

## ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS GRÃOS FINOS NOS PARÂMETROS DE CONSISTÊNCIA, CONSOLIDAÇÃO E PERMEABILIDADE DO SOLO

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF FINE GRAINS IN THE PARAMETERS OF CONSISTENCY, CONSOLIDATION AND PERMEABILITY OF THE SOIL

**Caíque Lima de SANTANA, Stephanny Conceição Farias do EGITO COSTA,  
Jocielle RODRIGUES DA SILVA**

Universidade Estadual de Santa Cruz. Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas. Campus Soane Nazaré de Andrade, Rodovia Jorge Amado, Km 16, Salobrinho, Ilhéus, BA. E-mails: caiquelima.santana@gmail.com; scfecosta@uesc.br; jocielle01@gmail.com

### Introdução

Correlação Linear entre o Teor de Umidade Ótima e o Limite de Plasticidade de solos argilosos  
Teor de finos de transição

### Materiais e métodos

Amostra original  
Amostra dosada  
Compactação dos corpos-de-prova  
Equipamento utilizado  
Ensaio de consolidação e permeabilidade  
Coeficiente de Consolidação (Cv)

### Resultados e discussões

Caracterização e classificação da amostra original  
Caracterização das amostras dosadas  
Variação do índice de vazios (e)  
Coeficientes de Permeabilidade (k)  
Coeficientes de Consolidação

### Considerações finais

Amostra original  
Amostra dosada

### Referências

**RESUMO** - Os solos argilosos são frequentemente usados em aplicações de Engenharia Geotécnica. Esse fato torna relevante a ampliação do conhecimento sobre os fatores que influenciam em seus parâmetros de engenharia. Nesse sentido, o presente estudo visou avaliar a influência do percentual de grãos finos sobre os parâmetros de consistência, consolidação e permeabilidade de amostras de solo compactadas. Foram analisadas as misturas com 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 e 80% em massa de finos. Os resultados apontaram para a influência direta dos grãos finos sobre os parâmetros analisados. Houve um aumento progressivo nos limites de Atterberg em relação ao aumento dos finos, com variação discreta do limite de plasticidade. O índice de vazios e o coeficiente de permeabilidade decaíram com o incremento de finos, apresentando uma taxa de variação decrescente ao longo da consolidação. Os coeficientes de consolidação foram obtidos através de duas metodologias distintas, pelo método de Taylor e pela correlação matemática de Terzaghi, que apontaram para o decréscimo sucessivo desse parâmetro ao longo do aumento finos na mistura. Contudo, o método de Taylor rendeu um conjunto de valores com os menores coeficientes de correlação, apresentando maiores desvios.

**Palavras-chave:** Consolidação. Solo fino. Consistência. Compressibilidade. Permeabilidade.

**ABSTRACT** - Clay soils are frequently used in Geotechnical Engineering applications. This fact makes relevant the expansion of knowledge about the factors that influence on its parameters of engineering. In this sense, the present study aimed to evaluate the influence of the percentage of fine grains on the parameters of consistency, consolidation, and permeability of compacted soil samples. Were analyzed the mixtures with 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, and 80% by mass of fines. The results show a direct influence of fine grains on the parameters analyzed. There was a progressive increase in Atterberg's limits in relation to the increase in fines, with a discrete variation in the plasticity limit. The void rate and the permeability coefficient suffered successive decreases with the increase in the fines content, presenting a decreasing rate of variation throughout the consolidation. The void rate and the permeability coefficient decreased with the increase in fines, with a decreasing rate of variation throughout consolidation. The consolidation coefficients were obtained through two different methodologies, by the Taylor method and by the mathematical correlation of Terzaghi, which pointed to the successive decrease of this parameter along the fine increases in the mixture. However, the Taylor method yielded a set of values with the lowest correlation coefficients, with greater deviations.

**Keywords:** Consolidation. Fine soil. Consistency. Compressibility. Permeability.

## INTRODUÇÃO

Na natureza, os solos tendem a ser encontrados como misturas heterogêneas de partículas sólidas, diferenciadas por propriedades químicas e físicas. Sua classificação é geralmente realizada com base na faixa granulométrica predominante da

mistura.

Os solos argilosos, constituídos predominantemente por partículas finas, têm amplo uso no âmbito da Engenharia Civil. São utilizados, após tratamento químico ou mecânico, em

aplicações de terraplenagem, estruturas de pavimentação, núcleos de barragens de terra, aterros sanitários, fundações, entre outros (Boutera & Rouili, 2016).

Cada uma dessas aplicações requer a consideração de uma ou mais propriedades de engenharia do solo para atender aos padrões mínimos de segurança e eficiência em seu uso. Entre as principais propriedades destacam-se a compressibilidade, fluência, potencial de liquefação, expansão, resistência ao cisalhamento e permeabilidade.

Nos últimos anos, estudos foram realizados com o objetivo de conhecer os parâmetros que influenciam o comportamento dos solos heterogêneos. Dentre eles, a influência exercida pelos grãos finos tem sido amplamente investigada.

Aldaood (2019) verificou, para misturas de areia e argila, que tanto o índice de compressão quanto o coeficiente de permeabilidade variam a partir do incremento de finos na mistura, apresentando aumento e redução, respectivamente. Hsiao et al. (2015) apontaram a redução dos coeficientes de consolidação e permeabilidade a partir do aumento do teor de silte com baixa plasticidade. Essas verificações se alinham com os resultados encontrados por Magistris et al. (1998) que analisaram a influência do teor de bentonita na compressão e permeabilidade de misturas de areia siltosa.

Os estudos de Rozalina & Yanful (2012) contribuíram para o entendimento de que o potencial de variação volumétrica apresenta um

aumento significativo conforme se eleva o teor de uma mesma argila na mistura. Essa tendência também foi verificada por Dafalla (2017), ao estudar misturas de areia e bentonita.

Akayuli et al. (2013), Otoko (2014) e Ojuri & Oluwatuyi (2017) concluíram que a coesão e o ângulo de atrito variam proporcionalmente ao aumento de argila em misturas de solo arenoso. A coesão aumenta progressivamente enquanto o ângulo de atrito apresenta um comportamento oposto. Observações semelhantes sobre o ângulo de atrito foram relatadas por Yin (1999), Al-Shayea (2001) e Tiwari & Marui (2005).

A influência dos finos no potencial de liquefação estática de uma areia siltosa foi estudada por Lade et al. (2009), que realizou experimentos com baixas pressões de consolidação para simular a possibilidade de ocorrência de liquefação em camadas naturais próximas à superfície dos depósitos. Foi verificado que a presença de finos cria uma estrutura de partículas no solo que é altamente compressível, aumentando o potencial de liquefação.

