



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL



# Construction en terre crue. Vue d'ensemble et développements au Portugal.

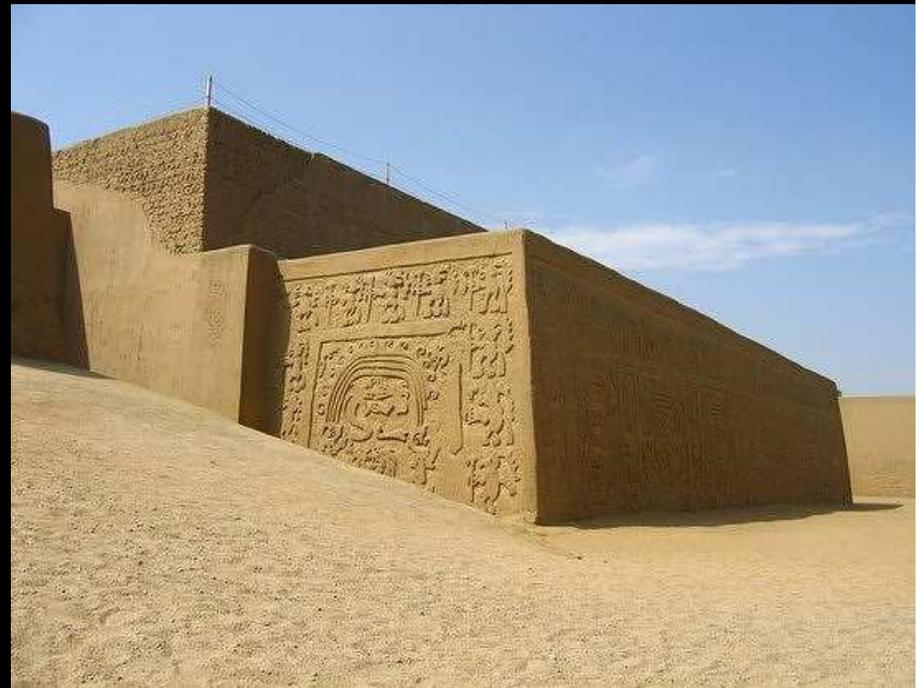
Teresa Diaz Gonçalves  
Maria Idália Gomes

# TERRE

- Historique



cit  antique d'Ur, Irak



cit  de Chan Chan, P rou

# TERRE

## - Historique



cit  antique de Shibam, l men



cit  de M rtola, Portugal  
(foto: Jo o Vieira)

# TERRE

- Historique
- Universel



village Dogon, Mali



Maison en *bauge*, Angleterre  
(foto: Whitton and Laing)

# TERRE

- Historique
- Universel
- Actuel



maison moderne en pisé, Australia  
(foto: Rammed Earth Constructions)



maison en pisé traditionnel a l'Alentejo, Portugal  
(foto: Grincho Serra)

# TERRE

Techniques vernaculaires => matériaux et ressources locales

- architecture de caractère local ou régional
- avec nombreuses variantes (matériaux / techniques)

# TERRE

Techniques vernaculaires => matériaux et ressources locales

- architecture de caractère local ou régional
- avec nombreuses variantes (matériaux / techniques)

Principales systèmes:

- A - monolithiques
- B - de maçonnerie
- C - de remplissage / revêtement

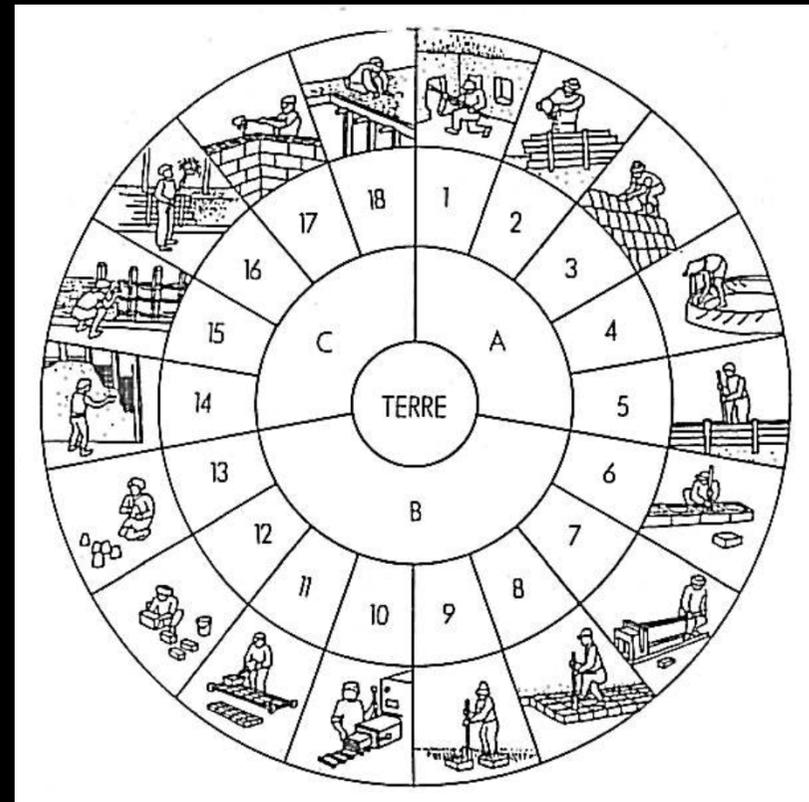


diagramme établi par le group CRATERRE (1986)

# TERRE

Techniques vernaculaires => matériaux et ressources locales

- architecture de caractère local ou régional
- avec nombreuses variantes (matériaux / techniques)

Principales systèmes:

- A - monolithiques
- B - de maçonnerie
- C - de remplissage / revêtement
- D - de liaison

