

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA**

PAULO HENRIQUE DE SOUZA GINES

**CONDICIONAMENTO DE SOLO PARA ESCAVAÇÕES
SUBTERRÂNEAS ATRAVÉS DE TUNELADORAS (TBM-EPB) COM
INFLUÊNCIA DE AGENTES QUÍMICOS E ELÉTRICOS.**

São Carlos - SP

JUNHO/2019

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA**

**CONDICIONAMENTO DE SOLO PARA ESCAVAÇÕES
SUBTERRÂNEAS ATRAVÉS DE TUNELADORAS (TBM-EPB) COM
INFLUÊNCIA DE AGENTES QUÍMICOS E ELÉTRICOS.**

Apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos necessários para o título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Tarcísio Barreto Celestino

(VERSÃO CORRIGIDA)

São Carlos - SP

2019

FICHA CATALOGRAGRICA

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

G492c Gines, Paulo Henrique de Souza
CONDICIONAMENTO DE SOLO PARA ESCAVAÇÕES
SUBTERRÂNEAS ATRAVÉS DE TUNELADORAS (TBM-EPB): COM
INFLUÊNCIA DE AGENTES QUÍMICOS E ELÉTRICOS / Paulo
Henrique de Souza Gines; orientadora Tarcísio Barreto
Celestino. São Carlos, 2019.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2019.

1. TBM-EPB. 2. Clogging. 3. pH. 4. Condicionamento
de Solos . 5. Dispersantes químicos. 6. Corrente
elétrica. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **PAULO HENRIQUE DE SOUZA GINES**.

Título da dissertação: "Condicionamento de solo para escavações subterrâneas através de tuneladoras (TBM-EPB) com influência de agentes químicos e elétricos".

Data da defesa: 24/05/2019.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Tarcísio Barreto Celestino**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Dr. **Miguel Angel Alfaro Soto**
(Pesquisador/Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-
Rio Claro)

APROVADO

Prof. Titular **José Leomar Fernandes Júnior**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Profa. Associada **Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

"Existem muitas hipóteses em ciência que estão erradas. Isso é perfeitamente aceitável, elas são a abertura para achar as que estão certas".

(CARL SAGAN, 180)

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Tarcísio Barreto Celestino pela orientação, compreensão nas mais diversas situações que ocorreram, e a profunda admiração que tenho pela pessoa Tarcísio em sua maneira de conduzir tudo...

À Janaína Ferreira, "minha esposa", por todo apoio emocional, incentivo em desenvolver este trabalho e principalmente, ao apoio financeiro do lar durante o tempo de estudo, sem isto a materialização deste trabalho seria impossível.

Aos meus pais, Dona Mariana e o Sr Toninho e meu irmão Pedro, que muito me motivou a seguir sempre em frente independente das dificuldades, obrigado por tudo...

Aos funcionários do departamento de Geotecnia, Oscar, José Luiz, Décio, Benedito, Maristela, Álvaro, Neiva, Herivelto, pela atenção e ajuda em todos os assuntos.

Aos colegas Esteban Vindas, Taira Lopez, Rogério Araujo (pesadão), Thiago (Carioca), Diego, Raul, Jean, Gabriel, João Sampaio e Thaíse Moraes, Marcell e Elaine, pela convivência durante este tempo de vida em São Carlos-SP.

De forma especial às amigas Iviny Barros e Liana Rocha, pela ajuda e ensinamentos nas atividades que pude desenvolver no laboratório de geotecnia ambiental.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – pelo auxílio financeiro que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

GINÊS, P.H.S. Condicionamento de solos para escavações subterrâneas através de tuneladoras (TBM-EPB) com influência de agentes químicos e elétricos. 2019. 141f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Este trabalho apresenta uma proposta de estudo sobre o tema de condicionamento de solos argilosos por meio de variações de alcalinidade e passagem de corrente elétrica pelo material argiloso, a fim de estudar o problema do *clogging* em escavações mecanizadas subterrâneas via Tuneladoras (*Tunneling Boring Machines - TBMs*) em modo *Earth Pressure Balance* (EPB). Este tema tem sido motivo de muitos estudos, pois, uma vez constatada sua ocorrência, os danos por ela causados envolvem: decréscimo nas taxas de avanço do TBM, acréscimo de manutenções e trocas de ferramentas de corte, além de aumentos significativos no tempo de exposição de operários sob-regime de trabalho hiperbárico. Para tal, foram escolhidas 5 amostras de solos argilosos comumente encontrados na região de São Carlos-SP. Os solos foram submetidos a ensaios de caracterização geotécnica e elétrica bem como determinação de limites de liquidez, plasticidade, granulometria e resistividade elétrica. O material estudado apresentou limites de plasticidade consideráveis. Os valores de pH das amostras variaram entre 5 e 7. As amostras foram saturadas inicialmente com água destilada e então submetidas a ensaios de aderência em superfície metálica (pá misturadora) do agitador mecânico (argamaseira). Em seguida foram adicionadas quantidades de dispersante químico NaOH, para e alterar pH do solo de forma gradual até o valor limite (pH=14). Os resultados apontaram que para tal mudança na alcalinidade do material quantidades entre 1 e 2% em relação a massa de solo seco foram suficientes. Para cada incremento de pH, foi acoplada uma corrente elétrica contínua com propósito de melhorar a desagregação das partículas de argila. A eficiência do condicionamento dos solos através pesagens comparativas entre o solo aderido na superfície metálica saturado apenas com água e o solo condicionado com NaOH mais a adição corrente elétrica apresentaram valores de melhoria na ordem de 95%. As medidas de trabalhabilidade obtidas através do abatimento e cone e densidade do material escavado apresentaram valores satisfatórios em relação aos valores teóricos apresentados por estudiosos no assunto. Espera-se que estas combinações entre agentes químicos e elétricos possam gerar resultados significativos no combate ao efeito de *clogging*, contribuindo então para a solução desse problema vivenciado na prática da execução de túneis.

Palavras-chave: TBM-EPB, clogging, pH, alcalinidade condicionamento de solos, dispersantes químicos, corrente elétrica.

ABSTRACT

GINES, P.H.S. Soil conditioning for underground excavations using TBM-EPB tunnels with influence of chemical and electrical agents. 2019. 141f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

This work presents a proposal of a study on the subject of conditioning of clayey soils by means of variations of alkalinity and passage of electrical currents by the clayey material, in order to study the problem of clogging in underground mechanized excavations via Tunneling Boring Machines (TBMs) in Earth Pressure Balance (EPB) mode. This issue has been the subject of many studies since, once it has been detected, the damage caused by it involves: decrease in TBM rates, increase of maintenance and cutting tool changes, and significant increases in exposure time of workers under a hyperbaric work regime. For this, 5 samples of clayey soils commonly found in the region of São Carlos-SP were chosen. The soils were subjected to geotechnical and electrical characterization tests as well as determination of liquidity, plasticity, grain size and electrical resistivity limits. The material studied presented considerable limits of plasticity. The pH values of the samples ranged from 5 to 7. Samples were initially saturated with distilled water and then subjected to metal surface (mixing blade) tests of the mechanical stirrer (mortar). Subsequently, amounts of chemical dispersant NaOH were added to gradually change the soil pH to the limit value (pH = 14). The results indicated that for such a change in the alkalinity of the material quantities between 1 and 2% in relation to the mass of dry soil were sufficient. For each pH increase, a continuous electric current was coupled with the purpose of improving the disintegration of the clay particles. The efficiency of soil conditioning through comparative weighing between the soil adhered on the metal surface saturated only with water and the soil conditioned with NaOH plus the electric current addition presented improvement values of 95%. The workability measurements obtained through the abatement and cone and density of the excavated material presented satisfactory values in relation to the theoretical values presented by scholars in the subject. It is expected that these combinations between chemical and electrical agents can generate significant results in the fight against the effect of clogging, thus contributing to the solution of this experienced in the practice of tunneling.

Key words: TBM-EPB, clogging, pH, alkalinity, conditioning of soils, chemical dispersant, electrical current

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Material
AM-01	Amostra estudada 01
AM-02	Amostra estudada 02
AM-03	Amostra estudada 03
AM-04	Amostra estudada 04
AM-05	Amostra estudada 05
Clogging:	Efeito de entupimento da roda de corte durante escavação
Closed Shield	Tuneladoras de escudo fechado
CC:	Corrente Contínua
C.E	Corrente Elétrica
DC	Corrente Alternada
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodovias
EPB:	Earth Pressure Balance - Pressão de balanço de terra
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EESC:	Escola de Engenharia de São Carlos
IFSC:	Instituto de Física de São Carlos
M.E.V:	Varredura de Microscopia Eletrônica
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
pH:	Potencial hidrogênico
Slurry Shield	Tuneladoras que promovem escavação por meio de lamas bentoníticas
TBM:	Tunneling Boring Machine - Máquina de escavar túneis
TBM-EPB	Máquina Tuneladora Operando em modo de balanço de pressões de frente através do solo escavado

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Constante de Hamaker
$A_{escav.}$	Área da seção transversal de escavação
a, b, c	Comprimento de célula unitária na direção desejada de análise
e	Índice de vazios
d	Distância basal entre as partículas
dh, k, l	Distância interplanar entre arestas dos cristais
FER	Razão de expansão de espuma
FIR	Razão de Injeção de Espuma
F_d	Energia livre da dupla camada por unidade de área
F_{∞}	Energia livre da iteração da dupla camada
G_{tot}	Massa de solo total do recipiente
G_{mix}	Massa de solo presa a palheta misturadora
h	Umidade natural do Solo
IP	Índice de Plasticidade
IC	Índice de Consistência
k	Constante da camada difusa
LC	Límite de Contração
LL	Límite de Liquidez
LP	Límite de Plasticidade
L	Comprimento
Q_f	Fluxo de espuma
p	Pressão osmótica
R_m	Resistência elétrica medida
R	Resistência Elétrica

S	Seção transversal
T	Temperatura absoluta em grau Kelvin;
$V_{anvan.}$	Velocidade de avanço
V_a	Energia de atração
V_f	Volume de espuma gerado
V_l	Volume de surfactante (liquido base) utilizado
V_r	Energia de repulsão
W	Umidade medida nas amostras de solo
δ	Espessura média das placas de argila
ξ	Potencial Zeta
$\gamma, \beta e \alpha$	Ângulos da estrutura cristalina com as demais faces dos cristais formadores
λ	Indicador de adesão dos solos
λ_l	Comprimento de onda
u	É uma função do potencial dielétrico da partícula
η_l	Ordem de difração
n_o	Concentração da solução
ρ	Resistividade Elétrica
ρ^{2e}	Resistividade média entre 2 eletrodos
σ_T	Condutividade elétrica total do material
σ_s	Condutividade elétrica da superfície das partículas
σ_w	Condutividade elétrica da água
$\Theta_{h,k,l}$	Semiângulo de difração
Ψ_0	Potencial elétrico
Ψ_δ	Potencial de Stern

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gravura do Túnel sob o Rio Tamisa construído por Marc Brunel em 1843 (Moreira, 2005).	34
Figura 2 - Escudo usado na construção do Túnel do Rio St Clair (Rocha, 1976).....	35
Figura 3 - Esquema de ar comprimido utilizado em 1880 (Burr, 1885)	36
Figura 4 - (a) TBM - EPB lançado em 1974, Japão - (b) TBM. (EPB fabricado em 1986, Alemanha).....	36
Figura 5 - Esquema de TBM Earth Pressure Balance (EPB) (Maidl <i>et al.</i> , 2012).....	38
Figura 6 - Estabilização de frente de escavação pela aplicação de pressão de frente (EPB) (Adaptado de Guglielmetti et al., 2008).	42
Figura 7 - Ilustração da dissipação de pressões pelo parafuso sem fim (Adaptado de Maidl, 1995).	44
Figura 8 - Distribuição granulométrica de solo e domínio típico para tuneladoras de escudo fechado (Budach and Thewes, 2013).....	45
Figura 9 - Avaliação do potencial de adesão (Adaptado de Hollmann e Thewes, 2012).....	48
Figura 10 - Á esquerda, scraper totalmente entupidos por efeito de clogging (adaptado de Comulada et al., 2016), á direita, disco de corte (diâmetro aproximado 17") sob efeito de clogging (adaptado de Shirlaw, 2015).....	49

Figura 11 - (Esquerda) Efeito clogging em TBM (Martinotto, 2010), (Direita) Efeito clogging Solos Saturados (Langmaack, 2009).....	49
Figura 12 - Relação entre o índice de plasticidade e a umidade da amostra (adaptado de Ball et al., 2009)	50
Figura 13 - Comparação entre as escalas principais de partículas sólidas (adaptado de Pinto, 2006)	54
Figura 14: Representação esquemática de argila tipo 1:1 Caulinita (adaptado de Baile, 2014).	57
Figura 15 - Estrutura esquemática de argila 2:1 (Modificado de Baile, 2014)	57
Figura 16 - Fotografia de microscópio eletrônico de variadas partículas e morfologias: (modificado de Krekeler, 2004).....	59
Figura 17 - Difração de raios - X por meio do reticulado cristalino - lei de Bragg, (Adaptado de Santos, 1989).....	62
Figura 18: Padrão da caulinita natural, solvatado em etilenoglicol e aquecida a 400 e 550°C (Scarpin, 2003).....	63
Figura 19 - Partículas coloidais esféricas estabilizadas eletrostaticamente (Reed, 1995).....	66
Figura 20 - Tipo de interações entre partículas de argila para diferentes pH da suspensão (Pozzi & Galassi, 1994).....	67
Figura 21 - Energias de repulsão, atração, e curvas de rede de interação das placas paralelas de argilas (Adaptado de Mitchell, 1994).....	69

Figura 22 - Elementos e caminhos para corrente elétrica, (a) - caminhos de corrente de fluxo, (b) - circuito elétrico equivalente (adaptado de Mitchell (1994)).....	72
Figura 23 - Efeito da umidade, temperatura e sais dissolvidos na água na resistividade dos solos (Adaptado de IEEE, 2000).	74
Figura 24 - (a) Foto do equipamento (b) medidas principais do cone, dimensões (mm), (Peila et al., 2009).	77
Figura 25 - Estudos de Slump test em solos arenosos, com vistas no melhoramento do condicionamento de solos para escavações mecanizadas via TBM-EPB (Peila et al., 2009).....	78
Figura 26 Estudo de condicionamento de solos para escavação EPB (Ball <i>et. al.</i> , 2009).....	79
Figura 27 – Diagrama de Bloco das Atividades Experimentais.....	81
Figura 28 - Execução do Limite de Liquidez das amostras.	83
Figura 29 - Preparação de amostras para ensaio de dosagem de NaOH.	84
Figura 30 - Equipamentos para difração e para espectrografia de raios X, (a) câmara de difração de raios X, (b) difratógrafo de raios X, (c) espectrógrafo de raios X (adaptado de Santos (1989))......	86
Figura 31 - Percurso dos raios X e correspondências entre filme fotográfico e gráfico de resultados (adaptado de Santos, 1989)	86
Figura 32 - Esquema de realização de medidas de resistência elétrica para cálculo da resistividade dos solos.....	87

Figura 33 - (a) Fotografia do misturador de palheta; (b) processo de mistura; (c) processo de pesagem do solo aderido (adaptado de Zumsteg & Puzrin, 2012).	89
Figura 34 - Pá misturadora da argamasseira.	89
Figura 35 - Esquema de aplicação de corrente ao solo aderido na pá misturadora.	90
Figura 36 - Locais de extração das amostras : (a) Amostra de solos 01, (b) amostra de solo 02, (c) amostra de solo 03, (d) amostra de solo 04 e (e) amostra de solo 05.	92
Figura 37 - Amostras de solos utilizadas (1) amostra 01, (2) amostra 02, (3) amostras 02, (4) amostra 04 e (5) amostra 05.	92
Figura 38 - Execução do ensaio de Limite de Plasticidade das amostras.	93
Figura 39 - Verificação de potencial e intensidade de clogging das amostras ensaiadas, (adaptado de Holman & Thewes, 2012)	94
Figura 40 - Granulometria dos solos estudados (adaptado Budach & Thewes, 2013).	95
Figura 41 - Pastilhas confeccionadas com solos estudados: (a) AM-01, (b) AM-02, (c) AM-03, (d) AM-04 e (e) AM-05.	96
Figura 42 - Amostra AM-01, ao lado esquerdo (a) é possível visualizar os resultados obtidos por difração de raio - X, lado direito (b) Imagem de microscopia eletrônica.	99
Figura 43 - Amostra AM-02: (c) difração de raio – X; lado direito (d) Imagem de M.E.V.	99
Figura 44 - Amostra AM-03: ao lado esquerdo (e) difração de raio – X; lado direito (f) Imagem de M.E.V.	100

Figura 45 - Amostra AM-04: ao lado esquerdo (g) difração de raio-X; do direito (h) Imagem M.E.V.....	100
Figura 46 - Amostra AM-05, ao lado esquerdo (i) difração de raio – X; lado direito (j) Imagem de M.E.V.....	101
Figura 47 - Amostra AM-01, a esquerda variação de <i>pH</i> em relação a massa de <i>NaOH</i> adicionada; e a direita da figura pressão osmótica gerada em relação a variação o <i>pH</i>	101
Figura 48 - Amostra AM-02, à esquerda: variação de <i>pH</i> em relação a massa de <i>NaOH</i> adicionada, e á direita: pressão osmótica gerada em relação a variação do <i>pH</i>	102
Figura 49- Amostra AM-03, à esquerda variação de <i>pH</i> em relação a massa de <i>NaOH</i> adicionada; e à direita da figura pressão osmótica gerada em relação a variação o <i>pH</i>	103
Figura 50 - Amostra AM-04, à esquerda variação de <i>pH</i> em relação a massa de <i>NaOH</i> adicionada; e à direita da figura pressão osmótica gerada em relação a variação do <i>pH</i>	103
Figura 51 - Amostra AM-05, à esquerda alterabilidade de <i>pH</i> em relação a massa de <i>NaOH</i> adicionada, e à direita da figura pressão osmótica gerada em relação a alterabilidade o <i>pH</i>	104
Figura 52 - AM-01: à esquerda condutividade elétrica; à direita resistência elétrica dos solos e suas respectivas resistividades elétricas.	105
Figura 53 - AM-02:à esquerda condutividade elétrica; à direita resistência elétrica dos solos e suas respectivas resistividades elétricas.	106

Figura 54 - AM 03: à esquerda condutividade elétrica, à direita resistência elétrica dos solos e suas respectivas resistividades elétricas.	106
Figura 55 - AM 04, á esquerda condutividade elétrica, á direita resistência elétrica dos solos e suas respectivas resistividades elétricas.	107
Figura 56 - AM 05: à esquerda condutividade elétrica; à direita resistência elétrica dos solos e suas respectivas resistividades elétricas.	108
Figura 57 - AM-01 ensaio adesividade em superfície metálica.	111
Figura 58 - AM 01 - comparativo de eficiência (a) antes da passagem da corrente elétrica, 1% <i>NaOH</i> (b) após aplicação de corrente contínua de 30V, 4A na condição 1% <i>NaOH</i> +CC.	111
Figura 59 - AM-02 ensaio adesividade em superfície metálica.	112
Figura 60 - AM 02 - comparativo de eficiência (c) antes da passagem da corrente elétrica, 2% <i>NaOH</i> (d) após aplicação de corrente contínua de 30V, 4A na condição 2% <i>NaOH</i> +CC.	112
Figura 61 - AM-03 ensaio adesividade em superfície metálica.	113
Figura 62 - AM 03 comparativo de eficiência (e) antes da passagem da corrente elétrica, 2% <i>NaOH</i> (f) após aplicação de corrente contínua de 30V, 4A na condição 2% <i>NaOH</i> +CC, umidade de 65%.	113
Figura 63 - AM-04 adesividade em superfície metálica.	114

Figura 64 - AM 04 comparativo de eficiência (g) antes da passagem da corrente elétrica, 1% <i>NaOH</i>	
(h) após aplicação de corrente contínua de 30V, 4A na condição 1% <i>NaOH</i> +CC, umidade de 55%.	
.....	114
Figura 65 AM -05 adesividade em superfície metálica.....	115
Figura 66 - AM 05 comparativo de eficiência (i) antes da passagem da corrente elétrica, 1% <i>NaOH</i>	
(j) após aplicação de corrente contínua de 30V, 4A na condição 1% <i>NaOH</i> +CC, umidade de	
72,5%.	115
Figura 67 - Vista da superfície da massa de solo imediatamente após a passagem da corrente	
elétrica.....	116
Figura 68 - Cálculo de áreas esquemáticas de roda de corte TBM-EPB (modificado de Lopes,	
2013).	119
Figura 69 - AM 01, a esquerda resultados de ensaio de abatimento de cone, a direita resultada de	
ensaio de densidade aparente.....	121
Figura 70 - Amostra AM-01 resultados de abatimento de cone com umidade de 85% e	
concentração de <i>NaOH</i> de 2%.	122
Figura 71 - AM 02, a esquerda resultados de ensaio de abatimento de cone, a direita resultada de	
ensaio de densidade aparente.....	122
Figura 72 - AM 03, a esquerda resultados de ensaio de abatimento de cone, a direita resultada de	
ensaio de densidade aparente.....	123

Figura 73 AM-03 abatimento de cone de 16,5cm umidade de 75% e concentração de 1% de <i>NaOH</i>	124
Figura 74 - AM 04, a esquerda resultados de ensaio de abatimento de cone, a direita resultada de ensaio de densidade aparente.....	125
Figura 75 - AM 05, a esquerda resultados de ensaio de abatimento de cone, a direita resultada de ensaio de densidade aparente.....	126
Figura 76 - AM-01, (a) imagem MEV antes do condicionamento do solo com <i>NaOH</i> , (b) imagem MEV após o condicionamento do solo com <i>NaOH</i> e passagem da corrente elétrica.	127
Figura 77 - AM-02, (c) imagem MEV antes do condicionamento do solo com <i>NaOH</i> , (d) imagem MEV após o condicionamento do solo com <i>NaOH</i> e passagem da corrente elétrica.	128
Figura 78 - AM-03, (e) imagem MEV antes do condicionamento do solo com <i>NaOH</i> , (f) imagem MEV após o condicionamento do solo com <i>NaOH</i> e passagem da corrente elétrica.	128
Figura 79 - AM-04, (g) imagem MEV antes do condicionamento do solo com <i>NaOH</i> , (h) imagem MEV após o condicionamento do solo com <i>NaOH</i>	129
Figura 80 - AM-05, (i) imagem MEV antes do condicionamento do solo com <i>NaOH</i> , (j) imagem MEV após o condicionamento do solo com <i>NaOH</i>	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Considerações normativas para trabalhos Hiperbárico, NR 15.....	40
Tabela 2 - Classificação de consistência das Argilas (Nogueira,1995).....	55
Tabela 3 - Distinção entre argila e argilomineral, (Bergaya & Lagaly, 2006)	58
Tabela 4 - Sumário de argilominerais e Características, (modificado de Mitchell 3ª Edição 1996);60	
Tabela 5 - Dados cristalográficos dos argilominerais - Fonte: Modificado de Santos (1989)	64
Tabela 6 - Constante de Hamaker, (modificado de Casimir &Polder, 1948).....	69
Tabela 7 - Resistividade dos terrenos de acordo com a sua natureza - Fonte: Modificado de Flores (2014)	73
Tabela 8 - Classificação de acidez do solo, Lopes (1989)	84
Tabela 9 - Limites de Atterberg das amostras ensaiadas - Fonte: Autor.....	94
Tabela 10 - Massa Específica dos Solos em Estudo	96
Tabela 11 - Limite de contração das Amostras.	97
Tabela 12 - Identificação dos argilominerais dos solos estudados.....	98
Tabela 13 - Intensidade do potencial de adesividade de solos (Zumsteg & Puzrin, 2012).	110
Tabela 14 - Umidade natural das Amostras na coleta	110
Tabela 15 - Estimativa de tensão elétrica para promover limpeza de superfícies metálicas da pá misturadora.....	118
Tabela 16 - Tensão em CC para TBM-EPB com diâmetro de 10m, situação hipotética.	119
Tabela 17 - Comparativo entre agentes químicos e solução proposta.....	133

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	33
1.1 - Escavações Subterrâneas	33
1.2 - Escavação Mecanizada de Túnel	37
2. JUSTIFICATIVAS.....	39
3. OBJETIVOS	40
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	42
4.1.1 - Escavações em modo TBM-EPB e suas características.....	42
4.1.2 - O Clogging.....	48
4.2 - Argilas.....	53
4.2.1 - Tipos de Argilas e Argilominerais	55
4.2.2 - Identificação dos Argilominerais	61
4.2.2.1 - Identificação dos argilominerais por Difração de Raios X	61
4.3 - Sistemas de Eletrólise Argila-Água	65
4.4 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS SOLOS.....	70
4.4.1 - Fatores que Influenciam a Resistividade dos Solos	73
4.4.2 - Métodos de Quantificação da Resistividade	74
4.5 - Dispersantes Químicos de Argilas (<i>NaOH</i>).....	75
4.6 - Importâncias dos indicadores de condicionamento no <i>EPB</i>	77
4.6.1 - Testes de Abatimentos de Cone (<i>Slump Test</i>).....	77
4.6.2 - DENSIDADE DO MATERIAL CONDICIONADO	78
5. Materiais e Métodos	80
5.1. Caracterização do Solo.....	81
5.1.1 - Coleta de Amostras de Solo.....	82
5.1.2 - Caracterização geotécnica dos solos	82
5.2.2- Identificação de Argilominerais (Difratometria por Raio – X e M.E.V).....	85
5.3. – Condicionamento para TBM-EPB	87

5.3.2 - Testes de Verificação de Parâmetros Operacionais (<i>Slump Test</i> e <i>Densidade Aparente do Material</i>)	90
5.4. – M.E.V antes e após o condicionamento de Solos.....	90
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	91
6.1. Caracterização do Solo.....	91
6.1.1. Coletas de Amostras.....	91
6.1.2. Caracterizações Geotécnicas	93
6.1.2.1 Limites de Liquidez e Plasticidade.....	93
6.1.2.2 Distribuição Granulométrica	94
6.1.3.3 Limites de Contração e Massa Específica dos grãos.....	95
6.2. Avaliação de parâmetros Químicos, Físicos e Elétricos que influenciam diretamente no condicionamento do solo para TBM-EPB.....	97
6.2.1. Identificações dos Argilominerais e MEV Antes do Condicionamento do Material	97
6.2.2. Variação da Alcalinidade e pressão osmótica do Solo com adição de diferentes concentrações de NaOH.....	101
6.2.3. Variação da Condutividade Elétrica e resistividade dos Solos em função da adição de NaOH	104
6.3. Condicionamento para TBM-EPB	108
6.3.2. Aderências de Solos à Superfícies Metálicas e Dispersão do Clogging em função da adição de diferentes % de NaOH e Corrente Elétrica	109
6.3.3. Teste de Escavabilidade (<i>Slump Test</i> e <i>Densidade Aparente dos Solos</i>).....	120
6.4. Análise Comparativa de imagens de Microscopia Antes e Após o Condicionamento de Solos	127
7. Considerações Finais.....	131
8. Sugestões de Novos Trabalhos.....	133
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135

1. INTRODUÇÃO

1.1 - Escavações Subterrâneas

Não há dúvidas que a arte das escavações subterrâneas se associa à história da humanidade há muitos milênios. Arqueólogos afirmam que o *Homo-Faber* já detinha consigo conhecimentos de dureza dos materiais rochosos, e seus planos de fraqueza. E assim, os utilizavam nas confecções de seus utensílios primitivos usados na caça dentre outras atividades rotineiras. De certa forma, esta necessidade além de ajudar o homem a desenvolver suas primeiras ferramentas, também lhe abriu as portas das técnicas das escavações de um modo geral.