Com base na sua vasta utilização prática e a partir das descobertas científicas das últimas décadas, fica clara a necessidade de se conhecer mais a fundo as variáveis que interferem no comportamento de engenharia dos solos finos. Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo contribuir com os conhecimentos acerca da influência do teor de grãos finos sobre os parâmetros de consistência, consolidação e permeabilidade dos solos.

## CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE O TEOR DE UMIDADE ÓTIMA E LIMITE DE PLASTICIDADE DE SOLOS ARGILOSOS

Nas últimas décadas, alguns autores verificaram que é possível correlacionar linearmente a umidade ótima ( $w_{ot}$ ) de compactação de um solo argiloso com seu respectivo limite de plasticidade (LP), dentre eles Marinho & Chandler (1993), Likos et

al. (2005), Sridharan & Nagaraj (2005) e Gurtug & Sridharan (2015).

A tabela 1 contém as faixas de argila trabalhadas e as correlações lineares obtidas por cada autor.

**Tabela 1** - Correlações lineares entre o teor de umidade ótima ( $w_{ot}$ ) e o limite de plasticidade (LP).

Autores	Fração de argila (%)	Correlação	R <sup>2</sup>
Marinho & Chandler (1993)	30 – 90	$w_{ot} = 0,83LP$	R <sup>2</sup> = 0,94
Likos et al. (2005)	5 – 90	$w_{ot} = 0,96LP$	R <sup>2</sup> = 0,82
Sridharan & Nagaraj (2005)	5 – 51,5	$w_{ot} = 0,92LP$	R <sup>2</sup> = 0,99
Gurtug & Sridharan (2015)	35 – 76	$w_{ot} = 0,94LP$	R <sup>2</sup> = 0,98

As correlações lineares encontradas variaram de 0,83LP a 0,96LP, com coeficientes de correlação (R<sup>2</sup>) de 0,94 e 0,82, respectivamente. A que apresentou o menor coeficiente foi a de Likos et al.

(2005) com R<sup>2</sup> de 0,82, mesmo assim o resultado encontrado está condizente com os dos demais autores. De forma geral, essas correlações demonstram que, para solos argilosos, o teor de

umidade ótimo tende a apresentar um valor inferior e relativamente próximo do limite de plasticidade.

Essas correlações lineares funcionam como ferramentas que ajudam a estimar o teor de

umidade ótimo dos solos argilosos através de um parâmetro geotécnico proveniente de um ensaio relativamente mais simples e que requer uma quantidade muito inferior de amostra.

### TEOR DE FINOS DE TRANSIÇÃO

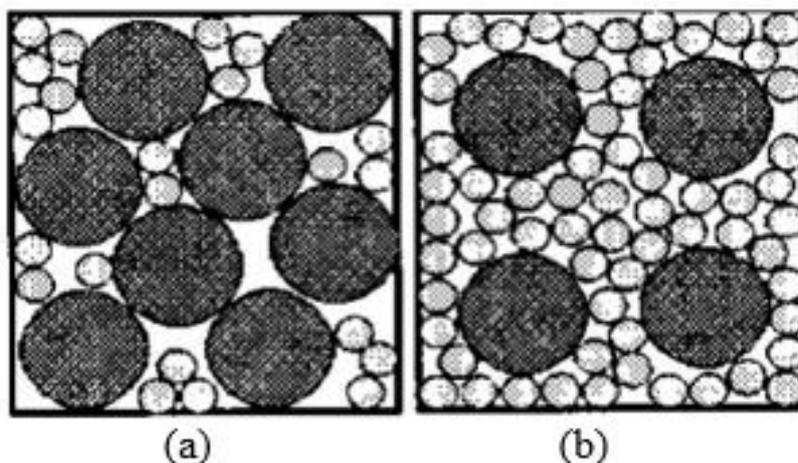
A variação da granulometria do solo contribui para a alteração do comportamento mecânico do material. Sabe-se que a tensão efetiva, que é a tensão transmitida entre os grãos sólidos, é determinante para a resistência do conjunto. Ao alterar o arranjo entre as partículas, a maneira como elas se conectam também muda, variando a resistência do sistema.

Thevanaygam et al. (2002) apresentaram dois possíveis arranjos microestruturais, com o mesmo índice de vazios, para a mistura de grãos finos e grossos. Neles, as tensões na massa do solo podem ser suportadas, primariamente, pelo contato entre os grãos grossos (Figura 1a) ou pelo contato entre os grãos finos (Figura 1b).

Thevanaygam et al. (2002) apontam para a existência de uma porcentagem de finos de transição (FCT) que determina a mudança da

influência primária na resistência do conjunto. Dessa forma, os grãos grossos exercem influência primária para um conteúdo fino abaixo do FCT, enquanto que para a situação inversa, os grãos finos assumem essa influência.

Estudos realizados nas últimas décadas contribuíram para uma maior compreensão dos finos de transição, para misturas de areia e argila submetidas às análises de resistência ao cisalhamento e compressibilidade. Salgado et al. (2000) e Vallejo & Mawby (2000) ao verificarem a resistência ao cisalhamento apontaram um FCT de aproximadamente 20% e 25% em massa, respectivamente. Monkul & Ozden (2007) e Lupogo (2013) estudaram a compressibilidade das misturas e obtiveram um FCT de 19 a 34% e 15 a 35% em massa, respectivamente.



**Figura 1** - Modelo microestrutural de amostras de solo, com contatos primários entre a) grãos grossos e b) grãos finos. Fonte: Adaptado de Thevanaygam et al. (2002).

### MATERIAIS E MÉTODOS

Os termos amostra original e amostra dosada foram utilizados para fins de identificação neste estudo, o primeiro relativo à amostra com granulometria original de campo e o segundo referente às misturas que foram preparadas e dosadas em laboratório, a partir da amostra original.

Para a execução dos procedimentos metodológicos, foram utilizadas as normas brasileiras do atual Departamento Nacional de Infraestruturas de Transporte (DNIT), antigo DNER, e da Associação Brasileira de Normas Técnicas

(ABNT NBR), para os procedimentos não padronizados pelo DNIT.

#### Amostra original

A amostra original foi extraída da Zona da Mata, dentro do território da Universidade Estadual de Santa Cruz, em Ilhéus, Bahia, Brasil, com coordenadas geográficas Lat. -14.7954 e Lng. -39.17232. O processo de coleta seguiu os requisitos normativos da DNER – PRO 003/94, para retirada de amostras deformadas de solo.