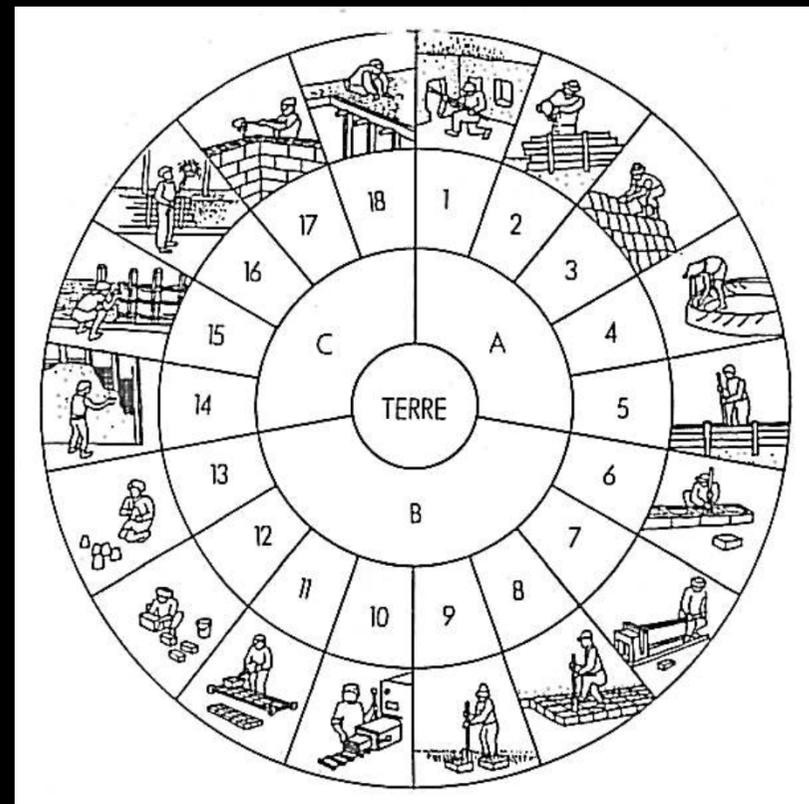


diagramme établi par le group CRATERRE (1986)

# TERRE – systèmes monolithiques

# TERRE – systèmes monolithiques

terre creusée



habitations troglodytes à Matmata, Tunisie  
(foto: Offroad-Reisen)



grottes de Mogao , Chine  
(foto: Steve Cadman)

# TERRE – systèmes monolithique

terre creusée

terre empilée



Djenné, Mali



construction de mur en bauge

(foto: Wikipedia)



Maisons en bauge, Milton Abbas, Angleterre

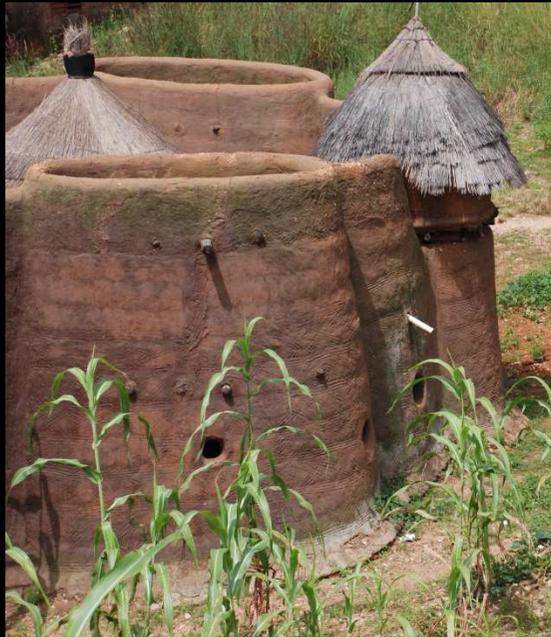
(foto: Ned Trifle)

# TERRE – systèmes monolithiques

terre creusée

terre empilée

terre façonnée



Maison Somba, Bénin  
(foto: Wikipedia)



cabane Mousgoum, Cameroun  
(foto: maremagna)



grenier à Cuernavaca, Mexique  
(foto: RLWemm, Panoramio)

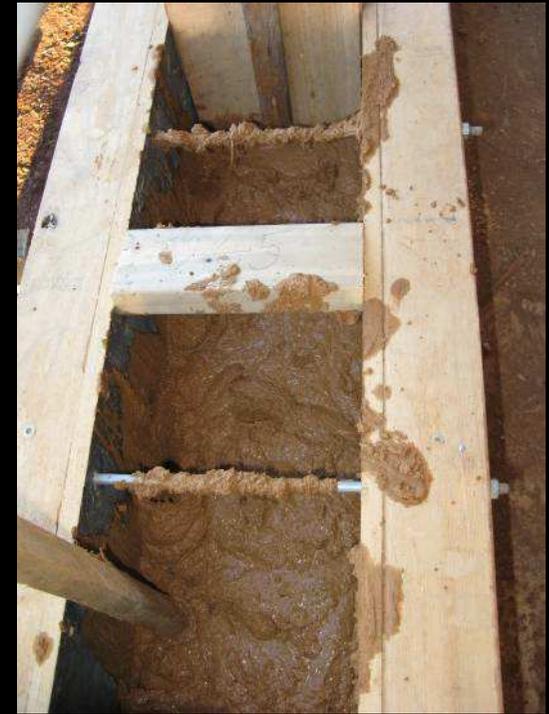
# TERRE – systèmes monolithiques

terre creusée

terre empilée

terre façonnée

terre coulée



workshop à Victoria, Australie

# TERRE – systèmes monolithiques

terre creusée

terre empilée

terre façonnée

terre coulée

terre pisé



# TERRE – systèmes monolithique

terre creusée

terre empilée

terre façonnée

terre coulée

terre pisé



Bâtiment actuel en pisé, a Beja, Portugal  
(foto: EcoCasaPortuguesa)



Construction de bâtiment em pisé, au Portugal  
(foto: Miguel Mendes, arquiteto)

**TERRE –**



ruine d'ancienne habitation en pisé, Alentejo, Portugal

# TERRE – systèmes monolithiques



Johanna house, Victoria, Australie  
(foto: Nicholas Burns, arquitecto)

# TERRE – systèmes de maçonnerie

# TERRE – systèmes de maçonnerie

blocs de terre découpée



blocs de construction en latérite, Orissa, Inde  
(foto: Vitor Pacheco)

# TERRE – systèmes de maçonnerie

blocs de terre découpée

adobe



musée d'art du Nouveau-Mexique, EUA  
(foto: Benjamin Meagher )



construction Inca, Pérou  
(foto: Inter-American Institute for Advanced Studies in Cultural History)

# TERRE – systèmes de maçonnerie

blocs de terre découpée

adobe

- manuel



exécution de *tubalis*, Nigéria  
(foto: Sabine Jell-Bahlsen)



construction Haoussa, Nigéria  
(foto: Sabine Jell-Bahlsen)

# TERRE – systèmes de maçonnerie

blocs de terre découpée

adobe

- manuel
- moulée (artisanal, ...)