Registros históricos apontam que ainda na antiguidade remota, já havia a percepção do homem em relação à estabilidade das cavidades subterrâneas. Exemplos disso podem ser observados nas cavernas francesas de Font de Gaume, Lascaux, e na caverna chinesa de Zhoukoudian. Datações de carbono indicam que estas cavernas foram utilizadas pelo homem há mais de 200 mil anos. Podemos então observar, que as escavações subterrâneas, além de fazerem parte da história da humanidade, estiveram lado a lado com a evolução do homem. Estes registros atravessam várias eras e suas motivações são diversas. Dentre elas, podemos citar: motivações religiosas e culturais, como é o caso das tumbas e sarcófagos encontrados no oriente médio; abrigo de intempéries naturais entre outros. Além destas, atividades como mineração, transporte de águas, drenagens entre outros motivos que exigiram o desenvolvimento das escavações subterrâneas.

Há uma evolução constante do homem em suas técnicas de escavações subterrâneas. Em registros arqueológicos, é possível observar feitos da engenharia como: o sistema de abastecimento de água da cidade de *Samos* (Grécia), construído no século VI, A.C. a leste do mar Egeu e que compreendia um túnel com cerca de 1000m. Outro exemplo documentado do uso desta arte, é a obra Romana de *Cloaca Máxima*, que integra um monumental sistema de esgoto urbano na *Roma Antiga*. Este sistema era composto por túneis de seção ferradura que chegavam a medidas de 3,2m de largura por 4,2m de altura. Este foi um verdadeiro marco na Engenharia Romana. Na antiguidade, as escavações subterrâneas eram realizadas de forma árdua e muito lenta, os operários avançavam nas escavações esculpindo o maciço utilizando ferramentas manuais, de forma lenta e muito cansativa.

Um segundo motivador para o aprimoramento das escavações subterrâneas, foi sem dúvida, o uso de explosivos. Em 1679, utilizou-se a pólvora pela primeira vez como material principal nas escavações subterrâneas. Esta nova técnica, foi utilizada primeiramente em um túnel ao sul da França. Os 157m de comprimento atingidos pela nova tecnologia de escavação integraram a construção de um importante canal para os franceses, mais especificamente nos referimos ao "*Canal du Midi*", ligando o mar Mediterrâneo e o oceano Atlântico. Em 1867, a construção do Túnel de *Hoosac* no estado

de Massachusetts nos Estados Unidos, foi marcada pela descoberta de um explosivo mais seguro que a pólvora, a nitroglicerina.

Caminhando pouco mais na evolução das escavações subterrâneas, o primeiro a utilizar um sistema de proteção "blindagem ou couraça" na arte das escavações subterrâneas foi o Engenheiro Marc Brunel, entre os anos de 1825 a 1843. Brunel idealizou um escudo que atuava como suporte das paredes do túnel, e em diversas vezes também era utilizado como suporte da frente de escavação. Com este sistema de construção, foi possível concluir o primeiro túnel subfluvial sob o rio Tamisa na cidade de Londres (Figura 1). O feito realizado por Brunel impulsionou consideravelmente os avanços tecnológicos no horizonte das escavações subterrâneas. Esta tecnologia é tida como carro chefe no desenvolvimento de grandes máquinas tuneladoras.

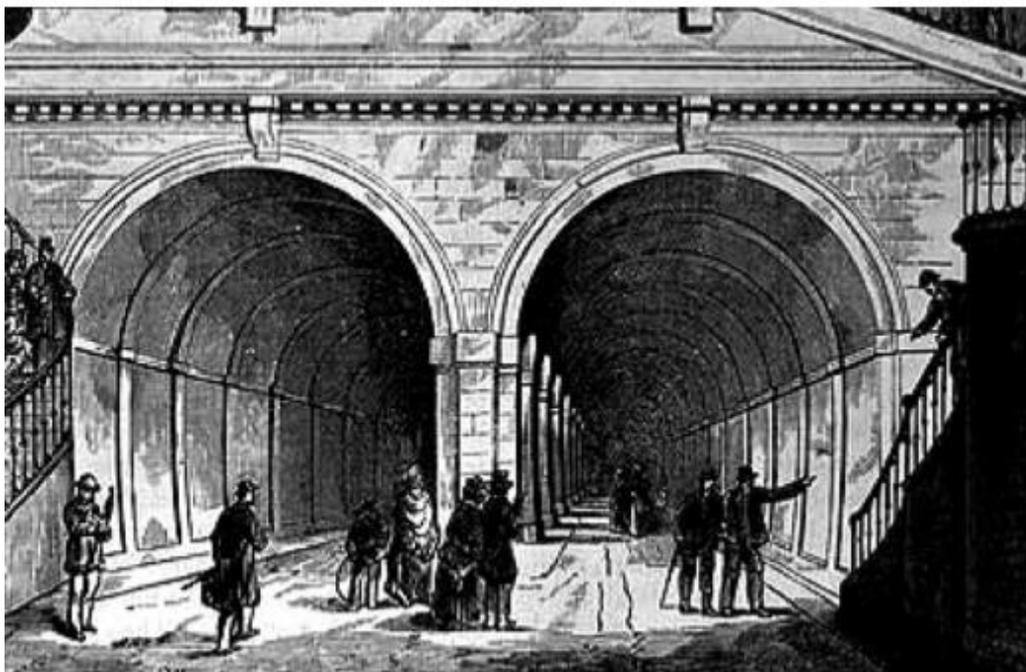


Figura 1 - Gravura do Túnel sob o Rio Tamisa construído por Marc Brunel em 1843 (Moreira, 2005).

Além do escudo idealizado por Brunel, outro marco das escavações de túneis com uso de escudo, é a construção do túnel do rio St Clair, entre os Estados Unidos da América e Canadá no final do século XIX, em 1896. Outro fato histórico desta obra, é o início das industrializações dos revestimentos que eram fabricados em ambiente externo, e então, transportados e montados no interior do túnel. O conceito de escavações industrializadas também denominado como propulsor, e que mais tarde evoluiria para o conceito das tuneladoras modernas. Na Figura 2, podemos observar a gravura que reflete o sistema de escavação e construção adotado.

Outra técnica admirável empregada na construção subterrânea, e que mais tarde seria incorporada as modernas tuneladoras, foi o uso de ar-comprimido. Um dos primeiros registros da utilização de ar-comprimido na construção subterrânea foi em 1880, na construção da travessia sob o rio Hudson em Nova York (Figura 3).

Desde então inúmeras técnicas de escavações subterrâneas vêm sendo desenvolvidas, em especial destaca-se a mecanização total do sistema. Nomes importantes como o do americano, Charles Wilson, são pioneiros na industrialização das escavações tuneleiras. Wilson em 1853 foi o primeiro detentor de uma patente de tuneladora, seu invento já dispunha de instalações e princípios modernos de um Tunnelling Boring Machine (TBM), como roda de corte, sistema de autopropulsão, sistemas de transporte de materiais entre a frente de escavação e o interior do túnel entre outros. Na ocasião o equipamento foi desenvolvido para escavar rocha.

Entretanto, foi na metade do século XX, que os TBMs foram grandemente impulsionados. Em 1964, temos o marco das tuneladoras modernas. Nesta época, o que se imaginava na concepção de tuneladora eram modelos específicos de escavações para cada tipo de solo. Como marco desta década, podemos citar os primeiros embriões para escavações mecanizadas em solos moles, solos argilosos mesclados com pedregulhos entre outros. Foi nesta época também, que os primeiros estudos dos modos de escavações utilizando solo como meio de propagação das pressões para o maciço foram realizados, e que atualmente são conhecidos como "*Earth Pressure Balance*" (EPB) e "*Slurry Shields*".

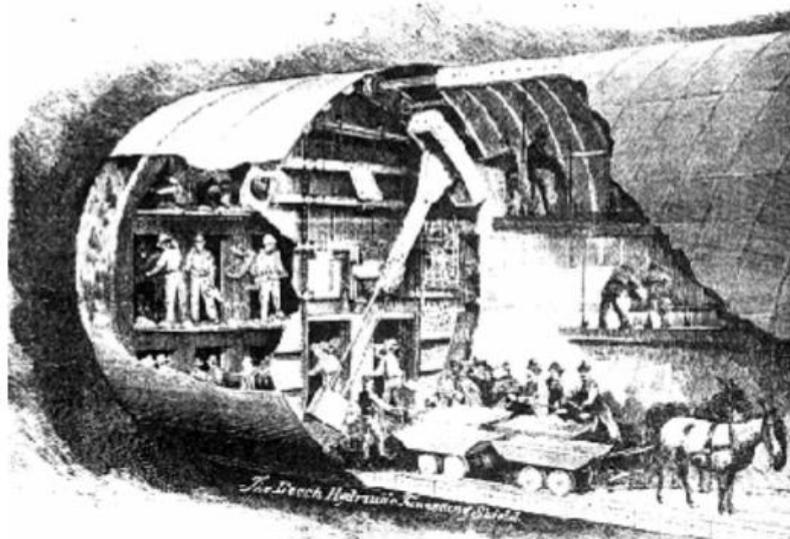


Figura 2 - Escudo usado na construção do Túnel do Rio St Clair (Rocha, 1976).

Apesar de encontrarmos registros em 1880 do uso da técnica de pressurização em ambientes com ar-comprimido, as primeiras tuneladoras da metade do século XX, ainda não tinham sido adaptadas para tal. A utilização do ar-comprimido no modo de escavação EPB foi um grande passo para a evolução dessa técnica, pois a ideia de utilização do próprio solo escavado como suporte, já havia sido cogitada. Porém, o que limitava a aplicação deste modo de escavação era justamente como criar maneiras de se realizar as manutenções no equipamento, uma vez que o próprio material escavado é quem garantia a estabilidade da frente de escavação.

Então em 1974 os japoneses tiveram a genial ideia de criação de uma câmara blindada onde poderiam ser desenvolvidas pressões de estabilização da frente de escavação, tanto por ar-comprimado quanto pelo solo escavado. Este novo dispositivo utiliza o ar-comprimado como suporte quando o solo precisa ser retirado da frente de escavação. Esta tecnologia lançada pela empresa japonesa IHI, além de apresentar os conceitos do EPB, excluiu a ideia de pressurizar todo o ambiente do túnel. Mais tarde entre 1977 e 1986, a Japonesa Kawasaki, lançou no mercado uma segunda família de equipamentos com os mesmos recursos.

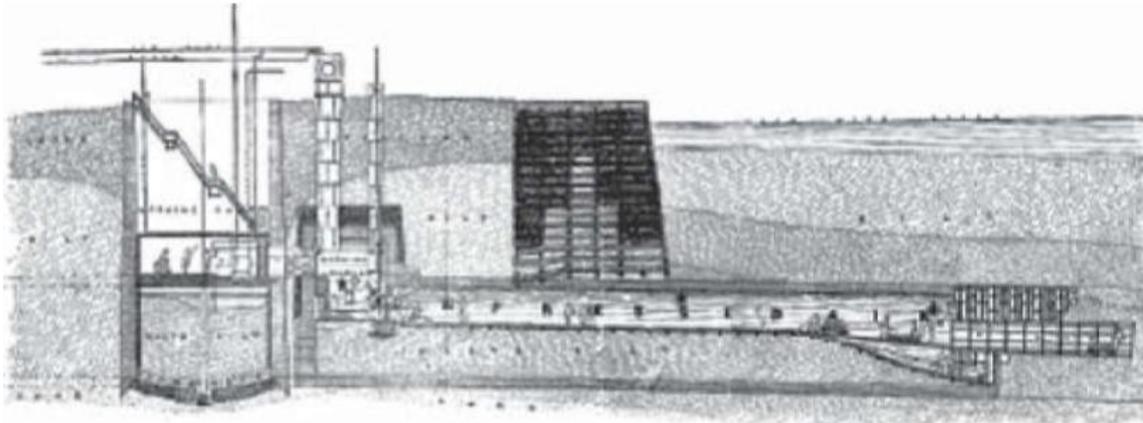


Figura 3 - Esquema de ar comprimido utilizado em 1880 (Burr, 1885)

Em 1986, a Alemanha lançou seu primeiro modelo TBM - EPB. Desde então esta técnica tem cruzado fronteiras, e se difundido entre fabricantes Japoneses, Alemães, Americanos, Chineses entre outros. O modelo de escavação EPB, é empregado quase que na totalidade dos túneis urbanos em maciços de solos.



Figura 4 - (a) TBM - EPB lançado em 1974, Japão - (b) TBM. (EPB fabricado em 1986, Alemanha)

Atualmente, o estado da arte se depara com as enormes tuneladoras, que são projetadas especificamente para cada empreendimento, e de acordo com as características geológicas e geotécnicas de cada local. A técnica de escavação em modo EPB, adquiriu avanço tecnológico memorável, e atualmente é possível empregá-la em túneis que vão

desde diâmetros entre 1,0m até grandes escavações. O recorde obtido pelos TBMs-EPB tem diâmetro de 19,0 m e seção transversal de 283m².

1.2 - Escavação Mecanizada de Túnel

A indústria das escavações mecanizadas tem se desenvolvido de forma bastante notável nos últimos 20 anos, pois é uma realidade que os avanços em mobilidade urbana e qualidade de vida nos grandes centros em acessibilidade e transporte eficiente. A exploração do espaço subterrâneo, em especial a construção de túneis vem de encontro com esta necessidade. Os túneis urbanos, além de estancar esta necessidade podem ser usados em diferentes casos, sejam eles em ampliações de malhas ferroviárias de metrô, túneis auxiliares no escoamento de veículos entre outros. As obras de túneis, especialmente nas malhas subterrâneas metroviárias dos grandes centros, vêm ilustrando esta nova direção de mercado. Podemos citar o caso de Cingapura, onde o plano diretor indicava em 2014 a operação simultânea de mais 40 TBMs, entre os anos de 2014 e 2019, (Peila, 2014).

É possível perceber em todo o mundo, que o processo de avanço nos grandes centros esbarra na exploração do espaço subterrâneo e concentra grandes investimentos nesta área. Exemplos dessas ações podem ser observados no metrô de Doha no Qatar, onde projeto prevê mais de 111 km de Túneis e o uso de 21 tuneladoras (total entre tuneladoras de grande diâmetro e microtuneladoras). Outro projeto importante e de grande dimensão, é a construção da linha 3 do metrô de Mumbai. Este projeto contempla escavações de 33,5 km de túneis que serão executados por 7 TBMs. Já outro investimento indiano que merece destaque, é a construção de mais de 80 km de túneis em Delhi. Estas obras terão usos diversos, entre elas expansão da fase III do metrô, corredores viários, transportes de esgoto entre outros. A previsão é que na cidade de Delhi, seja utilizado um total de 30 TBM's diferentes a partir de 2018. Este número engloba as grandes tuneladoras e as microtuneladoras. Outro notável investimento na exploração do espaço subterrâneo é o agressivo programa de ampliação do metrô de Istambul na Turquia. Neste investimento está prevista a operação simultânea de mais de 20 TBMs no ano de 2018 (TunnelTalk, 2018).

No Brasil a primeira Tuneladora de 6m de diâmetro foi usada entre as décadas de 60 e 70 nas escavações da Linha 1 do metrô de São Paulo. Em 2009, a Petrobrás utilizou a primeira Tuneladora para escavação em rocha do Brasil. Este equipamento foi utilizado nas obras do túnel GASTAU, que é responsável por transportar gás natural do litoral ao vale do Paraíba. Em 2005 nas obras da linha 4 do metrô de São Paulo foi utilizada uma Tuneladora de 9,46 m de diâmetro para as escavações dos túneis de via dupla. Em 2012 nas obras da Linha 5 lilás do metrô de São Paulo, foram utilizados mais 3 TBMs. Em 2014, mais um TBM foi utilizado no país, pois se iniciava as escavações da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro, (Aguiar, 2017). Atualmente, além dos TBMs citados anteriormente, existem mais 4 máquinas em espera na prefeitura de Fortaleza, aguardando o início das

obras da Linha 4 - Leste. Em São Paulo, além dos equipamentos citados anteriormente, há mais 2 TBMs aguardando a retomada das atividades da Linha 6 (Metrô-SP, 2018). Em resumo, neste momento não há no Brasil nenhuma máquina em operação.

Para melhor entendimento do processo de escavação mecanizada por TBM-EPB, faz-se necessário observar a Figura 5. Em (2) podemos observar a câmara de escavação, que é um compartimento completamente isolado do túnel já construído. É neste local onde são desenvolvidas as pressões de estabilização da frente de escavação. Em (3) temos a válvula que controla/informa o nível das pressões da câmara ao operador, em casos extremos pode ser aberta para aliviar as pressões de frente. Normalmente durante as escavações, ela pode estar totalmente aberta ou parcialmente fechada, pois sua função é manter as pressões inalteradas. A roda de corte é representada (1), onde podemos observar as aberturas e as ferramentas que realizam a escavação. O parafuso sem fim pode ser observado em (5), sendo este diretamente ligado à câmara de escavação e tem a função de dissipar pressões entre a câmara e o túnel. Este último é também o responsável por remover o material da câmara de escavação que é descarregado em (6), denominado como transportador de correia. O transportador é o responsável por enviar o material escavado até ponto de descarte. O sistema de propulsão é realizado por cilindros hidráulicos e pode ser visto em (4), tendo este como base de apoio os segmentos que revestem o túnel, que podem ser visualizados em (7) (quase que na totalidade são peças de concreto armado).

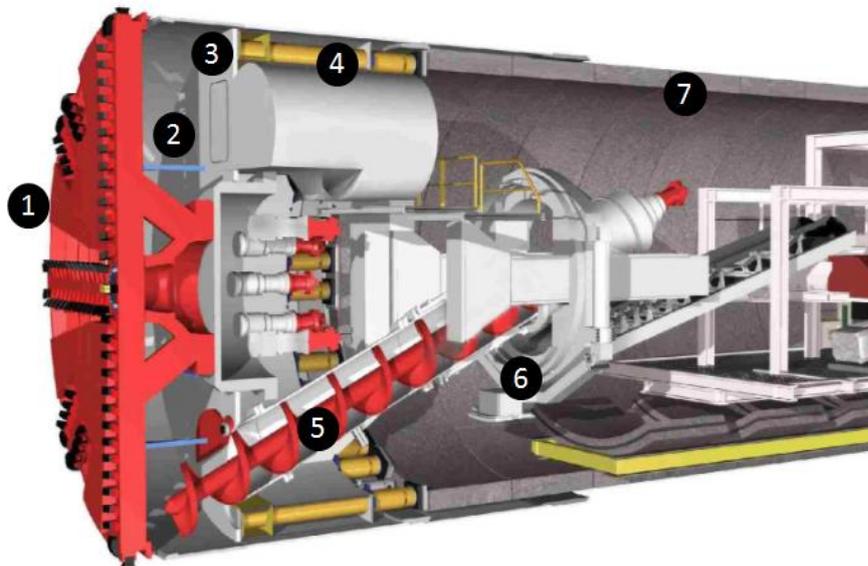


Figura 5 - Esquema de TBM Earth Pressure Balance (EPB) (Maidl *et al.*,2012)

2. JUSTIFICATIVAS

Um dos grandes problemas enfrentados hoje pela escavação realizada por TBM em solos finos, é o efeito clogging. Basicamente este problema é traduzido como um tamponamento de toda a roda de corte do TBM devido à plasticidade dos solos finos. Uma vez tapada a roda de corte, o equipamento fica impedido de seguir suas atividades e, problemas como prazo de entrega e custo das obras, são gravemente prejudicados. Uma das maneiras de se evitar esse problema é utilização de aditivos poliméricos, como espumas de alto desempenho e água, que são misturados ao solo na câmara de escavação. A este processo de mistura, se dá o nome de condicionamento de solos. Nem sempre essa tecnologia é eficaz, por exemplo, no caso de solos extremamente finos. Neste caso é necessário o desenvolvimento de métodos eficientes para solucionar este problema tão comum nas escavações mecanizadas em solo. Quase sempre, este fenômeno está associado com escavações realizadas em solos com percentagem significativa de finos (< 0.002 mm). Este tipo de material pode ser encontrado nos mais diversos tipos de litologias conhecidas. Entre elas podemos citar: solos transportados, residuais jovens ou maduros, ou até mesmo nas misturas de solos e pedregulhos, Peila (2012).

O agente condicionante mais comum nas escavações subterrâneas são as espumas. No caso das espumas, é possível modificá-las das mais variadas formas para que um bom desempenho na mistura possa ser alcançado. Nos dias atuais, para enfrentar esse problema alguns construtores têm usado a técnica de injeções de espumas poliméricas combinadas com altas quantidades de água para minimizar o efeito clogging. Esta técnica ajuda no enfraquecimento da adesão entre a argila, roda de corte e as ferramentas de escavação. Tal técnica de condicionamento deve ser usada de forma bastante cuidadosa, pois, quantidades de água em volumes elevados contribuem para a formação de material extremamente pobre no interior da câmara de escavação. Quando nos referimos a certa desqualificação do material, temos em mente densidade aparente e trabalhabilidade, que é fundamental para as dissipações de pressões, extração de materiais e controle de pressão de frente de escavação.

Para Maidl (2012) e Thewes (2011), o uso excessivo de água pode dificultar o controle de pressões de frente de escavação, além de, prejudicar a formação do material pastoso, que é extremamente necessária na extração do material da câmara de escavação de um TBM. Os prejuízos do uso da técnica aqui descrita podem ser traduzidos em recalques excessivos na superfície, risco de instabilidade de frente, entre outros.

Certo de que esta solução não ataca o real do problema em questão, entendemos que a aderência do solo às superfícies metálicas ainda segue sendo amenizada durante a execução da obra por tentativas de incrementos de água à massa de solo escavado. Desta forma, entendemos que este trabalho pode contribuir com a construção do conhecimento na área de condicionamento de solos finos com teores significativos de argilas/siltos. Outro ponto que também deve ser considerado, é que estes tipos de solos podem ser encontrados em diversos locais do mundo.

Em termos de alcance nacional, certamente materiais com as características citadas anteriormente serão encontrados em futuras escavações e expansões do espaço subterrâneo brasileiro. Desta forma, mesmo que não tão acelerada como se pode observar em países desenvolvidos, o Brasil teve um número significativo de obras nesse setor e algumas que ainda serão executadas, o que justifica então este trabalho, pois se pretende criar uma nova tecnologia para o melhoramento das escavações subterrâneas mecanizadas.

3. OBJETIVOS

As pesquisas aqui realizadas estão embasadas com foco principal em condicionamento de solos argilosos para combater o *clogging* em Tuneladoras, procurando por alternativas que podem colaborar com a minimização deste problema frequente em escavações mecanizadas.

Outro motivador desta pesquisa, não é somente o bom desempenho que o equipamento pode atingir, há também a preocupação com bem estar dos trabalhadores do ramo. Evitando-se o *clogging*, há também uma minimização das intervenções hiperbáricas realizadas para limpeza e manutenção da roda de corte. Para cumprir este trabalho, operários são submetidos a condições insalubres de trabalho, que contam com altas temperaturas (entre 35 e 40°C), trabalho em regime de pressão elevada que pode variar entre 0,5 até 4,0 bares de pressão (depende das características da obra), e em espaços confinados.

O tempo de compressão e descompressão de cada indivíduo pode variar de acordo com o tempo de exposição á pressão, horas de trabalho em pressão diferenciada entre outros. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, extraída da ABNT-NR15- 2014 podemos verificar o exemplo de tempo de descompressão para um trabalhador com jornada de trabalho entre 4 a 6 horas do regime de pressão hiperbárico, e com pressões entre 2,0 a 3,0 bares

Tabela 1 - Considerações normativas para trabalhos Hiperbárico, NR 15.

Pressão de Trabalho *** (kgf/cm ²)	Estágio de Descompressão* (kgf/cm ²)								Tempo Total de Descompressão *** (min.)
	1,60	1,40	1,20	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20	
2,0 a 2,2				5	10	25	40	50	130
2,2 a 2,4				10	20	30	40	55	155
2,4 a 2,6			5	15	25	30	45	60	180
2,6 a 2,8		5	10	20	25	30	45	70	205
2,8 a 3,0		10	15	20	30	40	50	80	245

Notas:

(*) A descompressão tanto para o 1° estágio quanto entre os estágios subsequentes deverá ser feita a velocidade não superior a 0,4kgf/cm²/minuto

(**) Não está incluído o tempo entre estágios

(***) Para os valores limite de pressão de trabalho use maior descompressão.

(****) O período de trabalho mais o tempo de descompressão (incluindo o tempo de estágios) não deverá exceder a 12 horas

Tendo em vista o exposto anterior, pretendemos então executar experimentos laboratoriais em busca de um condicionamento de solos eficiente no combate a esta problemática. Para cumprir tal objetivo, estudaremos cinco tipos de solos de diferentes

locais, todos com elevada fração de finos, e que apresentem alto potencial de aderência à superfícies metálicas.

O condicionamento de solos ao qual esta pesquisa está centrada consiste em saturar o solo em condições semelhantes ao que ocorre em uma câmara de escavação, e então, adicionar a esta massa de solos o dispersante de argila, hidróxido de sódio (NaOH). A ideia principal em adicionar o dispersante de argilas, é promover alterações no potencial hidrogênico do solo (pH). Algumas pesquisas mostram que quando este material é inserido em meio básico, são criadas forças de repulsão entre as partículas de solo, o que nesta pesquisa pode ser útil para o combate à aderência nas superfícies metálicas.

Como há uma diversidade muito grande de argilominerais conhecidos nos solos finos, cada argilomineral possui respostas diferentes quando saturados. Dentre estas variações podemos citar: argilominerais que se expandem, outros reagem com alto poder de aderência, isso sem contar com as combinações de efeitos entre eles, que são inúmeras. Por estes motivos é justificável além da alteração de alcalinidade que deve ser promovida pelo dispersante de argila, a injeção de corrente elétrica para auxiliar nas forças de repulsão entre as partículas. Acredita-se que a alteração do pH do meio, somado a corrente elétrica, pode potencializar as forças de repulsão e assim enfraquecer a capacidade de adesão.

