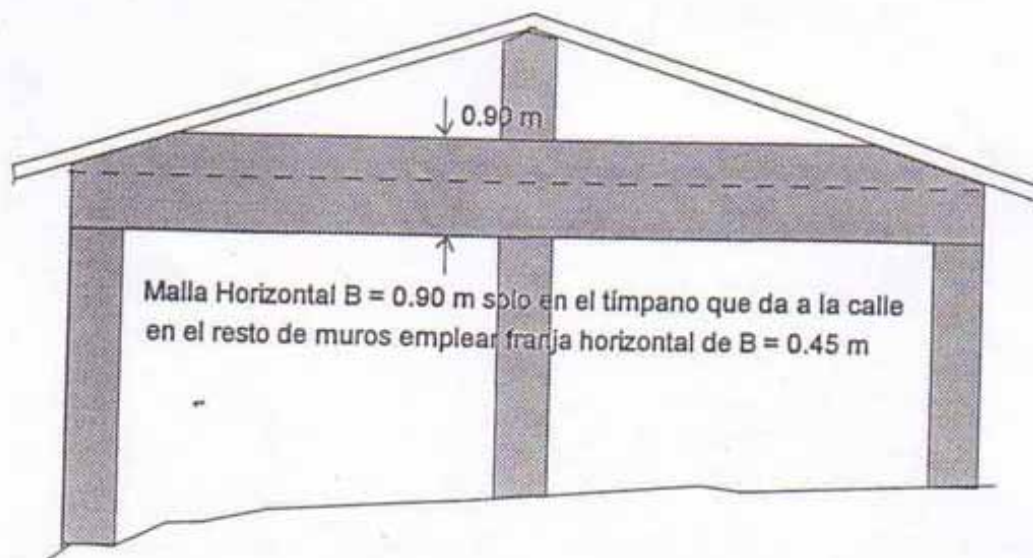
- **Renforcement des maisons d'adobe au moyen de bambou** par l'Université Catholique du Pérou
- Exemples pratiques de renforcements de maisons en adobe : plans détaillés montrant les zones sensibles à renforcer au cas par cas.

Annexe 1





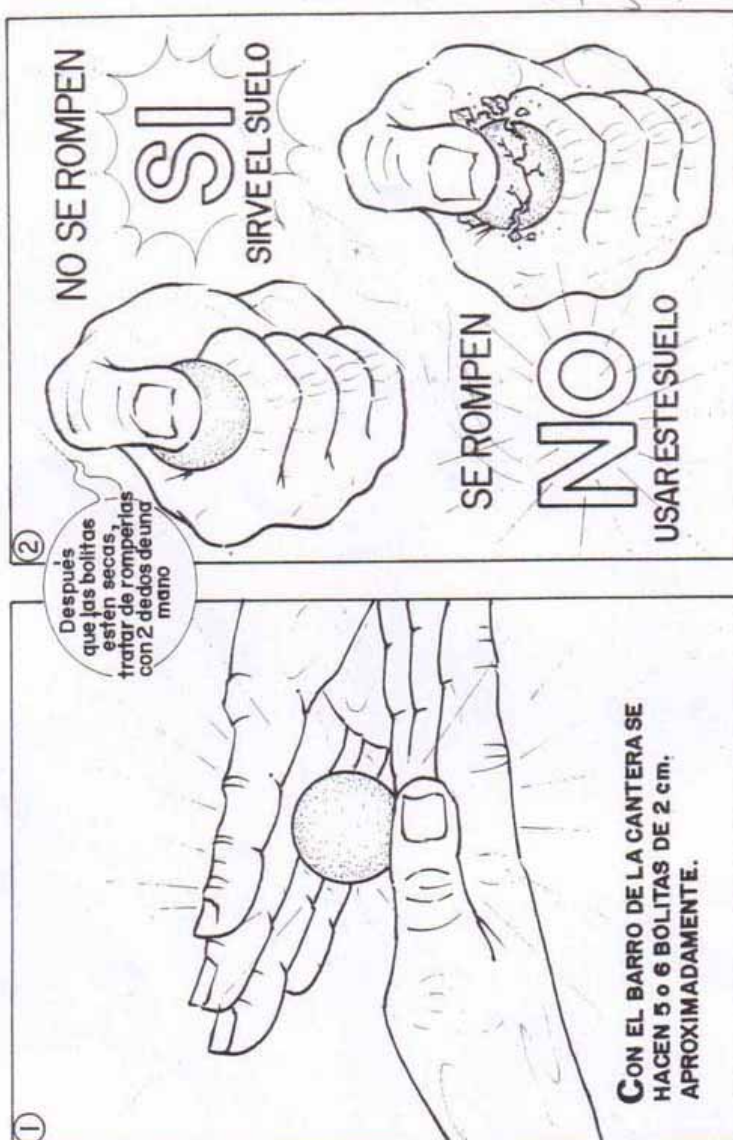
Jirón RICARDO PALMA





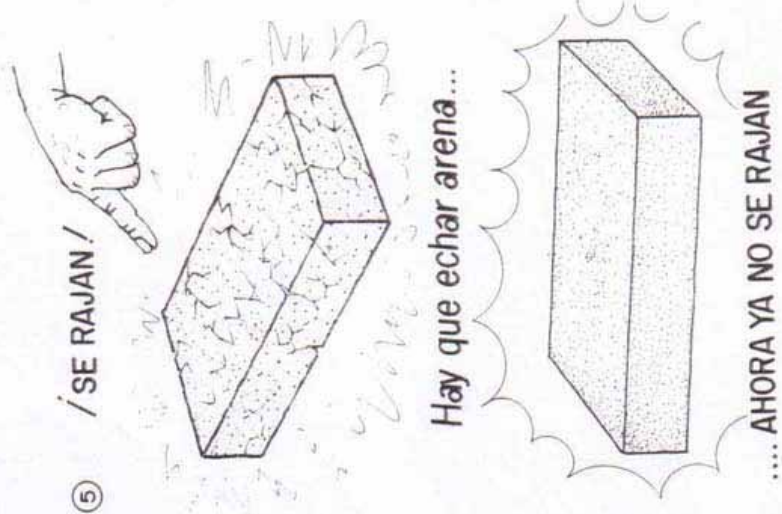
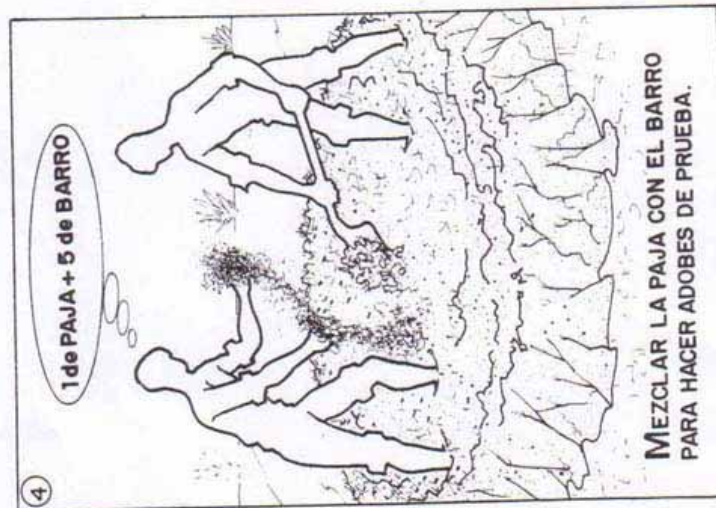
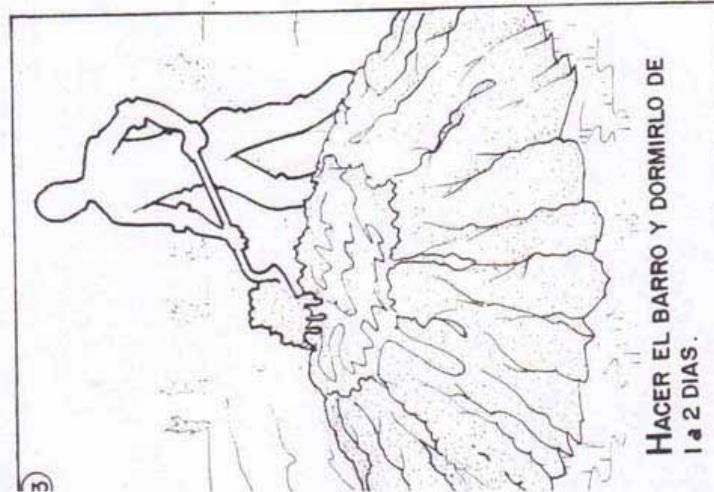
PRUEBA PARA ESCOGER UN BUEN SUELO .

