

*Artigo Científico*

## CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS PARA ANÁLISE DE RECALQUES: ESTUDO DE CASO

Soil characterization for settlement analysis: a case study

Joardes Almeida Bastos<sup>1</sup>, Fernanda Martins Cavalcante de Melo<sup>2</sup>, Oscar Khoiti Ueno<sup>3</sup>,

Vanessa Gentil de Oliveira Almeida<sup>4</sup>, Herbet Alves de Oliveira<sup>5\*</sup>

Instituto Federal de Sergipe *campus* Estância. Av. João Alves Filho, 260, Estância, SE, CEP:  
49200-000, Brazil<sup>1,2,4,5</sup>

Universidade do Estado de Santa Catarina – CEPLAN. Rua Luiz Fernando Hastreiter, 180 ,  
Centenário, São Bento do Sul, SC, CEP: 89283-081, Brazil<sup>3</sup>

Submetido em: 13.03.2022; Aceito em: 08.05.2023; Publicado em: 15.05.2023.

\***Autor para correspondência:** [herbet.oliveira@ifs.edu.br](mailto:herbet.oliveira@ifs.edu.br)

**Resumo:** O recalque é um dos fenômenos que mais preocupa os engenheiros de fundações, sobretudo em solos argilosos. Para cálculo do recalque é necessário determinar o coeficiente de compressão e tensão de adensamento, cuja determinações são demoradas. Assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a correlação entre as propriedades de solos do estado de Sergipe e seu respectivo recalque. Foram utilizados no trabalho três argilas do estado de Sergipe, Brasil. Os solos foram caracterizados pelos ensaios de composição granulométrica, índice de plasticidade, massa específica real, difratometria de raios-X (DRX), análise química por fluorescência de Raio-X (FRX), teor de matéria orgânica e higroscopicidade. Foram produzidos corpos de prova cilíndricos, de 20 mm de diâmetro e 20 mm de altura, para a análise não saturada em prensa axial utilizando tensão de 30 MPa a 120 MPa, e corpos de prova com 100 mm de diâmetro e 10 mm de altura para a análise odométrica saturada. Os resultados apontaram que é possível estabelecer uma previsão do recalque de solos por meio do coeficiente de compressão, utilizando propriedades como composição granulométrica e índice de plasticidade.

**Palavras-chave:** solo, recalques, argilas

**Abstract:** Settlement is one of the phenomena that most concerns foundation engineers, especially in clayey soils. To calculate the settlement, it is necessary to determine the coefficient of compression and compaction stress, whose determinations are time-consuming. Thus, the present work aims to evaluate the correlation between the properties of soils in the state of Sergipe and their respective settlement. Three clays from the state of Sergipe, Brazil were used in the work. The soils were characterized by granulometric composition, plasticity index, real specific mass, X-ray diffraction (XRD), chemical analysis by X-ray fluorescence (FRX), organic matter content and hygrosopicity. Cylindrical specimens of 20 mm in diameter and 20 mm in height were

produced for unsaturated analysis in an axial press using a tension of 30 MPa to 120 MPa, and specimens with 100 mm in diameter and 10 mm in height for the saturated oedometer analysis. The results showed that it is possible to predict the settlement of soils through the compression coefficient, using properties such as granulometric composition and plasticity index.

**Keywords:** soil, settlement, clays.

## INTRODUÇÃO

Devido a diversidade de solos existentes na natureza e a enorme diferença de comportamento apresentada entre eles, é de suma importância uma boa investigação do subsolo para a análise da previsão de recalques experimentados nas fundações e serviços de compactação, de modo geral (AOKI,1994). Segundo Logeais (1982), em seu trabalho em patologia em fundações, observou que cerca de 80% dos problemas são decorrentes do desconhecimento das características do solo e sobretudo do recalque.

A sondagem e o entendimento do comportamento do solo quando sujeito a compactação, são fundamentais para previsão de recalques, principalmente onde existe solo mole, de modo a reduzir patologias das fundações (MILITISHY,2011).

Existem várias teorias assumindo que o solo é um material linearmente elástico com compressibilidade constante. No entanto, o solo é realmente um material não linear com a alteração da permeabilidade e compressibilidade durante o processo de consolidação (CHU *et al.*, 2002). O comportamento de consolidação não linear do solo mole foi extensivamente estudado pela primeira vez na década de 1960 (LEKHA *et al.*,2003; ARNOD *et al.*, 1996; ABBASI *et al.*, 2007). O processo de consolidação depende da profundidade do solo e foi modelado usando uma função polinomial (SCHIFFMAN & GIBSON, 1964). Além disso, a mudança na permeabilidade e compressibilidade do solo foi considerada assumindo que a tensão do solo é relativamente pequena (BARDEN & BERRY, 1965), e modelos de consolidação unidimensionais também foram desenvolvidos levando-se em consideração a estratificação dos solos e a consolidação secundária e os estados insaturados (MAGNAN *et al.*, 1979).

Embora estudos anteriores tenham investigado o comportamento da microestrutura da argila mole no processo de consolidação (SHROFF & SHAH, 2009; TOVEY,1973), a relação entre o comportamento de consolidação da argila mole e a mudança da microestrutura da argila durante o processo de consolidação ainda não está clara.

Para o dimensionamento de um recalque o coeficiente de adensamento é fundamental (BINH, 2018 *et al.*; BERBERIAN, 2018). O mesmo pode ser determinado em laboratórios; no entanto, é uma tarefa demorada e extensa.

Assim, a previsão automática desse coeficiente deve ser considerada (NARASIMHA *et al.*, 1995).

Solos argilosos normalmente são plásticos decorrente da presença de matéria orgânica ou do tipo de argilomineral presente em sua composição, como ilita, montmorilonita, além de ser comum a presença de água na sua estrutura. Por sua vez, são solos que experimentam elevado recalque quando submetidos a cargas para compactação (SANTOS, 1989).