# TERRE – systèmes de maçonnerie

blocs de terre découpée

adobe

- manuel
- moulée (artisanal, mécanique)



Nouveau-Mexique, EUA, 1980  
(foto: Christine Bastin)

# TERRE – systèmes de maçonnerie

blocs de terre découpée

adobe

- manuel
- moulée (artisanal, mécanique)

blocs comprimées

# TERRE – systèmes de maçonnerie

blocs de terre découpée

adobe

- manuel
- moulée (artisanal, mécanique)

blocs comprimées

- blocs compactés avec un pilon
- blocs de terre comprimée (BTC)



presse manuel de BTC

(foto: Project Neighbors)

# TERRE – systèmes de maçonnerie

blocs de terre découpée

adobe

- manuel
- moulée (artisanal, mécanique)

blocs comprimés

- blocs compactés avec un pilon
- blocs de terre comprimée (BTC)



construction avec BTC, Texas, 2006  
(foto: Dan Powell)



machine de BTC

# TERRE – systèmes de maçonnerie

blocs de terre découpée

adobe

- manuel
- moulée (artisanal, mécanique)

blocs comprimées

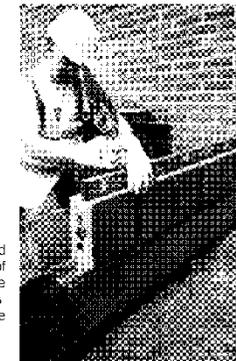
- blocs compactés avec un pilon
- blocs de terre comprimée (BTC)

blocs de terre extrudée



LT\_S\_1\_JSH

## Sumatec® Earth Blocks Information Sheet



### 1. Product

Sumatec® blocks are manufactured from clay

### 2. Suitable Uses

Sumatec® extruded earth blocks are unfired blocks and as such should not be used as an external wall, but are ideal as an internal leaf of certain exterior walls or as an internal partition walls, especially where there is a requirement for a good acoustic wall with high thermal mass. Sumatec® blocks can help inhibit condensation and regulate the relative humidity of the internal atmosphere.

### 3. Composition

Unfired clay blocks have excellent sustainability credentials – low energy input, very low waste and high recyclability. Sumatec® is manufactured in the UK.

### 4. Performance

Sumatec® extruded earth blocks have been developed to combine good compressive strength and high thermal mass with good acoustic and fire properties. They are manufactured to a typical compressive strength of at least 3 N/mm<sup>2</sup>.

### 5. Technical Data

Size 215 x 215 x 100mm (Holes laid vertically)

Average Density	1950 Kg/m <sup>3</sup>
Min. Compressive Strength	5 N/mm <sup>2</sup> (*3N/mm <sup>2</sup> )
Weight (Kg) approx.	Approx. 9kg
Length	215mm
Height	215mm
Width	100mm

\*Holes laid horizontally



www.lime-technology.co.uk  
01223 814444  
01223 814445

01223 814444  
01223 814445  
01223 814446

# TERRE – systèmes de maçonnerie

blocs de terre découpée

adobe

- manuel
- moulée (artisanal, mécanique)

blocs comprimés

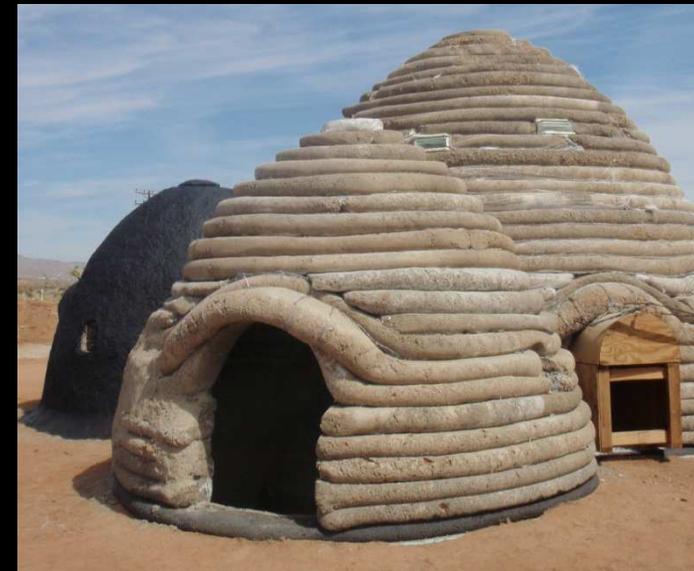
- blocs compactés avec un pilon
- blocs de terre comprimée (BTC)

blocs de terre extrudée

sacs de terre (super adobe)



construction en Afrique du Sud  
(foto: Design Indaba)



Joshua Tree eco home, California

# **TERRE – systèmes de remplissage ou revêtement**

# TERRE – systèmes de remplissage ou revêtement

terre garnissant (torchis)



étage élevée en torchis  
recouverte avec des carreaux  
céramiques, Porto, Portugal  
(foto: peregrino27)

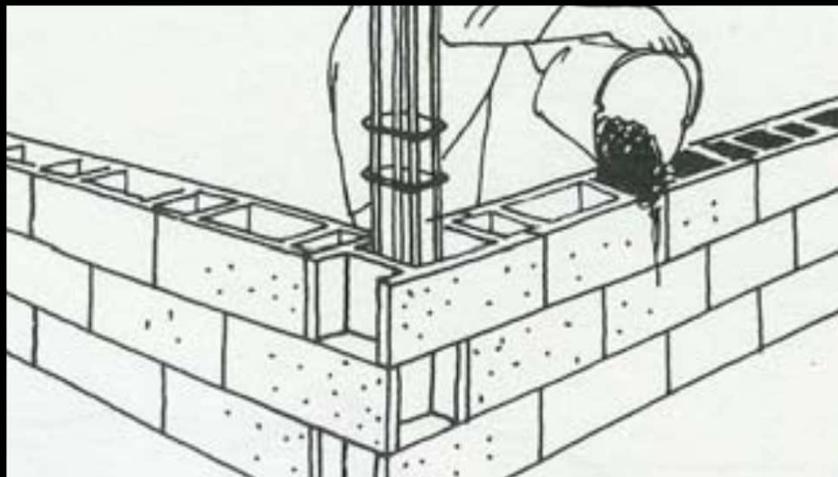


étage élevée en torchis, Pinhão, Portuga  
(foto: Paulo J. Mendes )