1. SUELO COMUN ES UTILIZADO PARA HACER ADOBES Y EL BARRO PARA LAS UNTAS DE LAS PAREDES DE LA CASA. TODOS LOS SUELOS NO SON ADECUADOS PARA ESTOS FINES. 2. LOS SUELOS SON UNA MEZCLA DE GRAVILLA, ARENA Y ARCILLA. AL COMBINARLOS CON AGUA SE LES PUEDE DAR LA FORMA NECESARIA.



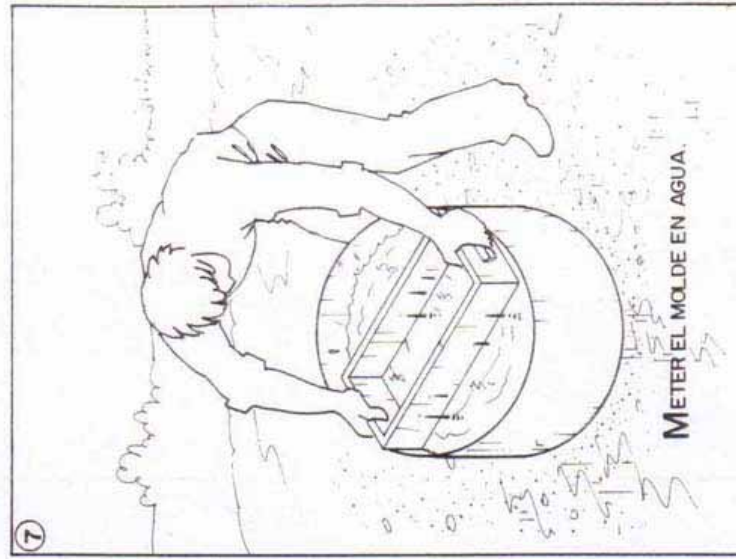
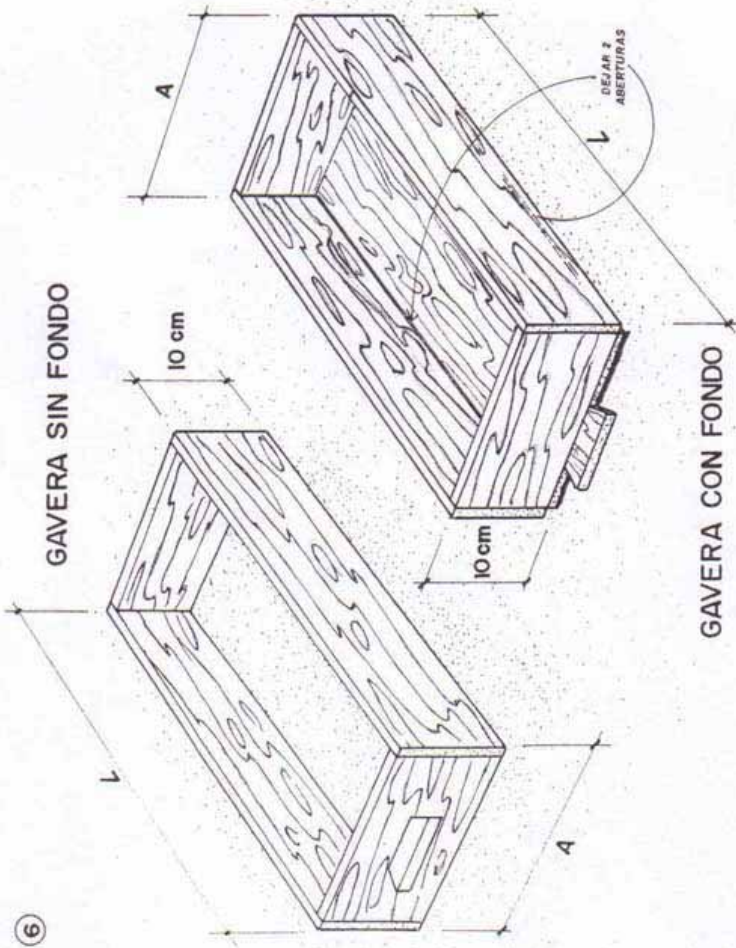
3. NO HAY SUFICIENTE ARCILLA EN UN SUELO, LA MEZCLA DE AGUA Y SUELO (BARRO) NO SERA SUFICIENTEMENTE FUERTE CUANDO SEQUE. 4. POR EL CONTRARIO NO HAY SUFICIENTE GRAVILLA O ARENA EN EL SUELO, EL BARRO SE ENCOGERA Y SE RAJARA CUANDO SEQUE. 5. EN ESTA PAGINA SE MUESTRA UNA PRUEBA SIMPLE PARA VERIFICAR SI EL SUELO TIENE SUFICIENTE ARCILLA.

BARRO PARA FABRICAR ADOBES .



SE RECOMENDABLE AGREGAR AL BARRO PAJA CORTADA EN TROZOS DE 5 cm, MAS O MENOS, PARA CONTROLAR LA PROPAGACION DE LAS RAJADURAS. HAY QUE HACER UNOS ADOBES DE PRUEBA. SI LOS ADOBES SE RAJAN AL SECARSE, ENTONCES EL SUELO CONTIENE MUCHA ARCILLA Y HAY QUE AGREGARLE

MÉTODOS PARA FABRICAR ADOBES.



PARA FABRICAR ADOBES SE PUEDE USAR LA GAVERA CON O SIN FONDO.
 EN AMBOS CASOS LA GAVERA SE DEBE SUMERGIR EN AGUA PARA EVITAR QUE EL BARRO SE PEGUE EN EL MOLDE.
 EL TAMAÑO DE LOS ADOBES DEPENDERÁ DEL ANCHO DE LAS PAREDES DE LA CASA :

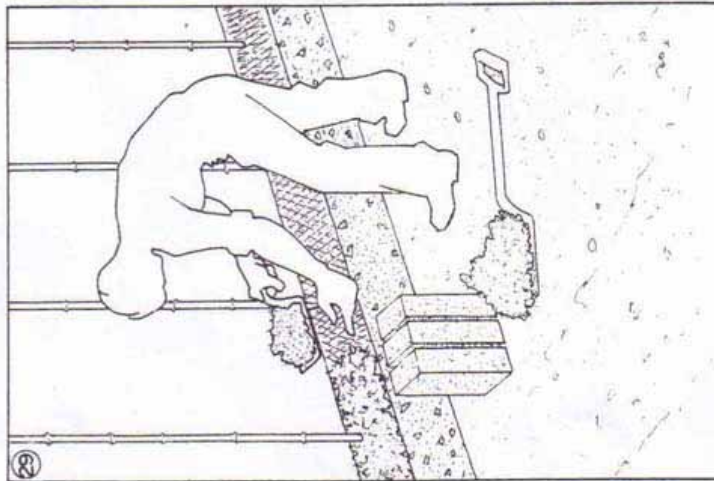
Ancho de la pared	L (cm)	A (cm)
30 cm	30	12.5
40 "	40	17
50 "	50	22

LOS MUROS .