O termo compactação do solo refere-se ao processo que descreve o decréscimo de volume de solos não saturados quando uma determinada pressão externa é aplicada, a qual pode ser causada pelo tráfego de máquinas agrícolas, equipamentos de transporte ou animais (LIMA, 2004).

Estudos do processo de compactação do solo têm demonstrado comportamentos distintos quando submetidos ao processo de compactação, devido a vários fatores, tais como: energia de compactação, textura, teor de matéria orgânica, e a história geológica do solo ou, ainda, devido ao manejo que o solo foi submetido no passado (DIAS *et al*, 1995; SILVA *et al*, 1986).

ANDRES *et al* (2021) desenvolveu um modelo matemático relacionando a compactação com a deformação, o que evidencia que solos plásticos deformam mais, porém levam maior tempo. Nos estudos de Gao (2021), em que submeteu solos a diferentes cargas de compactação e graus de saturação, concluiu-se que, a permeabilidade do solo é influenciável pela densidade do solo e por sua vez pelo tamanho do poro e estes pela compactação e quantidade de água presente.

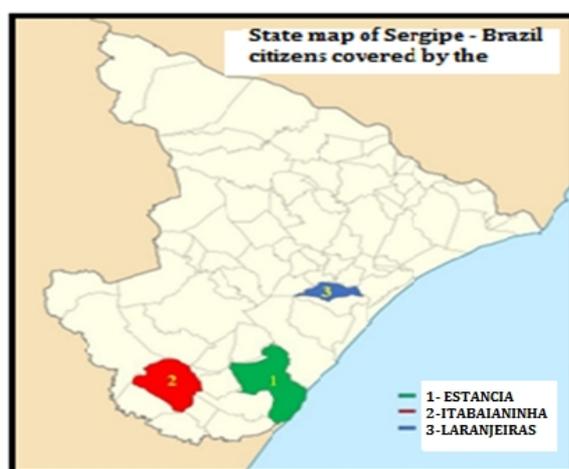
SURAVI (2021), estudou solos compactados com diferentes porcentagens de matéria orgânica e limite de liquidez, e chegou à conclusão que, para uma mesma pressão aplicada, solos menos plásticos e com menor limite de liquidez apresentam menor índice de vazios. Já RUILING *et al* (1998), em seus estudos sobre a consolidação da turfa com alto teor de material orgânico, verificou que a mesma ocorre em três estágios de forma exponencial. A consolidação que ocorre majoritariamente nos primeiros segundos do ensaio odométrico ocorre pela descarga de água enquanto no terceiro ele permanece constante.

BRAJA (2007) forneceram relações empíricas para previsão do índice de vazios de um solo em função da tensão aplicada. Segundo o autor, o índice de vazios tem uma relação direta com o limite de liquidez do solo.

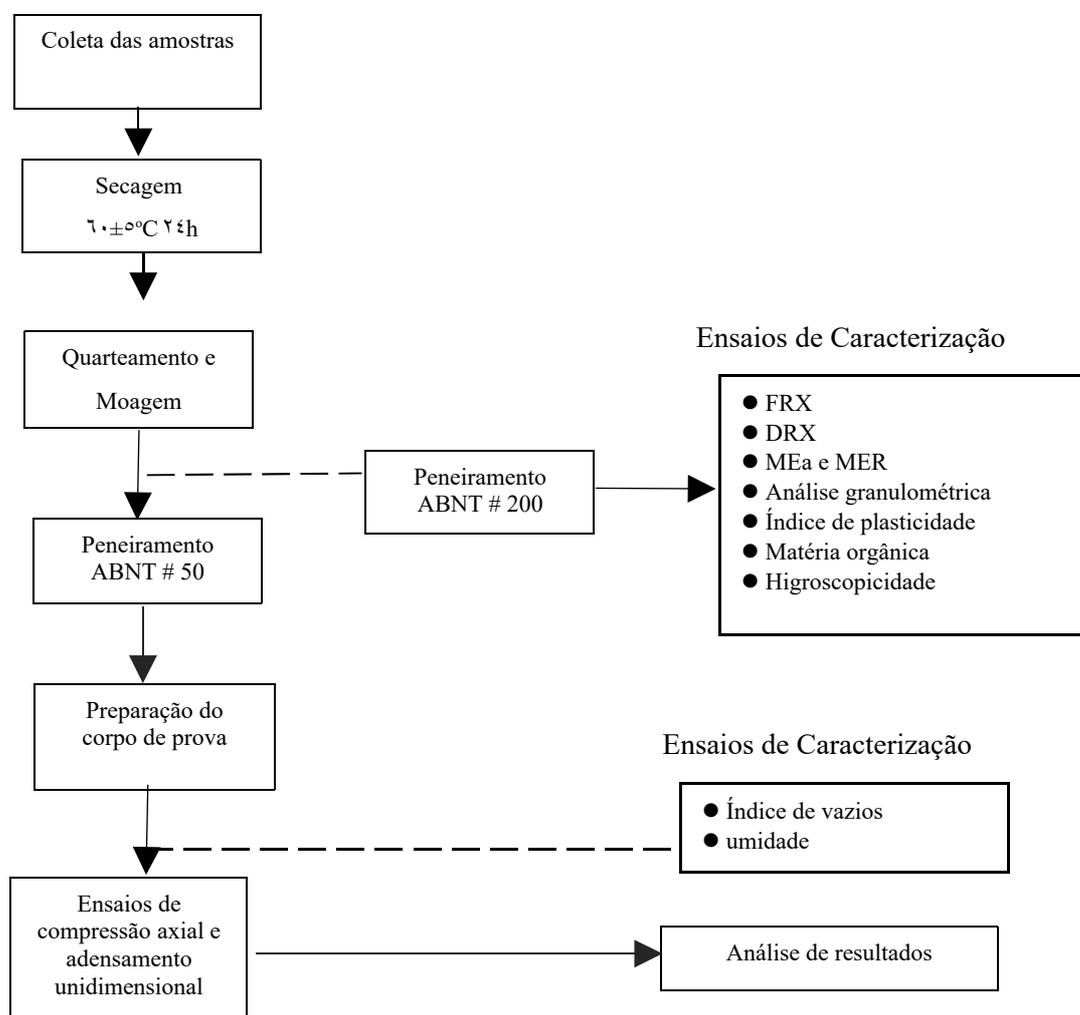
Portanto, para uma dada pressão de sobrecarga, o índice de vazios no campo pode ser estimado se o limite de liquidez e o peso específico do solo forem conhecidos. Assim, esta pesquisa tem como objetivo avaliar a correlação entre as propriedades de solos e seu respectivo recalque. Para isso, foram utilizadas três argilas do estado de Sergipe, Brasil.