As quantidades de dispersante e a intensidade da corrente elétrica necessária para que se promova este efeito esperado, serão definidas de acordo com o desenvolvimento desta pesquisa.

Inicialmente é preciso fragmentar todo o trabalho em passos experimentais, que quando somados nos fornecem dados para formar opinião crítica sobre o tema proposto. Para entender melhor o comportamento deste material é preciso verificar as condições geotécnicas e enumerar os seguintes passos:

- Coletar amostras de solos argilosos, com percentagem elevada da fração de finos;
- Caracterizar geotecnicamente estes materiais, através de testes laboratoriais para verificar se estes solos argilosos apresentam potencial quanto ao desenvolvimento do efeito clogging;
- Classificar o solo segundo os critérios desenvolvidos por Casagrande, uma vez que os índices de plasticidade são de extrema importância nesta pesquisa;
- Caracterizar os solos quanto a sua capacidade de condução de corrente elétrica. Este dado se faz necessário, pois um dos propósitos desta pesquisa é verificar se a corrente elétrica promove alguma melhoria no enfraquecimento do poder de aderência dos solos argilosos às superfícies metálicas.

- Identificação do argilomineral mais ativo de cada amostra, de forma a poder atestar que o condicionamento dos solos para escavação mecanizada em modo EPB é efetivo para os argilominerais aqui identificados;
- Quantificar o pH do solo em seu estado saturado, e verificar seu comportamento após as adições do dispersante de argila NaOH;
- Quantificar quais serão as melhorias que o condicionamento do solo realizado com a adição de água, NaOH e eletricidade pode trazer em relação ao combate do efeito clogging nas escavações mecanizadas.

E por fim, analisar os resultados obtidos de forma a opinar sobre o possível método de se condicionar os solos, e se possível iniciar um novo caminho de pesquisa para promover maior eficiência das escavações mecanizadas via TBM.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1.1 - Escavações em modo TBM-EPB e suas características

Segundo Peila (2014), o modo de escavação mecanizada TBM - EPB é atualmente o mais usado do mundo. Neste método, a Tuneladora usa o material escavado que se encontra no interior da câmara de escavação, como principal meio de transferência de pressões para o maciço de solo. Esta técnica tem o intuito de estabilizar a frente de escavação, minimizando entre outros, recalques e os riscos de colapsos e desestabilizações na frente de escavação (Figura 6).

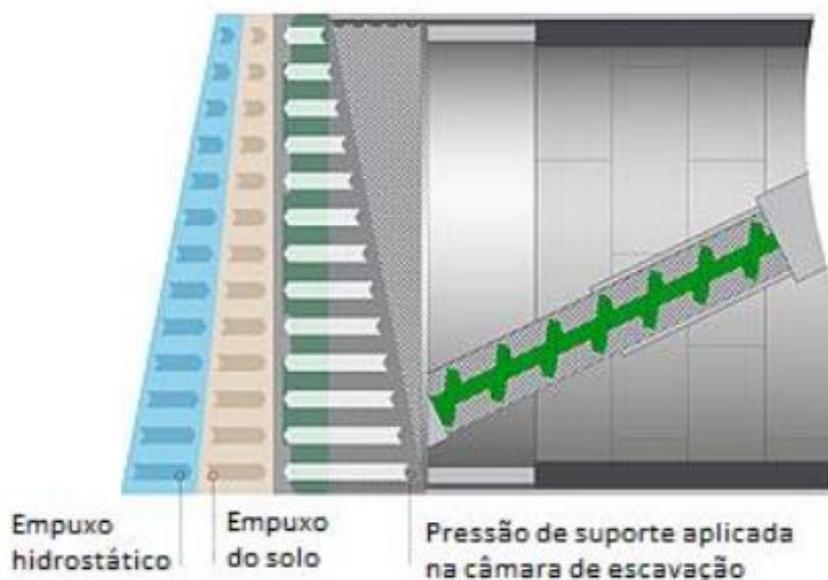


Figura 6 - Estabilização de frente de escavação pela aplicação de pressão de frente (EPB) (Adaptado de Guglielmetti et al., 2008).

Um dos pontos chave para obter bons desempenhos nas escavações subterrâneas com uso de tuneladoras TBM - EPB é a transformação do material escavado em uma mistura plástica e com consistência de pasta. Este processo pode ser realizado através da mistura de solo e agentes condicionantes como bentonita, espumas, polímeros, água e ar. Todo esse procedimento tem um só propósito, atribuir ao solo propriedades, para que este possa fluir pelo parafuso sem fim dissipando as diferenças de pressões entre a câmara de escavação e o túnel. De acordo com Duarte (2007), Peila (2014), Maidl (1995), Herrenknecht and Maidl (1995) & Quebaud (1998), além das funções descritas acima, um bom condicionamento de solo pode ser capaz de:

- Controlar de forma homogênea as pressões de frente na escavação;
- Minimizar os fluxos de entrada de água para interior da câmara; uma vez que o condicionamento dos solos pode diminuir a condutividade hidráulica da massa escavada por determinado período de tempo;
- Estabelecer fluxo contínuo de retirada de material escavado entre a câmara e o túnel;
- Minimizar o desgaste mecânico de ferramentas de corte;
- Minimizar forças de torque desenvolvidas no processo de escavação;
- Reduzir o atrito entre roda de corte e o solo.

Para Vinai (2006), fatores como a trabalhabilidade, consistência, permeabilidade são todos parâmetros geotécnicos observados na pasta de solo condicionado, e que auxiliam o material escavado a desempenhar seu papel face à estabilidade da escavação. Além destes benefícios mecânicos, existem também os benefícios proporcionados ao equipamento, tais como minimizações de desgastes em peças fundamentais como o parafuso sem fim (Peila et al. 2011). Outro ponto bastante importante é a minimização do atrito e consequentemente a minoração do torque necessário.

Sobretudo, o mais importante destes benefícios é a dissipação das pressões entre a câmara de escavação e o túnel. Para cumprir este requisito o fator transportabilidade densidade aparente e trabalhabilidade apresentam papel importante na escavação TBM-EPB, pois sem eles, este modo de escavação não seria possível. Na Figura 7, podemos visualizar como as pressões podem ser dissipadas entre câmara de escavação e o túnel por meio do parafuso sem fim.

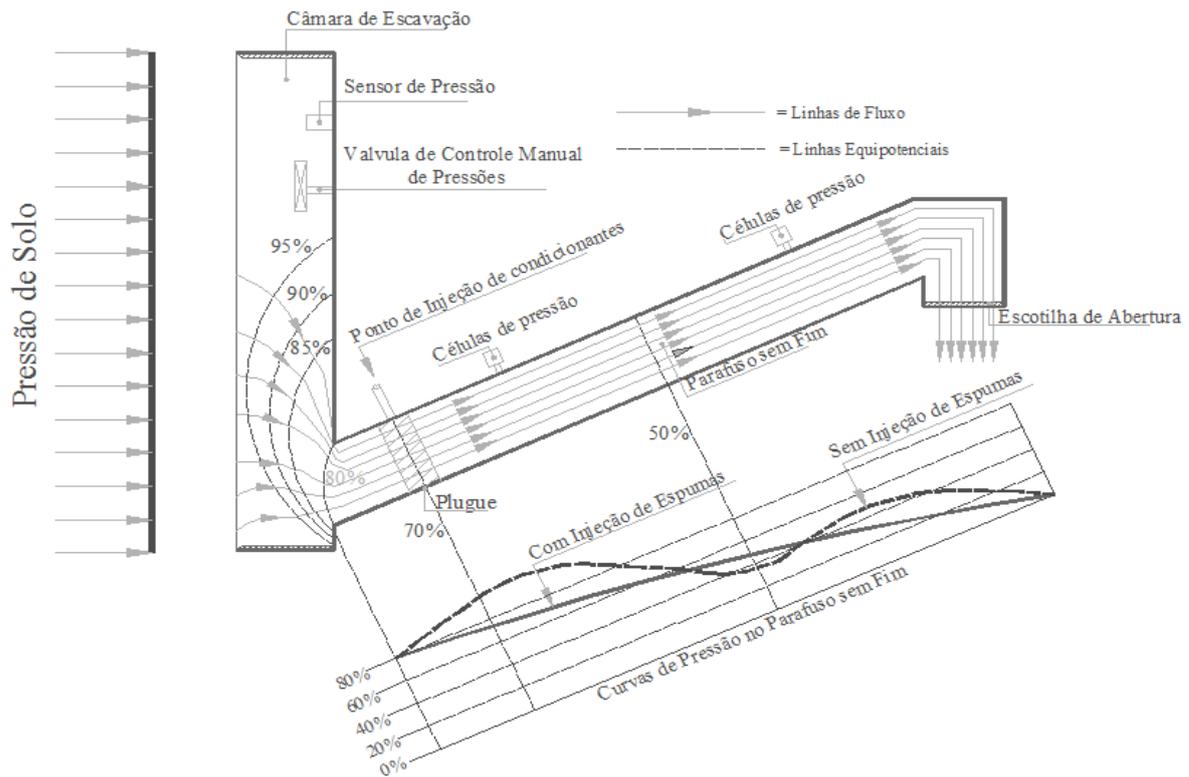


Figura 7 - Ilustração da dissipação de pressões pelo parafuso sem fim (Adaptado de Maidl, 1995).

Como visto, o condicionamento dos solos é um dos pontos fundamentais para as escavações em modo TBM-EPB. Porém, ainda há muito que desenvolver nesta área. As variações na litologia dos solos frequentemente ocorrem ao longo de um projeto de túnel. Segundo Peila (2014), estas mudanças na litologia devem ser acompanhadas de mudanças no condicionamento dos solos, a fim de manter a eficiência do equipamento. Porém, a eficiência do condicionamento dos solos não tem sido realizada de forma muito efetiva. Desta forma, podemos entender que o bom condicionamento de solo tem ligação direta com o bom desempenho da Tuneladora. Entretanto, os solos naturais dificilmente serão encontrados na forma ideal do ponto de vista de escavabilidade. Assim se faz necessário realizar modificação em suas características, a fim de melhorar as condições de desempenho do equipamento.

A efetividade dos agentes condicionantes depende inteiramente das características do solo escavado. Exemplo disso, podemos citar parâmetros físicos como: distribuição granulométrica das partículas, permeabilidade, índices de consistência, limites de plasticidade, coesão e peso específico dos solos. Estas variáveis alteram significativamente as condições de condicionamento dos solos no interior da câmara de escavação.

Em especial, as tuneladoras têm sido uma opção de grande uso deste mercado de escavações subterrâneas. Como vantagens do uso destas máquinas, podemos ilustrar principalmente: industrialização por completo da construção, a tecnologia embarcada e a rapidez com que a obra se desenvolve. Cada TBM é projetado de acordo com as condições geológicas que deverá encontrar, pois cada tipo de solo/rocha tem suas particularidades no processo de escavação. Assim, justifica-se a imensa diversidade destes equipamentos. As

tuneladoras tipo EPB são adequadas para solos cuja distribuição granulométrica contenha mais de 30% de partículas finas (<0.06 mm) (Barbendererde,1993).

Segundo Oliveira & Diederichs (2017), as tuneladoras são projetadas principalmente para faixas específicas de solos, tais como escudos abertos (Open Shields) para rochas competentes, a EPB (Earth Pressure Balance) para solos argilosos (coesivos) e a Slurry Shield para solos arenosos não coesivos. Estas duas últimas, são de escudo fechado (Closed shields). Para as máquinas de escudo fechado a Figura 8, exemplifica o domínio de cada modo de escavação.

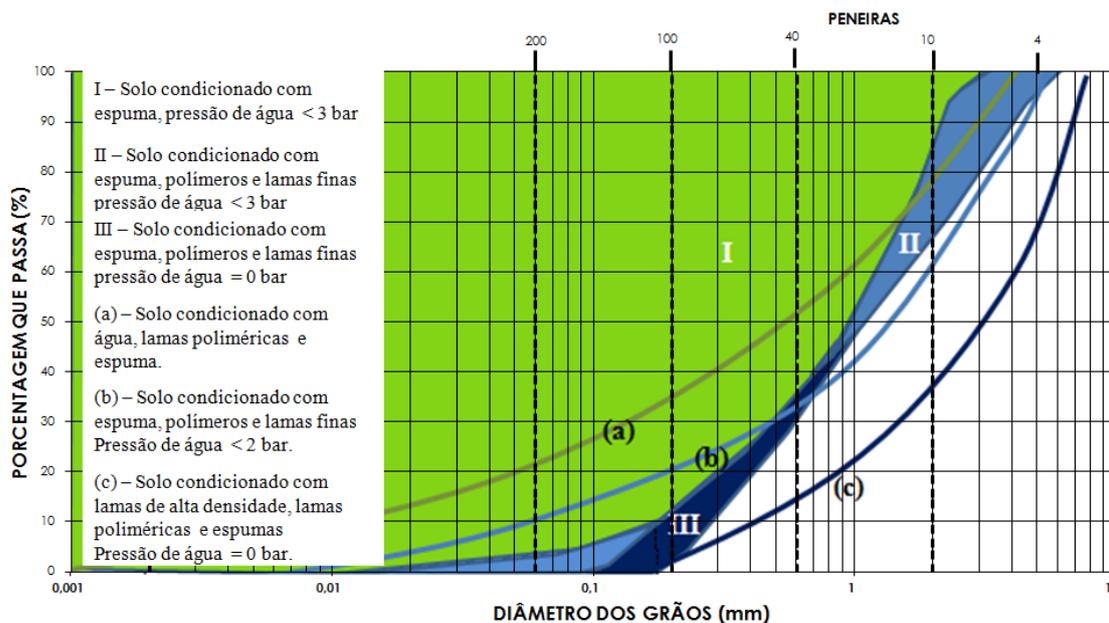


Figura 8 - Distribuição granulométrica de solo e domínio típico para tuneladoras de escudo fechado (Budach and Thewes, 2013).

Observa-se pela faixa de trabalho que à medida que o tamanho dos grãos de solos aumenta, o solo vai perdendo a capacidade de ser condicionado na câmara de escavação de um TBM-EPB. Além de perda de trabalhabilidade, o solo também apresenta dificuldades para ser transportado pelo parafuso sem fim. De acordo com Peila et al. (2011), as areias grossas costumam não responder bem ao condicionamento de solos, e alguns problemas como travamento do parafuso sem fim e a perda de eficiência em dissipar as pressões são constatados.

Para que o material escavado não perca capacidade de desempenho, são necessários processos de condicionamento diferenciados, como é o caso das lamas de escavação de alta densidade, onde além de água e bentonita, a composição conta com quantidades de pó de pedra. Geralmente o pó de pedra utilizado nestas misturas possuem granulometria variando entre 0,42 a 0,0075mm. Este condicionamento se aplica bem para solos arenosos e mal graduados. Para Krause (1987), o material condicionado deve respeitar certos limites de aplicação do modo de escavação em EPB. Estes limites impostos ao material condicionado garantem ao processo de escavação como um todo, eficiência e benefícios como: trabalhabilidade, controle de fluxo de água para o interior da câmara, entre outros.

Exemplo destes limites podemos citar a condutividade hidráulica, que não pode exceder valores maiores que 10^{-5} m/s sob regime de pressão inferior a 2 bar.

O solo condicionando com alta condutividade hidráulica não permite a total dissipação de pressões. Consequência disso, o plugue desejado do material condicionado ao ser transportado no parafuso sem fim não é formado. Nestes modos de operação, a escotilha (dispositivo de controle de abertura da extremidade da carcaça do parafuso sem fim) não pode ser mantida aberta como de costume. Assim, é necessário que logo após descarregar o parafuso sem fim, a escotilha seja imediatamente fechada. Este efeito pode desencadear instabilidades na frente de escavação, devido à fadiga que é imposta ao maciço nos processos de abertura e fechamento da escotilha do parafuso sem fim (Barbendererde, 1993).

Segundo DAUB (2010), as tuneladoras em modo EPB são vastamente utilizadas por conta de abranger uma parte considerável das faixas granulométricas. Além disso, quando há um condicionamento adequando dos solos, esta faixa pode ainda estender-se a granulometrias ligeiramente maiores. Certamente os solos não coesivos de granulometria fina (areia fina) também estão inclusos nesta consideração. Exemplo disso, podemos citar as escavações da linha 4 do metrô do Rio de Janeiro - BR, que foi premiada pela Associação Internacional de Túneis e Espaços Subterrâneos por inovar no condicionamento de solo arenosos, que por regra utilizaria modo de escavação com lamas (slurry), e no entanto, as escavações foram realizadas em modo EPB (Pierri et al., 2016).

Para Barzegari et al. (2014), esta amplitude de escavação do modo EPB, ficou claramente explícita durante as escavações da linha 1 do Metrô de Tabriz - Irã. Durante as escavações, a tuneladora EPB atravessou solos não coesivos (areia fina), e misturas de solos não coesivos com pedregulhos, como é o caso das transições entre rocha e solos arenosos, ou ainda nos espaldares de montanhas (formação tálus). Os condicionamentos utilizados durante a escavação destes solos foram espumas, lama bentonítica (água + bentonita) e lama bentonítica com adição de pó de pedra.

Os estudos de condicionamento de solos precisam ser mais bem explorados, pois são inúmeras as heterogeneidades que os solos podem apresentar, (Herrencknecht & Rehm, 1999). Na maioria dos casos, além dos complicadores comuns, se têm a mistura entre os solos e efeitos adicionais ao clogging podem ser verificados.

Segundo Peila et al. (2011), as grandezas fundamentais que controlam o condicionamento dos solos através de espumas são: razão de expansão das espumas (FER), e a razão de injeção das espumas (FIR). Estes parâmetros controlam o tipo e quantidade de espuma que é injetada na câmara de escavação. À medida que o solo é escavado ajustes nos parâmetros FIR e FER vão sendo testados até que sejam encontradas quantidades que promovam trabalhabilidade, consistência e transportabilidade ideal para o material escavado. A seguir definiremos cada um deles, FIR e FER.

O FER é o parâmetro que controla o fator de expansão da mistura ar, surfactante (líquido base) e água, cujo produto é a espuma gerada.

$$FER = \frac{V_f}{V_l} \quad (1)$$

Onde:

FER = Razão e expansão de espuma;

V_f = Volume de espuma gerado (m^3);

V_l = Volume de surfactante (líquido base) utilizado (m^3);

$$FIR = \frac{Q_F}{(V_{avan} \cdot A_{esc})} \cdot 100(\%) \quad (2)$$

Onde:

FIR = Razão de injeção de espuma (%);

Q_F = Fluxo de espuma (m^3/s);

V_{avan} = Velocidade de avanço (m/s);

A_{esc} = Área da seção transversal de escavação (m^2);

O FIR é uma variável capaz de medir o volume de espuma que é injetada na câmara de escavação face de velocidade de avanço do TBM, e conseqüentemente o volume de solo escavado. Através deste parâmetro, é possível ajustar a consistência do material, que hora pode ser mais ou menos trabalhável (Peila, et al., 2014). Segundo Galli & Thewes (2014), em um TBM, a escavação é realizada em um processo contínuo. Sendo assim, há a necessidade de que o volume de espuma a ser injetado na câmara seja compatível com o volume escavado à determinada taxa de avanço do TBM.

Peila et al. (2006), demonstraram, que para os solos não coesivos os valores ideais do parâmetro FIR variam entre 40 a 60%. Abaixo de 40%, o material apresenta dificuldades para ser transportados pelo parafuso sem fim devido à baixa trabalhabilidade. Para os valores acima de 60%, o material encontrava-se extremamente líquido, e não dissipada as pressões da câmara.

Um dos grandes problemas que as escavações TBM-EPB têm enfrentado é a dificuldade de se avançar com a tuneladora, onde os meios comuns de condicionamento não são eficientes. Geralmente este problema ocorre em solos coesivos e rijos. Neste tipo de material, geralmente os processos de condicionamento mais comuns, como é o caso do

uso de espumas, não surtem efeito. Para muitos pesquisadores ainda é preciso avançar muito nas pesquisas para que este problema seja resolvido (Thewes & Holmann 2013).

4.1.2 - O Clogging

Para Hollman & Thewes (2012), é possível prever se o maciço escavado poderá apresentar problemas relacionados à formação do clogging. Estas previsões são baseadas através de parâmetros geotécnicos extraídos dos limites de Atterberg. (Limites de liquidez *LL*, Limite de Plasticidade *LP*, Índice de Consistência *IC* e Índice de plasticidade *IP*). O trabalho publicado por estes pesquisadores levaram em conta os índices citados anteriormente para o desenvolvimento de um ábaco, onde é possível classificar a consistência do material a ser escavado, o teor de umidade necessário para promover a escavação, e ainda classificar qual será o potencial de desenvolvimento do clogging durante a escavação TBM-EPB, (Figura 9).

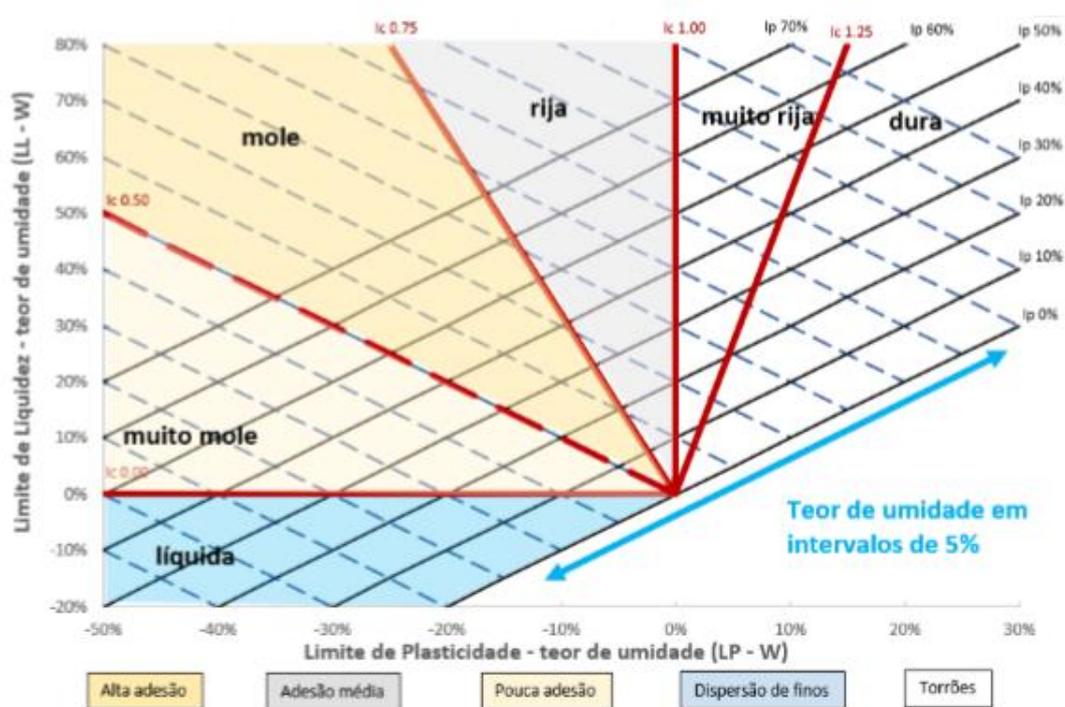


Figura 9 - Avaliação do potencial de adesão (Adaptado de Hollmann e Thewes, 2012).

Segundo Thewes (1999), Sass & Burbaum (2008), Feinendegen et al. (2011), Maidl (2012), a intensidade do fechamento pode ser tamanha, ao ponto de bloquear totalmente as aberturas da roda de corte. Quando fatos como este ocorrem, as razões de avanço da máquina podem ser diminuídas em até 90%.

Em especial, nas ferramentas de corte o clogging atua de forma a bloquear os cortadores, ocorre também o tamponamento total dos scrapers (ver Figura) diminuindo sua eficiência no corte de material, e o bloqueio do parafuso sem fim.

Certamente quando este nível de clogging é alcançado, ao girar a roda de corte na tentativa de avançar a escavação, o atrito entre o material aderido a roda de corte e a frente de escavação é dissipado em calor, e ocorre a elevação da temperatura do material da câmara de escavação, o que de certa forma pode ser extremamente maléfico para os componentes mecânicos do equipamento. Sendo assim, além de impedir o avanço na escavação, o clogging também degrada mecanicamente equipamento. Exemplo de clogging em roda de corte pode ser visualizado na Figura 11.



Figura 10 - À esquerda, scraper totalmente entupidos por efeito de clogging (adaptado de Comulada et al., 2016), à direita, disco de corte (diâmetro aproximado 17") sob efeito de clogging (adaptado de Shirlaw, 2015)



Figura 11 - (Esquerda) Efeito clogging em TBM (Martinotto, 2010), (Direita) Efeito clogging Solos Saturados (Langmaack, 2009).

É preciso entender o comportamento destes solos em relação à adesão nas superfícies metálicas dos equipamentos, e em especial na roda de corte das tuneladoras. Certamente a solução deste problema deve ser iniciada pela roda de corte, pelo fato de este componente promover a escavação, e ser peça fundamental para o equilíbrio de estabilidade de frente de escavação (Langmaack & Ibarra, 2011).

Devemos apontar também os problemas que ocorrem aos equipamentos de apoio, tais como, por exemplo: Durante a escavação em solos argilosos, devido á pegajosidade do material muitas vezes é contatada a presença de solos entre o tambor motriz e a borracha

da correia transportadora. Nestes casos, o tambor motriz perde aderência e entupimentos em sensores de funcionamento são constatados. Desta forma o equipamento é impedido de cumprir suas funções. Tal equipamento, apesar de ser secundário é de suma importância no processo, pois é ele que conduz o material escavado até o ponto de descarte, atividade crítica e de extrema importância em túneis (Langmaack, 2009).

4.1.3 - Potencial de formação do Clogging e Seus Parâmetros Indicativos

Segundo Holmann & Thewes (2013), há uma diferença substancial entre as escavações de solos coesivos e não coesivos. Quando os solos coesivos apresentam percentagens elevadas de materiais finos, geralmente estão associados a estas características, baixa condutividade hidráulica e altos limites de plasticidades. Tais características colaboram para o desenvolvimento de uma massa pastosa e pegajosa como produto da escavação. A pegajosidade do material fino pode ser demasiadamente alta e muito plástica (Ball et al. 2009).

Em termos mais específicos, o poder de aderência dos solos ou o conceito de adesão limite está diretamente ligado ao potencial de plasticidade deste solo. Em outras palavras, a plasticidade pode estar associada com a sua capacidade de aderir nas superfícies. O esquema ilustrado na Figura 12 pode resumir de forma gráfica que o decréscimo da plasticidade ocorre com incrementos de umidade do material, e que de forma inversa a plasticidade pode ser elevada.