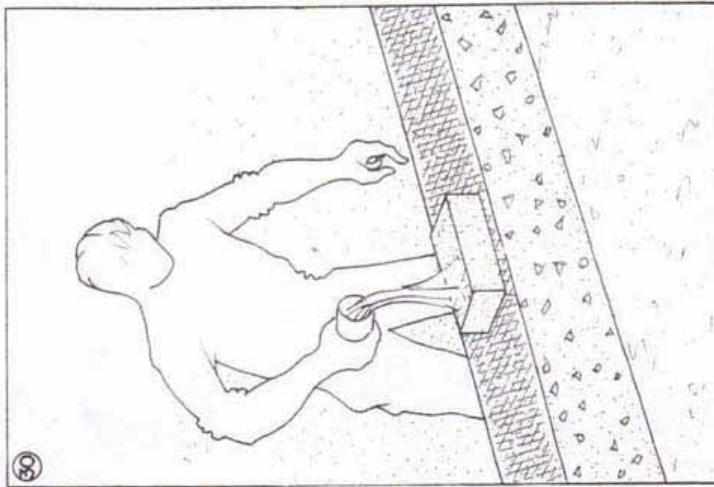
EL BARRO PARA MORTERO

EL BARRO PARA LAS JUNTAS DEBE HACERSE ELIMINANDO TODAS LAS PIEDRAS QUE PUEDA CONTENER EL SUELO. SE DESEA OBTENER UN MORTERO QUE CUANDO SEQUE, NO SE RAJE, YA QUE LAS RAJADURAS EN EL MORTERO DEBILITAN LA PARED.

EL BARRO PARA LAS JUNTAS DEBERA DORMIRSE 1 ó 2 DIAS ANTES DE MEZCLARLO CON LA PAJA, CORTADA EN TROZOS DE 5 cm, MAS ó MENOS.

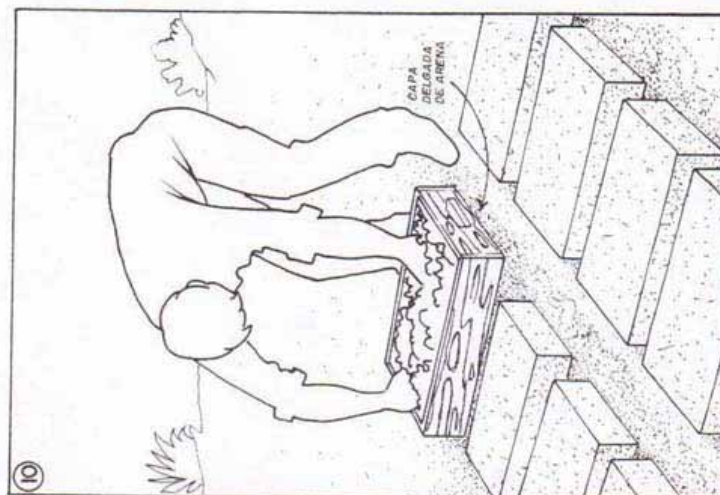


COLOCAR UNA CAPA DE BARRO SOBRE EL SOBRECIMIENTO.

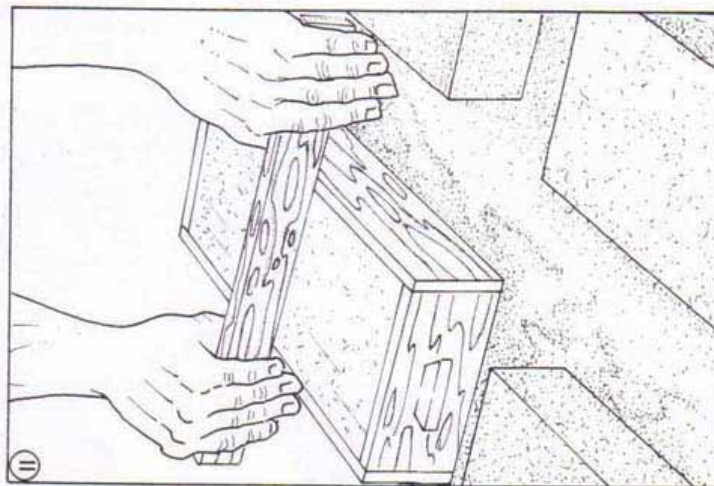


MOJAR LA SUPERFICIE DE LOS ADOBES ANTES DE ASENTARLOS. ESTO EVITARA QUE EL MORTERO SE SEQUE MUY RAPIDAMENTE Y PRODUZCA FISURAS.

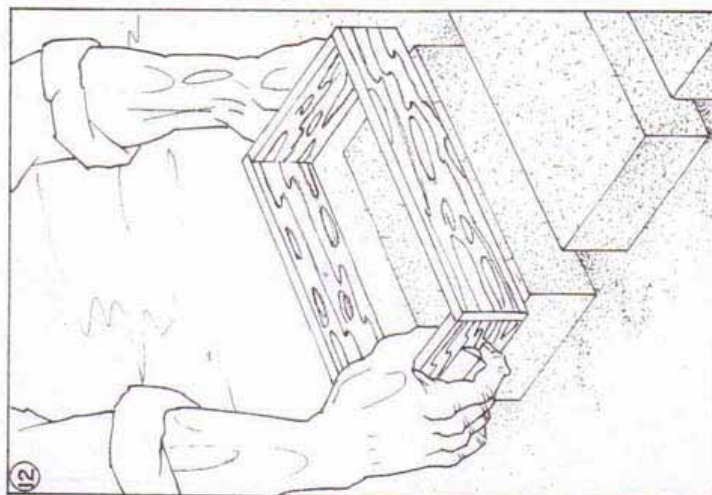
UTILIZACION DE LA GAVERA SIN FONDO .



TIRAR EL BARRO DENTRO DE LA GAVERA COLOCADA EN EL SUELO.

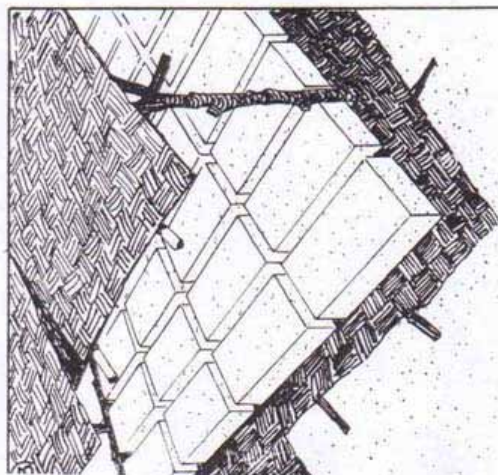


EMPAREJAR LA SUPERFICIE CON UNA REGLA DE MADERA, MOJADA.

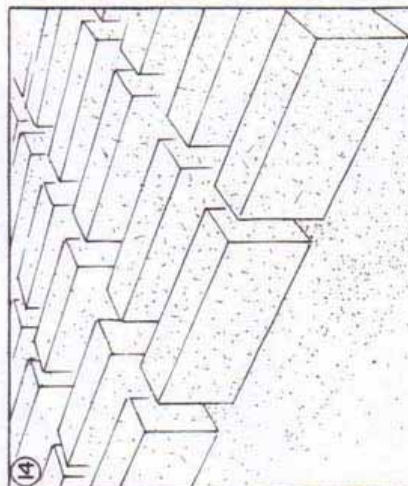


SACAR CON CUIDADO EL MOLDE PARA NO DEFORMAR EL ADOBE RECIENTE HECHO.