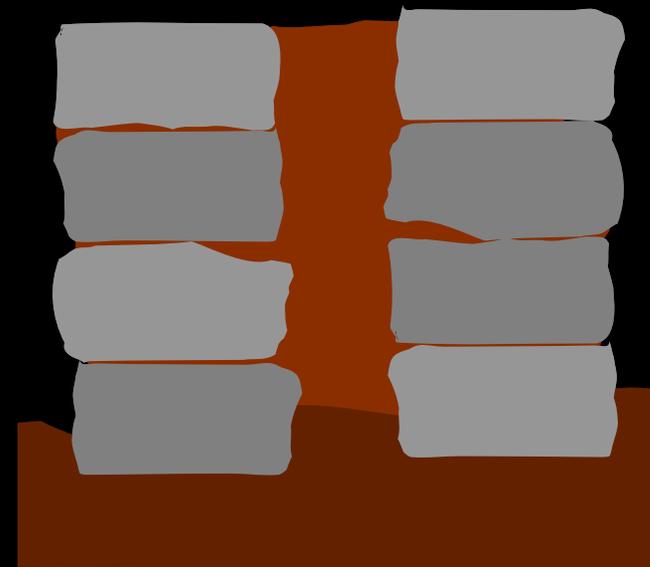
# TERRE – systèmes de remplissage ou revêtement

terre garnissant (torchis)

terre de remplissage



blocs de béton remplis de terre



double mur remplie de terre

# TERRE – systèmes de remplissage ou revêtement

terre garnissant (torchis)

terre de remplissage

terre-paille



maison en Lebbeke, Belgique

(foto: Paul De Neyer)

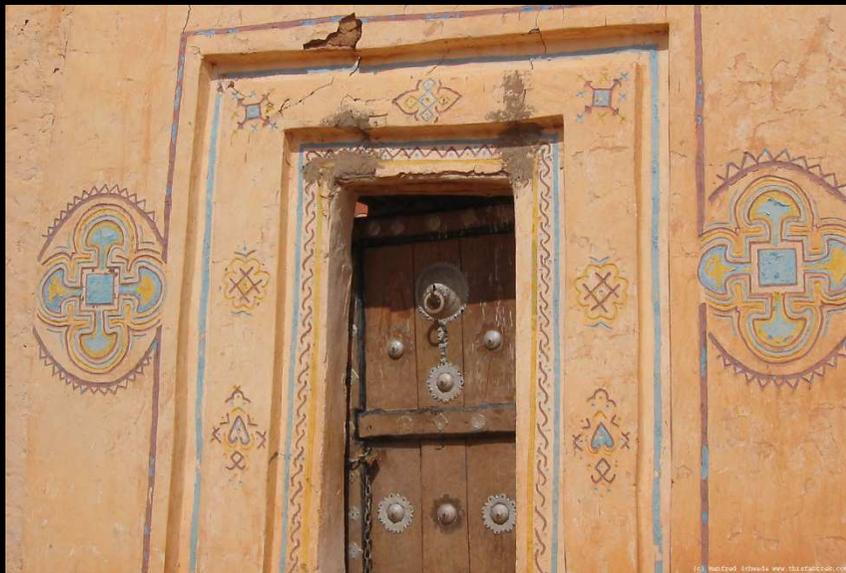
# TERRE – systèmes de remplissage ou revêtement

terre garnissant (torchis)

terre de remplissage

terre-paille

revêtements de terre



revêtement de terre décorée, Mauritanie



Kibbutz Lotan, Israel

# TERRE – systèmes de remplissage ou revêtement

terre garnissant (torchis)

terre de remplissage

terre-paille

revêtements de terre

couvertures en terre



maisons avec couverture de terre, Syrie

(foto: arminhermann)

# TERRE – systèmes de liaison

# TERRE – systèmes de liaison

## Mortiers de maçonnerie

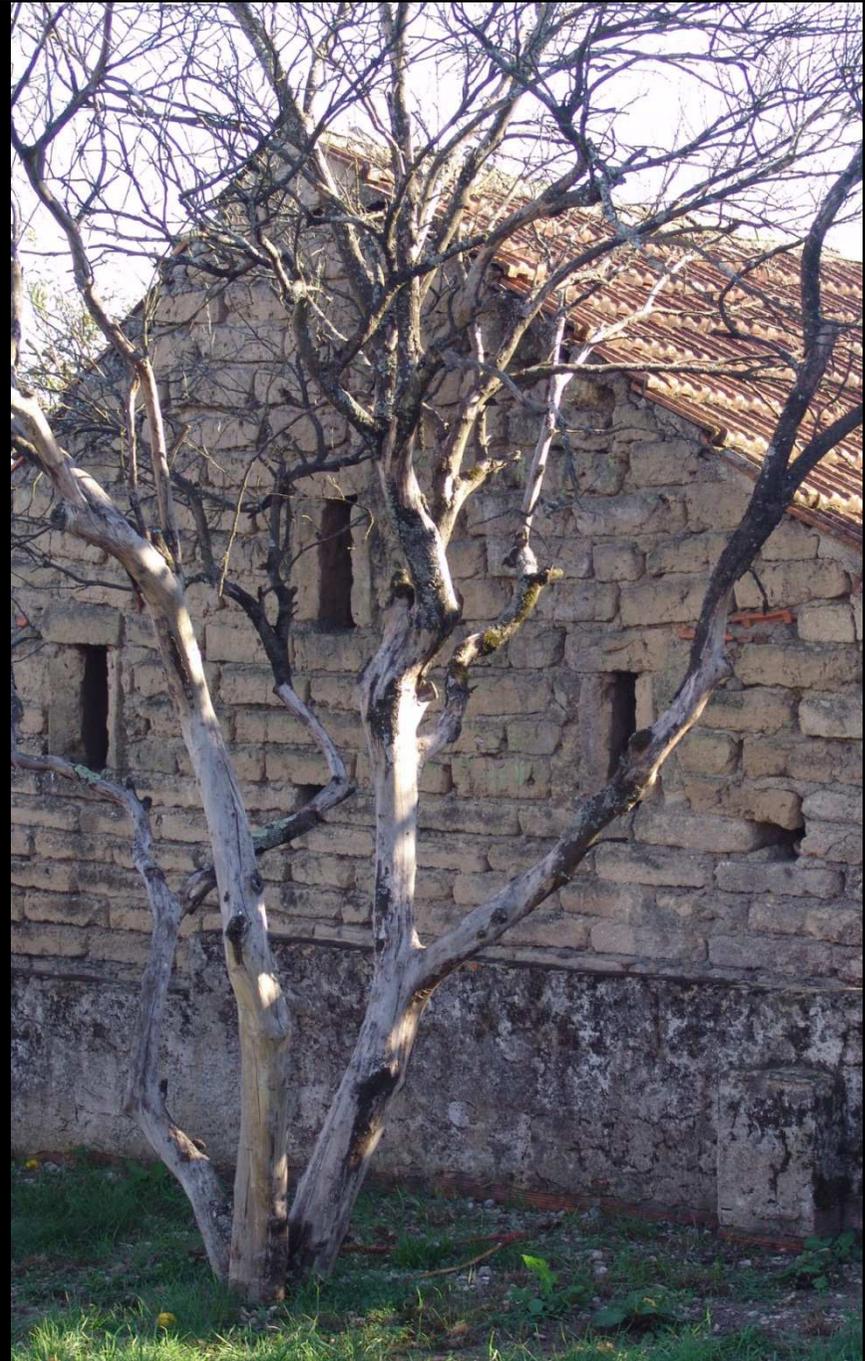
- de blocs d'adobe, pierre, briques céramiques, etc.
- blocs avec format régulière ou irrégulière