## MATERIAL E MÉTODOS

Na Figura 1 é apresentada a região das argilas estudadas no estado de Sergipe e, na Figura 2, o fluxograma do processo de análise de recalques.



**Figura 1.** Localização das argilas pesquisadas.



**Figura 2.** Fluxograma do processo de análise de recalques.

### Coleta de amostras

As argilas utilizadas no projeto são provenientes de jazidas de três cidades do estado de Sergipe, região nordeste do Brasil. Argila vermelha, situada no município de Estância no litoral sul do estado, uma argila cor escura (argila orgânica), localizada na cidade de Itabaianinha na região do Vale do Rio Real e a argila amarela, situada no município de Laranjeiras no leste do estado, Figura 3.



**Figura 3.** Aspecto das argilas estudadas.

### **Preparação das amostras**

Foram coletadas amostras de aproximadamente 5 kg de cada solo a ser analisado. As amostras passaram pelo processo de secagem em estufa a temperaturas de  $65 \pm 5$  °C por 24 h. Posteriormente, as amostras foram submetidas a destorroamento manual em almofariz, para em seguida serem colocadas em moinho de bola para redução do tamanho da partícula. As amostras moídas foram passadas cerca de 1kg na peneira nº 200 (0,074 mm) para realização de ensaios tecnológicos de laboratório. O restante das amostras passou na peneira nº 40 (0,42 mm) para confecção de corpos de prova. A preparação foi baseada nos procedimentos de AMOROS (1998).

### **Ensaio de caracterização dos solos**

#### **Análise granulométrica**

O método do peneiramento seguido de sedimentação foi utilizado para determinação da distribuição de tamanhos das partículas, em conformidade com a norma, NBR 7181, ABNT (2018).

#### **Índice de plasticidade**

Os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) foram obtidos de acordo com a NBR 7180, ABNT 2016 e NBR 6459, ABNT (2017) e ASTM D4318 (2010). O índice de plasticidade (IP) é o resultado da diferença entre os limites de liquidez e limite de plasticidade, segundo a Equação 1.

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

#### **Matéria orgânica**

A matéria orgânica pode influenciar no aumento da plasticidade das argilas, favorecendo a compactação, dificultando a eliminação da água livre. O teor de matéria orgânica foi determinado segundo a norma ASTM D 2974 (1992).

## **Análise química por FRX**

Com o objetivo de se determinar a composição química das argilas, os percentuais dos óxidos constituintes das amostras de argilas foram determinados através de medidas semiquantitativas pela técnica de fluorescência de raios X (FRX). As medidas foram realizadas em vácuo, em um equipamento da marca Bruker, modelo S4 Pioneer, utilizando amostras com massa em torno de 10 g, que foram prensadas no formato de corpos cilíndricos com diâmetro 20 mm e espessura de 3 mm, aproximadamente (OLIVEIRA, 2017).

## **Caracterização mineralógica**

A difração de Raios X-(DRX), é uma técnica utilizada na determinação a nível atômico, para identificar estruturas cristalinas, por meio de incidência de Raios X. Esse procedimento foi empregado para identificar as fases cristalinas das argilas, de acordo com os padrões obtidos no banco de dados do ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*), e analisados pelo software Match, versão Demo. Para a realização desse método, foi necessário que as argilas fossem secas em estufa a uma temperatura de  $105 \pm 5$  °C por 24 h, e posteriormente, passadas em uma peneira de abertura nº 100 (0,177 mm). Foi usado um equipamento D8-Advance Bruker, que aplica radiação Cu K $\alpha$ 1 ( $\lambda = 1,5418$  Å) em modo de varredura contínua, em intervalo angular de 5 a 70° (2 $\theta$ ), com velocidade de varredura 1°/min (SANTOS *et al*, 2016).

## **Higroscopicidade**

Este ensaio foi realizado pesando cerca de 10 g de cada argila passada na peneira 0,250 mm, as quais foram espalhadas em um vidro de relógio e colocado em sala com umidade relativa de cerca de 80% durante 7 dias. A higroscopicidade *Hi* é medida pela Equação 2, em que *Pi* é o peso da amostra seca, e *Pf* o peso da amostra exposta à umidade.

$$(\%)Hi = \frac{(Pf - Pi)}{Pi} \times 100 \quad (2)$$

## **Massa específica real**

A massa específica real foi obtida através do ensaio de picnômetro de acordo com a NBR 6458:2017 e DNER/94

## **Ensaio de adensamento unidimensional**

O ensaio de adensamento convencional de carregamento foi realizado de acordo com a norma NBR 16853, ABNT, (2020) e ASTM D 2435 (2011). O ensaio foi realizado com amostras produzidas no Laboratório Mecânica dos Solos do Instituto Federal de Sergipe, Campus - Estância. Foram ensaiadas três amostras com 100 g de solo, com ciclos de carregamento de acordo com o Quadro 1. Cada carga foi aplicada no solo e leituras da deformação foram realizadas por meio de um relógio comparador nos tempos estipulados. Cada carga foi aplicada por 24 horas. Para garantir a saturação, a água era adicionada sistematicamente.