A caracterização da amostra original seguiu as diretrizes metodológicas propostas pelas normas

DNER-ME 041/94, DNER-ME 122/94, DNER-ME 082/94, DNER-ME 093/94, DNER-ME 080/94 e DNER-ME 051/94, para a preparação das amostras, determinação do limite de liquidez, obtenção do limite de plasticidade, ensaio de densidade real, análise granulométrica parcial e total, respectivamente.

#### **Amostra dosada**

A metodologia utilizada para separar as frações granulométricas da amostra original seguiu as etapas de: secagem da amostra em estufa, desagregação dos torrões, separação da fração fina (passando pela peneira #200), separação da fração grossa (retida na #200), lavagem e secagem da fração grossa, eliminação de grãos maiores que 2,0 mm através da peneira nº 10 e preparação das misturas dosadas com porcentagens finas de 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 e 80%, em massa.

Vale ressaltar que a decisão de se trabalhar com percentuais de finos a partir de 35% foi tomada com base nos estudos apresentados por Salgado et al. (2000), Vallejo & Mawby (2000), Monkul & Ozden (2007) e Lupogo (2013), ao passo em que esse foi o maior valor de FCT dentre os apresentados por eles.

Essa escolha foi baseada na tentativa de se trabalhar com misturas em que os grãos finos estejam exercendo influência primária nos comportamentos analisados.

#### **Compactação dos corpos-de-prova**

Conforme as correlações apresentadas por Marinho & Chandler (1993), Likos et al. (2005), Sridharan & Nagaraj (2005) e Gurtug & Sridharan (2015) e dadas às limitações da quantidade de amostra e dos equipamentos de laboratório utilizados nesta pesquisa, optou-se por fixar a umidade de compactação para todas as amostras dosadas em 0,70LP.

As amostras foram submetidas à compactação dinâmica, através da aplicação da energia padrão intermediária, conforme recomendado pela norma DNIT 164/2013 - ME.

Ao final de cada compactação, as amostras foram moldadas por meio do anel da prensa de consolidação.

#### **Equipamento utilizado**

Foram utilizadas duas prensas do tipo Bishop, para consolidação uniaxial das amostras de solo. Ambas são dotadas de sistema automático de aferição e registro das deformações sofridas pelo corpo-de-prova, ao longo de períodos pré-determinados em suas configurações.

As prensas funcionam pelo método de aplicação de cargas por meio de uma alavanca, onde as cargas de cada estágio são aplicadas em uma extremidade e o corpo de prova é fixado na outra. Além disso, ambas as máquinas possuem uma célula de consolidação com anel fixo.

#### **Ensaio de consolidação e permeabilidade**

Devido à falta de normatização específica do DNIT, acerca do ensaio para determinação da permeabilidade dos solos argilosos, foram seguidas as prescrições da norma NBR 14545/2000, para a determinação do coeficiente de permeabilidade à carga variável.

O ensaio de consolidação foi realizado de acordo com a norma DNER-IE 005/94, para amostras compactadas.

Os corpos-de-prova foram moldados com 60 cm<sup>2</sup> de área e 2,0 cm de altura. As moldagens ocorreram aos pares, para evitar armazenamento e perdas de umidade.

Cada corpo-de-prova foi saturado durante 24 horas por meio do sistema de permeabilidade da prensa.

Em seguida foi aplicada uma tensão de pré-consolidação de 0,2kPa, durante 15 minutos, antes do início do primeiro estágio de carga para minimizar os efeitos de amolgamento gerado durante o processo de moldagem.

O ensaio de permeabilidade foi realizado antes e após a aplicação de cada estágio de carregamento de 24 horas. As tensões aplicadas em cada corpo-de-prova foram de 20, 40, 80, 160, 320 e 640kPa.

#### **Coefficiente de Consolidação (Cv)**

Foi obtido um coeficiente de consolidação (Cv) para cada estágio de carga aplicado. Para fins comparativos, cada Cv foi obtido por meio de duas metodologias distintas, através da aplicação do método de Taylor ( $\sqrt{t}$ ) e por meio da Equação (1) derivada da Equação Fundamental de Consolidação Unidimensional proposta por Terzaghi, que correlaciona o Cv com os coeficientes de compressibilidade e permeabilidade.

$$C_v = \frac{k(1+e)}{a_v * \gamma_w} \quad (1)$$

Em que  $k$  (cm/s) é o coeficiente de permeabilidade da amostra,  $e$  é o índice de vazios,  $a_v$  (kPa<sup>-1</sup>) é o coeficiente de compressibilidade e  $\gamma_w$  ( $\approx 10$  kN/m<sup>3</sup>) é o peso específico da água.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A caracterização e classificação da amostra original, bem como os parâmetros de consistência, compressibilidade e permeabilidade das amostras dosadas, foram dispostos nas subseções seguintes.

### Caracterização e classificação da amostra original

Por meio da curva granulométrica da amostra original (Figura 2), verificou-se que sua constituição tem predominância de grãos finos, com  $\approx 72,1\%$  dos grãos passantes na peneira #200. Além disso, 95% dos grãos passaram na #40 e nenhum grão ficou retido nas peneiras #4 e #10.

A partir dos testes de caracterização, foram obtidos os valores da tabela 2, referentes aos limites de Atterberg e massa específica.

O valor do limite de liquidez (LL) encontrado foi aproximadamente o dobro do obtido para o limite de plasticidade (LP), enquanto o LP apresentou um valor muito próximo ao índice de plasticidade (IP), com diferença percentual de 1,37%.

Na tabela 3, estão as classificações da amostra conforme os sistemas da SUCS e da AASTHO. Em ambas as metodologias o solo é tido como argiloso, com caráter de alta compressibilidade conforme a SUCS.

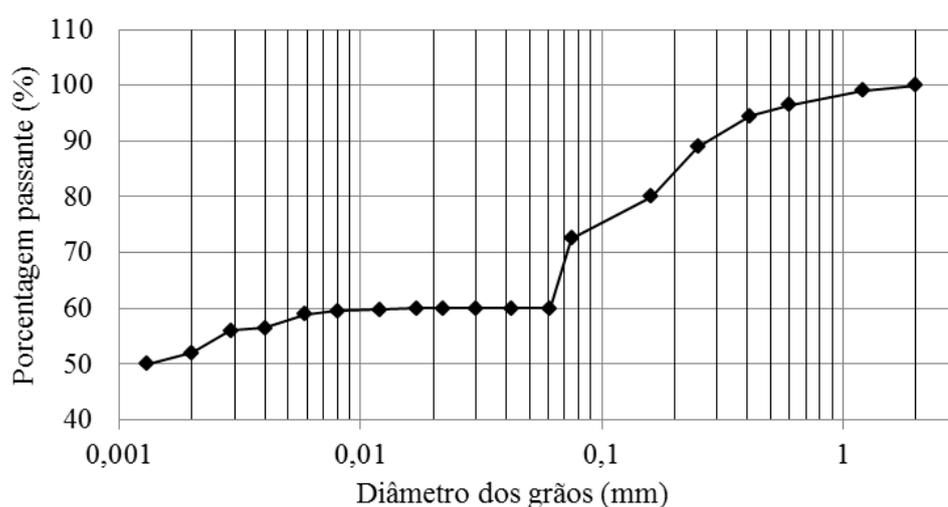


Figura 2 - Curva granulométrica da amostra original

Tabela 2 - Limites de Atterberg e massa específica da amostra original.

Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
2,391	55,80	27,71	28,09

Tabela 3 - Classificação da amostra original conforme os métodos SUCS e AASTHO.

Método	Classificação	Característica
SUCS	CH	Solo argiloso de alta compressibilidade
AASTHO	A-7-6	Solo argiloso

### Caracterização das amostras dosadas

O LL e LP mostraram um comportamento consistente com o previsto na literatura, com valores crescentes para incrementos sucessivos de finos (Figura 3). Entretanto, o LP apresentou menor sensibilidade à variação do teor de finos (TF) para valores a partir de 55%, enquanto o LL cresceu significativamente em todas as porcentagens. O valor de LL encontrado para o percentual de 70% foi muito próximo do obtido para a amostra original, com uma diferença de aproximadamente 4,5%, o que se justifica pela

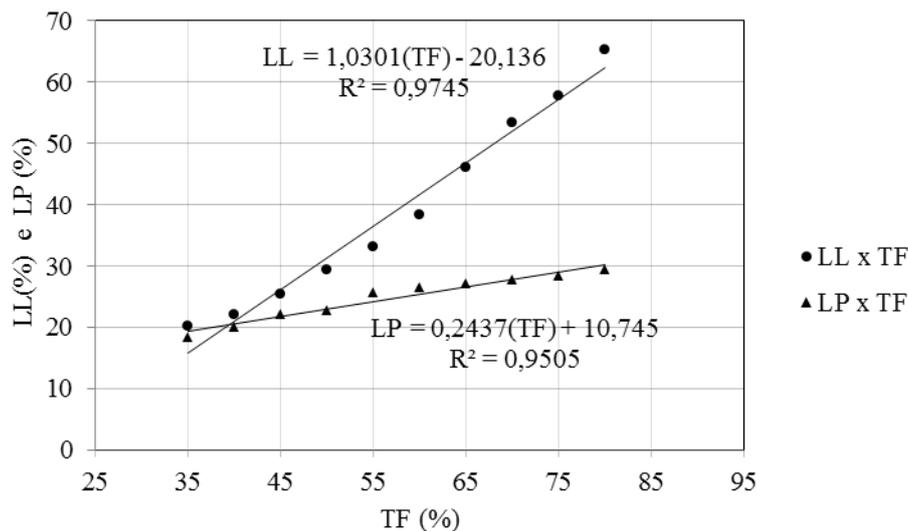
proximidade do TF em ambas.

Foram traçadas linhas de tendência que renderam bons coeficientes de correlação ( $R^2$ ) iguais a 0,974 e 0,950, para os valores de LL e LP, respectivamente. As equações de correlação obtidas também estão apresentadas na figura 3.

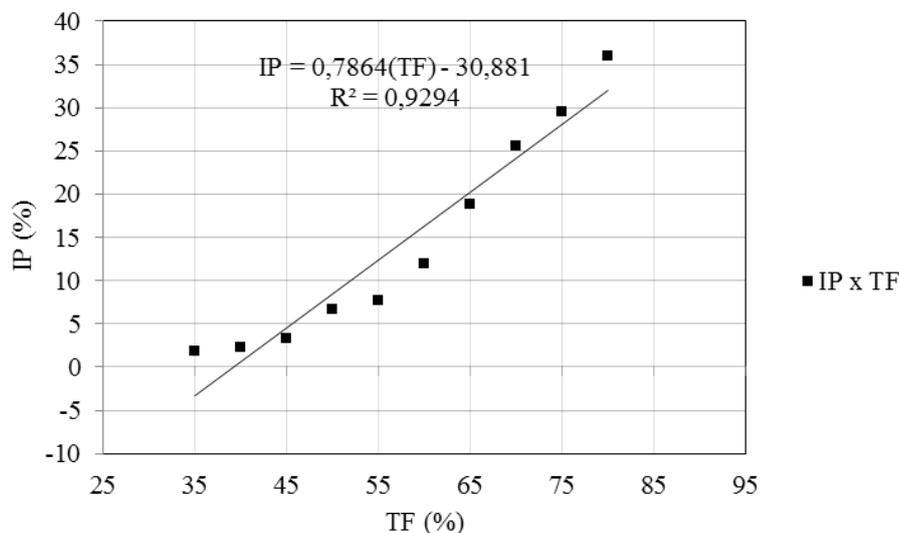
O índice de plasticidade (IP) das misturas também aumentou com o TF, como mostra a Figura 4, com valores mínimo e máximo de 1,88% e 35,89%, respectivamente. Isso sugere uma maior faixa de trabalho entre os estados plástico e líquido para misturas com níveis mais

altos de finos. A linha de tendência obtida também revela um bom coeficiente de correlação

( $R^2$ ) de 0,929, com a equação de correlação apresentada.



**Figura 3** - Limites de Liquidez (LL) e Plasticidade (LP) por Teor de Finos (TF).



**Figura 4** - Índice de Plasticidade (IP) por Teor de Finos (TF).

### Variação do Índice de Vazios (e)

As figuras 5 e 6 mostram como varia o Índice de Vazios (e) em relação às variações do TF e da tensão ( $\sigma$ ), respectivamente. Conforme a figura 5, para todas as misturas analisadas, o índice sofreu redução com o aumento do TF. As curvas de variação foram mais suavizadas à medida que o estágio de carregamento foi aumentado, o que pode ser justificado pelo fato de que cada aumento de tensão contribui para a redução parcial de vazios na mistura, aumentando o contato entre os grãos e, conseqüentemente, maior o impedimento à redução de vazios. Essa suavização na redução dos vazios da mistura também ocorreu ao longo dos incrementos de TF, apresentando uma contínua aproximação das curvas, como se observa na figura 6.

### Coefficientes de Permeabilidade (k)

Os Coeficientes de Permeabilidade (k) calculados a partir dos dados dos ensaios de condutividade hídrica, antes e após cada estágio de carregamento, foram dispostos nas figuras 7 e 8.