# TERRE

Construction traditionnelle / historique

- conservation
- réhabilitation

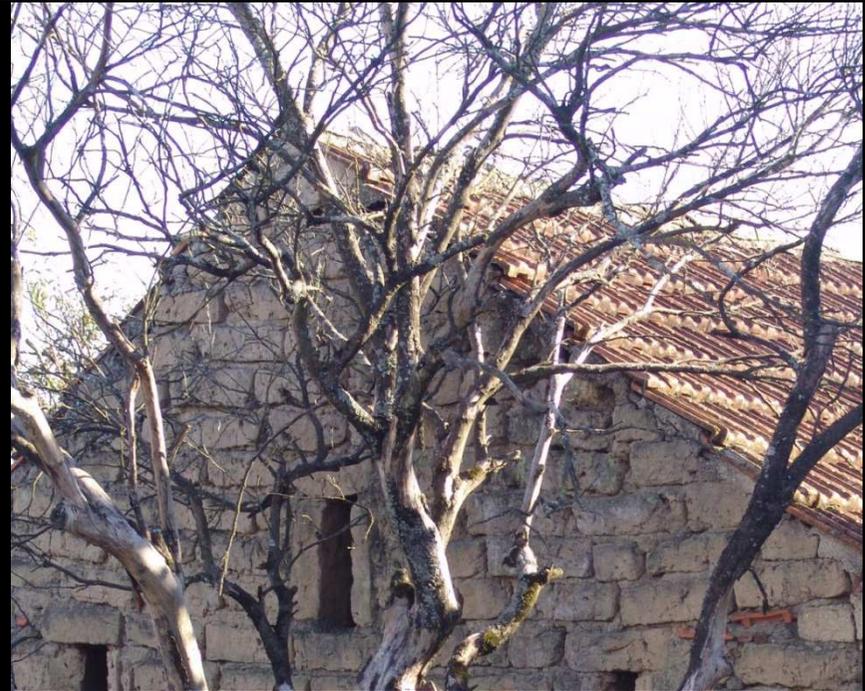


# TERRE

Construction traditionnelle / historique

- conservation
- réhabilitation

Nouvelle construction



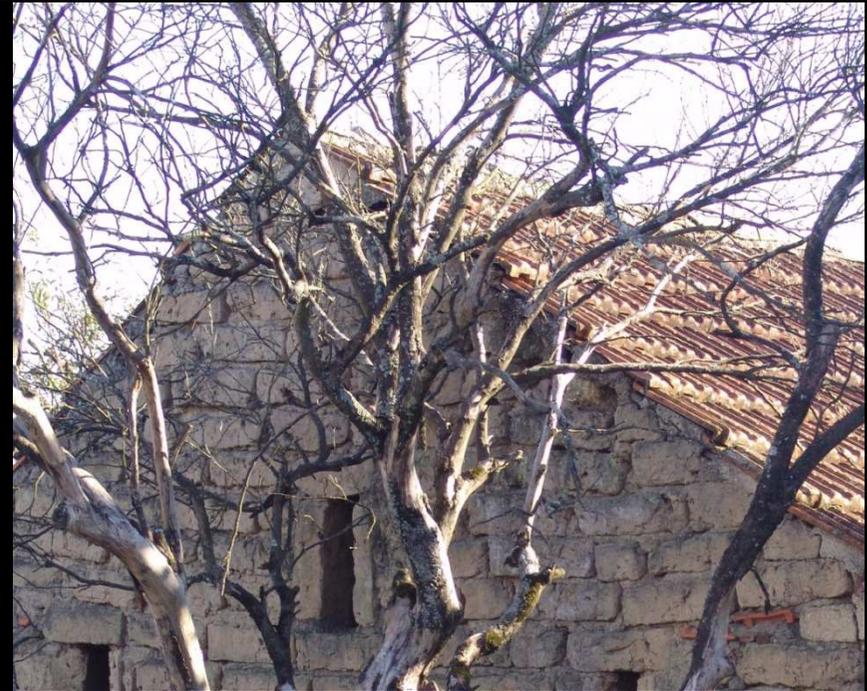
# TERRE

Construction traditionnelle / historique

- conservation
- réhabilitation

Nouvelle construction

- artisanal / autoconstruction



maison à S. Teotónio (Portugal)