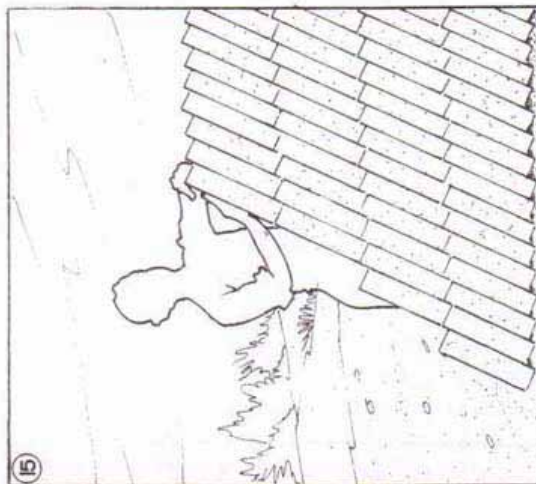
ECADO DE LOS ADOBES .



SECAR LOS ADOBES SOBRE EL
SUELO LIMPIO Y PLANO.



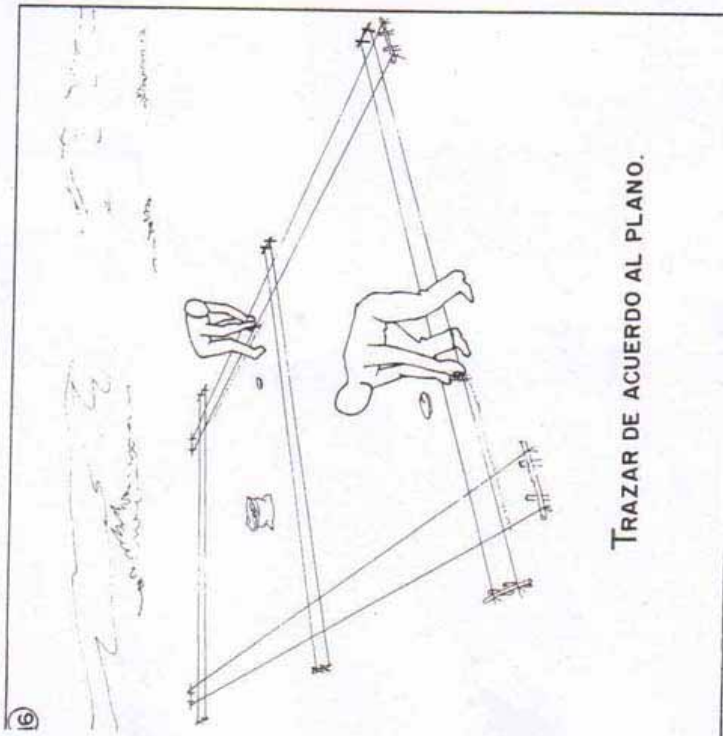
A LOS 4 DIAS VOLTEARLOS DE
CANTO PARA QUE SEQUEN.



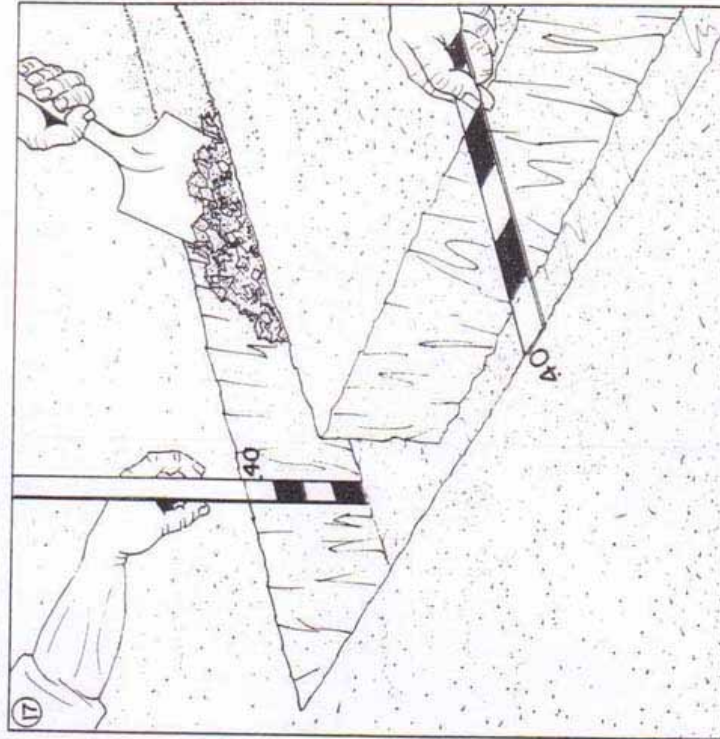
1 SEMANA DESPUES APILAR LOS
ADOBES.

ES PREFERIBLE SECAR LOS ADOBES A LA SOMBRA, PERO TAMBIEN SE PUEDE CUBRIR LA SUPERFICIE DE LOS ADOBES CON PAJA O ARENA PARA EVITAR QUE LA EVAPORACION DEBIDA AL VIENTO Y AL SOL FUERTE LOS FISURE.

TRAZO Y EXCAVACION

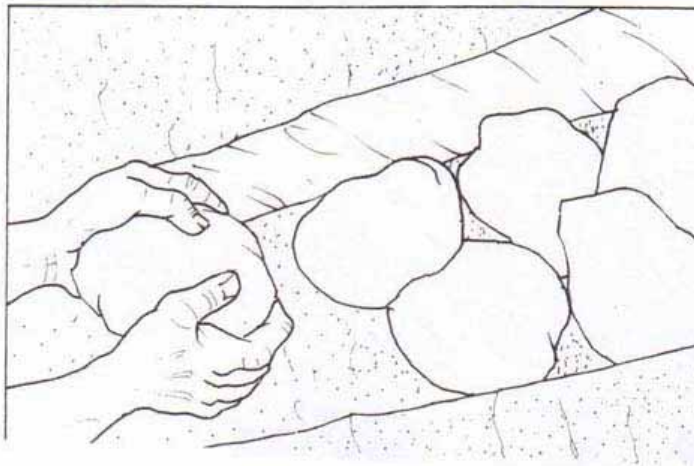


TRAZAR DE ACUERDO AL PLANO.

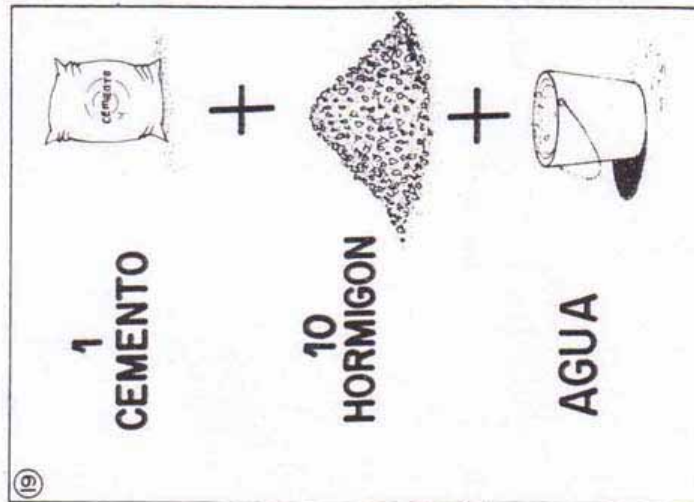


- EXCAVAR LA ZANJA A UNA PROFUNDIDAD MINIMA DE **40** cm , ELIMINANDO LA CAPA SUPERFICIAL DE SUELO SUELTO o RELLENO.
- A BASE DEL CIMIENTO DEBE APOYARSE SOBRE UN SUELO FIRME.
- SI LOS MUROS SON DE **50** cm , LA ZANJA DEBE SER TAMBIEN DE **50** cm DE ANCHO.