A figura 7 aponta um comportamento condizente com o que prevê a literatura, apresentando a redução desse parâmetro a partir do incremento do TF. Isso é justificável já que parte dos finos presentes na mistura passa a ocupar os espaços vazios entre os grãos arenosos, reduzindo os vazios e conseqüentemente o espaço interno disponível para que ocorra a percolação da água. Konime (2010), Hsiao et al. (2015), Evans et al. (2016) e Aldaood (2019) relataram tendência semelhante. Para Aldaood

(2019), a maior variação da permeabilidade, no estágio anterior ao início do carregamento, ocorreu para 20% de finos, enquanto que no

presente estudo, para o nível de carga nulo, essa maior variação ocorreu no TF de 75%, apresentando 8,57% de redução.

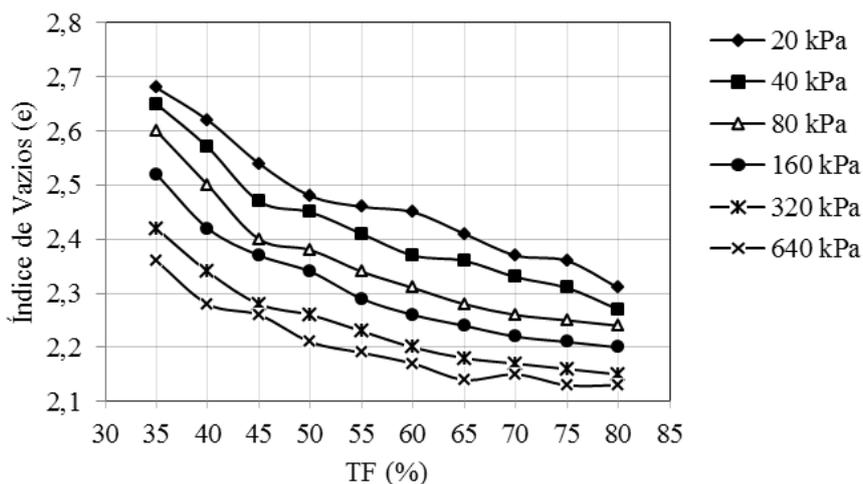


Figura 5 - Índice de vazios (e) por Teor de Finos (TF).

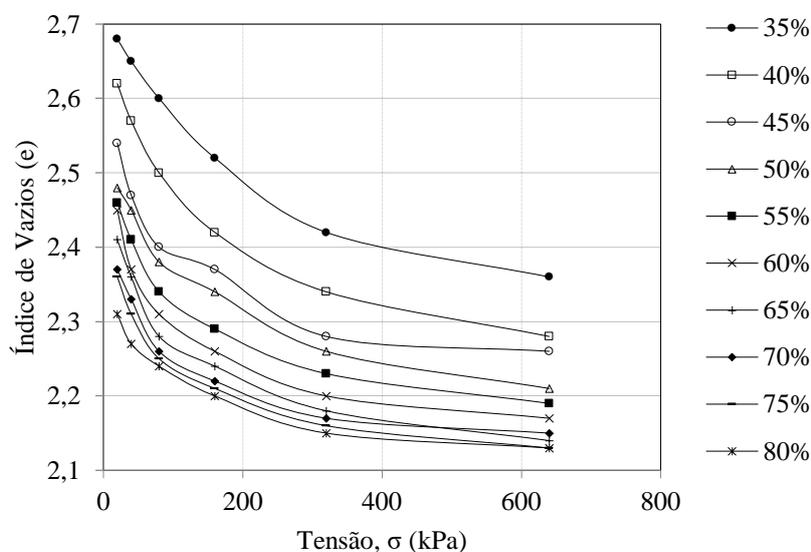


Figura 6 - Índice de vazios (e) por Tensão (σ).

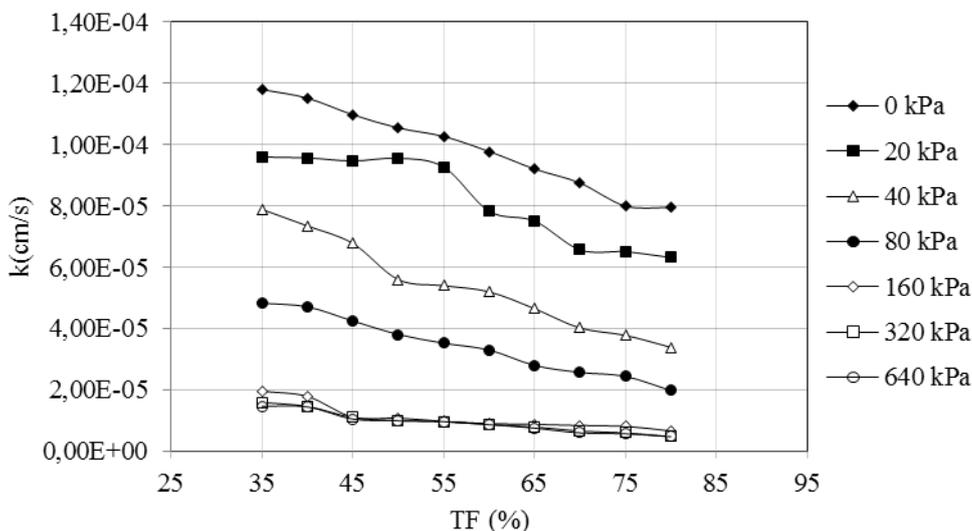


Figura 7 - Coeficiente de Permeabilidade (k) por Teor de Finos (TF).

Ainda conforme a figura 7, a carga de 20 kPa provocou a mudança na ordem de grandeza de  $10^{-4}$  para  $10^{-5}$  nas faixas percentuais de 35 à 55% de finos. Ainda houveram mudanças de  $10^{-5}$  para  $10^{-6}$  na faixa de 50% carregada com 320 kPa e para as faixas subsequentes em 160 kPa.

Os coeficientes de permeabilidade, avaliados quanto ao incremento de tensões, sofreram reduções significativas até a tensão de 160 kPa, com diminuição da taxa de decréscimo para carregamentos superiores. As menores permeabilidades foram obtidas para a maior carga aplicada, de 640 kPa (Figura 8).

### Coefficientes de Consolidação

Os coeficientes de consolidação obtidos da aplicação do método de Taylor (Cvt) e da Correlação Matemática de Terzaghi (Cvc) foram dispostos nas figuras 9 a 14, relativos aos

diferentes níveis de tensão. Ambos os métodos apontaram para a redução desse parâmetro a partir do incremento do TF. Esse comportamento também foi apontado por Hsiao et al. (2015) e Evans et al. (2016).