**Quadro 1.** Carga aplicada e tempo aplicado no ensaio Odométrico

Tempo para leitura da deformação				Carga aplicada (g)			
				2210	4500	9040	17040
Dia	hora	min	seg	Leitura no manômetro (mm)			
1			8				
			15				
			30				
			1				
			2				
			5				
			10				
			30				
			1				
			2				
			4				
			8				

O índice de vazios inicial foi calculado por meio de teste de secagem. A razão de vazios sob cada pressão de consolidação é calculada pela Equação 3, onde  $e_o$  é o índice de vazios inicial do corpo de prova,  $h_o$  é a altura inicial do solo no anel e  $\Delta h_i$  é a variação da altura à medida que a carga é aplicada.

$$e_i = e_o - (1 + e_o) \frac{\Delta h}{h_o} \quad (3)$$

### Ensaio de compressão axial

As argilas foram umidificadas com auxílio de um borrifador, com cerca de 5, 10 e 15% de umidade, homogeneizadas e passadas na peneira abertura 1,0 mm para ajuste de granulometria segundo metodologia de (AMOROS *et al*, 1998). Foram preparados corpos de prova com massa de 7g, sendo que os mesmos foram conformados em forma cilíndrica com diâmetro de 20mm e altura 20mm em prensa manual uniaxial. Para cada solo foram prensadas cerca de 10 amostras utilizando carregamento de 30, 60 e 120 MPa para cada umidade. Após prensadas, as amostras foram pesadas em balança eletrônica da marca DIGIMET, modelo KN-500, com precisão de 0,01 g. Em seguida foram secas em estufa com temperatura de  $105 \pm 5$  °C por 24 h. Posteriormente foram pesadas novamente e determinadas suas dimensões com paquímetro analógico com precisão de 0,05 mm.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Caracterização das matérias primas

#### Análise química

A composição química das argilas é apresentada na Tabela 1. Os óxidos mais abundantes nas amostras estudadas foram SiO<sub>2</sub> (52,0 -59,3%) seguido por Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (18,0 -28,9%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (7,9-9,2%) e K<sub>2</sub>O (1,36- 3,70). A relação SiO<sub>2</sub> / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> variou entre 1,99 a 2,89. As razões SiO<sub>2</sub> /Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > 2% são indicativas de um excesso de SiO<sub>2</sub> nas amostras, confirmando a presença de filossilicatos 2:1 do tipo esmectitas. (BENNOUR *et al*,2015)

O teor de óxido de ferro (III) (7,90- 9,22%) pode estar relacionado ao aumento da cor marrom avermelhada que pode sugerir a presença de goethite, como evidenciado na argila vermelha (PHILBERT *et al*, 2020).

Os maiores valores de perda de massa observados (7,0-10,08%) estão relacionados à desidroxilação de minerais de argila, oxidação da matéria e decomposição de carbonatos e hidróxidos. A argila amarela tem em destaque a presença do CaO (13%) característico de solos de origem marinha (ZANELLI *et al*, 2015).

Por meio da análise química fica evidente que a argila vermelha é argilosa com poucos contaminantes, além de elevada perda de massa o que pode influenciar no recalque. Enquanto a as demais argilas apresentam elevada relação SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o que comprova a presença de quartzo ou contaminantes, o que pode reduzir a retração, compactação e recalque

**Tabela 1.** Análise química (%)

Solo	P.F	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Vermelha	10,0	-	0,74	28,91	57,56	0,23	0,47	1,36	0,64	1,38	8,58	0,07	1,99
Orgânica	8,0	2,12	1,97	23,09	59,33	0,20	0,25	1,79	1,87	0,00	9,22	0,00	2,57
Amarela	7,0	1,40	3,10	18,01	52,0	-	-	3,70	13,0	1,00	7,90	-	2,89

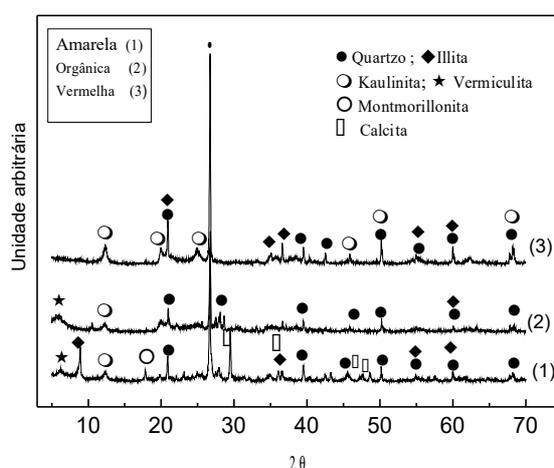
**Legenda:** P.F perda de massa após calcinação a 1000°C

#### Difratometria de raios X

Na Figura 4 é apresentada a análise de difratometria de raios X das argilas utilizadas no trabalho. O Quartzo é o mineral mais abundante em todas as argilas, variando de 30,8 a 61,7%. Segundo CARVALHO *et al*. (2015), CELIK (2010), o quartzo é associado principalmente a partículas granulares, tendo como característica baixa atividade físico-química, fazendo com que participe de forma pouco significativa na retenção de umidade, mas que influencia na redução da plasticidade. Outro argilomineral em abundância nas três argilas é a ilita com porcentagens variando de 16,9 a 32,7%. A ilita apresenta plasticidade mais elevada do que a caulinita e apresenta estrutura cristalina semelhante à da montmorilonita (CELIK, 2010).

A argila amarela destaca-se por apresentar montmorilonita, argilomineral que segundo (SANTOS, 1989) tem como principal característica a sua capacidade de absorver moléculas de água, inchar-se na presença de água e conferir elevada plasticidade ao solo. Foi observado ainda na argila amarela a presença de carbonatos, típicos de solos marinhos.

Já as argilas, orgânica e a vermelha são constituídos de argilominerais como a caulinita, o qual é estável na presença de água, no entanto, a caulinita, devido à sua estrutura em forma de placas, poderá, na interação interpartículas, sofrer contração ou expansão quando submetida a variações de energia, como tensão aplicada e sucção (CARVALHO et al., 2015). Destaca-se ainda no solo vermelho a presença da goethita rica em óxido de ferro.