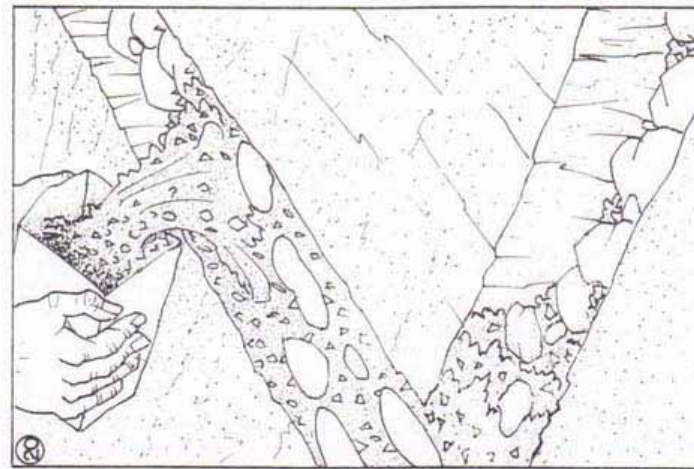
MENTACION .



COLOCAR PIEDRAS GRANDES DE MANERA

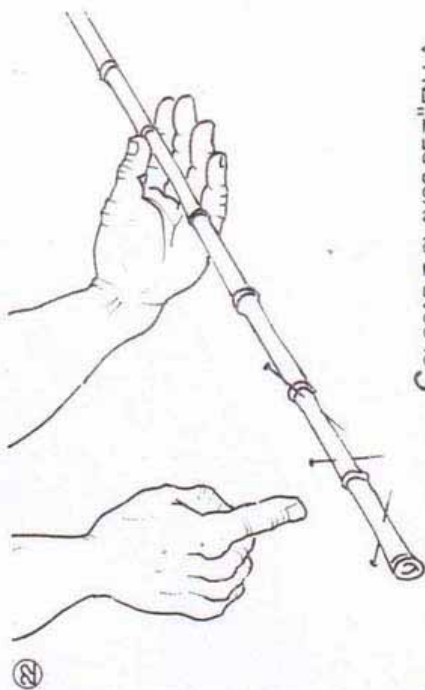
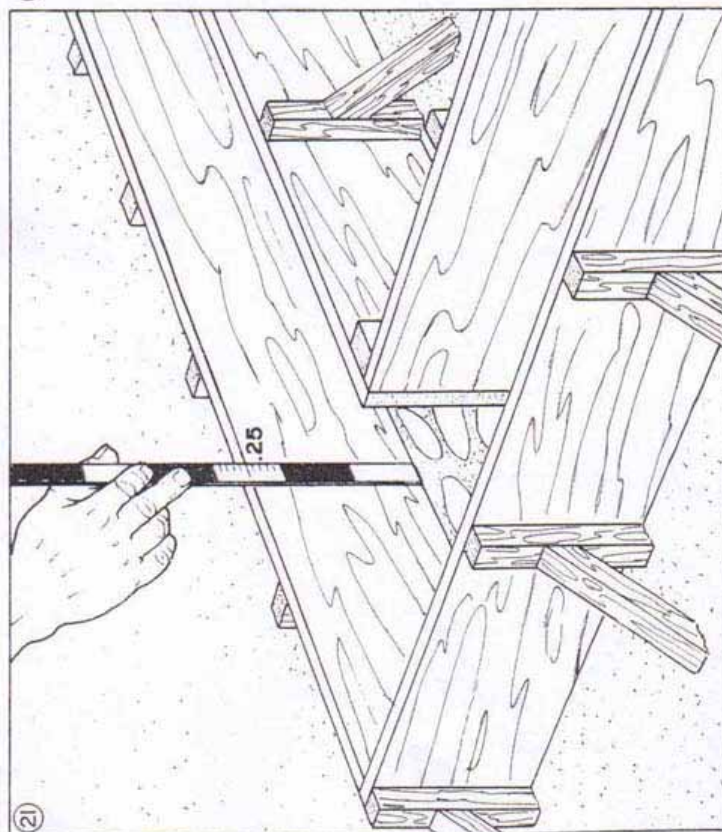


MEZCLA



LLENAR HASTA LA ALTURA DEL SUELO

ENCOFRADO PARA EL SOBRECIMIENTO .

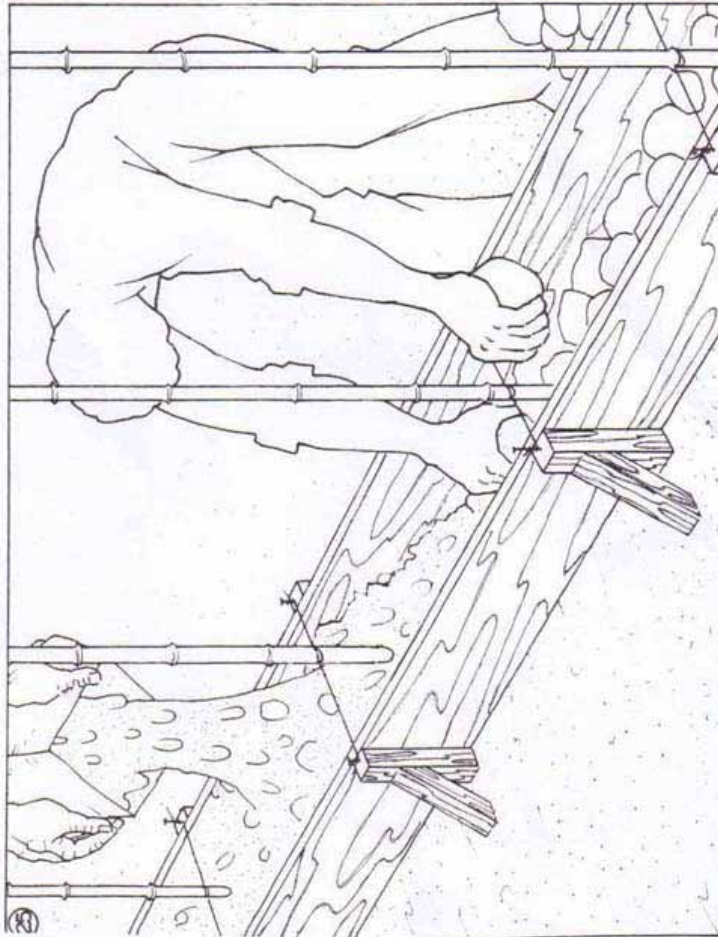


COLOCAR 3 CLAVOS DE 3" EN LA BASE DE LAS CAÑAS VERTICALES PARA QUE SIRVAN DE ANCLAJE EN EL SOBRECIMIENTO.

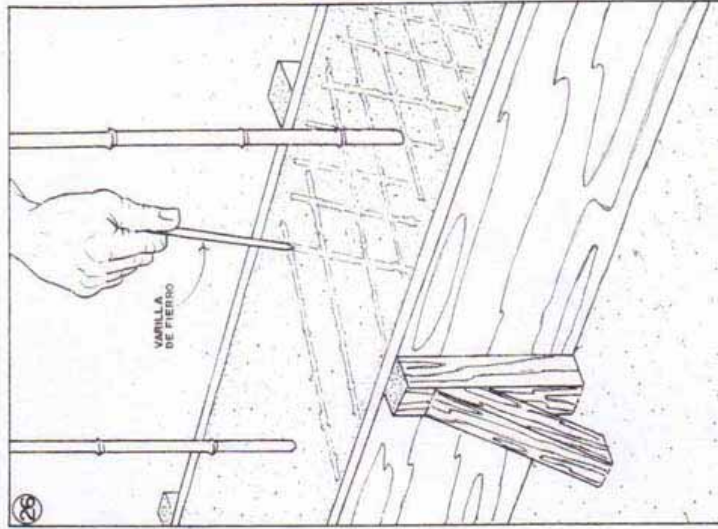
COLOCAR LAS TABLAS PARA EL SOBRECIMIENTO CON UNA ALTURA MINIMA DE 25 cm.