Contudo, os valores encontrados pela correlação de Terzaghi foram maiores que os obtidos pelo método de Taylor, onde foi verificado certo nível de convergência conforme houve aumento do TF. A faixa com 80% de finos rendeu as menores diferenças percentuais entre os valores encontrados para os níveis de tensão de 20, 40, 80 e 320kPa, com diferenças de 30, 27, 28 e 29%, respectivamente. A diferença percentual mínima de 32%, entre o Cvc e Cvt, foi obtida para as faixas de 50, 70 e 75% de finos, referentes às tensões de 640 kPa para a primeira faixa e 160 kPa para as duas últimas.

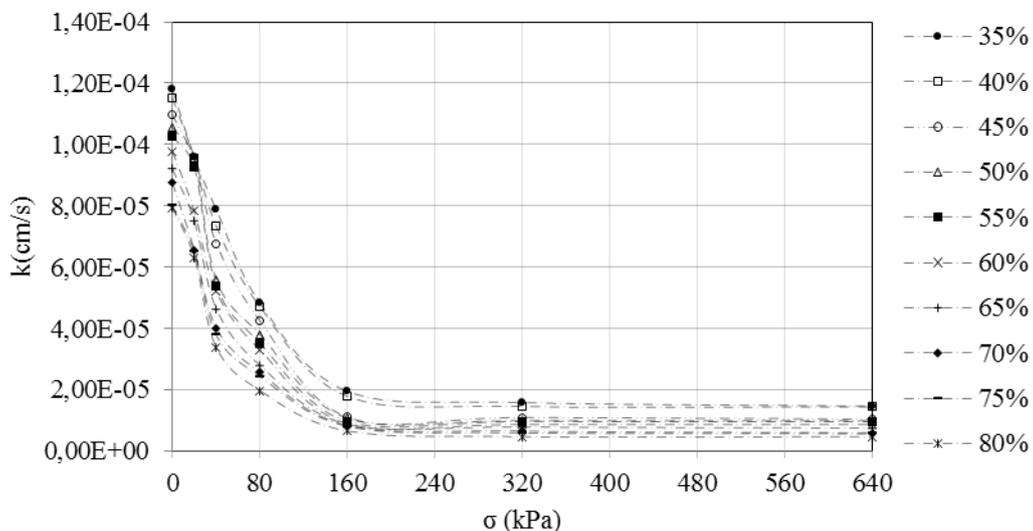


Figura 8 - Coeficiente de Permeabilidade (k) por Tensão (σ).

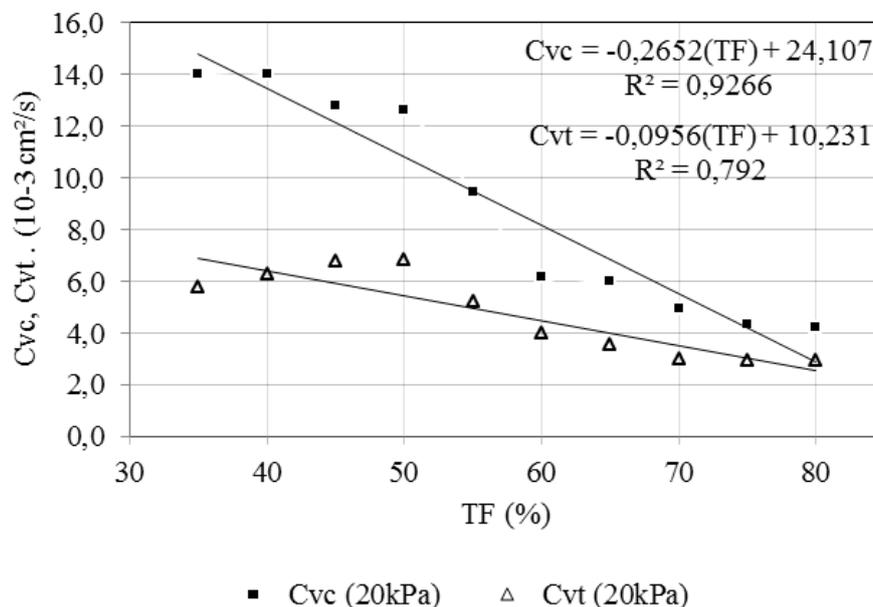
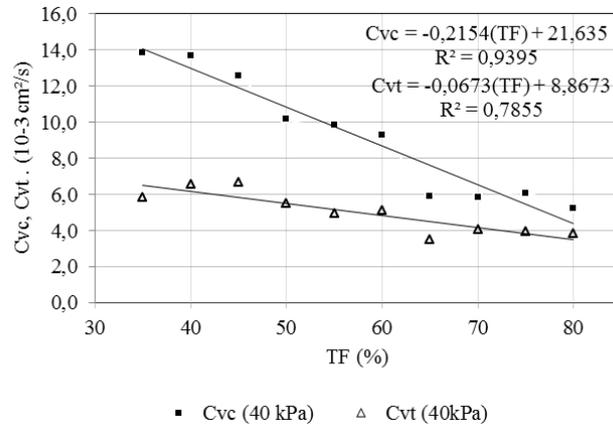


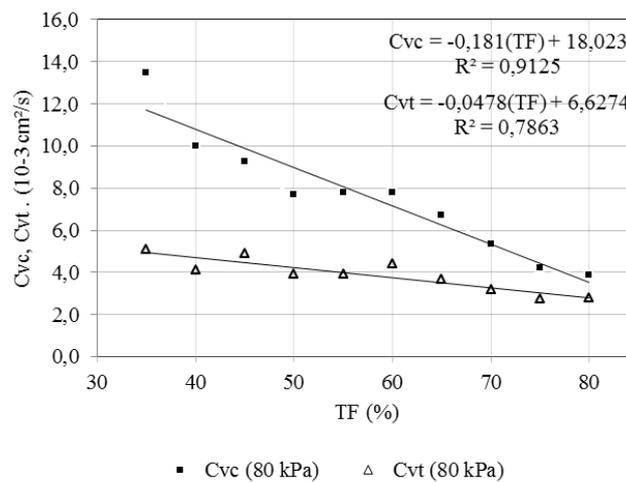
Figura 9 - Cvc e Cvt por Teor de Finos (TF) para Tensão de 20kPa.

Nas figuras 9 a 14 ainda foram apresentadas as equações de tendência que descrevem as variações de Cvc e Cvt em relação ao TF e também os coeficientes de correlação ( $R^2$ ) encontrados para ambos os conjuntos de dados. A tabela 4 resume os valores de  $R^2$  obtidos, onde se nota que esses coeficientes sofreram redução com aumento da tensão aplicada, para ambos os métodos.