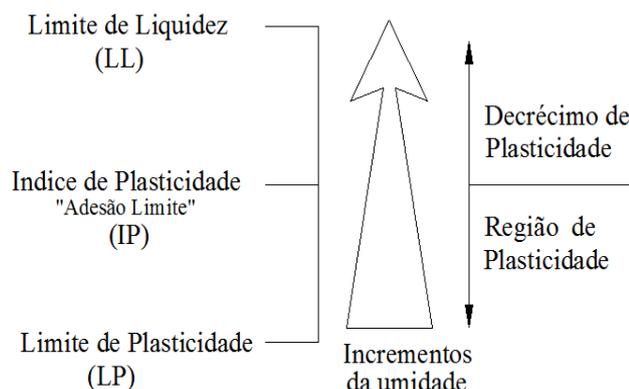


Figura 12 - Relação entre o índice de plasticidade e a umidade da amostra (adaptado de Ball et al., 2009)

Para Maidl (2012), é possível alcançar um condicionamento de solo adequado se os agentes condicionantes agirem de modo a alterar índices geotécnicos do material escavado. A modificação por meio de adição de agentes químicos ou físicos deve ter como alvo, os parâmetros de limite de liquidez (LL), plasticidade (LP) e seus respectivos índices de consistência e plasticidade (IC e IP). No ambiente de condicionamento de solos, esses parâmetros da massa já escavada podem ser alterados pela adição de:

- Bentonita, pó de pedra;
- Polímeros em suspensão;
- Espuma polimérica;

Segundo Hollmann (2012), os argilominerais montmorilonita ou illita apresentam comportamento tendencioso ao clogging. Para Hollmann et al. (2012), quando estes argilominerais estão associados aos solos, e também coincidem que a distribuição granulométrica apresenta porções de finos maiores que 10%. Além do clogging é constatado um efeito adicional de expansibilidade que potencializa o efeito de aderência. Para Hollmann & Thewes (2013), cada argilominerais tem potencial de desenvolvimento diferenciado face o cenário do clogging. O fato de se organizarem em diferentes padrões em suas ligações intracristalinas pode justificar esta reação. Segundo Pimentel (2003), a ligação entre as partículas de argila pode ser tão intensa ao ponto de desenvolver pontes intracristalinas com resistência da ordem de 10 MPa. A caulinita, desenvolve forças menores de adesão às superfícies metálicas quando comparadas com a montmorilonita (Einstein, 1996).

Segundo Hollmann & Thewes (2013), Galli & Thewes (2014), Sass & Barbaum (2008) Feinendegen et al. (2011) e Zumsteg & Puzrin (2012), além do argilomineral há outros fatos relevantes para desenvolvimento do clogging. Entre estes, a plasticidade (já comentado), a condição de saturação do solo em seu estado natural e a distribuição granulométrica são responsáveis por uma boa parcela do fenômeno do clogging. Segundo Ye et al. (20016), em geral 40% ou mais de grãos com diâmetro médio de partícula inferior a 1,0 mm também pode ser indicativo da ocorrência do clogging.

Em publicações recentes, pesquisadores da Queens University no Canadá demonstraram maneiras de como diminuir o efeito de clogging em misturas artificiais composta de argilas e areias, condicionando estes materiais com produtos comerciais (espumas e espumas com polímeros). A pesquisadora principal é Oliveira (2018). Por ser um trabalho com propósitos semelhantes ao desta pesquisa (combate ao efeito clogging), esboçaremos a ideia principal deste trabalho e seus resultados importantes em relação ao combate ao clogging em TBM-EPB. É bom recordar que os resultados abordados e técnicas utilizadas por Oliveira (2018) vão além do tema de combate ao clogging em TBM-EPB, contribuindo de forma muito abrangente para outras questões de escavações com TBMs.

A pesquisa de Oliveira (2018) combinou materiais como bentonita e caulinita com areia fina e média, dando origem a solos com percentagens de finos significativos e que foram submetidos a testes laboratoriais. Estes testes tinham a função de verificar a eficiência de diferentes produtos no combate ao efeito clogging. Em relação à composição dos solos artificiais formados, combinou-se: Bentonita nas proporções 10, 20, 30, 50 e 70, 80 e 100% com areia de granulometria fina e também com areia de granulometria média. No caso da caulinita, as combinações foram: 10, 20, 30, 50, 70, 80 e 100%, mais areia de granulometria fina e areia granulometria média.

Para verificar a eficiência destes produtos no combate ao clogging, Oliveira (2018) condicionou o material artificial criado utilizando 3 polímeros (espumas), cujos fabricantes nem suas composições não foram identificados na pesquisa. Nomeando apenas os produtos como A, B e C, a tese informa que: A, trata-se de espuma de escavação comum, B espuma de escavação com polímero anti-argila e C, também é uma espuma de escavação com agente polimérico anti-argila, porém de fabricantes diferentes.

Em seus testes, Oliveira (2018) condicionou os solos com parâmetros FIR variando entre 9 a 22% e FER variando entre 38 a 42%. Estes parâmetros foram aplicados nas misturas que levavam Bentonita e também nas que levavam Caulinita. Para calibrar o potencial de clogging das misturas de solos artificiais, Oliveira (2018) testou pontos de umidade dos solos até encontrar qual seria a umidade que proporcionava o maior potencial formador de clogging. Neste caso, a umidade que satisfiz a condição de potencial formador de clogging variando entre médio a alto, proporcionava parâmetro IC entre 60 e 80%.

Segundo os resultados encontrados por Oliveira (2018), as misturas que proporcionaram maior potencial formador de clogging foram compostas de: 50% de Bentonita + areia fina, e 50% de Caulinita + Areia Fina. Antes de verificar a eficiência dos produtos A, B e C, a autora calibrou seus resultados condicionando o solo apenas com água.

Os resultados de Oliveira (2018) apontam que o estudo de combate ao clogging para a mistura que levava bentonita em sua composição, utilizando somente água como agente condicionante, obteve melhorias na ordem de 50%. Utilizando o produto A, foi possível alcançar melhorias entre 30 e 35%. Os agentes condicionantes que continham o agente anti-argila alcançaram os seguintes resultados: B entre 90 e 95% e C entre 80 e 85%. Nestes testes, as umidades das amostras variaram entre valores que proporcionaram IC com os seguintes valores: água IC igual a 100%, condicionante A, IC igual 85%, condicionante B, IC 100% e condicionante C, IC igual a 105%.

Já os resultados obtidos por Oliveira (2018) para as misturas que levavam em sua composição Caulinita, se resumem em: material condicionado somente com água alcançou resultados de melhoria da ordem de 70 a 75%. Material condicionado com produto A, alcançou melhorias da ordem de 40%. Material condicionado com produto B, alcançou melhorias da ordem de 60 a 65%, e o material condicionado com produto C, obteve melhorias na ordem de 50 a 55%. Neste caso a umidade das misturas proporcionou IC entre 70 e 75%.

Para Oliveira (2018), a avaliação realizada na pesquisa descrita anteriormente abre mais um caminho por onde o tema clogging pode ser abordado, além de avaliar produtos já existentes no mercado, o que é muito importante para o mercado de túneis e indústria química envolvida no setor. Entretanto, este estudo foi realizado com misturas artificiais de bentonita, caulinita e areias, o que de certa forma pode não representar grande parte da realidade geotécnica encontrada nas escavações utilizando a técnica TBM-EPB. Esta pesquisa não aborda temas como outros argilominerais, como é o caso da Ilita, que

demonstra poder ativo bastante influente no efeito clogging, e também, vale a pena ressaltar, solos naturais.

4.2 - Argilas

O termo argila é utilizado para descrever de maneira geral um material natural de granulometria fina acompanhada de plasticidade e trabalhabilidade, cujas partículas apresentam sistema coeso entre si, e que se mantém em estado floculado ou disperso de acordo com ligações e interações químicas de suas partículas. A trabalhabilidade das argilas geralmente se apresenta na forma plástica. Quimicamente, as argilas são formadas essencialmente por elementos pesados como silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio (Santos, 1989).

Para Bergaya & Lagaly (2006), as argilas são conhecidas e utilizadas pela humanidade desde a antiguidade, e têm desempenhado papel importante cultural e socialmente. Nos dias atuais, sua utilização vai desde a fabricação de cerâmicas até a utilização na indústria farmacêutica. Segundo pesquisadores, a diversidade das estruturas e propriedades das argilas é complexa, e de difícil compreensão. Devido a tal complexidade, é possível encontrar na literatura estudos dirigidos a estes materiais nas mais diversas formas e áreas da engenharia.

Entende-se que um dos caminhos para se conduzir bons estudos a respeito deste tema é identificar corretamente os argilominerais contidos nas amostras. Não obstante, é necessário entender as estruturas cristalinas associadas a cada argilomineral, e suas principais características marcantes. Depois de identificado e compreendidas suas formas comportamentais, podemos então ter possibilidades de adquirir entendimento do efeito das argilas em aderir-se às superfícies (Ye et al., 2016).

Algumas das primeiras publicações sobre o tema de mineralogia das argilas em jornais foram: *Clay Mineralogy and Applied Clay Mineralogy*, publicado entre as décadas de 1950 e 1970. Para ser mais exato, Grim (1953, 1962, 1968). Desde então outras publicações de grande importância na área foram realizadas. Outros exemplos bem sucedidos são: Weaver and Pollard, 1973; Farmer 1974. Theng, 1974, 1979; Olphen 1977; Brindley & Brown, 1980; Chamley, 1989; Santos 1989, Wilson, 1994; Velde 1995; Moore & Reynolds, 1997.

Segundo Santos (1989) e Moore & Reynolds (1997), no sentido popular o termo argila é utilizado para descrever materiais de granulometria fina, mesmo sendo eles produtos de ação hidrotermais ou sedimentos fluviais, marinhos e lacustres. Nas aplicações geotécnicas há certa tendência em se definir o tamanho limite dos grãos de argila baseado no tamanho médio das partículas. Segundo Wentwork (1922), o que define a fração argila são partículas com tamanho equivalente ou inferior a 4 μm . Muito embora não exista uma divisão universalmente aceita, há uma tendência usual em vários locais do mundo em concentrar essa fração a diâmetros médios menores que 2 μm .

Para Simões (1955) e Gillot (1968), na engenharia civil, as principais escalas das dimensões das partículas sólidas podem ser encontradas em Road Research Laboratory, (1956). Podemos dizer de certa forma que a escala brasileira encontrada na Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1995) é baseada na Road Research Laboratory, (1956) com algumas inclusões. Na Figura 13, podemos observar as variações das classificações de acordo com sistemas e institutos ao redor do mundo.

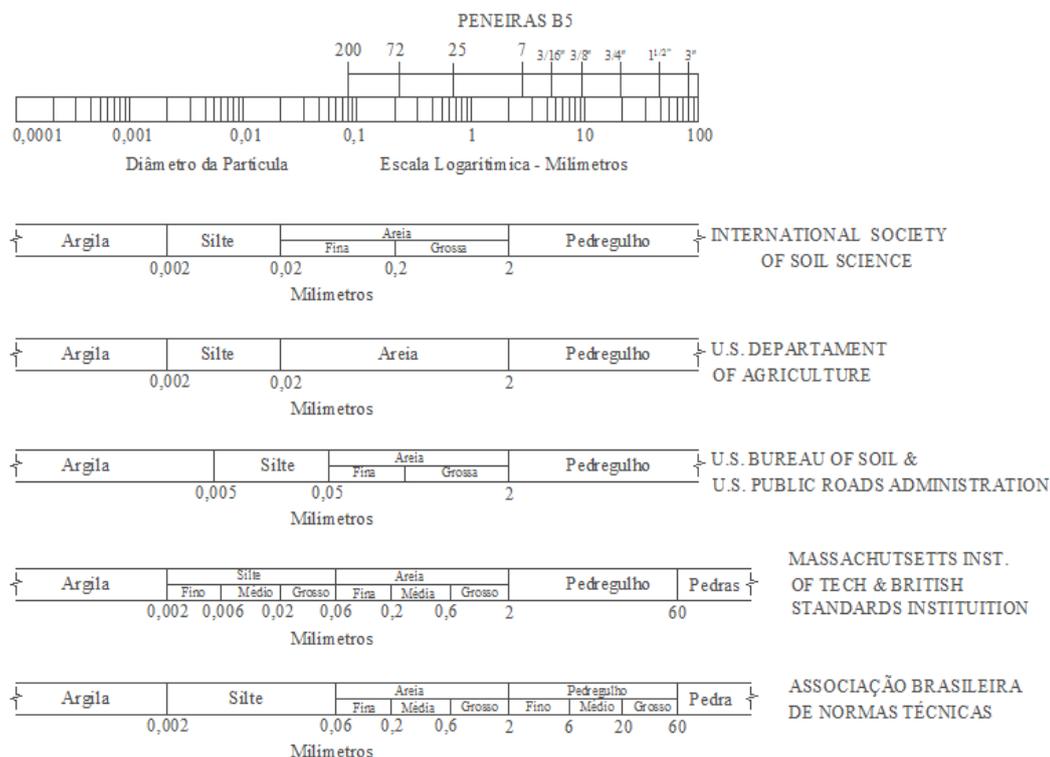


Figura 13 - Comparação entre as escalas principais de partículas sólidas (adaptado de Pinto, 2006)

No estudo das argilas e suas consequências às escavações subterrâneas mecanizadas, é importante definirmos quais os tipos de minerais e argilominerais mais ativos no solo.

Mineral é um composto químico inorgânico, que pode trazer consigo impurezas. Também é constituído de uma estrutura cristalina definida em certos padrões e característica que determinam um grupo específico de minerais (Santos, 1989). Segundo Mackenzie (1995), o estudo das argilas e seus respectivos argilominerais, está focado nas estruturas cristalinas que abrigam elementos constituintes da argila, como por exemplo: magnésio, ferro, cálcio, sódio, potássio entre outros. Outro ponto interessante destes materiais, é que quando submetido ao tratamento térmico "queima" se tornam mais rígidos. Em alguns casos adquirem boa resistência mecânica, como é o caso dos tijolos e dos pisos cerâmicos.

4.2.1 - Tipos de Argilas e Argilominerais

De acordo com Nogueira (1995), as classificações quanto ao grau de dureza dos solos argilosos encontrados na natureza seguem as orientações da Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação de consistência das Argilas (Nogueira,1995).

Índice de consistência (IC)	Classificação do Solo
IC < 0	Muito Mole
0 < IC < 0,5	Plástica Mole
0,50 < IC < 0,75	Plástica Média
0,75 < IC < 1,0	Plástica Rija
IC > 1,0	Consistência Dura

Georgius Agricola (1494 - 1555) foi o primeiro geólogo a formalizar uma definição para as argilas. As contribuições de "Georgius Agrícola" impulsionaram os esforços para se catalogar e juntar as características das argilas a uma nomenclatura específica (Bergaya & Lagaly, 2006).

O primeiro trabalho técnico sobre as argilas foi publicado pela Comissão de Geologia da American Ceramic Society (1939). O trabalho continha uma lista com os nomes das argilas e seus respectivos minerais constituintes (composição química). De acordo com Santos (1989), após as publicações da American Ceramic Society (ACS), pesquisadores desta área têm o privilégio de partir de um dado inicial, que é o relatório publicado em 1939. O assunto é de tal complexidade, que ao longo dos anos foram desenvolvidos glossários e dicionários para os diversos tipos de argilas.

No Brasil Souza Santos (1959), publicou um glossário complementar que abordava as descrições da ACS, e incluía os solos brasileiros. Mais tarde, atualizações foram publicadas por Santos (1989). Também são encontrados glossários nos seguintes documentos: Relatório 49 da American Petroleum Institute (API, 1949), Clay Mineralogy (Grim, 1953, 1968), Minéralogie des Argiles (Cailletéri en Hénin, 1963), Geologia das Argilas (Millot, 1964) e Associação Brasileira de Normas Técnicas (Ferron e Souza Santos, 1961). Os glossários, geralmente são compostos por nome, origem da argila (parte mais comum de ser encontrada), e aplicações do material na indústria cerâmica.

O glossário publicado pela ABNT em 1961 possui 58 descritivos. Para fins desta pesquisa não se faz necessário trazer ao leitor tais documentos na íntegra. Como já

informado anteriormente, a aplicação destes catálogos tem grande valia na indústria de artefatos cerâmicos. Apenas para complementar a informação, apresentaremos uma descrição de um dos itens deste catálogo.

"(XXIII) *FOUNDRY CLAY (argila para fundição)* - Argilas plásticas de várias resistências à temperatura, mas com boas propriedades ligantes ou aglomerantes, utilizadas para fazer moldes de fundição. As argilas verdes e vermelhas do Vale do Paraíba e as argilas quaternárias plásticas dos arredores de São Paulo são razoáveis argilas para fundição. A bentonita de Uberaba e as argilas montmoriloníticas de Sacramento (MG) e Boa Vista (PB) são bons agentes ligantes para moldes de peças especiais de metalurgia", (Santos, 1989), página 22.

Estes glossários não definem os termos regionais e de uso comum no Brasil. Seria bastante oneroso encontrarmos definições técnicas para estes termos. Em exemplo a isto, para nomear as argilas regionais temos: serecitas, terra rocha, taguás, ocre, massapê, taipa, saibro, cera da montanha, piçarras, sangue de tatu, espuma do mar, margas entre outras, (Abreu, 1960). Percebemos que estes nomes e seus respectivos significados variam de região para região. O problema ainda se torna mais complicado quando se deseja classificar as argilas através de bases geológicas e/ou geotécnicas. Percebemos com bastante clareza a veracidade desta afirmação, quando consultamos trabalhos de Reis (1927), Parmelee (1921, 1949) e Norton (1973).

Nos dias atuais, é preferível que se classifiquem os argilominerais, ao invés das argilas propriamente ditas. Segundo Bergaya & Lagaly (2006), a classificação destes materiais é mais objetiva quando são realizadas de acordo com as estruturas cristalinas do argilomineral. Segundo Grim (1953, 1968), é visto que a classificação das propriedades da argila deve levar em considerações além dos fatores anteriormente descritos, complementos como:

- A composição mineralógica dos argilominerais tanto no aspecto quantitativo como qualitativo, e pontos importantes como a distribuição granulométrica das partículas maiores que a fração argila, que também devem ser consideradas, pois trazem informações importantes sobre a matriz formadora dos argilominerais;
- A composição mineralógica dos não argilominerais;
- Teor em eletrólitos quer dos cátions trocáveis, quer dos sais solúveis. Este teor deve ser contabilizado tanto de forma qualitativa quanto de forma quantitativa;
- Textura dos argilominerais, grau de orientação e paralelismo entre as partículas dos argilominerais.

De acordo com Guerra et al. (2009), a elevada área de superfície dos argilominerais facilita os fenômenos de troca entre íons entre eles. Um aspecto importante que também deve ser levado em conta são as estruturas das argilas e seu modo de expansão das camadas basais. Quando as argilas estão em contato diretamente com a água reações

inesperadas podem ser registradas. Em alguns casos, é constatada colapsividade entre grãos, e em outros casos expansão. Para Guerra et al. (2009) e Santos (1992), somente não são consideradas expansivas as argilas com camadas 1:1. A nomenclatura de minerais do tipo 1:1, são compostos por uma folha de tetraedros de silício (*Si*) sobreposta de uma camada de octaedros de alumínio (*Al*), por isso são nomeados bilaminares ou 1:1 (Fassbender, 1982; Brandy & Buckman, 1983; Shulze, 1989). A nomenclatura argila 2:1 se refere às argilas que também podem ser chamadas de trilaminares, ou seja, aquelas compostas por uma folha de octaedros de *Al* intercalada com duas camadas de octaedros de *Si*. Os principais exemplos destas classes minerais podem ser encontrados com muita frequência nos solos como, vermiculita, montmorilonita (esmectita) (Fassbender, 1982; Brandy & Buckman, 1983; Shulze, 1989). A representação esquemática dos minerais 1:1 e 2:1 podem ser visualizadas na Figura 14 e Figura 15.

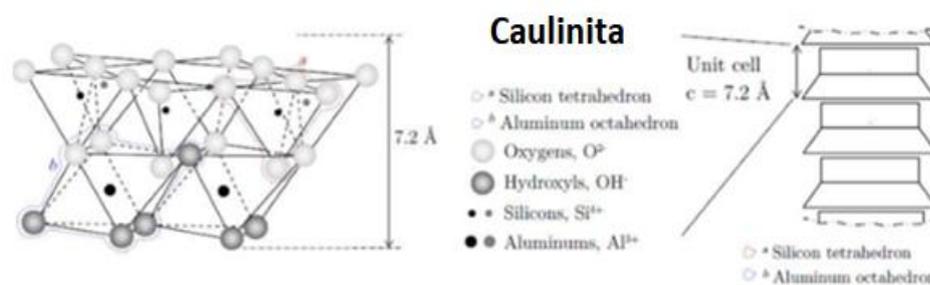


Figura 14: Representação esquemática de argila tipo 1:1 Caulinita (adaptado de Baile, 2014).

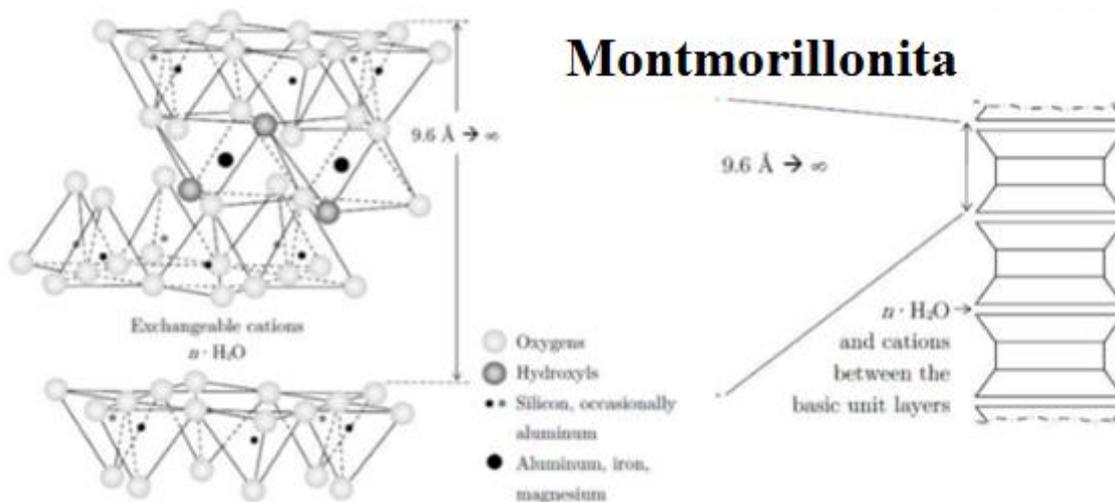


Figura 15 - Estrutura esquemática de argila 2:1 (Modificado de Baile, 2014)

Para facilitar a compreensão das características dos argilominerais, podemos então incluir nestes aspectos as seguintes propriedades:

- Anisotropia das camadas ou partículas;
- A existência de vários tipos de superfície cristalina: base externa planar, superfícies intercaladas planas entre outras;
- Plasticidade quando umedecidos;
- Dureza ao ser seco/aquecido (nem todos argilominerais);

A seguir, podemos observar na Figura 16, a forma real de diversas estruturas de argilominerais.

Frequentemente o termo "argila" é usado para "argilominerais" por ser tornar mais prático e rápido. Neste caso, a pesquisa tem preocupação inteiramente voltada para o argilomineral contido nas amostras de solo. Na Tabela 3, é possível assimilar estas diferenças (Bergaya & Lagaly, 2006).

O foco na composição das argilas, é uma forma importante de se estreitar o conhecimento dos solos e suas características, principalmente aquelas ainda não conhecidas nas atividades da engenharia civil (Mitchell et al.,1992). Em especial, os argilominerais podem apresentar comportamentos inesperados quando submetidos a agentes químicos, como é o caso do uso de floculantes e defloculantes, que às vezes não funcionam em determinados solos. Na Tabela 4, é possível observar a complexidade da composição dos minerais.

Segundo Vada (1989), além do interesse em conhecer propriedades dos materiais, os cientistas também estão interessados nos resultados das iterações dos argilominerais com substâncias químicas. Os resultados destas interações podem ser influenciados por diversos fatores, que vão desde alcalinidade dos solos até as condições de pressão e temperatura a que este material é submetida.

Tabela 3 - Distinção entre argila e argilomineral, (Bergaya & Lagaly, 2006)

Argilas	Argilominerais
Natural	Natural e Sintéticos
Granulometria fina (< 2 µm ou 4 µm)	Não há critério
Polissilicatos como principal constituinte	Deve incluir os não polissilicatos
Plástico	Plástico
Ganho de rigidez quando seco ou queimado	Ganho de rigidez quando seco ou queimado

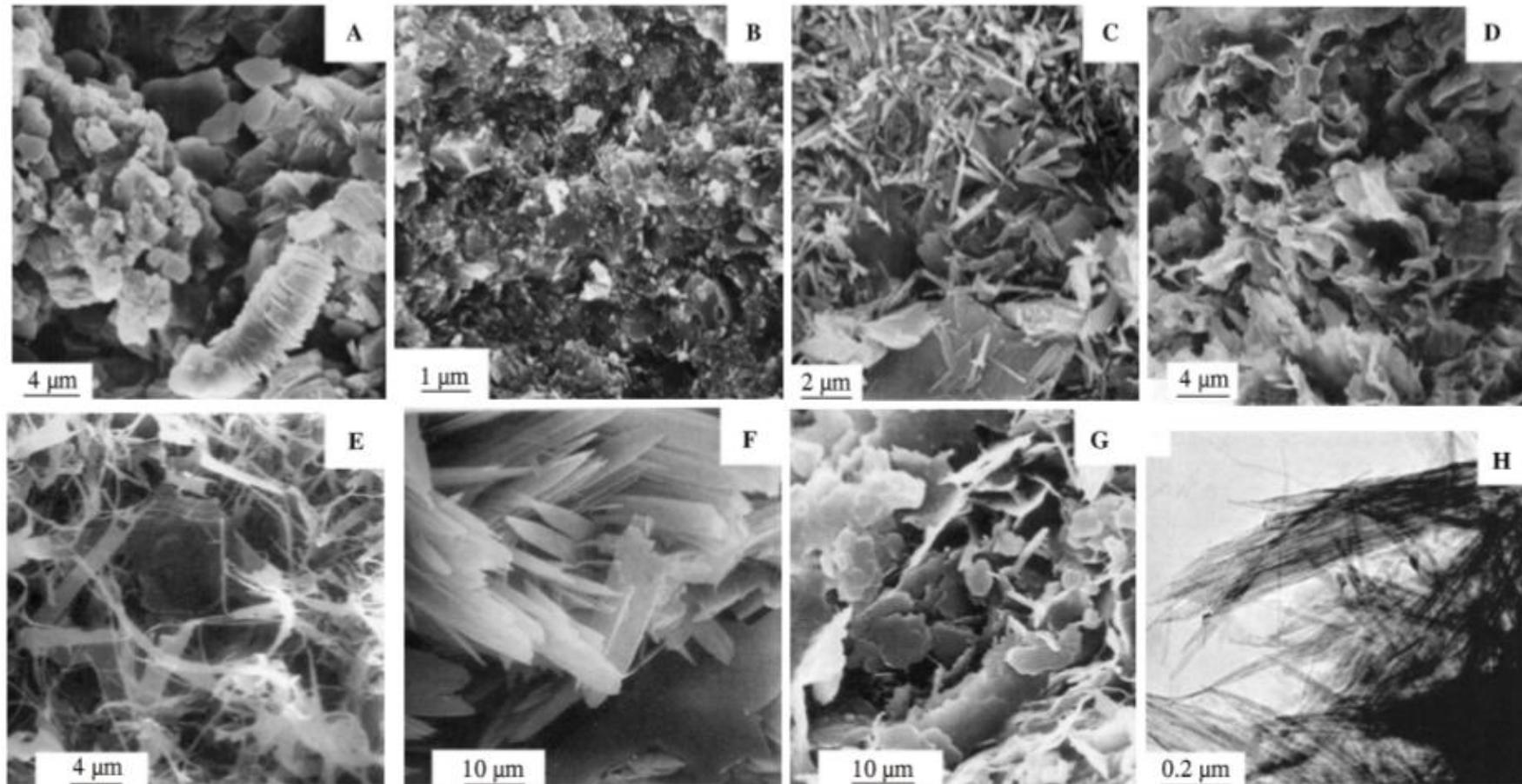


Figura 16 - Fotografia de microscópio eletrônico de variadas partículas e morfologias: (modificado de *Krekeler, 2004*).