**Figura 4.** Padrão de difratometria de raios X dos solos

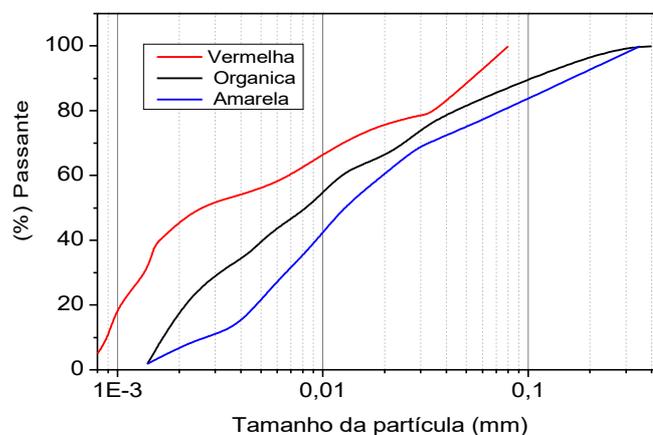
### Análise granulométrica

Segundo SANTOS (1989), quanto maior a porcentagem de partículas abaixo de 0,002mm, maior a probabilidade de apresentar elevada plasticidade. A maior porcentagem de finos também pode favorecer maior resistência mecânica e dificultar a saída da água. A Tabela 2 e Figura 5 apresentam os resultados obtidos para o ensaio de análise granulométrica das argilas. O solo vermelho é o mais fino pois apresentou cerca 45% passante na abertura 0,002mm, enquanto a orgânica 17% e amarela 5%. Por sua vez, a presença de acessórios como areia, favorece a redução da plasticidade como o solo amarelo (22,5%).

**Tabela 2.** Caracterização física dos solos.

Solo	Argila % ( $\varnothing < 0,002$ mm)	Silte % (0,002 - 0,06 mm)	Areia % (0,06 - 2mm)	Mer ( $g \cdot cm^{-3}$ )	Mea ( $g \cdot cm^{-3}$ )	FE (%)
Vermelha	45,4	47,4	7,2	2,64	1,34	50,8
Orgânica	20,0	64,0	16,0	2,68	1,16	43,3
Amarela	6,8	70,7	22,5	2,71	1,15	42,2

Mer- massa específica real; Mea- massa específica aparente; FE- fator de empacotamento.



**Figura 5.** Curvas granulométricas.

### Massa específica real e massa específica aparente

Conforme apresentado na Tabela 2, os solos analisados apresentam semelhança em relação a massa específica real, e diferença na massa específica aparente sobretudo devido a composição granulométrica e presença de acessórios. A argila vermelha apresentou maior fator de empacotamento (50,8%) em relação aos demais solos, provavelmente devido a presença de maior porcentagem de finos, o que favoreceu ao melhor arranjo das partículas. Adicionalmente, na argila vermelha foi observado a presença da goethita que é um mineral de elevada massa específica identificado na difratometria de raios X.

### Limites de Atterberg

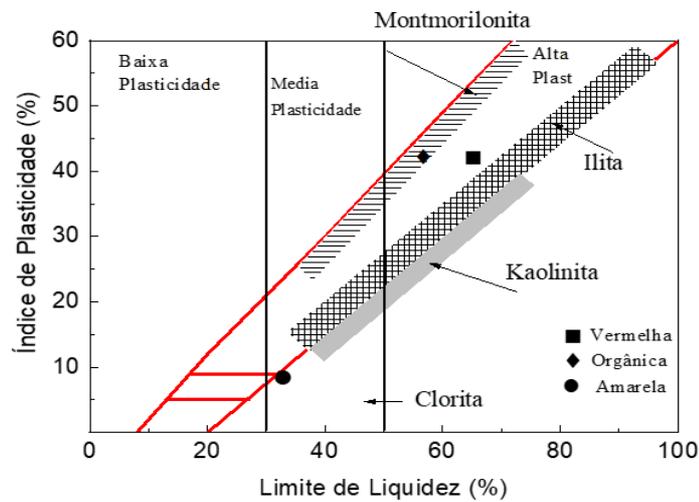
Segundo MAESTRELLI (2013), solos cujo  $IP > 15$  são altamente plásticos, como a argila vermelha (45,0%) e orgânica (41,0%). Solos de alta plasticidade apresentam maior dificuldade para eliminar água mediante uma carga aplicada, favorecendo recalques tardios. Já a argila amarela (13,6%) é classificada como média plasticidade favorecendo recalques imediatos. Com relação a higroscopicidade não foram observadas variações significativas.

**Tabela 3.** Índice de plasticidade

Solo	LP (%)	LL (%)	IP (%)	MO (%)	Hig (%)
Argila Vermelha	25,0	70,0	45,0	8,4	0,19
Argila Orgânica	11,1	52,0	41,0	7,3	0,27
Argila Amarela	17,4	30,0	13,6	3,0	0,10

**Legenda:** LP-limite de plasticidade; LL- limite de liquidez; MO- matéria orgânica; Hig- higroscopicidade.

De acordo com o diagrama de HOLTZ E KOVACS (1948) *apud* (CHAKCHOUK, 2006), apresentado na Figura 6, a argila amarela se enquadra em plasticidade moderada enquanto a argila negra e vermelha se enquadra em alta plasticidade.