LOS MUROS LLEVARAN EN SU INTERIOR UNA MALLA DE CAÑA HORIZONTAL Y VERTICAL PARA MEJORAR SU RESISTENCIA FRENTE A LOS TERREMOTOS.

EL SOBRECIMIENTO .

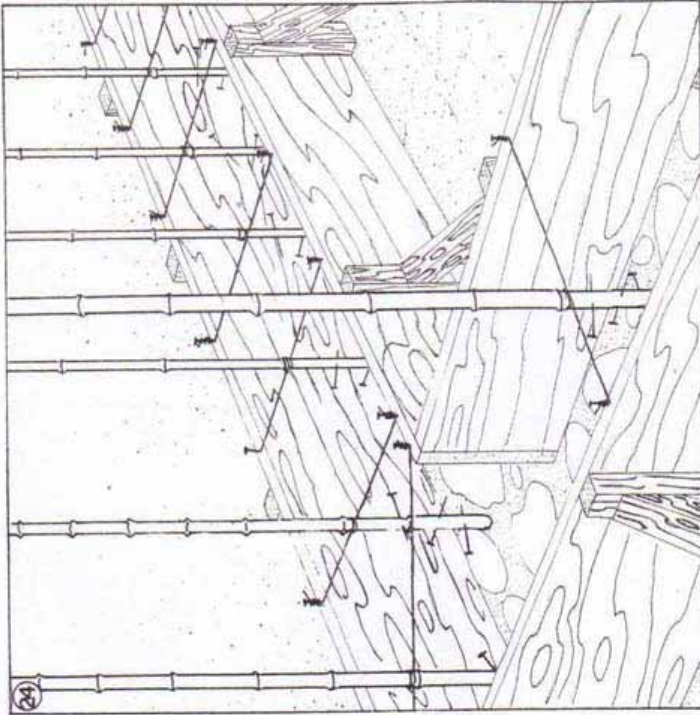
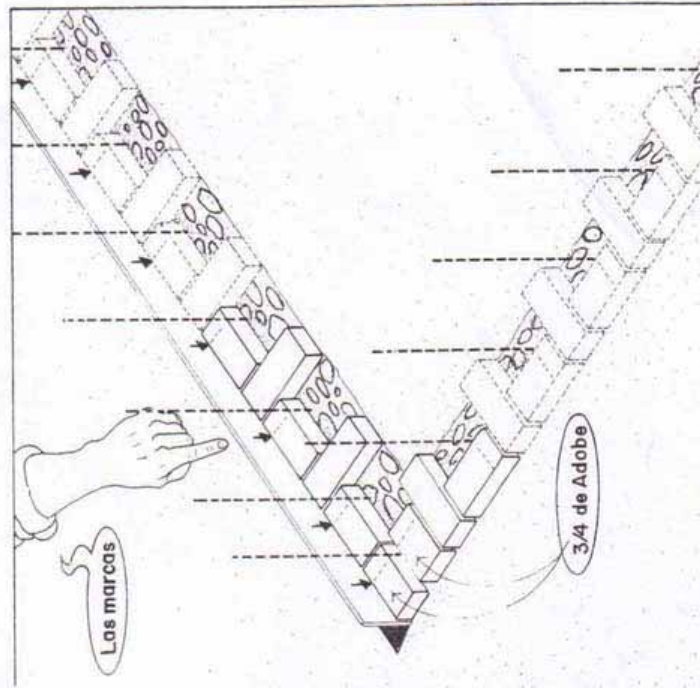


LLENAR EL SOBRECIMIENTO CON LA MISMA MEZCLA DE LA CIMENTACION Y COLOCAR LAS PIEDRAS MEDIANAS.



RAYAR LA SUPERFICIE TERMINADA PARA MEJORAR LA JUNTA CON LOS MUROS.

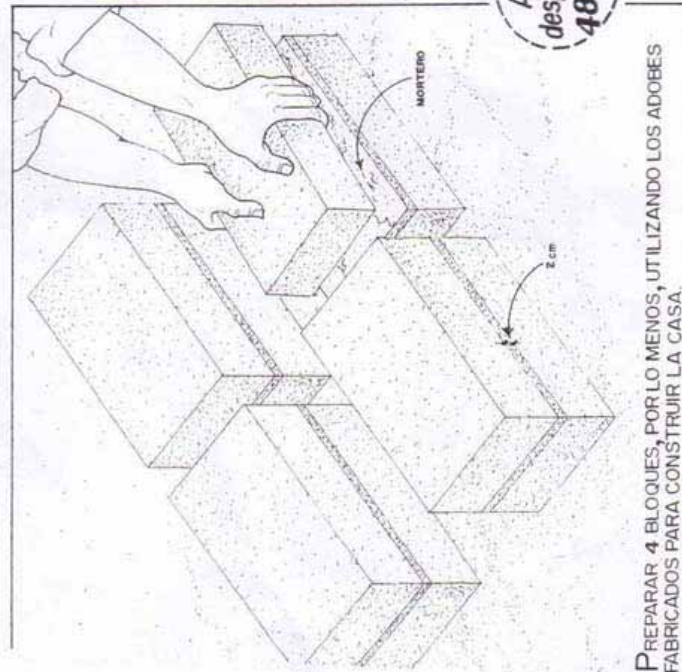
LOCACION DE CAÑAS VERTICALES .



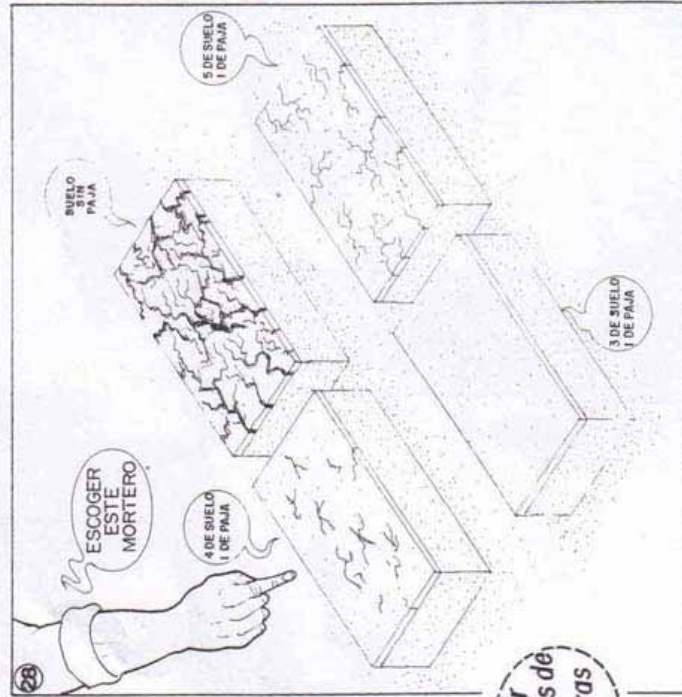
... ..

COLOCAR LAS CAÑAS VERTICALES Y SUJETARLAS AL ENCOFRADO
... ..

JEBA PARA ESCOGER EL MORTERO .



PREPARAR 4 BLOQUES, POR LO MENOS, UTILIZANDO LOS ADOBES FABRICADOS PARA CONSTRUIR LA CASA.