A) Caulinita da região de Sasso Itália; (B) Argila de alta qualidade de Gasconade Missouri USA; (C) partículas tubulares de Halosita de Sasso Itália; (D) Esmectita ou Ilita/Esmectita de Sasso Itália; (E) filamentos de Ilita da região dos Países Baixos; (F) Ilita provinda de escavações offshore nos Países Baixos; (G) partículas pseudo-hexagonais de Ilita das escavações offshore no Países Baixos; (H) fibras de palygorskita do sul da Georgia USA. Fonte: (A), (C), e (D) modificado de *Lombardi et al. (1989)*; (B) modificado de *Keller & Stevens (1983)*, e (E), (F) e (G), modificadas de *Lanson et al. (2002)*.

Tabela 4 - Sumário de argilominerais e Características, (modificado de Mitchell 3ª Edição 1996);

Tipo	Sub-grupo	Mineral	Estrutura			Forma	Capacidade de troca de cátions (meq/100gm)	Peso Específico	Superfície Específica (m ² /mg)
			Isomorfos de Substituição	Ligações entre camadas	Espaço Basal				
1:1	Kaolinita	Kaolinita	Pequeno	O - OH - Hridrogênio mais Forte	7.2 Å	6 lados alongados	3 - 15	2.60 - 2.68	10 - 20
		Dickite	Pequeno	O - OH - Hridrogênio mais Forte	14.4 Å	6 lados alongados	1 - 30	-	-
		Nacrite	Pequeno	O - OH - Hridrogênio mais Forte	43 Å	Lados arredondados	-	-	-
		Halosita (desidratada)	Pequeno	O - OH - Hridrogênio mais Forte	7.2 Å	tubular	5 - 10	2.55 - 2.56	-
		Halosita (hidratada)	Pequeno	O - OH - Hridrogênio mais Forte	10.1 Å	tubular	5 - 40	2.0 - 2.2	35 - 70
2:1	Montmorilonita	Montmorilonita	Mg --> Al	O - O Ligação Fraca	9.6 Å	Foleado	80 - 150	2.35 - 2.70	50-120 Primária 700 -840 secundária
		Beidelita	Al --> Si	O - O Ligação Fraca	9.6 Å	Foleado	-	-	-
		Nontronita	Fe --> Al	O - O Ligação Fraca	9.6 Å	Foleado	110 - 150	2.2 - 2.7	-
2:1	Saponite	Hectorite	Mg Li --> Al	O - O Ligação Fraca	9.6 Å	Foleado	17.5	-	-
		Saponite	Mg-->Al, AL--> Si	O - O Ligação Fraca	9.6 Å	Foleado	70 - 90	2.24 - 2.30	-
		Sauconita	Zn --> Al	O - O Ligação Fraca	9.6 Å	Foleado	-	-	-
2:1	Mica	Ilita	Si -->AL	Ións K - Ligação Forte	10 Å	Foleada	10 - 40	2.6 - 3.0	65 - 100
2:1	Vermiculita	Vermiculita	Al --> Si	Ligação fraca	10.5 - 14 Å	Foleada	100 - 150	-	40-80 (Primária) 870 (Secudária)
2:1:1	Clorita	Clorita	Al --> Si camada 2:1 Al --> Mg Entre Cam.	Ligação fraca	14 Å	Foleada	10 - 40	2.6 - 2.96	-

4.2.2 - Identificação dos Argilominerais

4.2.2.1 - Identificação dos argilominerais por Difração de Raios X

Faz-se necessária a identificação dos argilominerais nesta pesquisa para que possamos comprovar a eficiência do condicionamento de solo ao qual se evidencia. Devemos ter a ciência de que determinado material escavado e seu respectivo argilomineral mais ativo respondem ao condicionamento de solos impostos, ou seja, devemos verificar se o mesmo condicionamento utilizado no solo que possui o argilomineral Esmectita, por exemplo, mantém eficiência para o solo que contenha o argilomineral Illita.

Um dos métodos mais utilizados na identificação dos argilominerais é a difração de raios - X. Esta é uma técnica bastante difundida, e justifica-se pela simplicidade do preparo das amostras e pela eficiência com que este método entrega os resultados (Santos,1989). De acordo com Scapin (2003), a composição e as fases cristalinas são parâmetros fundamentais para a caracterização dos solos, sedimentos e argilas. Sendo assim, a difração de raios - X é mais indicada nas determinações das fases cristalinas.

Para Santos (1989), os átomos se ordenam em cristais separados por espaços de mesma ordem de grandeza ou dimensão. Conseqüentemente por terem espaços e dimensões semelhantes, os comprimentos de onda dos raios X que os atravessam tendem a ser o mesmo. Isso de certa forma facilita o uso desta técnica, que além de apresentar vantagens como simplicidade no preparo das amostras, também apresenta e alta confiabilidade nos resultados.

A estrutura cristalina pode ser definida por um grupo de cristais que obedecem a padrões conhecidos. O plano cristalino é definido no espaço por suas intersecções com os eixos cristalográficos. Segundo MacGillavry (1951), essa distância é considerada a distância entre basais das estruturas cristalinas. Na Tabela 5, podemos observar dados cristalográficos de reticulados cristalinos conhecidos (Albers et al., 2002).

Segundo Azároff & Buerger (1958), quando uma estrutura cristalina é exposta a incidência e raios-X, e se as células unitárias da estrutura cristalina estiverem paralelas é produzida uma difração destes raios. Entretanto, o cristal da célula não produz uma imagem difratada, é visto apenas a uma intensificação da difração com o espalhamento do raio-X. Este efeito é o mesmo observado na difração da luz por meio do retículo paralelo. Desta forma resulta que o caminho seguido pela radiação X difratada deve ter o mesmo comprimento para todos os átomos dos planos formadores do cristal (h, k, l) (Santos,1989). Do âmbito da visão física, significa que há uma condição clássica de reflexão, em outras palavras, os raios incidentes são refletidos com determinado ângulo (Θ) (difratados no caso dos raios X). E é por isso que a difração de raios - X por uma estrutura do reticulado cristalino também costuma ser chamada de "reflexão dos raios - X". A ilustração desta difração pode ser observada na Figura 17.

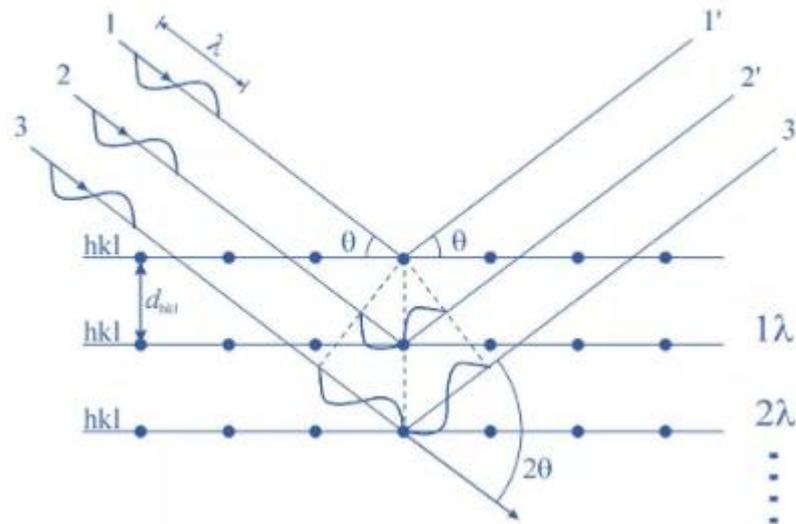


Figura 17 - Difração de raios - X por meio do reticulado cristalino - lei de Bragg, (Adaptado de Santos, 1989)

A sequência periódica com que estes átomos caracterizam este espalhamento da radiação pode ser identificada como planos cristalográficos que produzem um padrão característico do mineral, assim, estes padrões são traduzidos em gráficos específicos. Segundo Klug & Alexander (1974), este processamento de imagens estabelece uma condição que é regida pela lei de Bragg, e que obedece a equação 3.

$$n\lambda_1 = 2 d_{hkl} \text{ sen } \theta_{hkl} \quad (3)$$

Onde:

n = Ordem de difração (normalmente considera-se $n=1$);

λ_1 = Comprimento de onda;

d_{hkl} = Distância interplanar entre arestas dos cristais;

θ_{hkl} = Semiângulo de difração;

Segundo Brindely & Brown (1987), os valores de d_{hkl} , são calculados pelos planos formadores dos cristais (h,k,l -ver Figura 17). Porém antes de utilizar a técnica anteriormente descrita, Azároff & Buerger (1958), afirmam que a distância interplanar basal do plano cristalino poderia ser calculado segundo a equação 4.

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{\left[\frac{h}{a} \begin{bmatrix} h/a & \cos \gamma & \cos \beta \\ k/b & 1 & \cos \alpha \\ l/c & \cos \alpha & 1 \end{bmatrix} + \frac{k}{b} \begin{bmatrix} 1 & h/a & \cos \beta \\ \cos \gamma & k/b & \cos \alpha \\ \cos \beta & l/c & 1 \end{bmatrix} + \frac{l}{c} \begin{bmatrix} 1 & \cos \gamma & h/a \\ \cos \beta & 1 & k/b \\ \cos \beta & \cos \alpha & l/c \end{bmatrix} \right]^{1/2}}{\begin{bmatrix} 1 & \cos \gamma & \cos \beta \\ \cos \gamma & 1 & \cos \alpha \\ \cos \beta & \cos \alpha & 1 \end{bmatrix}} \quad (4)$$

Onde

a, b, c = comprimento de célula unitária na direção desejada (ver Tabela 5);

γ , β e α = ângulos da estrutura cristalina com as demais faces dos cristais formadores (ver Tabela 5);

Atualmente recursos tecnológicos podem ser utilizados para identificação da variável d_{hkl} . A International Union of Crystallography disponibiliza em seus arquivos, documentos em forma de tabelas onde podem ser consultadas as distâncias basais dos reticulados cristalinos dos argilominerais mais conhecidos. Na Figura 18, podemos observar o padrão de gráficos produzido por esta técnica (difração de raios -X) para a identificação das argilas.

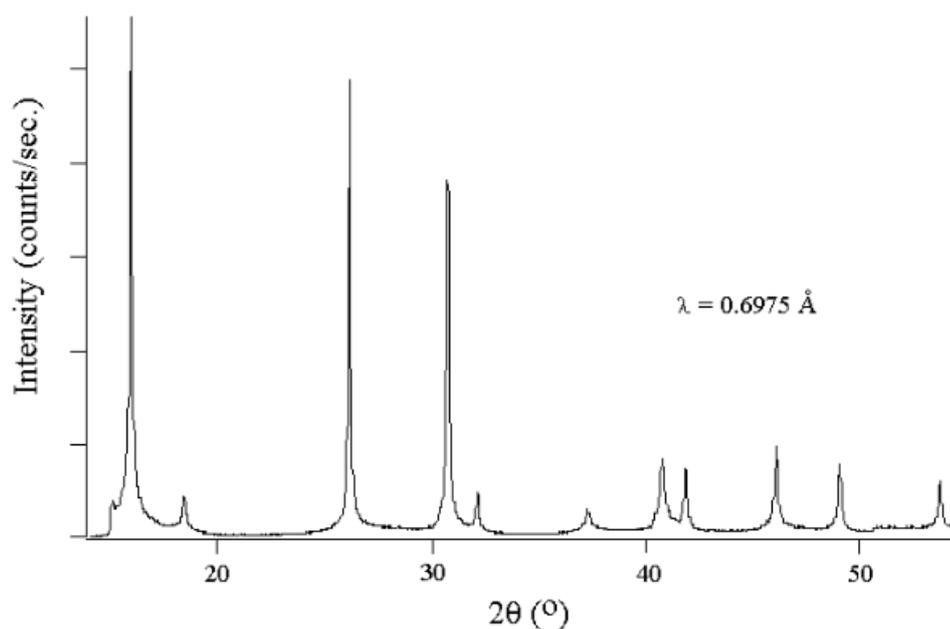


Figura 18: Padrão da caulinita natural, solvatado em etilenoglicol e aquecida a 400 e 550°C (Scarpin, 2003).

A partir dos resultados dos gráficos de cada argilomineral, e com auxílio dos documentos citados acima, são então identificados os argilominerais mais ativos de cada amostra. De acordo com as teorias de Deer et al. (1975), cada argilomineral tem um comportamento de pico a determinada temperatura, como por exemplo: as cloritas têm seus picos entre 14 - 14,4Å, e este domínio não é alterado por saturação iônica ou solvatação com etilenoglicol (amostra é posta em contato com etilenoglicol em recipiente fechado), entretanto, quando aquecida a 550°C, sua intensidade de picos é alterada. Este é simples exemplo que ilustra como se pode constatar que a amostra possui o argilomineral clorita.

Os detalhes do equipamento, e o esquema operacional serão vistos oportunamente no capítulo de materiais e métodos.

Tabela 5 - Dados cristalográficos dos argilominerais - Fonte: Modificado de Santos (1989)

ArgiloMineral	Caulinita		Ilita	Montmorilonita	Vermiculita	Clorita	Sepiolita	Paligorsquita
Sist. Cristalino	Triclínico		Monoclínico	Monoclínico	Monoclínico	Monoclínico	Ortorrômico	Pseudo-ortorrômico
Célula unit.								
a (Å)	5,150	5,139	5,20	5,17	5,33	5,30	13,50	12,90
b (Å)	8,950	8,932	9,00	8,94	9,18	9,20	26,97	18,00
c (Å)	7,390	7,371	20,00	9,95	28,90	14,30	5,26	53,00
Ângulo alfa (α)	91,800	9,160	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00
Ângulo beta (β)	104,500	104,800	95,50	99° 54'	97,00	97,00	90,00	90,00
Ângulo gama (γ)	90,000	89,900	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00
Distância Basal								
(Å)	7,15		9,98	15,5 (variável)	14,4 (variável)	14,0 - 14,4	12,5	10,5
Cor								
	Branca, rosa, creme, azulado, incolor em lâminas delgadas	Branca e outras cores claras, quando teor de ferro é baixo	Branca, amarela e verde	Incolor, amarela e verde	Verde, amarela, branca, rosa e marron	Branca, rosa, amarela-esverdeada	Branca, cinza, amarelada, esverdeada	
Clivagem								
	001	001	001	001	001	001	100	110
Hábito								
	Lamelar, pseudo-hexagonal	Lamelar	Lamelar	Lamelar	Lamelar	Lamelar	Ripiforme e fibrosa	Fibrosa

* *a*, *b*, *c* são distâncias basais de cada face da estrutura cristalina; α , β e γ , são os ângulos formados pelas arestas da célula unitária do reticulado cristalino.

4.3 - Sistemas de Eletrólise Argila-Água

Para Meurer 2004, Buckman & Harry 1974, Batista & Barbas, 2000, o solo é basicamente composto por quatro componentes: minerais, matéria orgânica, água e ar. Estes elementos estão distribuídos diretamente na proporção de: 1) cerca de 30 a 35% de água (condições normais de não saturação); 2) entre 15 - 20% de ar, 3) 45% de minerais, 4) aproximadamente 5% de matéria orgânica. Assim por ver, entendemos que toda a problemática a respeito do tema "aderência de solos argilosos em superfícies", possui relação direta entre os minerais dispersos no solo e fenômeno físico de floculação e dispersão das partículas.

A interação das forças de superfície entre partículas pode mudar o comportamento, que vai desde repulsão, a floculação das partículas. O fenômeno de floculação/repulsão entre as partículas se deve ao equilíbrio eletrostático entre cátions e ânions adjacentes à partícula da argila (Mitchell,1975).

Certamente a distribuição dos íons na superfície, apresenta ligação com a magnitude das forças de adesividade nas superfícies metálicas. Segundo Batista & Barbas (2000), quando se observa uma argila seca, os cátions são atraídos pelas cargas negativas. Estes em excesso na superfície da partícula necessitam ser neutralizados eletronegativamente, isso quando estão associados a sais precipitados. Entretanto, quando esta argila é posta em contato com a água, e sua superfície de contato abriga sais precipitados, a atração formada entre as partículas é diminuída. De certa forma, essa teoria ao de encontro de vasto uso de água no combate ao clogging.

Nas partículas coloidais predominam as cargas negativas. De acordo com Meurer (2004), quando as cargas negativas geram forças predominantemente repulsivas, o sistema está majoritariamente disperso. Para Lambe (1958), as forças de repulsão são atribuídas à interação da dupla camada iônica que envolve as partículas. Segundo Delavi (2011), devidos ao número contra-íons dispersos na superfície das partículas, eles se mantêm rigidamente fixos formando a chamada camada de Stern ao seu redor, como indicado na Figura 19. As limitações espaciais não são capazes de neutralizar totalmente as cargas superficiais da partícula. Apenas pode reduzir linearmente o potencial elétrico (ψ_0) da superfície da partícula para o denominado de potencial de Stern (ψ_δ).

O potencial de Stern também é capaz de atrair cargas para a região da partícula, devido ao efeito repulsivo dos íons de mesma carga e que encontram próximos à região carregada eletricamente. A concentração de contra-íons da camada de Stern é reduzida suavemente por conta da distância, originando o que podemos chamar de camada difusa. A diferença de potencial que existe entre a camada difusa e a dispersão é chamada de potencial zeta (ζ) e pode ser determinada experimentalmente (Hotza ,1997).

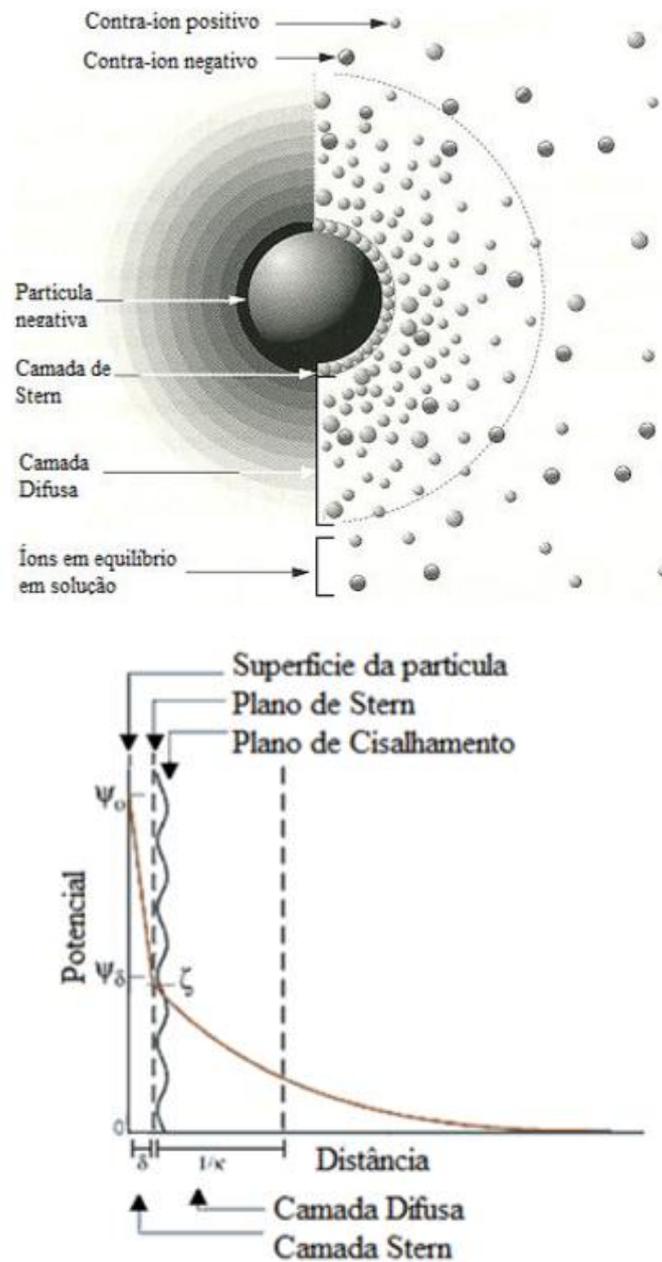


Figura 19 - Partículas coloidais esféricas estabilizadas eletrostaticamente (Reed, 1995).

Para Cotton et al. (1999), é preciso que as cargas elétricas sofram possível bloqueio/interferência para que a dispersão seja efetiva. A espessura da dupla camada é extremamente importante neste processo de dispersão, pois quanto mais espessa a camada difusa, menor é a tendência das partículas encontrarem-se no estado de floculação. Segundo Raji & Peech (1972), quando o pH é elevado acima do ponto de carga zero ($\text{pH} > 7$), há um incremento na repulsão entre as partículas, ver Figura 20.

Atualmente, os dispersantes mais utilizados nos laboratórios geotécnicos brasileiros são o hexametáfosfato de sódio e o carbonato de sódio. Estes componentes químicos são utilizados para dispersão da fração argila em ensaios granulométricos. Entretanto, para

situações mais dinâmicas como escavações subterrâneas mecanizadas sua eficiência não é atrativa, pois os dispersantes citados acima demandam tempo elevado (12 horas em média) para que se ocorram as reações químicas necessárias. É necessária mistura em altas velocidades (uso agitador mecânico) para que possa ocorrer à dispersão, o que não é uma realidade nas câmaras de escavação das tuneladoras.

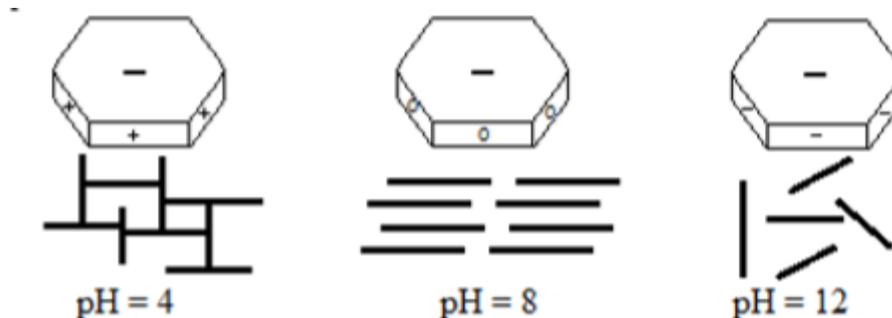


Figura 20 - Tipo de interações entre partículas de argila para diferentes pH da suspensão (Pozzi & Galassi, 1994)

As hidroxilas das partículas de argila apresentam uma tendência de associar-se, e estas são fortemente modificadas pelo pH do solo. A maioria das argilas possui o elemento químico *Si*, o efeito deste mineral associado com a água contribui para a formação das hidroxilas aumentando negativamente as cargas da partícula. Isso pode ser visualizado na equação 5 (Mitchell, 1975).



Quando o pH é considerado básico, está acima do ponto de equilíbrio zero, ou seja, $pH = 7$ ($pH > 7$, é básico - baixa concentração de H^+). Consequência desta variação de pH é que temos elétrons livres entre as camadas da partícula. De acordo com Raji & Peeck (1972), o pH desenvolve função importante no comportamento das argilas, e frequentemente estas variações de H^+ , influenciam tanto na dispersão das argilas, quanto na floculação. Segundo Verwey & Overbeek (1948), o potencial de distribuição entre as interações das duplas camadas, pode ser calculado através da energia das forças eletrostáticas. Neste sentido, para que se possam quantificar a energia de repulsão entre as partículas a equação 6 pode ser usada.

$$V_R = 2(F_d - F_\infty) \quad (6)$$

Onde:

V_r = Energia de Repulsão (Joules);

F_d = Energia livre da dupla camada por unidade de área (Joules/m²);

F_∞ = É a energia livre da interação da dupla camada (Joules).

Para Mitchell (1994), a força de repulsão depende da diferença da pressão osmótica e do número de íons livres na região. Em outras palavras, o valor das forças de repulsão considerando a influência da pressão osmótica pode ser obtido através da equação 7.

$$p = 2nokT(\cos(u) - 1) \quad (7)$$

Onde:

p = Pressão osmótica

no = Concentração da solução (mol/L)

T = Temperatura absoluta em grau Kelvin;

k = Constante da camada difusa.

u = É uma função do potencial dielétrico da partícula em função área de superfície (ver equação 08).

$$\int_z^u (2 \cosh(y) - \cosh(u))^{-\frac{1}{2}} dz = \int_0^d d\varepsilon = -Kd \quad (8)$$

Onde:

k = Constante da camada difusa;

d = Distância basal entre as partículas (mm);

De acordo com Mitchell (1994), as forças de atração são potencializadas sempre que a predominância das cargas adjacentes à camada difusa é alterada positivamente. Segundo London (1937), a teoria da energia de atração entre os pares de partículas é estendida quando é assumida a interação entre as placas de argila. Já para Casimir & Polder (1948), a energia de atração pode ser quantificada pela equação-9.

$$V_A = -\frac{A}{48\pi} \left[\frac{1}{d^2} + \frac{1}{(d + \delta)^2} - \frac{2}{(d + \frac{\delta}{2})^2} \right] \quad (9)$$

Onde:

V_A = Energia de atração (Joules)

A = Constante de Hamaker (ver Tabela 6).

d = Distância basal entre as partículas (mm);

δ = Espessura média das placas de argila (mm);

Para Moore & Mitchell (1974), o resultado obtido da Teoria de Casimir-Polder que calcula a energia de atração não é exato. Entretanto, oferece boa aproximação para as

partículas menores que 100 nm (1000 Å). A fim de resumir de forma gráfica as relações entre as forças de repulsão e atração das partículas de argilas, observaremos o gráfico da Figura 21.