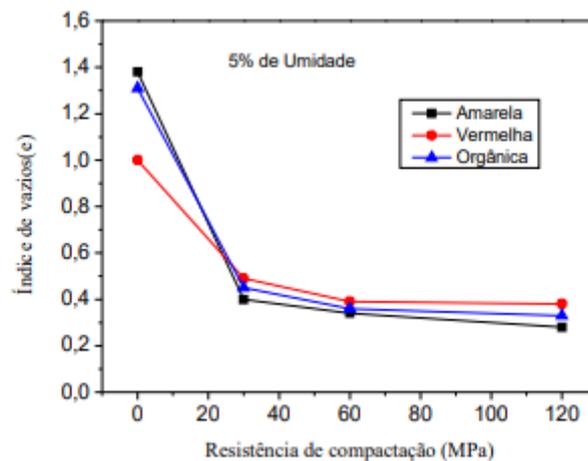


**Figura 6.** Diagrama de Holtz e Kovac (Chakchouk, 2006).

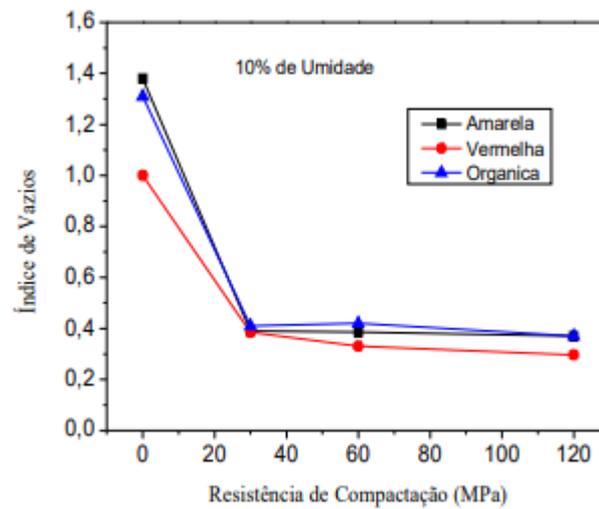
### Análise das argilas não saturadas

Conforme apresentado na Figura 7, foi observado que o solo vermelho apresentou menor índice de vazios inicial ( $e_0$ ) (1,0), seguido do solo orgânico (1,3) e o amarelo (1,4). O menor índice observado no solo vermelho se deu ao fato, do mesmo apresentar maior quantidade de finos na análise granulométrica, maior índice de plasticidade, o que favoreceu melhorar o empacotamento como apresentado na Tabela 3. (NARASIMHA *et al*, 1995)

De acordo com Figuras 7 e 8, o comportamento dos solos quando se aplicou cargas até 30 MPa com umidades de 5 e 10%, apresentaram bastante semelhança, com relação a redução do índice de vazios. Para as pressões de 30 a 120 MPa, o solo vermelho apresentou menor variação do índice de vazios em todas as porcentagens de umidade (50%), seguido do solo orgânico (61,3%), e o amarelo (71,4%). Pode-se observar que a pressão de 30 MPa já foi suficiente para consolidar o índice de vazios para todos os solos.



**Figura 7.** Análise índice de vazios versus pressão de compactação.

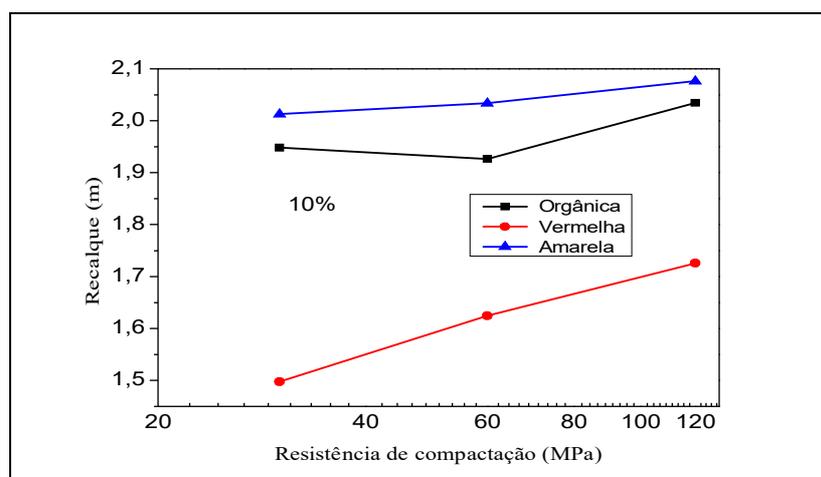


**Figura 8.** Análise índice de vazios versus pressão de compactação.

### Relação tensão e recalque em solos Insaturados

Na Figura 9 é apresentada a relação entre a tensão aplicada e o recalque obtido com a variação de umidade. Quando submetido a uma tensão inicial de 30 MPa, o recalque imediato observado no solo amarelo foi de (2,00 m) seguido do solo orgânico (1,95 m) e o solo vermelho (1,50 m). Conforme já explicado o solo amarelo apresenta no estado natural menor fator de empacotamento o que favorece o recalque. No entanto, à medida que se aumentou a tensão de compactação até o limite de 120 MPa, o solo vermelho experimentou uma deformação máxima de (13%), orgânico (5%) e o amarelo (4%).

Pode-se observar que os solos que apresentaram menor fator de empacotamento (FE), inicialmente experimentaram maior recalque imediato e quando submetidos a cargas maiores a deformação já reduziu drasticamente.

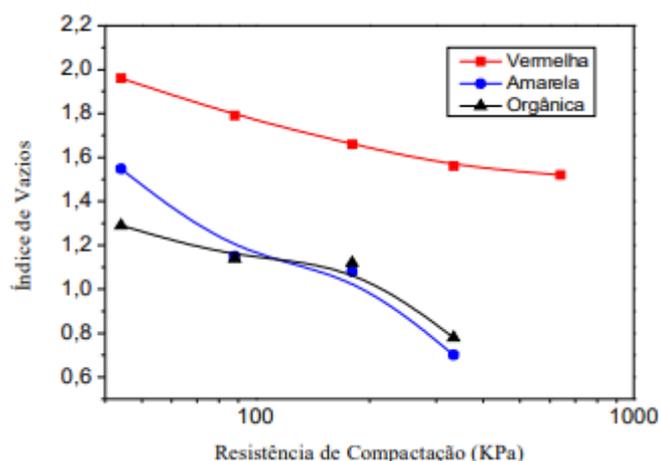


**Figura 9.** Tensão x recalque em solos 10% umidade.

## Análise das argilas saturadas

### Análise do ensaio de adensamento unidimensional

Conforme observado na Figura 10, na aplicação das cargas iniciais de 30 MPa, a argila vermelha apresentou recalque imediato maior do que os demais solos devido ao seu menor fator de empacotamento, como já comentado. Após aplicação de tensão de 300 MPa a variação do índice de vazios em relação ao início do ensaio quando foi aplicada a tensão de 30 MPa foi para o solo vermelho foi de (33,3%), orgânica (30,7%) e amarelo (52,4%). Os valores mais elevados da argila amarela deve-se ao seu menor limite de liquidez, menor índice de plasticidade o que favorece a expulsão mais rápida da água. Por sua vez as argilas vermelha e orgânica que são altamente plásticas.