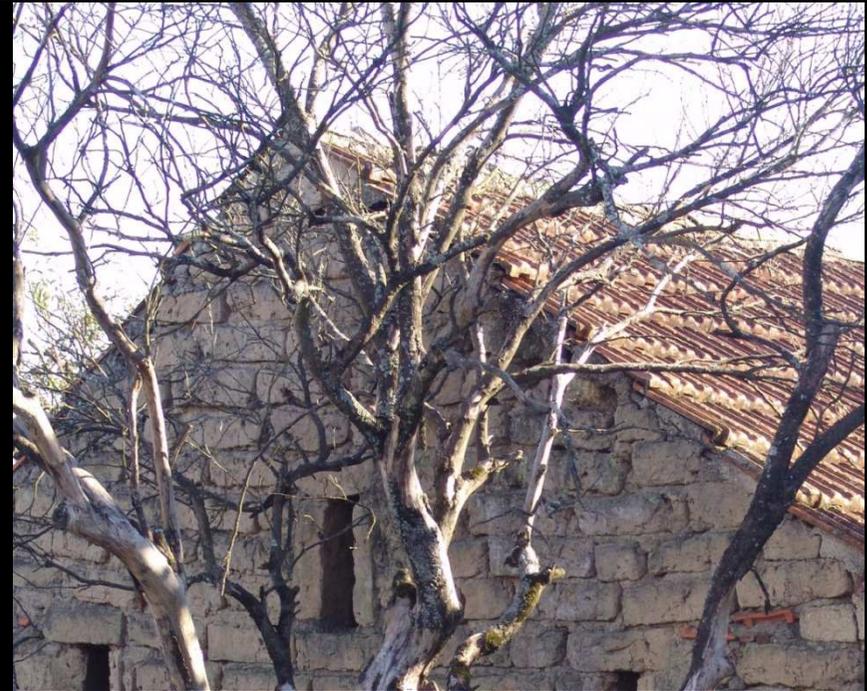
# TERRE

Construction traditionnelle / historique

- conservation
- réhabilitation

Nouvelle construction

- artisanal / autoconstruction
- industrialisée



maison à S. Teotónio (Portugal)



école des Beaux-Arts de Oaxaca (Mexique)

# Normes et codes

# Normes et codes

ASTM E 2392-05: *Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems*

adobe, pisé, bauge, terre coulée (couvertures pas incluses)

Nova Zelândia, Standard NZS 4297-4299: 1998 - *Earth Building Set*

adobe, BTC, terre coulée , pisé

Alemanha, DLV, 1999 - *Lehmbau Regeln*

premier code publié dans l'Union européenne

Perú, Norma E.080:2000 - *Adobe*

adobe

Zimbabwe Standard SAZ 724: 2001 - *Code of Practice for Rammed Earth*

pisé

Walker & Standards Australia, 2001- *The Australian earth building handbook*

adobe, BTC, pisé, terre coulée , bauge

USA, Novo México, 2003 - *Earthen Buildings Materials Code*

adobe, BTC, pisé

# Normes et codes

ASTM E 2392-05: *Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems* – décisions pour projets et pour le développement de normes spécifiques et codes

adobe, pisé, bauge, terre coulée (couvertures pas incluses)

Nova Zelândia, Standard NZS 4297-4299: 1998 - *Earth Building Set*

adobe, BTC, terre coulée , pisé

Alemanha, DLV, 1999 - *Lehmbau Regeln*

premier code publié dans l'Union européenne

Perú, Norma E.080:2000 - *Adobe*

adobe

Zimbabwe Standard SAZ 724: 2001 - *Code of Practice for Rammed Earth*

pisé

Walker & Standards Australia, 2001- *The Australian earth building handbook*

adobe, BTC, pisé, terre coulée , bauge

USA, Novo México, 2003 - *Earthen Buildings Materials Code*

adobe, BTC, pisé

# Normes et codes

*ASTM E 2392-05: Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems*

## Considérations sur le développement soutenable

1) Matériaux

2) Procédé de fabrication

3) Performance opérationnel

Note:  
recyclabilité/réutilisation  
ne sont pas assez  
développées

# Normes et codes

*ASTM E 2392-05: Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems*

## Considérations sur le développement soutenable

### 1) Matériaux

terre; matériaux additionnelles (sable, gravier, paille, etc.); stabilisants (ciment, chaux, etc.); revêtements

### 2) Procédé de fabrication

production du matériau

production de l'élément de construction

- mise en place du matériau (travail, énergie, coffrages)
- emploi d'autres matériaux dans le système de construction
- épaisseur des parois

distribution

### 3) Performance opérationnel

# Normes et codes

*ASTM E 2392-05: Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems*

## Considérations sur le développement soutenable

### 1) Matériaux

terre; matériaux additionnelles (sable, gravier, paille, etc.); stabilisants (ciment, chaux, etc.); revêtements

### 2) Procédé de fabrication

production du matériau

production de l'élément de construction

- mise en place du matériau (travail, énergie, coffrages)
- emploi d'autres matériaux dans le système de construction
- épaisseur des parois

distribution

### 3) Performance opérationnel

durabilité, maintenabilité, efficacité énergétique, qualité environnementale intérieure

# Normes et codes

*ASTM E 2392-05: Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems*

## Considérations sur le développement soutenable

### 1) Matériaux

#### Terre

terre locale naturelle / mélange de terres

potentiels effets adverses sur la capacité de production d'aliments

#### Matériaux additionnelles

paille plus durable que le foin, parce que elle est sèche et sans semences

paille est un déchet de l'industrie agricole => ressource renouvelable

#### Stabilisants – teneur en ciment

terre stabilisée a une efficacité énergétique:

- plus grande que le béton

- plus faible que la terre non-stabilisée

# Normes et codes

ASTM E 2392-05: *Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems*

## Considérations sur le développement soutenable

### 2) Procédé de fabrication

matériaux séchés au soleil => mieux efficacité énergétique que briques céramiques, etc  
techniques de maçonnerie (adobe, BTC)

fabrication similaire à la maçonnerie ordinaire de briques céramiques ou de blocs de béton (éléments empilés à la main)

considérer aussi le mortier

techniques monolithiques

coffrage (ex: pisé, terre coulée) ou non (ex: bauge)

matériau de la coffrage (bois, acier, fibre de verre) + réutilisation / recyclage

similarités avec les techniques ordinaires de construction:

- fabrication de la terre coulée similaire au béton coulé en place
- pisé exige plus travail/énergie (car il est compacté couche par couche)

# Normes et codes

ASTM E 2392-05: *Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems*

## Considérations sur le développement soutenable

### 2) Procédé de fabrication

usage de matériaux énergétiquement plus intenses (ciment, acier) dans les fondations, les linteaux, etc.