Tabela 6 - Constante de Hamaker, (modificado de Casimir & Polder, 1948)

Material	δ (Joules)
Caulinita	2,50E-20
Ilita	2,2E-20
Montmorilonita	1,63E-20

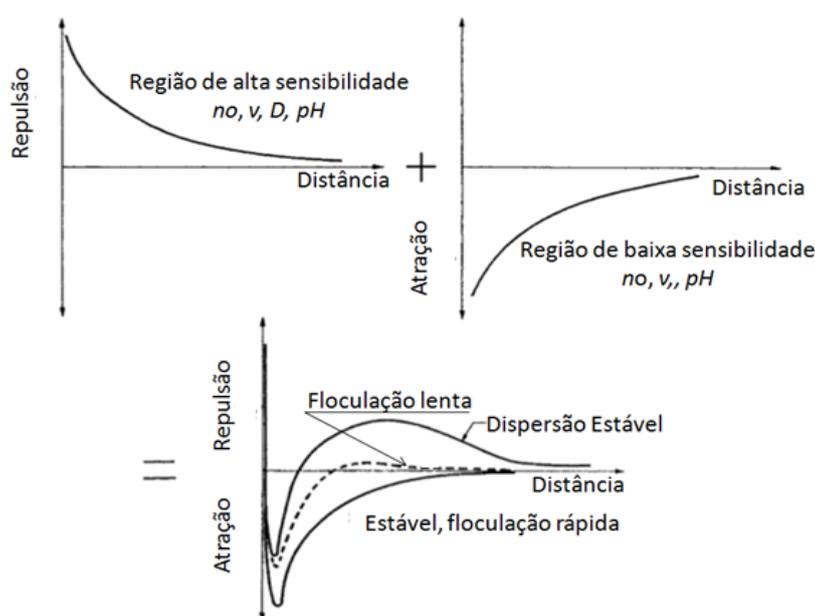


Figura 21 - Energias de repulsão, atração, e curvas de rede de interação das placas paralelas de argilas (Adaptado de Mitchell, 1994).

Como citado anteriormente, as forças de repulsão e atração, têm relação direta com os elétrons livres na superfície das argilas, e estes podem ser modificados com alteração da alcalinidade dos solos. Ou seja, a capacidade de troca das cargas H^+ , tem influência significativa no fenômeno de repulsão e floculação das partículas. Atualmente o uso de eletricidade tem sido amplamente difundido nas técnicas de melhoramentos de solos, e são facilmente encontrados na literatura casos de compactação de solos via a técnica de eletro-osmose.

De acordo com Chew et al. (2004) e Ritirong et al. (2008), resultados positivos são encontrados após a aplicação de uma corrente elétrica (corrente contínua CC) na consolidação de solos moles juntamente com variações do pH. Segundo seus estudos o efeito apresenta melhorias significativas. Eles demonstram que quando realizadas variações no pH ($pH < 7$) do solo conjuntamente com a aplicação da corrente elétrica (C.E), houve um enrijecimento da amostra de solo e aumentos significativos na resistência ao

cisalhamento foram constatados. Na Literatura também podem ser encontrados efeitos de desagregação de solos com uso de correntes elétricas. Segundo Yotara (2013), "separação por eletro-osmose" pode ser alcançada mediante aplicação de voltagens entre 100 e 300 volts (V), concluindo que separação dos solos por meio desta técnica torna-se cara e de difícil aplicação em engenharia.

Para Ren et al., (2001), testes de desagregação de argilas via técnica de eletro-osmose em solos a baixo custo e utilizando correntes elétricas de baixa intensidade foram realizados. Alguns pesquisadores obtiveram resultados positivos após aplicações de corrente contínua de 12V. De acordo com Ren et al. (2001), os testes foram realizados em uma réplica de concha de escavadeira, a peça possuía cerca de 5244,03 cm² de área contato. O tempo de exposição à corrente elétrica foi de 30 segundos.

Foram obtidos bons resultados em relação a melhorias dos solos quanto ao enfraquecimento da adesão. No solo em questão, os principais argilominerais eram caulinita e ilita. O principal meio propulsor da dispersão das partículas foi o etanol. Houve desagregação parcial do solo, e ligeira eficiência quando combinadas as técnicas de aplicação do eletrólito (etanol) com a corrente elétrica. Acredita-se que o eletrólito promoveu facilidades na troca de íons livres na superfície das partículas, colaborando assim para a desagregação do solo (Spagnoliet al., 2010).

4.4 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS SOLOS

Para Flores (2014), a resistividade elétrica dos solos resume-se na dificuldade que o solo oferece a um determinado fluxo de corrente elétrica. Neste trabalho, a determinação deste parâmetro é de fundamental importância. Segundo Modena & Sueta (2011), o solo tem uma composição bastante heterogênea, e seus valores da resistividade podem variar de local para local. A variação da resistividade elétrica também tem a ver com o tipo do material (argila, calcário, areia, granito, etc.). Outros pontos que também influenciam nesta variável é a profundidade das camadas, a idade da formação geológica, a temperatura, a salinidade e outros fatores naturais. Segundo a literatura, todas estas variáveis atuam de forma a aumentar a resistência dos solos perante a passagem da corrente elétrica. Desta forma, é facilmente compreensível que um solo compactado deve oferecer mais resistência a corrente elétrica, do que um solo em seu estado natural. Semelhante à condutividade hidráulica, a condutividade elétrica que um solo pode oferecer está intimamente relacionada com o índice de vazios (e) deste material. A resistividade pode ser calculada de acordo com a equação 10.

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (10)$$

Onde:

R = Resistência (Ω);

L = Comprimento (m);

S =Área (m^2);

ρ =Resistividade ($\Omega.m$).

Em resumo podemos dizer que a condutividade elétrica pode ser traduzida como a facilidade da corrente elétrica ao atravessar o meio, enquanto que a resistividade elétrica é a oposição que o meio oferece a passagem da corrente elétrica. De acordo com Mitchell (1994), a condutividade elétrica entre as partículas de solo é melhorada devido a quantidade de elétrons livres na superfície das partículas, do que quando comparadas a solos eletricamente equilibrados. Ao encontro com as teorias de Waxman & Smits (1968), o resultado da condutividade elétrica dos solos pode ser representado pela equação 11.

$$\sigma_t = X(\sigma_w + \sigma_s) \quad (11)$$

Onde:

σ_t = condutividade elétrica total do material;

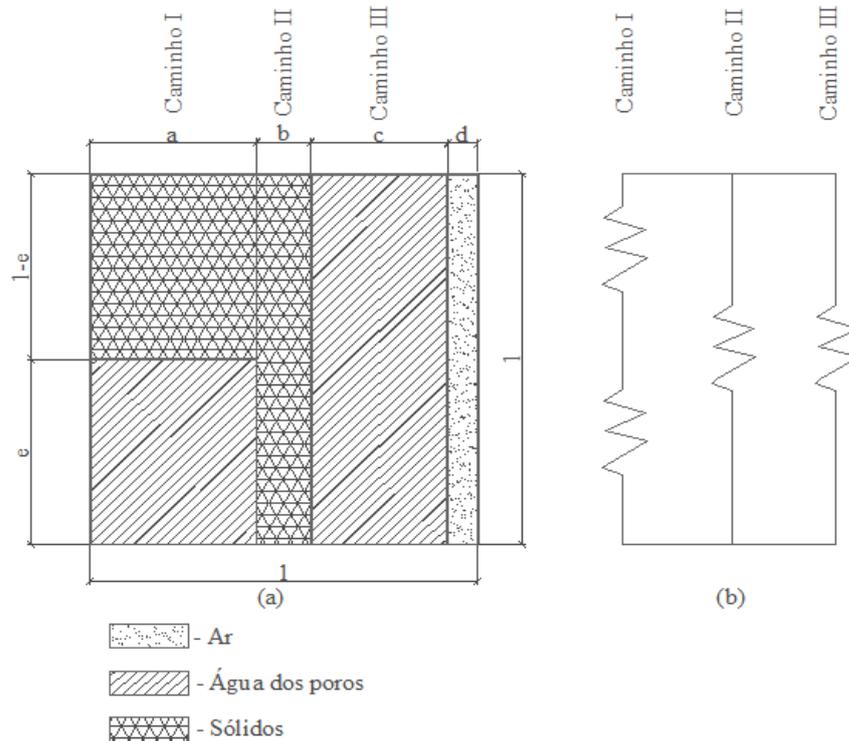
σ_w = condutividade elétrica da água;

σ_s = condutividade elétrica da superfície das partículas, e

X = constante de proporcionalidade representada pela forma do meio condutor.

Para Lago (2009), a propagação da corrente elétrica em maciços de solos estratificados pode ocorrer de formas diferentes. Parte da diferença é norteadada pela condutividade elétrica que os solos possuem naturalmente, e a outra diferença se dá em relação à condutividade eletrolítica do meio na qual o solo está inserido (umidade, salinidade, alcalinidade do meio). Modena & Sueta (2011), reafirmam esta teoria citando: "O solo é geralmente composto por diversas camadas, sendo que cada uma delas apresenta um valor de resistência proporcional a sua espessura."

Segundo Mitchell (1994), para se determinar a condutividade elétrica dos solos, é importante conhecer qual é o caminho preferencial do trecho por onde pode passar o fluxo das correntes elétricas. Para o melhor entendimento do caminho realizado pela corrente elétrica no meio condutor (o solo, vazios e água), faz se necessário a visualização da Figura 22.



$a, b, c =$ dimensões da amostra.

Figura 22 - Elementos e caminhos para corrente elétrica, (a) - caminhos de corrente de fluxo, (b) - circuito elétrico equivalente (adaptado de Mitchell (1994)).

Neste sistema, o fluxo da energia que passa pelo solo pode ser associado a um circuito elétrico equivalente. A condutividade elétrica do meio pode ser representada pela equação (12). Nos solos argilosos a condutividade elétrica média está entre $0.3 \Omega/m$ para $0.6 \Omega/m$, Mitchell (1994).

$$\sigma_T = \frac{a\sigma_w\sigma_s}{(1-e)\sigma_w + e\sigma_s} + b\sigma_s + c\sigma_s \quad (12)$$

Onde:

$\sigma_t =$ Condutividade elétrica total do material;

$\sigma_w =$ Condutividade elétrica da água;

$\sigma_s =$ Condutividade elétrica da superfície das partículas;

$e =$ Índice de vazios;

$a, b, c =$ dimensões da amostra;

Segundo Arulandan & Smith (1981), os valores da condutividade elétrica dos solos são demasiadamente diferenciados, ainda que os resultados fornecidos pelas bases empíricas apresentem boas aproximações dos ensaios laboratoriais práticos.

4.4.1 - Fatores que Influenciam a Resistividade dos Solos

Para o IEEE (2000), o fator umidade é tido como principal redutor da resistividade do solo. Estudos mostram que a partir de 15% de umidade a resistividade decresce abruptamente. Segundo Flores (2014), além da umidade, fatores como sais dissolvidos na água e temperatura dos solos influenciam de maneira contundente este parâmetro. A seguir faremos breves comentários sobre os parâmetros físicos mais comuns, e suas respectivas formas de influência na resistividade dos solos.

- **Tipo de Solo** - Os solos não são materiais homogêneos, desta forma não há como atribuir um valor fixo e exato de resistividade. De acordo com Pinto (1996), OBO (2012), os parâmetros variam de acordo com condições de saturação, tipo de solo entre outros. Na Tabela 7, podemos observar este dado.

Tabela 7 - Resistividade dos terrenos de acordo com a sua natureza - Fonte: Modificado de Flores (2014)

<i>Natureza dos terrenos</i>	<i>Resistividade ($\Omega.m$)</i>
Terreno Pantanoso	1 a 30
Lama	20 a 100
Húmus	10 a 150
Turfa úmida	5 a 100
Argila plástica	50 a 500
Mármore e argilas compactas	100 a 200
Mármore Jurássicos	30 a 40
Areia Argilosa	50 a 500
Areia Siltosa	200 a 3000
Granito muito alterado	100 a 600

- **Grau de compactação do solo** - Quanto maior o grau de compactação dos solos menor é o índice de vazios, e maior é o grau de conectividade entre as partículas. Desta forma a continuidade e propagação da corrente elétrica são reduzidas devido à resistividade do meio, (Flores, 2014).
- **Granulometria do Solo** - O solo é composto de vários grãos de dimensões variadas, mais especificamente nos grãos menores há um maior potencial de reter água e também há uma maior continuidade física. Quanto mais variada a granulometria, maior será a resistividade, pois os grãos menores tendem a ocupar os vazios entre os grãos maiores (Visacro,2002).
- **Estrutura geológica** - Segundo o IEEE (2000), apesar de muitas vezes esta variável ser desprezada, cada substrato pode apresentar diferentes resistividade. Essas diferenças podem estar ligadas à matriz rochosa, anisotropia e a salinidade que cada camada possui.

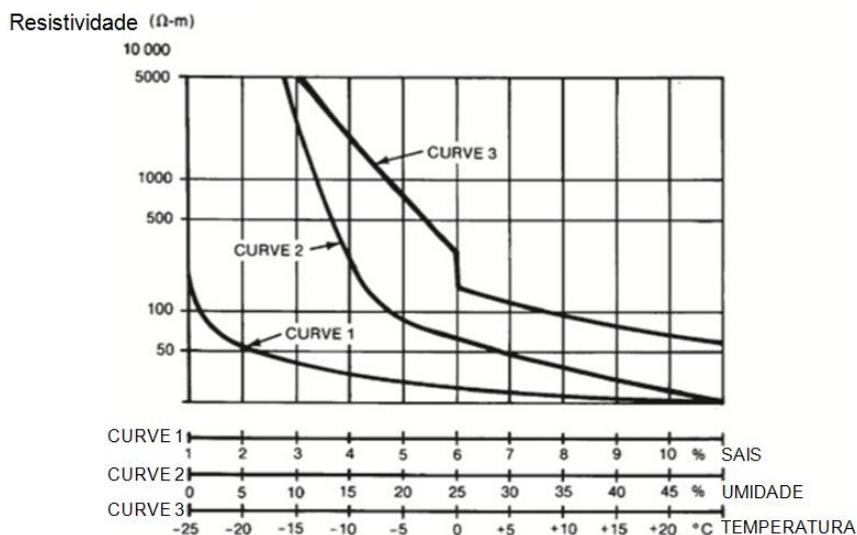


Figura 23 - Efeito da umidade, temperatura e sais dissolvidos na água na resistividade dos solos (Adaptado de IEEE, 2000).

4.4.2 - Métodos de Quantificação da Resistividade

A quantificação da resistividade dos solos deve ser realizada com propósito de obter um sistema elétrico proporcional e equivalente. É preciso obter um conjunto de diferentes medidas das quais resultam tais modelos (Flores, 2014). Dentre os métodos convencionais temos: a medição por amostragem e a medição local. Neste trabalho, por se tratar de um estudo de um solo que já se encontra escavado na câmara do TBM-EPB, não há sentido em realizar outro tipo de quantificação que não seja por amostragem. Segundo Schettinni (2016), os solos argilosos em determinadas umidades (variando desde seco a totalmente saturado) em suas camadas mais superficiais apresentam resistividades aparentes que variam entre 20 a 1084 Ω.m.

O caminhar da corrente elétrica nos corpos de solo acontece de maneira desuniforme. Nos substratos rochosos o caminhar da corrente se dá através da porosidade e das fraturas. Já para os solos, o caminhar da corrente tende a ser mais pronunciado através dos meios eletrolíticos (água, ou meio que contém elétrons livres). Nos ambientes, onde a drenagem dos solos não ocorre de maneira efetiva, a corrente elétrica acontece de forma mais pronunciada, (Lago, 2009 e Gandolfo, 2007).

Gandolfo (2007), afirma que os métodos de medidas da eletrorresistividade dos solos não apresentam grandes dificuldades, pois consistem em empregar uma fonte geradora de corrente (corrente contínua), que é introduzida na superfície de solo através de um par de eletrodos. Assim é lida a diferença de potencial entre os dois eletrodos. De acordo com Modena & Sueta (2011), através das amostragens de solos, ainda podemos realizar estas medidas por vários métodos, sendo que os três mais usados estão listados a seguir:

- Método da variação da profundidade;
- Método dos dois pontos;
- Método dos quatro eletrodos.

Para esta pesquisa o método mais indicado para quantificar a resistividade dos solos é dos dois pontos. Os detalhes de execução destas medidas estão descritos a frente no capítulo de materiais e métodos. Na equação 13, podemos verificar a forma de cálculo deste parâmetro e seus respectivos auxiliares.

$$\rho_{2e} = \frac{R_m \pi \cdot L}{\ln \frac{2L}{r}} \quad (13)$$

Onde:

ρ_{2e} = Resistividade média entre 2 eletrodos ($\Omega.m$);

R_m = Resistência medida (Ω);

L = Profundidade de cravação (m);

r = Raio dos eletrodos.

Segundo Schettini (2016), a maioria dos minerais que compõem os solos da crosta terrestres são isolantes elétricos. No comércio de materiais e componentes elétricos há muitos dispositivos usados como isolantes elétricos que são feitos de peças cerâmicas, Estes materiais têm sua base principal fundamentada na matéria prima argila. Desta forma, fica evidente que as argilas não são bons condutores elétricos, devemos então proporcionar meios para que os eletrólitos dispersos em meio as argilas possam facilitar a propagação de corrente elétrica neste material.

4.5 - Dispersantes Químicos de Argilas (NaOH)

É de interesse de diversas áreas da engenharia desagregar o solo para diversos fins. Na Engenharia Civil, há interesses no uso do solo como material de construção, matéria prima para fabricação de materiais (tijolos), revestimentos entre outros.

Nos solos com teores significativos de partículas finas ($< 2\mu m$), para se verificar a distribuição granulométrica dos grãos é preciso, além do preparo e procedimentos sugeridos pela NBR 7181/84, o uso de dispersantes químicos para auxiliar no processo de desagregação das partículas na fase de sedimentação. Estes dispersantes tem função de enfraquecer as ligações entre as partículas coloidais e facilitar assim a sedimentação dos grãos (Cunha et al.,2014).

Baseado nos estudos mais recentes espera-se realizar a aplicação da corrente elétrica somada ao agente químico (NaOH). Este será o propulsor da troca de H^+ , na superfície das partículas dos solos argilosos. Neste sentido, espera-se que a corrente elétrica potencialize as forças de repulsão entre as partículas, e que através deste fenômeno físico se possa diminuir o poder de adesão destes materiais nas superfícies metálicas.

Segundo Kilmer & Alexander (1949), a estabilidade de uma suspensão contendo argilas depende da hidratação das partículas de solo. Tanto a floculação quanto a dispersão são inteiramente dependentes do potencial do dispersante utilizado para alterar propriedades da partícula. De acordo com Nakayama (1966), a dispersão de solos através de diferentes agentes químicos ($NaCl$, Na_2SO_4 e Na_2CO_3 e $(Na_2PO_3)_6$) apresenta grande efetividade nas argilas. Já os agentes químicos ($NaCl$, Na_2SO_4), resultaram em floculação da suspensão. Estes estudos reafirmam a teoria empírica sobre as alterações dos parâmetros químicos, e o que eles podem alterar no processo de floculação/dispersão. Nestes últimos estudos apresentados, sabe-se que o pH final das amostras se encontrava deslocado para direção dos ácidos (pH < 7).

Para Mauri (2008), é percebido que as cargas das partículas de argilas apresentam íntima relação com a alcalinidade do meio. Nestes casos, a dispersão será facilitada por valores de pH superiores àqueles do ponto de carga zero (pH = 7). Assim (pH > 7), eleva-se a proporção de cargas negativas dependentes da alcalinidade do meio.

Percebe-se que a técnica de dispersão das argilas através dispersantes químicos, é um tema que já foi amplamente discutido e possui conhecimentos sólidos sobre o quanto o efeito dos eletrólitos na superfície das argilas pode contribuir para floculação/dispersão das suspensões, e como se mantém essa relação com o pH. Segundo Cunha et al. (2014), não há uma unanimidade nos laboratórios brasileiros quanto o uso de um dispersante específico e mais apropriado para realização da desagregação das partículas.

Para Mauri et al. (2011), o hidróxido de sódio ($NaOH$) se mostrou como dispersante mais efetivo quando comparado ao hidróxido de lítio ($LiOH$). Esta resposta pode estar atrelada a ligações covalentes por parte do lítio. Cotton et al. (1999), atribui a estes resultados um possível bloqueio das cargas elétricas negativas do complexo mecanismos de troca de íons livres que ocorrem na superfície das argilas.

Nos solos argilosos o pH geralmente está deslocado para a região ácida (pH < 6), fruto do intemperismo químico forte que atua nas regiões com altos índices pluviométricos e clima quente. Segundo Vitorino et al. (2003), nestes materiais há predomínio de argilominerais 2:1 como as esmectitas (Cunha, 2013). De acordo com Embrapa (1997), neste caso o hexametáfosfato de sódio e o NaOH apresentam bons resultados. Cunha (2014), ao realizar experimentos de dispersão em argilas da região nordestes afirma que nenhum outro dispersante químico igualou os resultados obtidos no uso do NaOH.

Segundo Camargo et al. (2009), quando se percebe alto poder de adesividade das partículas de solos, é comum optar pela mistura dos dispersantes químicos. Em seus estudos, a mistura entre o NaOH e o hexametáfosfato de sódio, conduziram bons

resultados de dispersão das argilas, salvo em casos em que houve tempo reduzido de agitação entre o dispersante e os solos em questão.

No caso específico de estudo de condicionamento de solos argilosos na busca do desempenho e da eficiência das tuneladoras, será indispensável o uso de dispersantes químicos para auxiliar no processo de enfraquecimento das ligações que ocorrem na superfície das argilas, para tal, pretende-se usar o NaOH, que se mostrou com eficiência superior a vários outros produtos nos solos argilosos. O NaOH atuará em dupla função:

- Auxiliar na dispersão as argilas;
- Alterar o pH do material escavado.

4.6 - Importâncias dos indicadores de condicionamento no EPB

De maneira geral, os testes realizados em campo para verificação do condicionamento de solo devem ser rápidos e de simples execução. Exemplo disso, podemos citar o abatimento de cone e medidas de densidade do material condicionado. Os indicadores periféricos de um bom condicionamento dos solos são medidos pela capacidade que o material apresenta ao fluir pelo parafuso sem fim. Esta característica é função da trabalhabilidade e da densidade adquirida no condicionamento.

4.6.1 - Testes de Abatimentos de Cone (*Slump Test*)

Na evolução e controle da área de condicionamento de solos, alguns testes usualmente aplicados em outras áreas do conhecimento (concreto) foram importados para a geotecnia com propósito de quantificar a trabalhabilidade e a consistência do material (Gharahagh et al., 2014). No Brasil o teste de abatimento de cone (Slump test) é regulamentado pela NBR NM 67/98. No caso do uso deste teste para fins de condicionamento de solos, adota-se o mesmo padrão abordado pela norma regulamentadora (NBR NM 67/98). Na Figura 24, é possível observar o cone principal do ensaio.

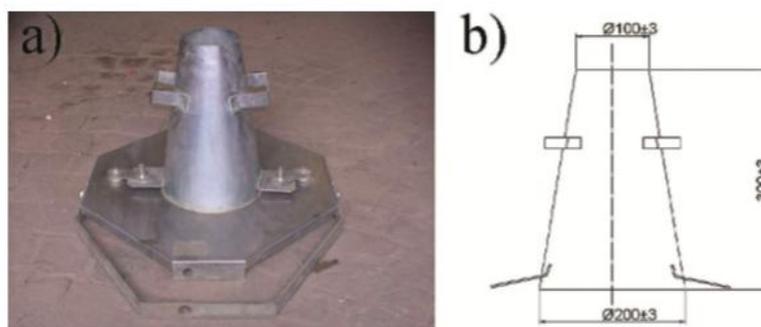


Figura 24 - (a) Foto do equipamento (b) medidas principais do cone, dimensões (mm), (Peila et al., 2009).

Segundo Peila (2014), este procedimento permite avaliar se as quantidades da mistura entre solo e agentes condicionantes estão adequadas ao atendimento dos requisitos necessários na escavação em modo EPB. Quebaud et al. (1998), após conduzir testes em areia de baixa permeabilidade e uso de condicionantes do tipo espuma, concluíram que para solos granulares finos o abatimento máximo do slump test seria próximo a 12cm. Já para Vinai (2006), a trabalhabilidade ótima nas escavações significa abatimentos de cone entre 16 e 21 cm para os mesmos materiais. De acordo com Peila et al. (2009), os abatimentos entre 15 e 20cm costumam ser considerados adequados para que se tenha uma boa escavação no modo EPB. Já para Peron & Marcheselli (1994), Jancsecvz et al. (1999), Langmaack (2000), os valores de abatimento de cone para as escavações EPB deve estar entre o domínio de 10 a 25cm, sejam eles solos granulares ou solos coesivos. Ver Figura 25.

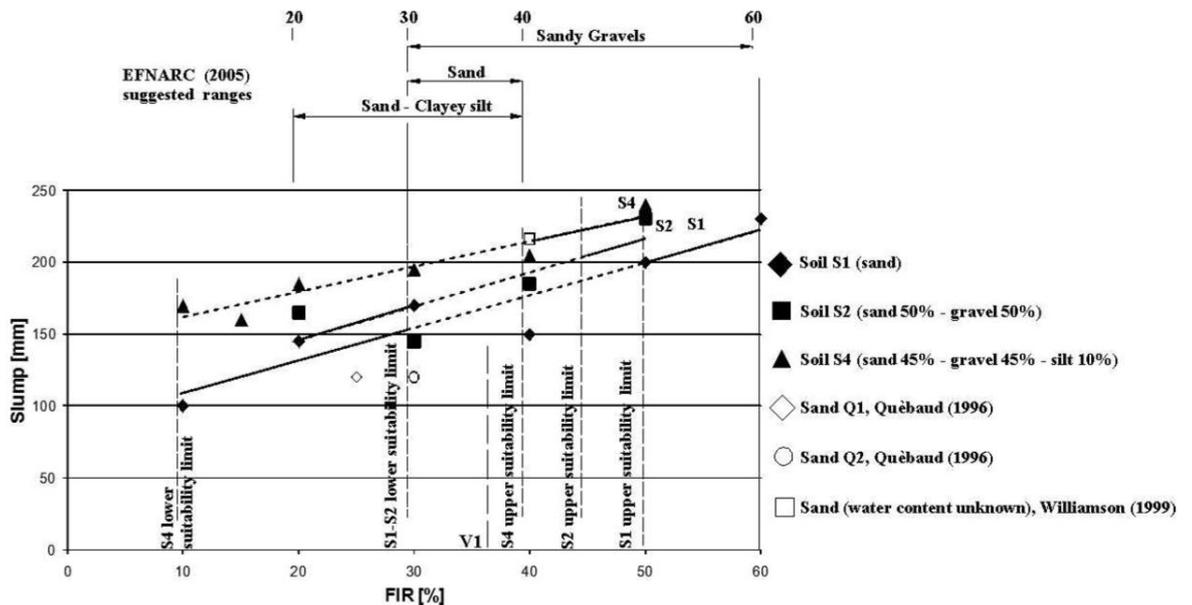


Figura 25 - Estudos de Slump test em solos arenosos, com vistas no melhoramento do condicionamento de solos para escavações mecanizadas via TBM-EPB (Peila et al., 2009)

4.6.2 - DENSIDADE DO MATERIAL CONDICIONADO

A densidade do material escavado no interior da câmara assume grande importância no modo de escavação EPB. Segundo Herrencknecht & Rehm (1999), para cada tipo de escavação mecanizada existe uma faixa de trabalho em termos densidade dos materiais. Esta variável pode influenciar no rendimento das escavações, pois quando a câmara de escavação se encontra demasiadamente cheia, parte da energia da roda de corte é não aproveitada por conta desta carga excessiva. Além da eficiência do equipamento principal (Tuneladora), também é necessário que o material condicionado atinja os padrões mínimos de transportabilidade (densidade e trabalhabilidade), para que os equipamentos que são responsáveis pelo escoamento de materiais produto da escavação sejam utilizados

corretamente. Há uma grande preocupação com estes equipamentos, pois sem um bom funcionamento destes, a escavação precisa ser interrompida.