**Figura 10.** Curva de adensamento odométrico.

### Recalque

Para determinação dos recalques, foi necessário calcular o coeficiente de compressão  $C_c$  de cada solo por meio do ensaio de adensamento odométrico. O recalque primário pode ser determinado por meio da Equação 4, a qual considera o solo normalmente adensado onde:  $\Delta H$ -Recalque;  $H_o$ - é altura a ser considerada do solo mole onde ocorrerá o recalque;  $\sigma_a$  - tensão de adensamento;  $\sigma'$ - tensão efetiva;  $C_c$ - coeficiente de compressão,  $e_o$ - índice de vazios do início do ensaio;  $\Delta\sigma'$  - acréscimo de tensão referente a carga externa.

$$\Delta H = \frac{H_o}{1+e_o} \cdot C_c \cdot \log\left(\frac{\sigma' + \Delta\sigma'}{\sigma_a}\right) \quad (4)$$

Para melhor visualização, na Figura 11 é apresentada uma simulação da previsão do recalque primário das argilas estudadas. Para a análise foi considerado um perfil de solo argiloso normalmente adensado, saturado com camada de 7 m abaixo de uma camada de areia de 3 m, sendo estes, submetidos a um carregamento uniforme de aterro de 50 KPa como demonstrado na Tabela 4.

Pode-se observar que o solo amarelo apresentou maior recalque (0,48 m) devido a sua menor plasticidade, motivado pela maior porcentagem de areia que favoreceu ao menor fator de empacotamento e consequentemente maior recalque. Por sua vez, os solos vermelho e orgânico que são argilosos, até a tensão estudada de 600 KPa apresentaram menor recalque (0,16) e (0,19) m respectivamente.

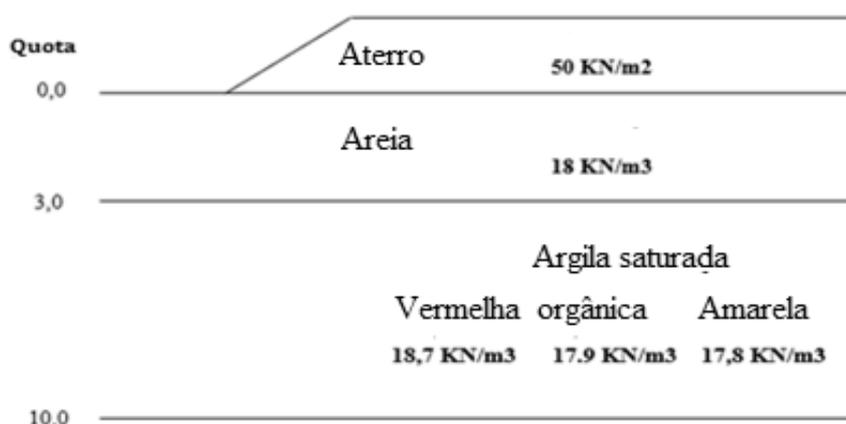


Figura 11. Perfil do solo .

Tabela 4. Previsão de recalque primário

Solo	$e_o$	$\sigma_a$	$\sigma'$	$C_c$	Recalque (m)
Argila vermelha	1,96	114,9	114,9	0,43	0,16
Argila Orgânica	1,28	103,3	103,3	0,37	0,19
Argila amarela	1,54	102,6	102,6	1,00	0,48

## CONCLUSOES

O comportamento dos solos argilosos saturados e não saturados para análise da previsão de recalque foi realizado. Diante da análise dos resultados das propriedades das argilas e do seu comportamento com a tensão aplicada, pode-se afirmar as seguintes conclusões:

Com relação aos solos saturados para o índice de vazios iniciais  $e_o$  foram maiores nas argilas amarela e orgânica e menor na argila vermelha devido ao seu maior fator de empacotamento, ou seja, menor índice de vazios favorecido pela maior quantidade de finos e maior índice de plasticidade.

Com relação aos testes em argilas não saturadas com umidades de 5 e 10%, o índice de vazios estabilizaram para todas as argilas com pressão de 20MPa, mantendo-se praticamente o  $e_f$  similar.

O recalque em solos insaturados foi menor na argila vermelha, devido ao seu maior FE, motivado pela maior porcentagem de finos. Já em solos saturados o recalque foi maior na argila amarela devido ao seu menor fator de empacotamento e maior porcentagem de areia.

Existe uma correlação entre o recalque e propriedades dos solos, principalmente com relação a composição granulométrica e índice de plasticidade. Solos de menor fator de empacotamento (FE) apresentam menor recalque. A menor FE depende da presença de impurezas como areia, da plasticidade e da porcentagem de finos que favorece o aumento da plasticidade.