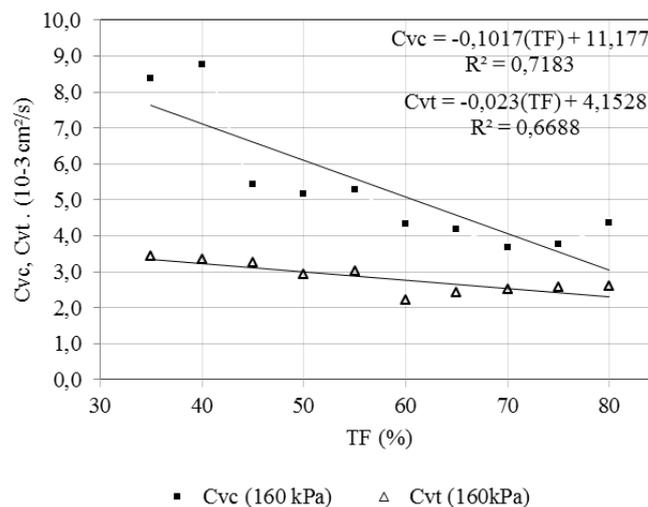
Contudo, o método de Taylor rendeu os menores coeficientes de correlação para todos os estágios de carregamento, o que pode ser ocasionado pela maior sensibilidade de aplicação do método, já que qualquer desvio na curva de variação da altura (H) pela raiz quadrada do tempo ( $\sqrt{t}$ ) acaba dificultando o correto posicionamento da reta tangente ao trecho de adensamento primário.



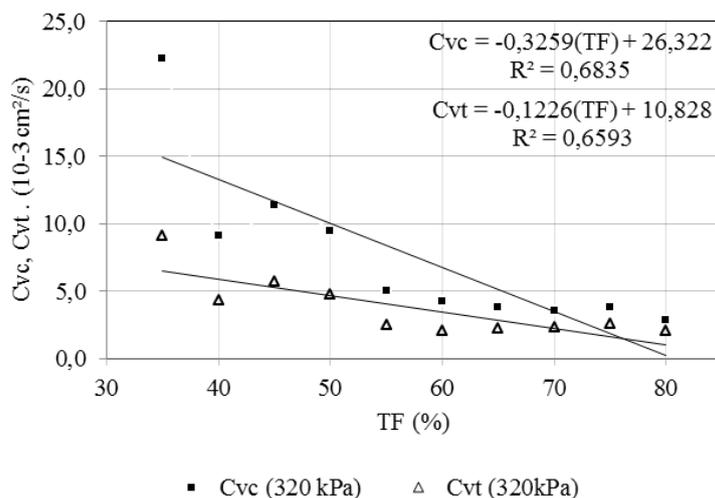
**Figura 10** - Cvc e Cvt por Teor de Finos (TF) para Tensão de 40kPa.



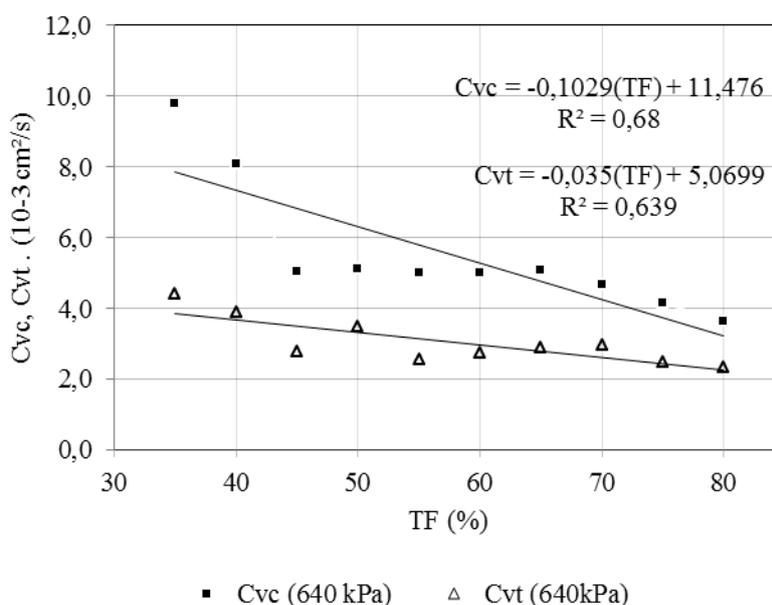
**Figura 11** - Cvc e Cvt por Teor de Finos (TF) para Tensão de 80kPa.



**Figura 12** - Cvc e Cvt por Teor de Finos (TF) para Tensão de 160kPa.



**Figura 13** - Cvc e Cvt por Teor de Finos (TF) para Tensão de 320kPa.



**Figura 14** - Cvc e Cvt por Teor de Finos (TF) para Tensão de 640kPa.

**Tabela 4** - Coeficientes de Correlação ( $R^2$ ) encontrados para os valores de Cvc e Cvt.

Parâmetro	Coeficientes de Correlação ( $R^2$ )					
	Estágios de carregamento (kPa)					
	20	40	80	160	320	640
Cvc	0,9266	0,9395	0,9125	0,7188	0,6835	0,6800
Cvt	0,7920	0,7855	0,7863	0,6688	0,6593	0,6390

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

### Amostra original

A amostra com granulometria de campo original apresentou uma fração predominante de grãos finos, com 72,1% dos grãos passando na peneira #200. Sua classificação, de acordo com as metodologias SUCS e AASHTOO, foi de solo argiloso (CH) e de solo argiloso altamente compressível (A-7-6), respectivamente.

### Amostras dosadas

Os limites de Atterberg se mostraram

crecentes para aumentos sucessivos do teor de finos (TF). Entretanto, o LP apresentou menor sensibilidade à variação do TF para valores a partir de 55%, ao passo que o LL cresceu significativamente ao longo de todas as porcentagens.

Já o IP apresentou crescimento considerável, dado pelo distanciamento do LP e LL ao longo do aumento do TF, apresentando valores mínimo e máximo de 1,88% e 35,89%, respectivamente.

Os coeficientes de correlação encontrados para o conjunto de valores de LL, LP e IP foram 0,974, 0,950 e 0,929, respectivamente.

O índice de vazios se mostrou decrescente ao longo do incremento do TF, cujas taxas de variação também sofreram redução ao longo do aumento de finos na mistura. Esse comportamento foi refletido na suavização das curvas de variação obtidas. Essa suavização nas curvas também foi verificada ao longo do aumento da carga de ensaio, o que pode ser justificado pelo fato de que cada aumento na tensão contribui para a diminuição parcial de vazios na mistura, aumentando o contato entre os grãos e, conseqüentemente, o impedimento à redução de vazios.