De acordo com Maidl et al. (2012), o domínio clássico para uma boa faixa de trabalho em escavações do tipo EPB, é quando o material de escavação possua densidades entre 16 a 20 kN/m³. Já para outros modos de escavação este domínio segue outras orientações. No caso de escavações em modo Hydro-Shield, a densidade do material deve estar entre 11 e 14 kN/m³. Segundo Stahl et al. (1984), no caso de materiais com densidade abaixo do limite inferior (16kN/m³), apresentam-se consistências demasiadamente fluídas e comportamento desordenado ao sair pelo parafuso sem fim. Este comportamento causa oscilações de pressões significativas na câmara de escavação (> 5%), e submete o maciço a carregamentos cíclicos.

Outro problema associado aos materiais escavados com densidade abaixo do limite inferior é que: o limite máximo para que um material tenha condições de ser transportado por bombas é ter densidade específica máxima de 14 kN/m³, Herdina (2008), Maidl (2011), (Figura 26). O material que esteja próximo a este limite, terá grandes problemas ao ser transportado pelas correias transportadoras. Entre eles podemos citar derramamentos em curvas, aclives, gerando transtornos ao longo do túnel. Outro problema que se relaciona com a densidade do material é a baixa eficiência do material ao ser transportado até o local de descarte final.



Figura 26 Estudo de condicionamento de solos para escavação EPB (Ball *et. al.*, 2009).

Segundo Wehrmeyer (2007), para os materiais escavados que apresentem densidade específica acima do limite superior (20 kN/m³), outros problemas de transportabilidade são relatados, entre eles temos o travamento do parafuso sem fim, problema comum e bastante frequente quando o material apresenta alto coeficiente de atrito e baixa trabalhabilidade. A grande dificuldade de se solucionar este problema, é que o parafuso sem fim na maioria dos casos está pressurizado e abriga quantidades significativas de materiais. Então em

alguns casos despressurizar o parafuso sem fim, significa despressurizar a frente de escavação.

De acordo com a British Tunnelling Society (2005), os materiais rochosos devem ser escavados em modo aberto (open mode), a menos que se esteja executando escavações em rochas especiais (sedimentares, evaporíticas) com densidade ligeiramente superior a 20 kN/m³. Neste modo de escavação os fabricantes recomendam que o preenchimento da câmara de escavação seja menor ou igual à metade do volume total, isso para que não haja uso de torques excessivos do equipamento. Assim, se torna facilmente compreensível a importância do controle de densidade dos materiais escavados. Os materiais escavados com densidade acima de 20 kN/m³ podem causar danos mecânicos ao equipamento (Maidl et al., 2012).

5. Materiais e Métodos

Para que o objetivo final desta pesquisa seja cumprido estão descritos os materiais e metodologias empregados durante o trabalho. A Figura 26 apresenta todas as etapas do trabalho, que serão melhor descritas a seguir.

Inicialmente é preciso fragmentar todo o trabalho em passos experimentais, que quando somados nos fornecem dados para formar opinião crítica sobre o tema proposto. Para entender melhor o comportamento deste material é preciso verificar as condições geotécnicas e enumerar os seguintes passos:

- Coletar amostras de solos argilosos, com percentagem elevada da fração de finos;
- Caracterizar geotecnicamente estes materiais, através de testes laboratoriais para verificar se estes solos argilosos apresentam potencial quanto ao desenvolvimento do efeito clogging;
- Classificar o solo segundo os critérios desenvolvidos por Casagrande, uma vez que os índices de plasticidade são de extrema importância nesta pesquisa;
- Caracterizar os solos quanto a sua capacidade de condução de corrente elétrica. Este dado se faz necessário, pois um dos propósitos desta pesquisa é verificar se a corrente elétrica promove alguma melhoria no enfraquecimento do poder de aderência dos solos argilosos às superfícies metálicas.

- Identificação do argilomineral mais ativo de cada amostra, de forma a poder atestar que o condicionamento dos solos para escavação mecanizada em modo EPB é efetivo para os argilominerais aqui identificados;
- Quantificar o pH do solo em seu estado saturado, e verificar seu comportamento após as adições do dispersante de argila NaOH;
- Quantificar quais serão as melhorias que o condicionamento do solo realizado com a adição de água, NaOH e eletricidade pode trazer em relação ao combate do efeito clogging nas escavações mecanizadas.

E por fim, analisar os resultados obtidos de forma a opinar sobre o possível método de se condicionar os solos, e se possível iniciar um novo caminho de pesquisa para promover maior eficiência das escavações mecanizadas via TBM.

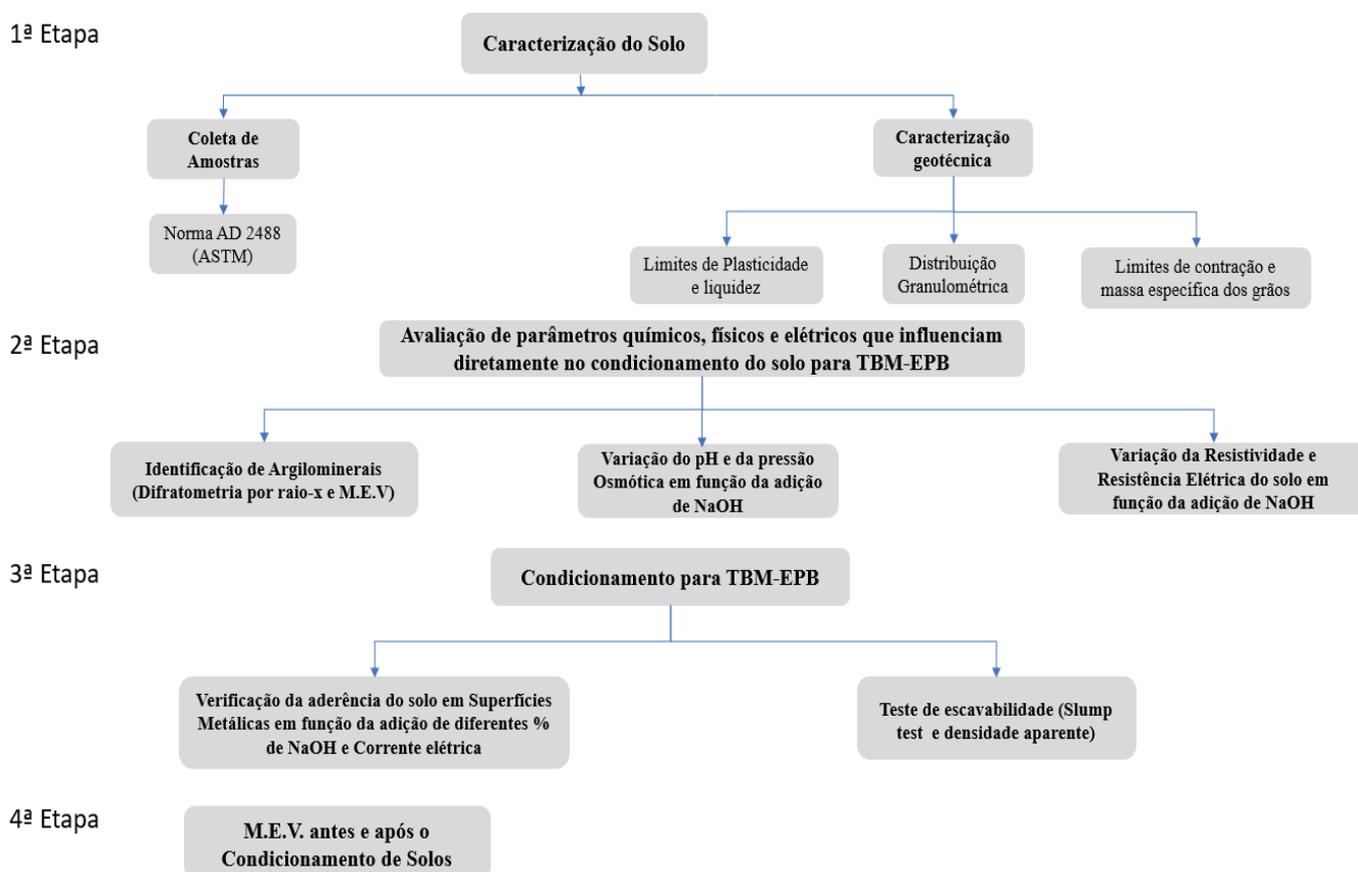


Figura 27 – Diagrama de Bloco das Atividades Experimentais.

5.1. Caracterização do Solo

A primeira etapa do trabalho, bem como suas subdivisões, que foram melhor ilustradas na figura 26, será detalhada a seguir.

5.1.1 - Coleta de Amostras de Solo

Segundo a ABNT - NBR-9604 (2016), a retirada de amostras deformadas deve obedecer à necessidade de estudo e as quantidades necessárias para realização dos ensaios desejados. As amostras devem ser identificadas com profundidade, local, data e devem ser armazenadas de forma que não percam umidade. Neste estudo, o solo foi coletado superficialmente de taludes superficiais e armazenado em recipiente hermeticamente fechado, preservando então a umidade de campo.

As amostras foram secas ao ar livre, e depois foram submetidas a peneira 4,8 mm (#4 mesh), e por fim, quarteadas e armazenadas em sacos plásticos. No Brasil a norma utilizada para identificação e armazenamento das amostras era NBR 7250, NB 617 da ABNT, devido ao seu cancelamento utilizou-se a norma D 2488, da American Society for Testing and Material (ASTM).

5.1.2 - Caracterização geotécnica dos solos

Os solos foram submetidos aos ensaios de distribuição granulométrica conjunta (sedimentação e peneiramento), limites de plasticidade e liquidez, limites de contração e massa específica dos grãos.

Para aferir a distribuição granulométrica dos grãos levaram em consideração os critérios da ABNT NBR 7181/2012. Para os testes de Limites de Atterberg (limite de liquidez e plasticidade) utilizou-se os critérios da ABNT NBR 6459/2016, BS 1377-2(A) e ABNT NBR 7180/2016. Também foram realizados ensaios para determinar o limite de contração, nesta etapa, seguiu-se às orientações da ABNT NBR 7183/1982 e BS 1377-2(A), e por fim, para aferir a massa específica dos grãos, foram realizados ensaios laboratoriais de acordo com as orientações da ABNT NBR 6508/1984.

Para a execução do ensaio de limite de liquidez de Casagrande, também foram separadas amostras de solos em cada ponto de umidade, e contabilizados o número de golpes necessários para que as exigências do ensaio fossem cumpridas na íntegra.



Figura 28 - Execução do Limite de Liquidez das amostras.

Para o cálculo do índice de consistência do solo apresentamos a equação (16).

$$IC = \frac{LL - h}{IP} \quad (14)$$

Onde:

IC = Índice de consistência;

h = Teor de umidade natural do solo;

LL = Limite de Liquidez;

IP = Índice de Plasticidade;

5.2 -Avaliação de parâmetros Químicos, Físicos e Elétricos que influenciam diretamente no condicionamento do solo para TBM-EPB

Após a coleta e caracterização geotécnica do solo, em uma segunda etapa do trabalho, foram realizados ensaios que avaliaram parâmetros químicos, físicos e elétricos do solo.

5.2.1 – Determinação do pH do solo natural e modificado (com adição de diferentes porcentagens de NaOH)

O método mais usual e preciso para a determinação do pH das amostras de solo, é o potenciométrico (pH-metro). O pH do solo é determinado numa suspensão formada por uma quantidade de solo e outra de água destilada ou de solução salina (KCl 1N ou CaCl₂ 0,01M, por exemplo).

No presente estudo as medidas foram realizadas usando apenas solução de água destilada, conforme manual de procedimentos a Embrapa (1997). Além das medidas de pH para caracterização dos solos em seu estado natural, foram necessárias a identificação do pH dos solos em seu estado modificado, ou seja, após as adições de *NaOH nas porcentagens de 0,2 a 10%*. O dispersante (*NaOH*) aqui utilizado possuía índice de pureza de 97%.

Para mensurar as mudanças no *pH* da amostra de solo com a adição de *NaOH*, utilizou-se uma razão entre as massas de solo seco e a massa de dispersante adicionada.

Realizaram-se as seguintes dosagens de massa de *NaOH*: 0,0%, 0,20%, 0,40%, 0,60%, 0,80%, 1,0%, 2,0%, 4,0%, 8,0% e 10,0%. A seguir é possível visualizar as amostras preparadas para realização da leitura do *pH* (Figura 29).



Figura 29 - Preparação de amostras para ensaio de dosagem de *NaOH*.

Para cada dosagem pré-estabelecida foram realizadas cinco repetições por ponto. No geral, a maioria das amostras na concentração 0% apresentou-se deslocamento para o lado ácido das soluções. De acordo com os critérios utilizados por Lopes (1989), as faixas de acidez dos solos podem ser descritas de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8 - Classificação de acidez do solo, Lopes (1989)

<i>Classificação</i>	<i>Níveis de pH</i>
Acidez elevada	< 5,0
Acidez média	5,0 - 5,9
Acidez fraca	6,0 - 6,9
Neutro	7,0
Alcalinidade fraca	7,1 - 7,8
Alcalinidade elevada	> 7,8

De acordo com Embrapa (2010), a variação do pH no solo não se comporta de forma linear, pois o seu comportamento está ligado a uma função de $\log H^+$, que é inteiramente dependente do cátion (H^+) disponível na solução.

Outro fator importante, é como a variação do pH tem ligação direta com as forças de pressão osmótica que são desenvolvidas entre as partículas de solos. Esta interação que ocorre entre os elétrons ao redor das partículas de solo promovem o desenvolvimento expressivo destas pressões, que no caso pode ser chamada de pressão osmótica, Pozzi & Galassi (1994).

5.2.2- Identificação de Argilominerais (Difratometria por Raio - X e M.E.V)

Para identificação de argilominerais foram utilizados os métodos de microscopia de varredura eletrônica (M.E.V) e a difratometria por Raio-X. O esquema do instrumento de difração de raios - X, usualmente utilizado nas análises de identificação dos argilominerais pode ser visualizado na Figura 30. A câmara de difração (Figura 30 - a) é um cilindro oco metálico que é fixado próximo à janela de um tubo de raios - X. Um feixe de raios-X de comprimento de onda conhecido é produzido no tubo, e passa através de um colimador que atinge a espécime a determinado ângulo " θ ". Cada grupo de planos cristalinos irá difratar os raios - X em um ângulo diferente. Uma fita de filme fotográfico é colocada na circunferência da porção cilíndrica da câmara. Uma linha negra aparece no filme fotográfico marcando o ângulo de difração do argilomineral, para cada ângulo em que ocorreu difração pode-se associá-lo a um determinado argilomineral de acordo com os princípios da lei de Bragg.

Modernamente, um instrumento de registro gráfico automático chamado de difratógrafo ou difratômetro de raios - X (Figura 30 - b) entrou em uso generalizado. O feixe atinge a superfície plana do espécime, e é difratado e detectado por colimador tipo Geiger que se move a uma velocidade constante em um arco de círculo. Este contador registra graficamente, em posição e intensidade os ângulos θ , e suas correspondentes intensidades de difrações.

O espectrógrafo de raios - X (Figura 30 - c), utiliza o princípio da fluorescência (Legrand, 1963). A correspondência entre os difratogramas e o gráfico de resultados, pode ser visualizada na Figura 31. Para execução do procedimento de difração de raio -X, utilizou-se a unidade de raios -X: Rigaku IV, modelo Ultima IV. O passo de varredura dos ângulos foi de 0.020mm/segundo com velocidade de 2°/minuto. A tensão operante da unidade foi de 40 kV no filamento principal, e 40mA no alvo, o ânodo utilizado é de *Cu* (Cobre).

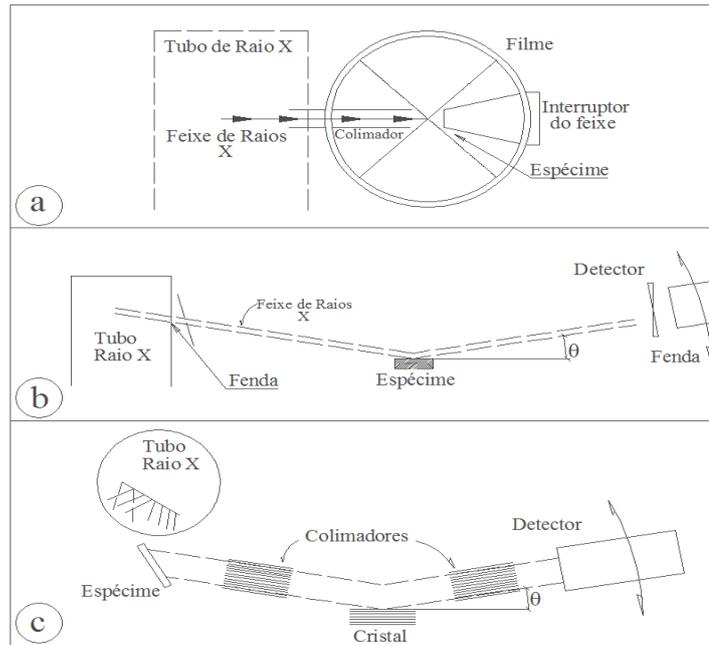


Figura 30 - Equipamentos para difração e para espectrografia de raios X, (a) câmara de difração de raios X, (b) difratômetro de raios X, (c) espectrógrafo de raios X (adaptado de Santos (1989)).

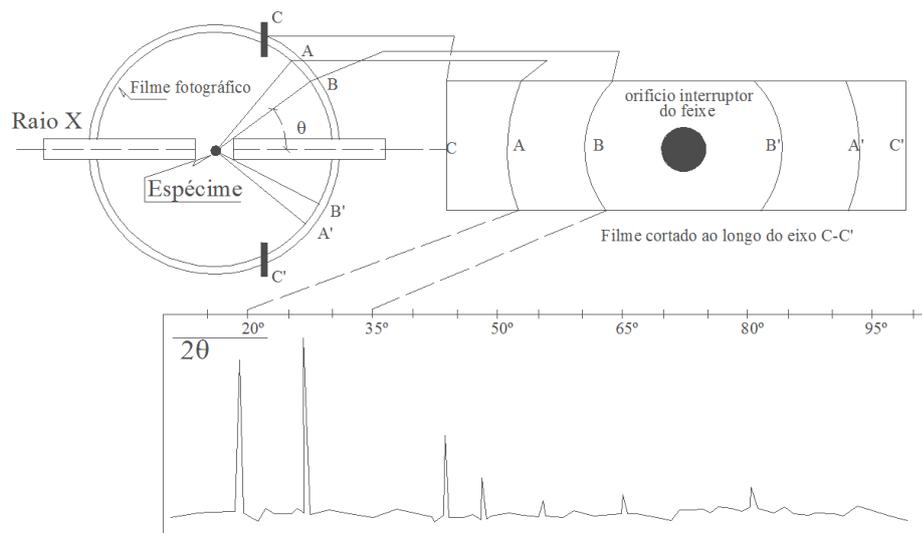


Figura 31 - Percurso dos raios X e correspondências entre filme fotográfico e gráfico de resultados (adaptado de Santos, 1989)

5.2.3 - Medidas Experimentais de Resistividade Elétrica dos Solos

Atualmente, existem diferentes métodos de medição de resistividade e resistência elétrica dos solos. Para quantificar estes parâmetros foram feitos uso das especificações da ABNT NBR 7117. Os ensaios foram realizados de acordo com a geometria que pode ser

observada na Figura 32. Para cálculo da resistividade elétrica da amostra utilizamos a equação (14), *(Bis de equação 10).

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (15)$$

Onde:

R = Resistência (Ω);

L = Comprimento (m)

S =Área (m^2)

ρ =Resistividade ($\Omega.m$)

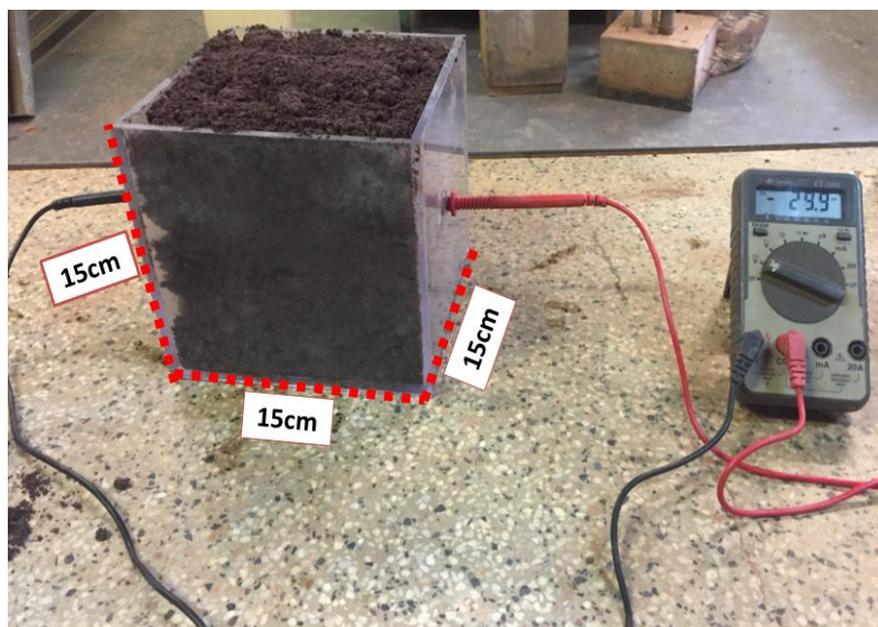


Figura 32 - Esquema de realização de medidas de resistência elétrica para cálculo da resistividade dos solos.

5.3. – Condicionamento para TBM-EPB

Na terceira etapa do trabalho foram verificada a aderência do solo a superfícies metálicas bem como os teste de escavabilidade que serão melhor detalhados a seguir.

5.3.1 - Medidas de Aderência de Solos Superfícies Metálicas

Nesta etapa da pesquisa foram tomadas amostras deformadas de solo e saturadas apenas com água até o limite de plasticidade. O material foi inserido no interior da cuba da

argamasseira industrial simulando a agitação que o material sofre no interior da câmara de escavação. A realização dos ensaios segue os princípios utilizados em Zumsteg & Puzrin (2012).

Segundo Fountaine (1954), Jancsecz (1991), Thewes (1999), Thewes & Burguer (2005), Barbaum (2009) e Feinedegen et al. (2010), a quantificação do potencial da adesividade dos solos finos é melhor representada usando um misturador de palheta. Neste teste, o solo é inserido em um recipiente e agitado através de uma pá mecânica. É realizada uma pesagem do material que está no recipiente (G_{tot}), e que será revolvido pela palheta. Após a agitação da palheta, é realizada uma nova pesagem do material que sobrou no recipiente e que não está aderido a palheta. Desta forma, é possível quantificar o solo aderido à pá do misturador (G_{mix}), e o solo que permanece no recipiente. A relação entre essas duas massas (solo aderido na pá e solo solto no recipiente) tem sido usada para quantificar o poder de adesão dos solos. Segundo Zumsteg & Puzrin (2012), este simples ensaio pode descrever de forma bastante realística o movimento de cisalhamento da roda de corte ao atacar o maciço no processo de escavação. Os resultados dos testes realizados no misturador de palheta podem ser quantificados pela equação 15.

$$\lambda = \frac{G_{mix}}{G_{tot}} \quad (16)$$

Onde:

λ = Indicador de adesão dos solos;

G_{tot} = Massa de solo total do recipiente (kg);

G_{mix} = Massa de solo presa a palheta misturadora (kg);

Para um melhor entendimento do processo descrito anteriormente nos ensaios de Zumsteg & Puzrin (2012), ver Figura 33.

Segundo os autores, os solos argilosos com alto potencial de clogging apresentam índices (λ) > 0.40. As faixas de domínio de (λ) para o baixo potencial de formação do clogging englobam o domínio de $0.00 > \lambda < 0.20$; já para o médio potencial de formação o domínio encontra-se entre $0.20 > \lambda < 0.40$.

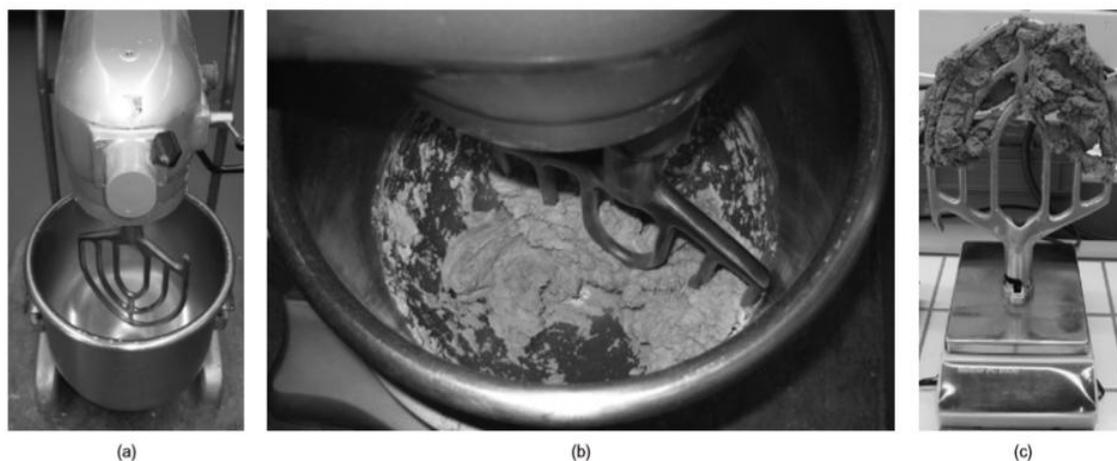


Figura 33 - (a) Fotografia do misturador de palheta; (b) processo de mistura; (c) processo de pesagem do solo aderido (adaptado de Zumsteg & Puzrin, 2012).