## REFERÊNCIAS

- ABBASI, N.H; RAHIMI, A.A; JAVADI, A; FAKHER. Finite difference approach for consolidation with variable compressibility and permeability. *Comput. Geotech.*, **34**, 41-52, 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM D 2974-1992: **Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Organic Soils.**
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM D4318, **Standard test method for Liquid Limit, Plastic limit, and plasticity index of soils, 2010**
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS (ASTM) **D 2435-90**,1993.
- AMOROS, J.L. SANCHES, G; JAVIER, M.M. **Manual para el control de la calidad de materias primas arcillosas.** ITC Instituto de Tecnología Cerámica. 1998.
- ANDRES E., BERNARDO C., MIGUEL C. Interaction between a cylinder and a partially saturated soil for compaction analysis. *Transportation Geotechnics*, **30**, 2021.
- AOKI, N. **Solos do litoral de São Paulo.** São Paulo, SP: ABMS, 1994.
- ARNOD, S; BATTAGLIO M; BELLOMO N. Nonlinear models in soils consolidation theory parameter sensitivity analysis, *Mathl. Comput. Modelling* **24**, 11-20, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181, Determinação do índice de granulometria. Rio de Janeiro, p. 7, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180, Determinação do limite de liquidez de solos. Rio de Janeiro, p. 3, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459, Determinação do limite de plasticidade de solos. Rio de Janeiro, p. 5, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16853, Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 2020.
- BARDEN, L; BERRY, P.L; Consolidation of normally consolidated clay of the soil mechanics and foundation Division, *ASCE.*, **91** (sm5),1965.
- BENNOUR, S; MAHMOUDI, E. SRASRA, S. BOUSSEN, N. HTIRA. Composition, firing behavior and ceramic properties of the Sejnène clays (Northwest Tunisia). *Applied Clay Science* **115** (2015) 30–38
- BERBERIAN D. **Engenharia de Fundações Passo-a-passo.** Brasília: 1. Ed. ISBN, 2018.
- BINH T.P; LE H. SON; TUAN-ANHH; DUC-M . Prediction of shear strength of soft soil using machine learning methods, *Catena*, **166**, 2018.
- BRAJA, M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica.** São Paulo: Thomson, 2007.
- CARVALHO J.C. *et al.* **Solos não saturados no contexto geotécnico.** São Paulo: 1. Ed. ABMS. 2015.
- CELIK, H. Technological characterization and industrial application of two Turkish clays for the ceramic industry, *Appl. Clay Sci.* **50**, 245-254, 2010
- CHAKCHOUK A; SAMET B; MNIF T. Study on the potential use of Tunisian clays as pozzolanic material. *Applied Clay Science*, **33**, 79–88, 2006.
- CHU, M.W; BO, M.F; CHANG,V. Consolidation and permeability properties of Singapore marine clay, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **128** (9) 724-732, 2002
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER – ME 093: **Determinação da densidade real.** São Paulo: DNER, 1994.
- DIAS J.; PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Technology. Amsterdam*, **8**(2), 139-151, 1995.
- GAO, Y. A simple method for predicting the hydraulic properties of unsaturated soils with different void ratios. *Soil & Tillage Research, Ningbo*, 2021.

- LEKHA, K.R; KRISHNASWAMY,N.R; BASAK,P.Consolidation of clays for variable permeability and compressibility. **Geotech. Geoenviron. Eng.**, **129** (11), 1001-1009,2003
- LIMA, C.L.R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada. 2004.** 70p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP
- LOGEAIS, L. **La Pathologie des Foundations.** Paris: Edition du Moniteur, 1982.
- LORENTZ B; SHANAHAN N; STETSKO Y.P; A. ZAYED. Characterization of Florida kaolin clays using multiple-technique approach. **Applied. Clay Science.** **161**, 326–333, 2018.
- MAGNAN, J.P.S; BAGHERY,M.B. Etude Numdrique de Laconsolidation Unidimensionnelle en Tenant Compte des Variations de la Permeabilite et de la Compressibilite du Sol, du Fluage et de al non-Saturation, **Bulletin de Liasion des Laboratoires des Ponts et Chauss’ess.****103** (1979)
- MASTRELLI, S.C; ROVERI, C.D; NUNES A. *et al.* Estudo da caracterização de argilas não plásticas da região de poços de caldas, **Cerâmica** **59**,(350), abril/junho. 1994
- MILITISHY, J; CONSOLI, N.C; SCHNAID, F. **Patologia das fundações.** Oficina de Textos, São Paulo, SP. 2011.
- OLIVEIRA, H.A.D; SANTOS, C.P.D; OLIVEIRA, R.M.P.B., JESUS, E.D., MACEDO, Z.S. Produção de agregado sintético de argila com reaproveitamento de resíduo de vidro. **Matéria (Rio de Janeiro)**, **24**. 2017
- PHILBERT, N.; ADAMAH, M.; DOMINIQUE, O. Physico-chemical and mineralogical characterization of clay materials suitable for production of stabilized compressed earth blocks.**Construction and Building Materials**, **241**, 118097, 2020
- NARASIMHA R.P., PANDIAN N.E.T. NAGARAJ. Análise e Estimativa do Coeficiente de Consolidação. **Geotechnical Testing Journal** **18** (2), 252-258, 1995.
- RUILING F.; BO P.; XIAOPEI, C. Three-stage consolidation characteristics of highly organic peaty soil, **Engineering Geology**, **294**, 1998.
- SANTOS, P.S. **Tecnologia de argila**, Editora blucher, 10ª edição, São Paulo, SP. 1989.
- SANTOS, C.P., OLIVEIRA, H.A.D., OLIVEIRA, R.M.P.B., MACEDO, Z.S. Caracterização de argilas calcárias utilizadas na produção de revestimentos cerâmicos no Estado de Sergipe-Brasil. **Cerâmica** **62**, 147-156, 2016.
- SCHIFFMAN, R.L GIBSON, R.E. Consolidation of non-homogeneous clay layers, **J. Soil Mech. Foundations Division, ASCE**, **90** (5), 1-30, 1964
- SHROFF, A.V; SHAH, M.V. New theory of consolidation through radial drainage for soft soils. *In: International Symposium on Ground Improvement. Technologies & Case Histories*, 2009.
- SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L.; CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** **10**, 91-95, 1986.
- SURAVI, K.N. The effect of organic carbon content on soil compression characteristics. **Soil & Tillage Research**, Reino Unido, 2021.
- TOVEY, N.K. The preparation of soil and other geological materials for the SEM, Swedish. **Geotech. Soc.** 59-68, 1973
- ZANELLI, C.; CLAUDIO I.; EDUARDO D.; DAVIDE G.; MARIAROSA R., GUIA G.; DONDI, M. Mineralogical composition and particle size distribution as a key to understand the technological properties of Ukrainian ball clays. **Applied Clay Science** **108**, 102-110,2015.