ESCOGER EL MORTERO QUE SOLO TENGA RAJADURAS MUY FINAS, CON LA MENOR CANTIDAD DE PAJA. EL BARRO CON MUCHA PAJA ES MUY DIFÍCIL DE TRABAJAR Y NO ENTRA BIEN EN LAS JUNTAS.

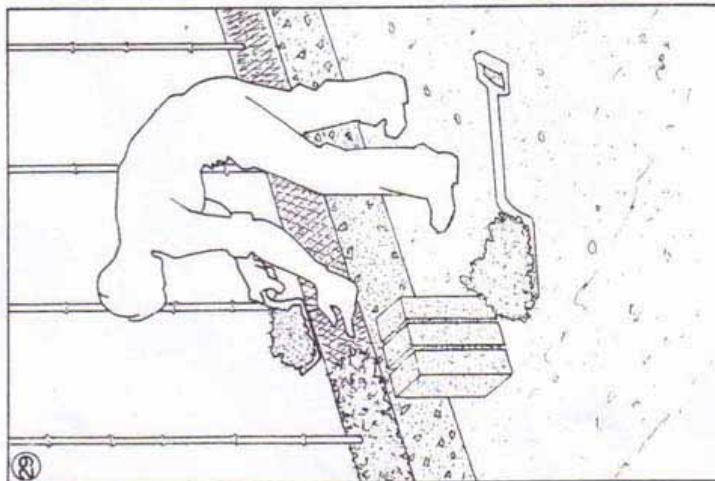
BARRO PARA LAS JUNTAS DE LOS MUROS DE ADOBE, LLAMADO MORTERO, TIENE QUE HACERSE AÑADIENDO PAJA, DE CUALQUIER TIPO, AL SUELO REMO-

LOS MUROS .

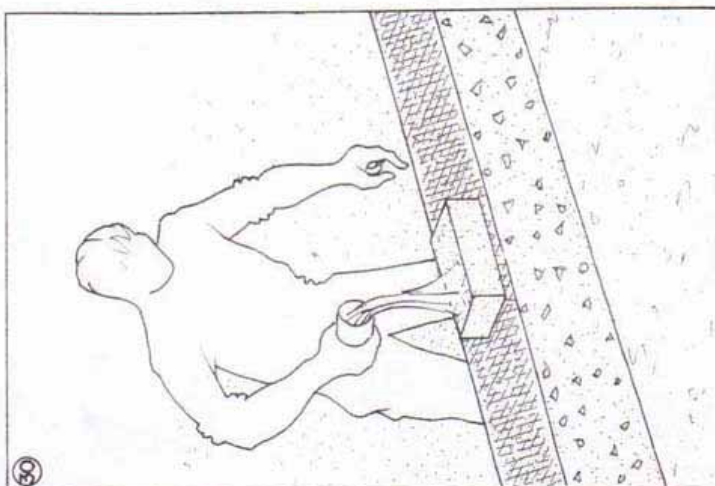
EL BARRO PARA MORTERO

EL BARRO PARA LAS JUNTAS DEBE HACERSE ELIMINANDO TODAS LAS PIEDRAS QUE PUEDA CONTENER EL SUELO. SE DESEA OBTENER UN MORTERO QUE CUANDO SEQUE, NO SE RAJE, YA QUE LAS RAJADURAS EN EL MORTERO DEBILITAN LA PARED.

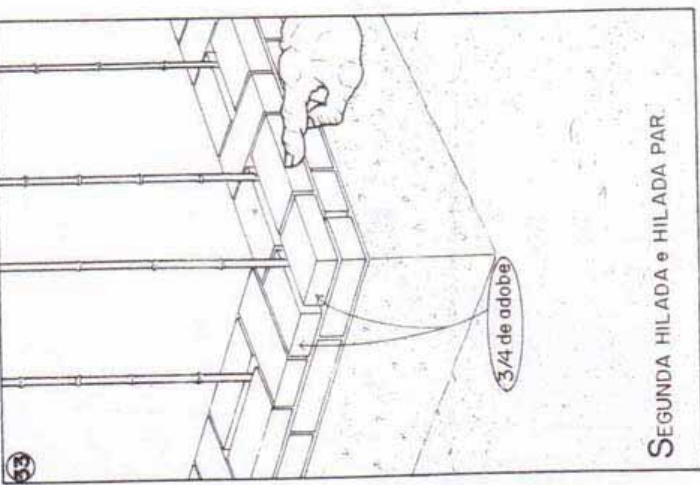
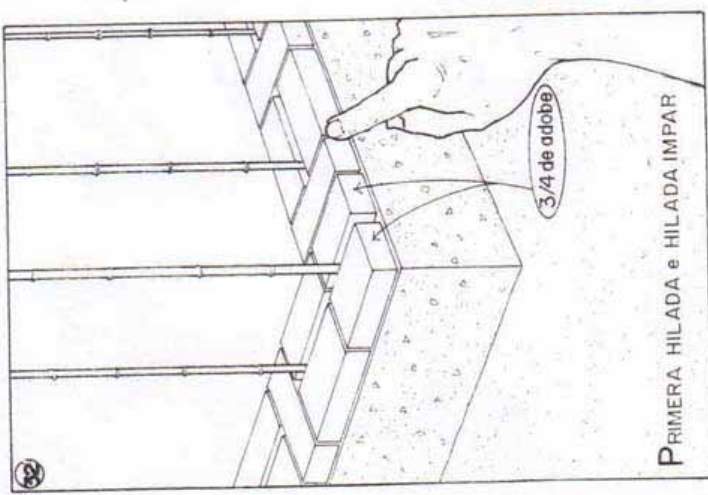
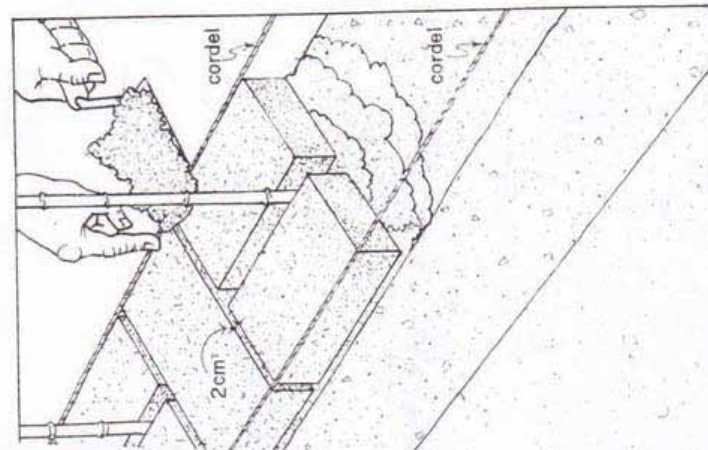
EL BARRO PARA LAS JUNTAS DEBERA DORMIRSE 1 ó 2 DIAS ANTES DE MEZCLARLO CON LA PAJA, CORTADA EN TROZOS DE 5 cm, MAS ó MENOS.



COLOCAR UNA CAPA DE BARRO SOBRE EL SOBRECIMIENTO.