énergie et charbon augmentent avec l'épaisseur des murs:

capacités structurales plus élevées des matériaux modernes

béton coulé en place ou préfabriqué

maçonnerie de briques céramiques ou de blocs de béton

=> épaisseur généralement supérieure pour les techniques de la terre

---

impacts possibles sur l'écosystème :

- terre non-stabilisée pourra retourner au sol
- terre stabilisée (ex: ciment) => modifier capacité sol production agricole

# Analyse expérimentale des bâtiments traditionnels



**Alentejo: PISÉ (non stabilisé)**



1) Av - Avis



2) PD - Odemira



3) VC - Odemira



4) CZ - Almodôvar



5) CI - Ourique



6) Ar - Arraiolos

Gomes I, Diaz Gonçalves T, Faria P (in press) Unstabilised rammed earth: Characterization of material collected from old constructions in south Portugal and comparison to normative requirements, *Int J Archit Herit*.

# Analyse expérimentale des bâtiments traditionnels

## PROPRIÉTÉS

- analyse granulométrique - LNEC E196 e E239
- limites de consistance : limite de liquidité (LL) e limite de plasticité (LP) - NP 143
- compaction Proctor - LNEC E197
- retrait linéaire Alcock - Walker & Standards Australia (2001)
- teneur en matière organique - ASTM D2974-07
- teneur en sels solubles (HMC) - Diaz Gonçalves & Rodrigues (2006)

# Analyse expérimentale des bâtiments traditionnels

## PROPRIÉTÉS

- analyse granulométrique - LNEC E196 e E239
- limites de consistance : limite de liquidité (LL) e limite de plasticité (LP) - NP 143
- compaction Proctor - LNEC E197
- retrait linéaire Alcock - Walker & Standards Australia (2001)
- teneur en matière organique - ASTM D2974-07
- teneur en sels solubles (HMC) - Diaz Gonçalves & Rodrigues (2006)

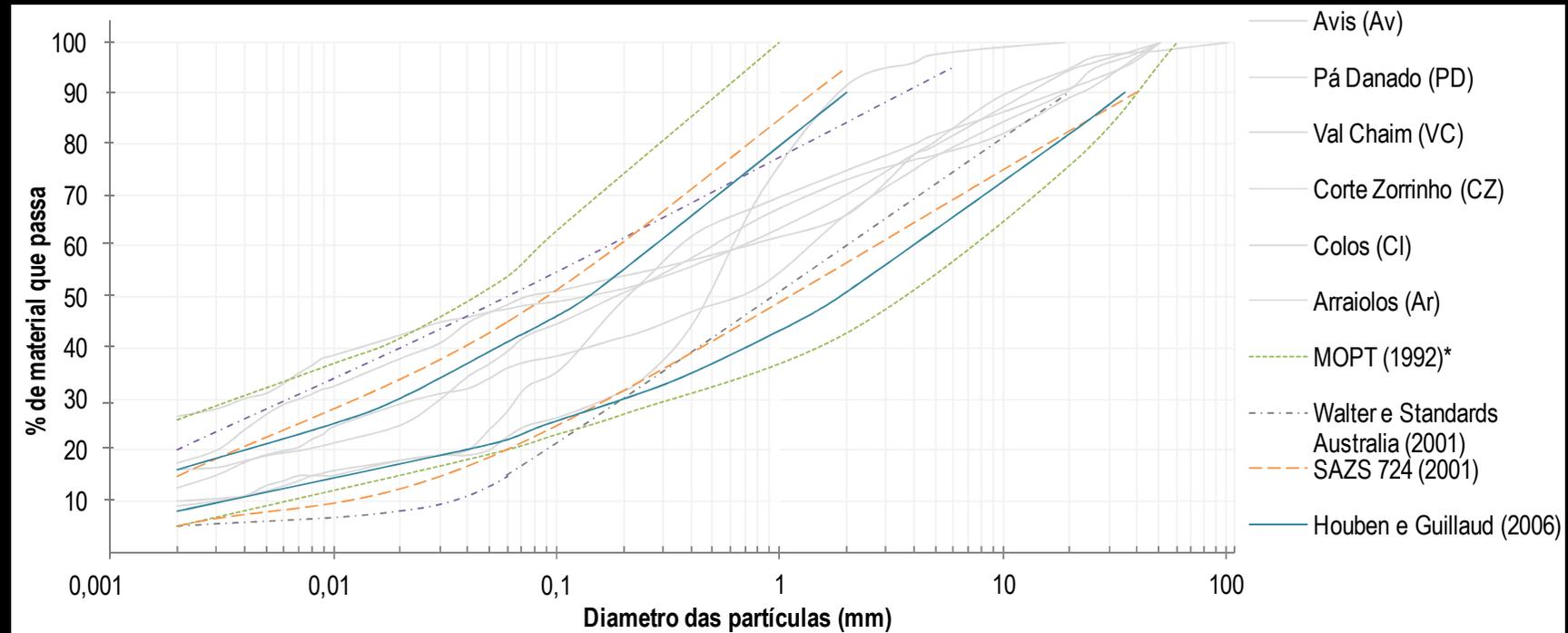
## Comparaison des nos résultats expérimentaux avec les valeurs des recommandations normatives

L'ensemble de documents de référence varie pour chaque propriété parce que:

- ni tous les documents abordent toutes les propriétés
- quelques documents sont redondantes par rapport à certaine propriété

# Analyse expérimentale des bâtiments traditionnels

## analyse granulométrique



- Les limites normatives sont assez étendues
- Nos six matériaux se situent, en général, dans ces limites

# Analyse expérimentale des bâtiments traditionnels

analyse granulométrique - dimension maximale du granulat

	Dimension maximale des particules
<b>Av</b>	19,05
<b>PD</b>	50,80
<b>VC</b>	101,6
<b>CZ</b>	50,80
<b>CI</b>	50,80
<b>Ar</b>	50,80
Gomes & Folque (1953)	20-25 mm (20-25% à 50 mm)
IETCC (1971)	20 mm
Norton (1997)	2-6 mm
New Mexico Code(2006)	38 mm
Keefe (2005)	20 mm
Walker et al. (2005)	10-20 mm (50-100 mm - réussi dans certains cas)

L'utilisation de granulats de grande dimension, hors des limites normatives actuelles, était apparemment courante à l'Alentejo.