O coeficiente de permeabilidade (k) sofreu

redução progressiva ao longo do aumento do TF. O percentual de finos que ocasionou a maior redução da permeabilidade, antes de se iniciarem os carregamentos, foi o de 75%, apresentando 8,57% de variação. Além disso, para tensões a partir de 160 kPa as reduções foram significativamente diminuídas ao longo da elevação do TF.

Os coeficientes de consolidação obtidos apresentaram o comportamento decrescente previsto na literatura, para incrementos sucessivos de finos. Contudo, os valores de  $C_v$  obtidos pelo método de Taylor foram relativamente inferiores ao encontrados pela correlação matemática de Terzaghi. O método de Taylor apresentou ainda os menores coeficientes de correlação ( $R^2$ ).

## REFERÊNCIAS

- AKAYULI, C.; OFOSU, B.; NYAKO, S.O.; OPUNI, K.O. The Influence of Observed Clay Content on Shear Strength and Compressibility of Residual Sandy Soils. **International Journal of Engineering Research and Applications**. v. 3, n. 4, p.2538-2542, 2013.
- ALDAOOD, A. Impact of fine materials on the saturated and unsaturated behavior of silty sand soil. **Ain Shams Engineering Journal**, article in press, 9 p, 2019.
- AL-SHAYEA, N.A. The combined effect of clay and moisture content on the behavior of remolded unsaturated soils. **Engineering Geology**, v. 62, n. 4, p. 319-342, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14545: SOLO – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável**. Rio de Janeiro, 2000. 12p.
- BOUTERAA, D. & ROUILI, A. Compressibility of a 'Fat' Clay mixed with aggregates. **Journal of Civil & Environmental Engineering**, v. 6, n. 4, 4 p., 2016.
- DAFALLA, M.A. The Compressibility and Swell of Mixtures for Sand-Clay Liners. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, 9 p., 2017.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-IE 005/94: Instrução de Ensaio. Solos - Adensamento**. Brasil, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 041/94: Solos – preparação de amostras para ensaio de caracterização**. Brasil, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 051/94: Solos – Análise granulométrica**. Brasil, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 080/94: Solos – análise granulométrica por peneiramento**. Brasil, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 082/94: Solos – determinação do limite de plasticidade**. Brasil, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 093/94: Solos – determinação da densidade real**. Brasil, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 122/94: Solos – determinação do limite de liquidez – método de referência**. Brasil, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 164/2013: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – método de referência**. Rio de Janeiro: IPR, 2013.
- EVANS, J.C.; HUANG, H.; RUFFING, D.G. Evaluation of Soil-Bentonite Backfill Consolidation Properties. **Proceedings of the DFI International Conference on Deep Foundations, Seepage Control and Remediation**, NY, p. 169-178, 2016.
- GURTU, Y. & SRIDHARAN, A. Prediction of Compaction Behaviour of Soils at Different Energy Levels. **International Journal of Engineering Research and Development**, v. 7, n. 3, 5 p., 2015.
- HSIAO, D.-H.; PHAN, V. T.-A.; HSIEH, Y.-T.; KUO, H.-Y. Engineering behavior and correlated parameters from obtained results of sand-silt mixtures. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 77, p. 137-151, 2015.
- KONIME, H. Predicting hydraulic conductivity of sand-bentonite mixture backfill before and after swelling deformation for underground disposal of radioactive wastes. **Engineering Geology**, v.114. n. 3-4, p. 123-134, 2010.
- LADE, P.V.; YAMAMURO, J.A.; LIGGIO JR., C.D. Effects of fines content on void ratio, compressibility, and static liquefaction of silty sand. **Geomechanics and Engineering**, v. 1, n. 1, p. 1-15, 2009.
- LIKOS, W.J; LU, N.; SHARKEY, K. J. Laboratory Characterization of Steeply Dipping Expansive Bedrock in the Rocky Mountain Front Range. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 131, n. 9, p. 1162-1171, 2005.
- LUPOGO, K. Effect of fines mineralogy on the oedometric compressional behavior of sandy soils. **Journal of Civil Engineering and Construction Technology**, v. 4, n. 7, p. 232-238, 2013.
- MAGISTRIS, F.S. DE; SILVESTRI, F.; VINALE, F. Physical and mechanical properties of a compacted silty sand with low bentonite fraction. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 35, n. 6, p. 909-925, 1998.
- MARINHO, F.A.M. & CHANDLER, R.J. Unsaturated Soils. **Geotechnical Special Publication**, n. 39, p. 77-90, 1993.
- MONKUL, M.M. & OZDEN, G. Compressional behavior of clayey sand and transition fines content. **Engineering Geology**, v. 89, n. 3-4, p.195-205, 2007.
- OJURI, O. & OLUWATUYI, O. Strength and Hydraulic Conductivity Characteristics of Sand-Bentonite Mixtures Designed As a Landfill Liner. **Jordan Journal of Civil Engineering**, v. 11, n. 4, p. 614-622, 2017.
- OTOKO, G.R. Dependence of shear strength and compressibility of tropical lateritic soils on clay content. **International Journal**

- of Engineering and Technology Research**, v. 2, n. 2, p. 1-9, 2014.
- ROZALINA S.D. & YANFUL E. K. Factors affecting the shear strength of mine tailings/clay mixtures with varying clay content and clay mineralogy. **Engineering Geology**, v. 125, p. 11-25, 2012.
- SALGADO, R.; BANDINI, P.; KARIM, A. Shear strength and stiffness of silty sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 126, n. 5, p. 451-462, 2000.
- SRIDHARAN, A. & NAGARAJ, H.B. Plastic limit and compaction characteristics of finegrained soils. **Ground Improvement**, v. 9, n. 1, p. 17-22, 2005.
- THEVANAYAGAM, S.; SHENTHAN, T.; MOHAN, S., LIANG, J. Undrained Fragility of Clean Sands, Silty Sands, and Sandy Silts. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 128, n. 10, p. 849-859, 2002.
- TIWARI, B. & MARUI, H., A new method for the correlation of residual shear strength of the soil with mineralogical composition. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 131, n. 9, p. 1139-1150, 2005.
- VALLEJO, L.E. & MAWBY, R. Porosity influence on the shear strength of granular material-clay mixtures. **Engineering Geology**, v. 58, p.1 25-136, 2000.
- YIN, J.H., Properties and behaviour of Hong Kong marine deposits with different clay contents. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 36, n. 6, p.1085-1095, 1999.

*Submetido em 13 de julho de 2020*

*Aceito para publicação em 5 de setembro de 2021*