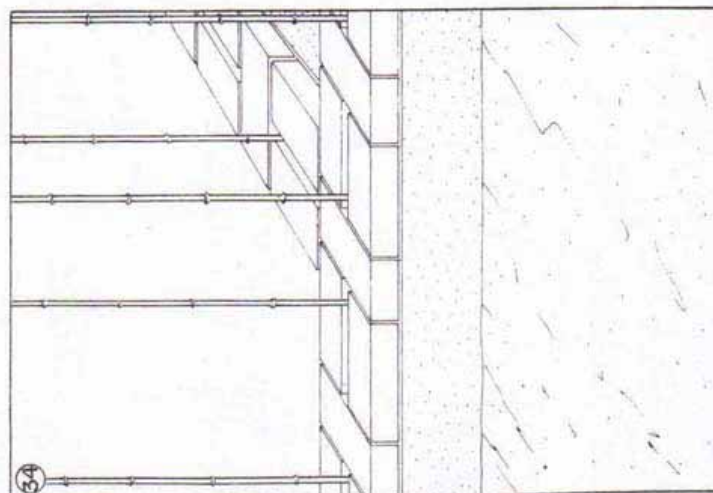
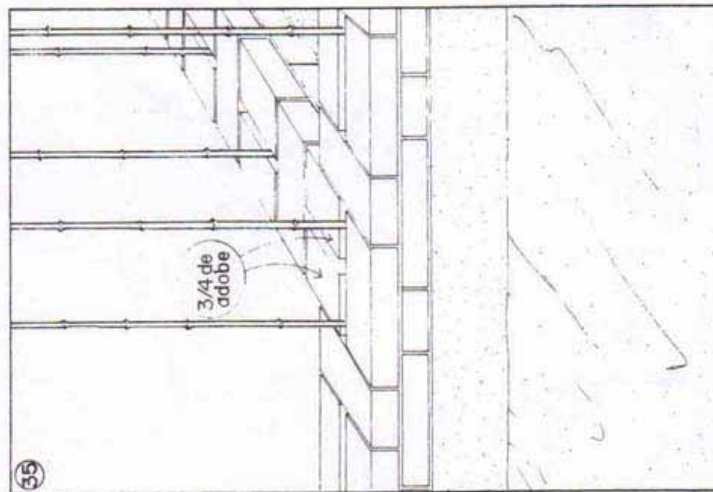
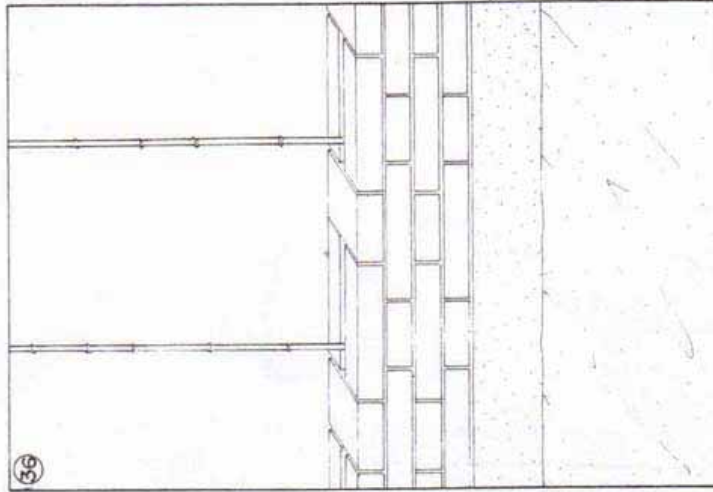


MOJAR LA SUPERFICIE DE LOS ADOBES ANTES DE ASENTARLOS. ESTO EVITARÁ QUE EL MORTERO SE SEQUE MUY RAPIDAMENTE Y PRODUZCA FISURAS.



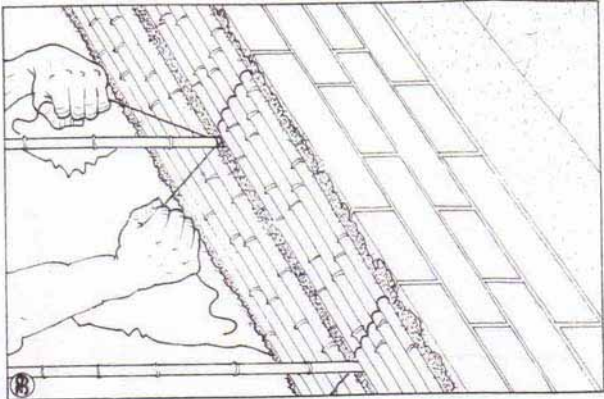
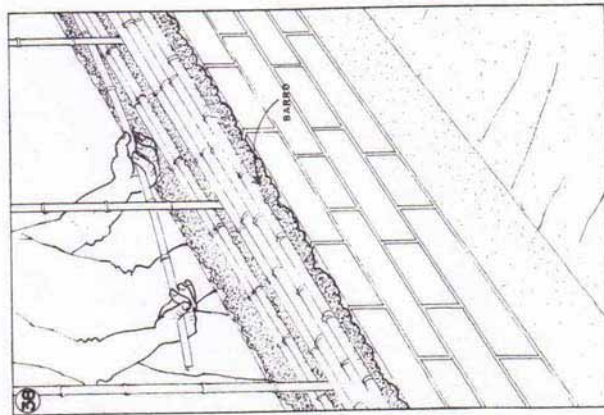
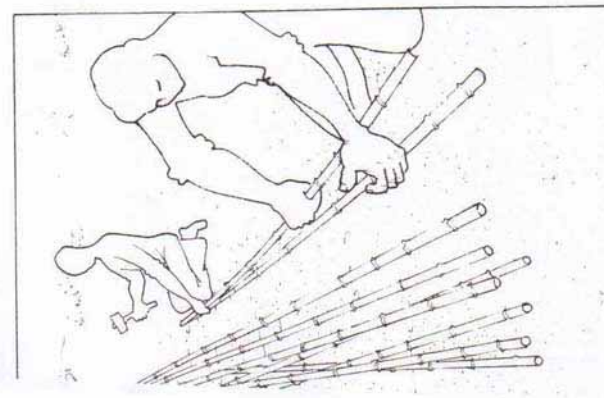
DAIRO ANDRÉS SEGUN PLANTILLA USANDO

... EN ESCALA



ENCUENTRO EN PRIMERA HILADA e HILADAS IMPARES. ENCUENTRO EN SEGUNDA HILADA e HILADAS PARES. HACER 4 HILADAS TRABADAS.

LOCACION DE CAÑAS HORIZONTALES .



... X CAÑA VARRIRI A

EN LA CUARTA HILADA COLOCAR CAÑAS
... CAÑA T. 4 III ADAS.

AMARRAR LAS CAÑAS HORIZONTALES ENTRE
SI Y A LAS CAÑAS VERTICALES.

LIVRES – PUBLICATIONS DIVERSES

Matériaux de constructions appropriés – KAT/ITDG/GATE/CRATERRE -1996

Traité de construction en terre – Hugo Houben – Hubert Guillaud – Editions Parenthèses

Guide CP-MI Antilles - Association française du Génie Parasismique

Guide technique parasismique belge pour maisons individuelles – SSTC, Ulg, Saferr, Observatoire Royal de Belgique - 2003

Nuevas casas resistenses de Adobe – Pontificia Universidad Catolica del Peru – Centro International de Investigacion para el Desarrollo

Técnicas para el reforzamiento sismico de viviendas de adobe – Angel San Bartolomé, Daniel Quiun, Luis Zegarra

Reforzamiento de viviendas existentes de adobe – Proyecto CERESIS-GTZ-PUCP - Angel San Bartolomé, Daniel Quiun, Luis Zegarra, Alberto Giesecke - Pontificia Universidad Catolica del Peru

Research studies on adobe buildings & earthquake – Marcial Blondet, Gladys Villa Garcia

Tecnologia apropiada par paises sub-desarrollados – Viviendas Unifamiliares resistentes a los efectos de sismo - Cesar A. Kiamco – Universidad Santa Maria La Antigua – Panama

Small buildings in earthquaka areas – A.F. Daldy – Department of the Environment Building Research Establishment Garston – Watford

Construction métallique et mixte acier-béton –Tome 2 – chap. 8 – Editions Eyrolles

La prise en compte du risque sismique dans les constructions – Guy Besacier – Risques Info N°13 – Juin 2002

Site internet : www.ceresis.org/proyect/madobe/manual.htm