- tous les matériaux (sauf Av) se situent hors des limites recommandées
- seulement Walker (2005) admet l'utilisation de granulats de cette dimensions

# Analyse expérimentale des bâtiments traditionnels

limites de consistance

	LL (%)	IP = LL - LP (%)
<b>Av</b>	15	NP
<b>PD</b>	41	16
<b>VC</b>	46	19
<b>CZ</b>	17	NP
<b>CI</b>	36	14
<b>Ar</b>	26	6
Doat et al. (1979)	25 - 50	7-29
Houben & Guillaud (2006)	25 - 46	2-30
Walker & Australia(2001)	35 - 45	15-30
Walker et al. (2005, p.37)	< 45	2-30

NP - Não plástico

**Les six sols étudiés ne sont pas toujours en conformité avec les recommandations**

# Analyse expérimentale des bâtiments traditionnels

## compaction Proctor

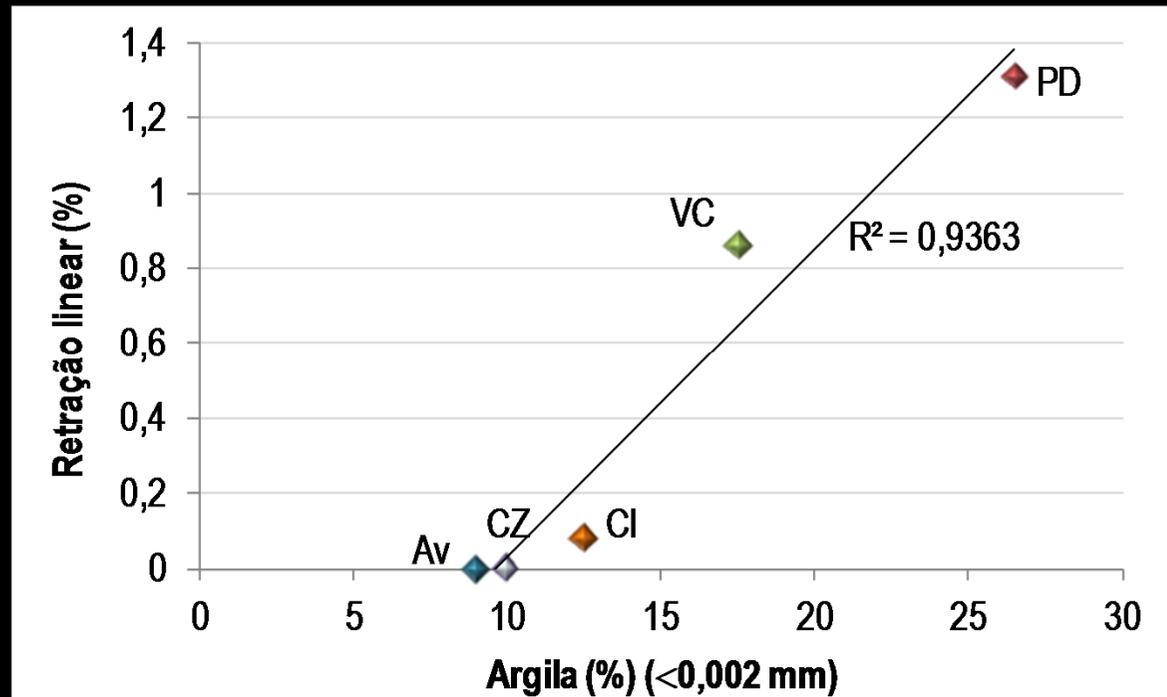
	Masse volumique sèche maximale (kg/m <sup>3</sup> )
Av	2019
PD	1734
VC	1652
CZ	1601
CI	1815
Doat et al. (1979)	1760 - 2400
Warren(1999)	≥ 2000
Keable (1996)	1800 - 2000
Walker & Australia (2001)	1700 - 2200
Houben & Guillaud (2006)	1750 - 2300
Minke (2006)	1700 - 2200*

\* plus élevée si le sol a beaucoup des agrégats grossiers

**Sols avec une densité maximale au-dessous des limites actuelles étaient parfois utilisés dans le pisé à l'Alentejo**

# Analyse expérimentale des bâtiments traditionnels

retrait linéaire Alcock



Walker & Standards  
Australie =>

retrait linéaire  $\leq 2.5\%$   
(4-6% ciment)

**Le retrait linéaire des six sols est faible et dépend de la teneur en argile**

DRX => tous sont argiles d'activité faible (chlorite ou kaolinite)

# Analyse expérimentale des bâtiments traditionnels

teneur en matière organique

	Teneur en matière organique (masse)
Av	0,9
PD	4,5
VC	3,5
CZ	1,8
CI	3,6
Ar	5,4
King (1996)	1 a 2%
Warren (1999)	< 5%
Walker et al. (2005)	<2%
Houben & Guillaud (2006)	< 2 a 4%

- Grande variabilité de situations à l'Alentejo
- Il faut définir des valeurs-limites consistants associées à des méthodes d'essai viables

Limites quantitatives sont rares et les méthodes d'essai varient beaucoup

On a utilisé la méthode de calcination de la norme ASTM D2974-07

# Analyse expérimentale des bâtiments traditionnels

teneur en sels solubles (HMC)

	HMC (%)	Teneur en sel (estimé)	
		NaCl (%)	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%)
<b>Av</b>	4,2	0,24	0,55
<b>PD</b>	5,4	0,31	0,72
<b>VC</b>	4,7	0,27	0,62
<b>CZ</b>	1,2	0,07	0,16
<b>CI</b>	3,1	0,18	0,41
<b>Ar</b>	42,6	2,46	5,73

HMC de la référence (100% NaCl) = 1763,6% => HR actuel = 96,8%

Teneur en sel	
Warren (1999)	
Walker et al. (2005)	< 2% (en masse)
New Mexico Code (2006)	

**Les cinq sols ruraux ne sont pas problématiques**

**il faut évoluer vers une meilleure définition des méthodes d'essai et valeurs-limites**

Les méthodes d'essai divergent ou sont omis; limites quantitatives sont rares.

On a choisi la méthode de la teneur en humidité hygroscopique (HMC):

- NaCl très hygroscopique => probable limite inférieur de la teneur actuel en sel
- Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> moins hygroscopique => probable limite supérieur de cette teneur en sel

# Analyse expérimentale des bâtiments traditionnels

## CONCLUSIONS

- les limites normatives présentent souvent des différences...
- ... et ni toujours sont associées à des méthodes d'essai claires
- les six sols analysées ne sont pas toujours en conformité avec les limites normatives
- **code national => définition des limites et des essais appropriés aux sols régionaux**



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

**Merci de votre  
attention!**

Teresa Diaz Gonçalves  
Maria Idália Gomes