A pá misturadora da argamaseira apresenta uma área superficial de $\text{Área} = 0,0994\text{m}^2$, conforme pode ser visualizado na Figura 34. Trata-se de uma superfície lisa e polida de aço inox.

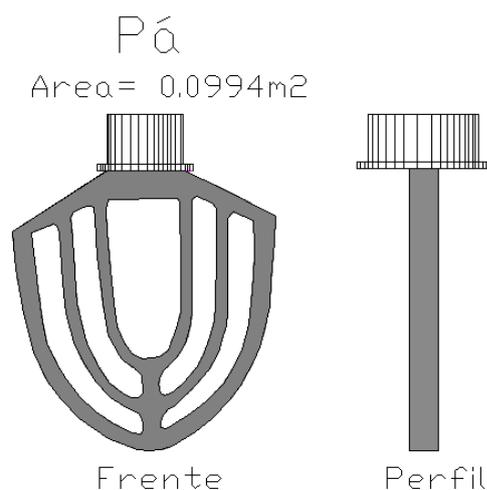


Figura 34 - Pá misturadora da argamaseira.

O procedimento de pesagem para checar a eficiência do condicionamento dos solos deverá ocorrer após a mistura total da massa de solos e os agentes condicionantes. A passagem da corrente elétrica segue o esquema que pode ser visualizado na Figura 35

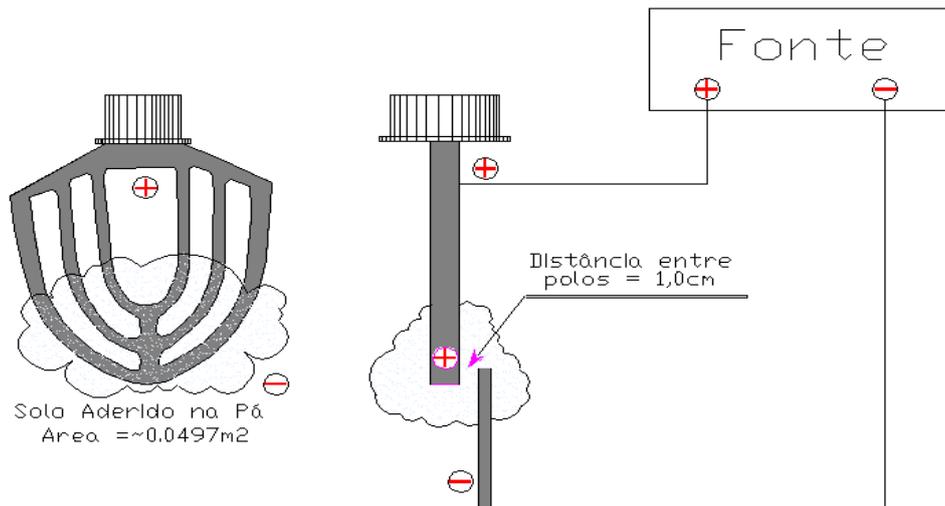


Figura 35 - Esquema de aplicação de corrente ao solo aderido na pá misturadora.

A argamassa utilizada neste experimento foi do tipo planetária BT-18, a fonte elétrica do tipo digital Yihua Yaxun Ps - 150dd.

5.3.2 - Testes de Verificação de Parâmetros Operacionais (*Slump Test e Densidade Aparente do Material*)

As melhores condições encontradas no método desenvolvido por Zumsteg & Puzrin (2012) em relação ao enfraquecimento da ligação solo e superfície metálica, foram submetidas aos testes que aferiram a trabalhabilidade e densidade aparente do material condicionado. Este propósito tem como finalidade principal aferir as condições de trabalhabilidade e poder de dissipação de pressões, que é fundamental no modo de escavação TBM-EPB.

Os ensaios de abatimento de cone (*Slump test*) levaram em consideração as prescrições da ABNT NM 67/1988. Para os ensaios de estimativa da densidade aparente baseou-se nas as orientações da norma DNER - ME 081/98.

5.4. – M.E.V antes e após o condicionamento de Solos

Por fim em uma quarta e última etapa do trabalho foram realizadas as comparações dos solos após a análise de microscopia eletrônica de varredura antes e após condicionamento. O método foi descrito no item 5.2.2.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Caracterização do Solo

Assim como já descrito em materiais e métodos, aqui serão apresentados os resultados e discussões da primeira etapa do trabalho (caracterização do solo).

6.1.1. Coletas de Amostras

A coleta de amostras deformadas de solos argilosiltosos foi realizada em quatro diferentes pontos nas regiões de São Carlos e Rio Claro - SP. Os materiais coletados na cidade de Rio Claro pertencem à Formação Corumbataí (Permotriássico) e os Latossolos roxos e avermelhados da região de São Carlos - SP estão relacionados aos Gleissolos Hápicos.

A Formação Corumbataí é comumente encontrada nas regiões de Rio Claro, Piracicaba, Limeira e Pirassununga. É usada vastamente na indústria de revestimento cerâmico de Santa Gertrudes, a maior do país. A Formação Corumbataí é essencialmente argilosa de coloração arroxeadada ou avermelhada, e curiosamente apresenta intercalações de lentes de arenito muito fino, que se misturam as argilas promovendo uma formação bastante diferenciada quanto à produção de artefatos cerâmicos, Landin (1967).

Os Latossolos roxos e avermelhados, encontrados no município de São Carlos, são originários de basalto e diabásios, e estão relacionados pedologicamente, de forma superficial, com os Gleissolos Hápicos. Esses Latossolos apresentam-se como pacotes espessos bem desenvolvidos, e os horizontes A-B-C apresentam pequenas diferenciações entre eles, Lepisch (1994).

Na maioria dos casos os Latossolos roxos apresentam texturas argilosas ou muito argilosas predominando solos com pouca areia grossa (menos que 10%). Devido ao elevado teor de magnetita, quando seco se pulverizados apresentam forte atração pelo imã, o que é utilizado para diferenciá-los do Latossolo avermelhado, FIPAI (2010).

De forma ilustrativa, podemos observar os maciços ao qual foram extraídas as amostras (Figura 36).

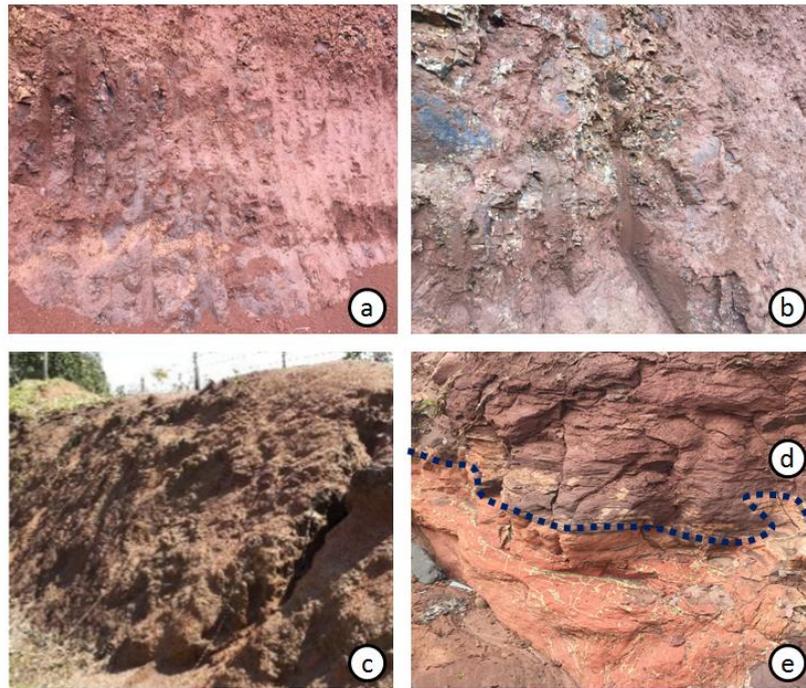


Figura 36 - Locais de extração das amostras : (a) Amostra de solos 01, (b) amostra de solo 02, (c) amostra de solo 03, (d) amostra de solo 04 e (e) amostra de solo 05.

Já na Figura 37 é possível observar porções dos materiais em seu estado já destorroado e em secagem previa para caracterização geotécnica. No anexo 01, é possível visualizar os locais e pontos de amostragem dos solos.



Figura 37 - Amostras de solos utilizadas (1) amostra 01, (2) amostra 02, (3) amostras 02, (4) amostra 04 e (5) amostra 05.

6.1.2. Caracterizações Geotécnicas

A seguir serão apresentados os resultados da caracterização geotécnica dos solos estudados, de acordo com as normas ABNT/NBR as quais já descritas em materiais e métodos. Os materiais foram submetidos a ensaios de limites de Atterberg, granulometria e massa específica dos grãos. Também foram realizados testes de verificação do potencial formador de clogging utilizando o ábaco publicado por Thewes & Holman (2012).

6.1.2.1 Limites de Liquidez e Plasticidade

O ensaio do limite de plasticidade foi realizado de acordo com as orientações normativas descritas no capítulo de materiais e métodos. Ressalta-se que foram separadas cápsulas para obtenção do teor de umidade de cada ponto de ensaio, de forma que as médias destas umidades remetem ao limite de plasticidade do solo (Figura 38).



Figura 38 - Execução do ensaio de Limite de Plasticidade das amostras.

No geral, os resultados obtidos estiveram entre os valores de 36,05 a 49,15%. Os resultados podem ser visualizados na íntegra observando a Tabela 9. Comparando estes valores a outros autores que desenvolveram trabalhos em solos na mesma região, é possível verificar uma semelhança nos resultados encontrados, o que nos assegura certa coerência na classificação do material. Dentre os autores podemos citar: Musso (2008), Arab (2011), Almeida (2015) e Schettinne (2016).

A umidade do limite de liquidez obtidas nos ensaios variou entre 55,63 e 73,50%, valores característicos de solos finos e coesivos (Tabela 9).

Tabela 9 - Limites de Atterberg das amostras ensaiadas - Fonte: Autor

Amostra	Limites de Atterberg			
	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IC
AM-01	73,50	43,10	30,40	1,42
AM-02	71,36	49,15	22,21	1,20
AM-03	55,63	36,30	19,33	1,18
AM-04	68,16	36,05	32,11	1,12
AM-05	62,38	42,29	20,09	1,05

No tocante dos estudos e verificações aplicáveis em TBM-EPB se faz necessário aferir o parâmetro de consistência dos solos, pois a combinação de resultados entre o índice de consistência (IC) e o índice de plasticidade (IP) utilizado por Holmann e Thewes (2009), nos fornece um indicativo de formação e possível intensidade do clogging.

Percebe-se que os solos alvo desta pesquisa apresentam potencial formador de clogging que varia entre médio a alto, o que de certa forma, cumpre os requisitos desejados para este estudo. Com base na classificação publicada por Thewes (1999), as condições e intensidade do clogging são visualizadas na Figura 39.

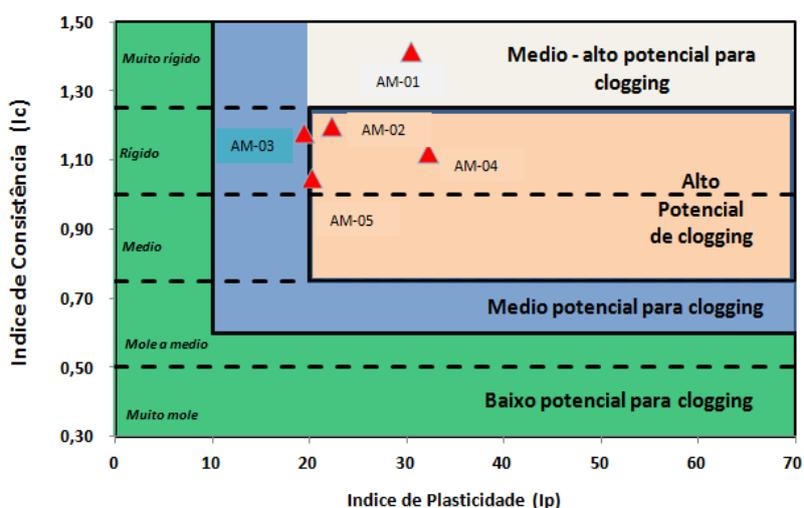


Figura 39 - Verificação de potencial e intensidade de clogging das amostras ensaiadas, (adaptado de Holman & Thewes, 2012)

6.1.2.2 Distribuição Granulométrica

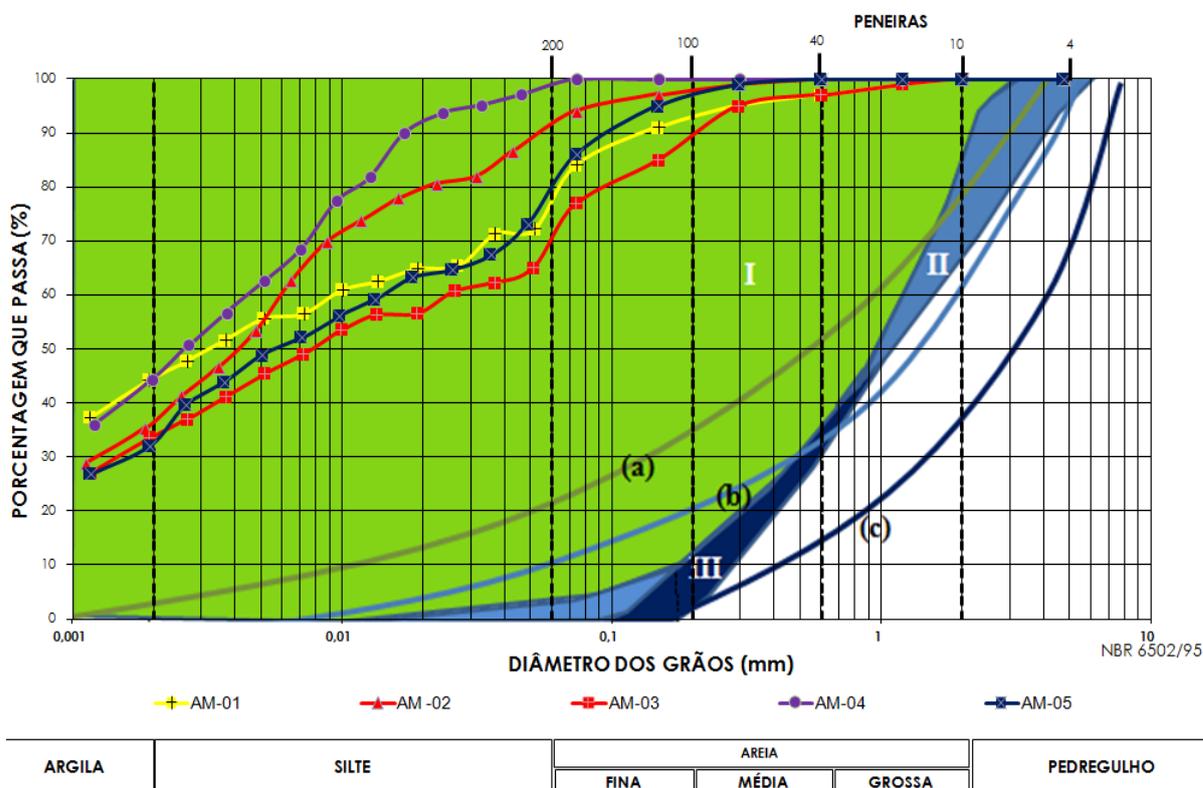
Para a análise granulométrica dos solos estudados foi necessária utilizar a técnica de granulometria acoplada à sedimentação, pois o material em questão é composto, em sua maioria, de solos finos e passantes na peneira 0,075mm (peneira #200). Ao verificar as condições granulométricas e inseri-las nas orientações de Budach & Thewes, 2013,

supostamente esse material encontra-se na região onde é recomendada a escavação através de tuneladoras de em modo TBM-EPB.

Comprovou-se através destes ensaios que os solos aqui utilizados apresentaram em média a seguinte composição:

- Argila - 35%;
- Silte - 55%;
- Areia Fina - 10%

A análise granulométrica conjunta pode ser visualizada na Figura 40.



Legenda (regiões do gráfico):

I - Solo deve ser condicionado com espuma - Pressão de água < 3 bar.

II - Solo deve ser condicionado com espuma, polímeros e lamas finas - Pressão de água < 3 bar.

III - Solo deve ser condicionado com espuma, polímeros e lamas finas - Pressão de água = 0 bar.

(a) - Solo deve ser condicionado com água, bentonita, lamas poliméricas e espuma.

(b) - Solo deve ser condicionado com espuma, polímeros e lamas finas - Pressão de água < 2 bar.

(c) - Solo deve ser condicionado com lamas de alta densidade, lamas poliméricas e espumas - Pressão de água = 0 bar.

Figura 40 - Granulometria dos solos estudados (adaptado Budach & Thewes, 2013).

6.1.3.3 Limites de Contração e Massa Específica dos grãos

Para identificação da massa específica dos solos, as amostras foram destorroadas e secas em estufa com temperatura constante (110°C) por no mínimo 24 horas até atingir a

umidade higroscópica do material. Todos os passos prévios a execução do ensaio seguiram as orientações da norma regulamentadora referente a este ensaio, conforme descrito em materiais e métodos.

De certa forma os valores apresentados confirmam as suposições pedológicas dos materiais. No caso das amostras AM-01, AM-02 e AM-03 extraídas da região de São Carlos - SP, onde há uma predominância de intemperismo de rochas basálticas, sendo a formação predominante de Latossolos roxos e avermelhados, Lepisch (1994).

Nas amostras AM-04 e AM-05, percebe-se que há uma grande discrepância entre os valores, o que pode ser justificada pela pedologia da Formação Corumbataí, onde a evolução pedológica dos solos ocorre pela alteração de rochas mais brandas, e que podem ainda apresentar horizontes de arenito intercalado com os solos argilo-siltosos, Musso (2008). Na Tabela 10 é possível observar os resultados.

Tabela 10 - Massa Específica dos Solos em Estudo

Solo	ρ_1 (g/cm ³)
AM-01	2,808
AM-02	3,026
AM-03	2,904
AM-04	2,705
AM-05	2,926

O limite de contração é o teor de umidade que separa os estados semissólido do sólido. Inicialmente, os solos com altos teores de argilas quando encontrados em seu estado saturado, ao perder água sofrerão uma variação em seu volume. A variação de volume é coincidente ao volume de água evaporada até atingir um teor de umidade que é igual ao limite de contração. A partir deste valor, a amostra secará a volume constante. Na Figura 41, é possível observar o ponto ao qual a umidade é coincidente com a umidade do limite de contração.

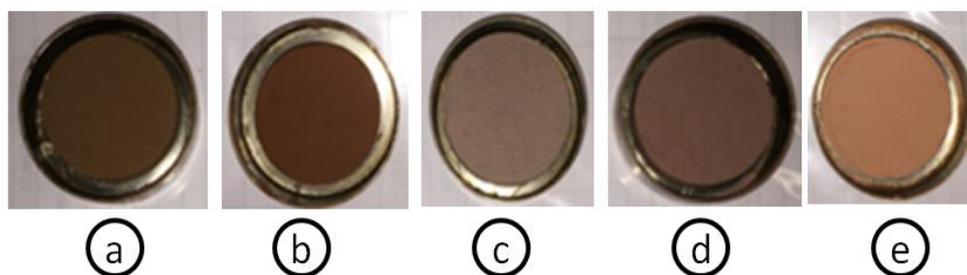


Figura 41 - Pastilhas confeccionadas com solos estudados: (a) AM-01, (b) AM-02, (c) AM-03, (d) AM-04 e (e) AM-05.

Na

Tabela 11, é possível observar os resultados obtidos para o limite de contração dos solos em estudo.

Tabela 11 - Limite de contração das Amostras.

Amostras	Limite de Contração - LC (%)
AM-01	24,2
AM-02	31,7
AM-03	21,9
AM-04	17,3
AM-05	22,7

Percebe-se que a umidade correspondente do limite de contração dos solos apresenta valores com diferenças significativas entre 17 e 31%. Isso, de certo modo pode ser explicado devido à formação pedológica dos materiais. Nas amostras AM-01, AM-02, temos uma formação geológica oriunda de basalto e diabásio, que por sua vez, pode apresentar menor sensibilidade na presença de umidade. No entanto, nas amostras AM-04 e AM-05, é constatada uma maior sensibilidade quanto ao tema da umidade, pois estas amostras são oriundas de rochas da formação Corumbataí, que em sua maioria se resumem em argilitos e siltitos.

A amostra AM-03 tem sua base fundamentada em rochas basálticas, entretanto, apresenta limites de contração muito parecidos à formação Corumbataí. De acordo com publicações de Lepisch, 1964, isso pode ocorrer com solos da camada superficial dos horizontes geológicos A-B-C, nos quais, o alto grau de intemperismo é encontrado.

6.2. Avaliação de parâmetros Químicos, Físicos e Elétricos que influenciam diretamente no condicionamento do solo para TBM-EPB

Como já descrito em materiais e métodos, aqui serão apresentados os principais resultados da segunda etapa do trabalho.

6.2.1. Identificações dos Argilominerais e MEV Antes do Condicionamento do Material

Na Tabela 12 são descritos os argilominerais encontrados nas amostras em estudo. Como já mencionado acima, o método utilizado de difratometria por raio-x foi descrito em materiais e métodos. No geral, foram confeccionadas 3 lâminas de cada amostra, uma das lâminas seca ao ar, uma passou por tratamentos com etilenoglicol e a última passou por tratamento térmico a 550°C. Levando em consideração a Lei de Braag, analisaram os picos identificados no ensaio de difração de raio-X e suas distâncias basais para identificação do argilomineral. Os resultados obtidos através do emprego desta técnica podem ser

visualizados a seguir. Os resultados apresentados Tabela 12 foram extraídos dos gráficos representados a seguir (figuras 41, 42, 43, 44 e 45). Acompanhado de cada gráfico, são apresentadas as figuras de microscopia de varredura eletrônica das amostras.

Tabela 12 - Identificação dos argilominerais dos solos estudados.

Amostras	Laminas	Pico	2 Θ	Espaçamento Basal (Å)	Mineral
01	Seca ao Ar	1	13,3	6,65	Caulinita
		2	25,0	3,56	Caulinita
		3	26,6	3,35	Caulinita
	550°C	-	-	-	-
	Etilenoglicol	1	13,1	6,80	Caulinita
		2	25,3	3,52	Caulinita
3		26,8	3,33	Caulinita	
02	Seca ao Ar	1	25,0	3,56	Quartzo
		2	12,5	7,08	Caulinita
		3	36,2	2,48	Halosita
	550°C	-	-	-	-
	Etilenoglicol	1	12,5	7,05	Halosita
		2	25,2	3,53	Quartzo
3		8,7	10,16	Halosita	
03	Seca ao Ar	1	12,5	7,08	Caulinita
		2	25,0	3,56	Caulinita
	550°C	1	21,5	4,13	Ilita
		2	20,5	4,33	Ilita
	Etilenoglicol	1	12,4	7,13	Caulinita
		2	25,3	3,53	Caulinita
04	Seca ao Ar	1	26,5	3,36	Quartzo
		2	21,0	4,23	Quartzo
		3	9,0	9,82	Halosita
		4	12,5	7,13	Sepiolita
	550°C	-	-	-	-
	Etilenoglicol	1	26,4	3,37	Quartzo
		2	21,5	4,13	Quartzo
		3	9,0	9,82	Halosita
4		12,5	7,13	Sepiolita	
05	Seca ao Ar	1	26,7	3,33	Feldspato
		2	12,5	7,08	Caulinita
		3	8,5	10,40	Pargosita
		4	21,0	4,23	Clorita
		5	25,0	3,56	Feldspato
	550°C	1	26,7	3,33	Feldspato
	Etilenoglicol	1	26,7	3,33	Feldspato
		2	12,5	7,08	Caulinita
		3	8,5	10,40	Pargosita
		4	21,0	4,23	Clorita
5		25,0	3,56	Feldspato	

Na Figura 42 é possível observar os resultados do ensaio de difração de raio - X segundo a lei de Bragg. Nesta mesma figura também é possível visualizar a microestrutura do material estudado através da análise de M.E.V.

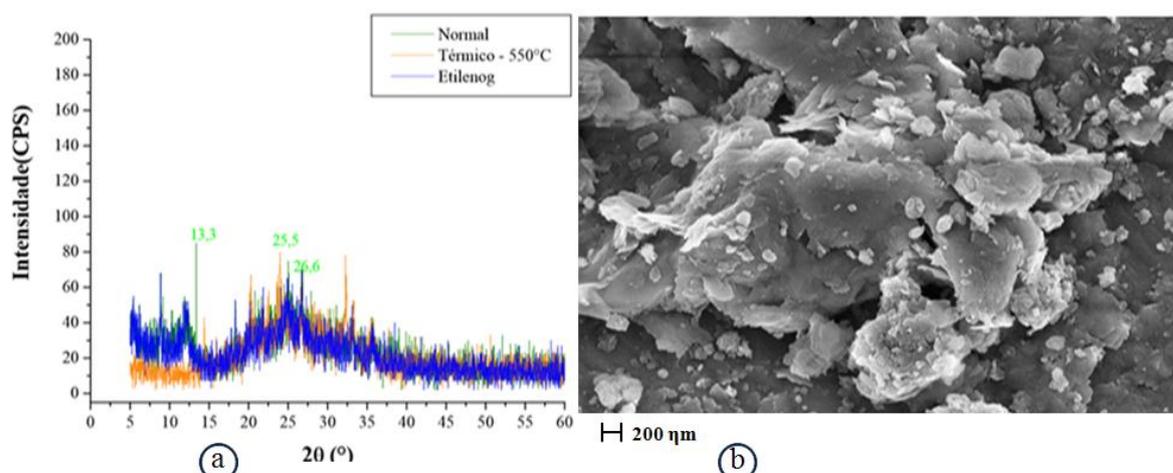


Figura 42 - Amostra AM-01, ao lado esquerdo (a) é possível visualizar os resultados obtidos por difração de raio - X, lado direito (b) Imagem de microscopia eletrônica.

Percebe-se que na Figura 42 (a) há bastante interferência na difração dos raios - X, no entanto ainda se faz possível visualizar picos de intensidade. Esta interferência registrada nos resultados de raio-X, pode de certa forma ser explicada ao observar a Figura 43 (b), pois nela não é possível identificar com clareza uma estrutura definida de argilomineral. Assim, se torna evidente o resultado obtido na distribuição granulometria conjunta onde é registrada presença de alta percentagem de silte na amostra. De forma semelhante à amostra AM-01, a AM-02 apresenta a mesma forma comportamental (figura 41).

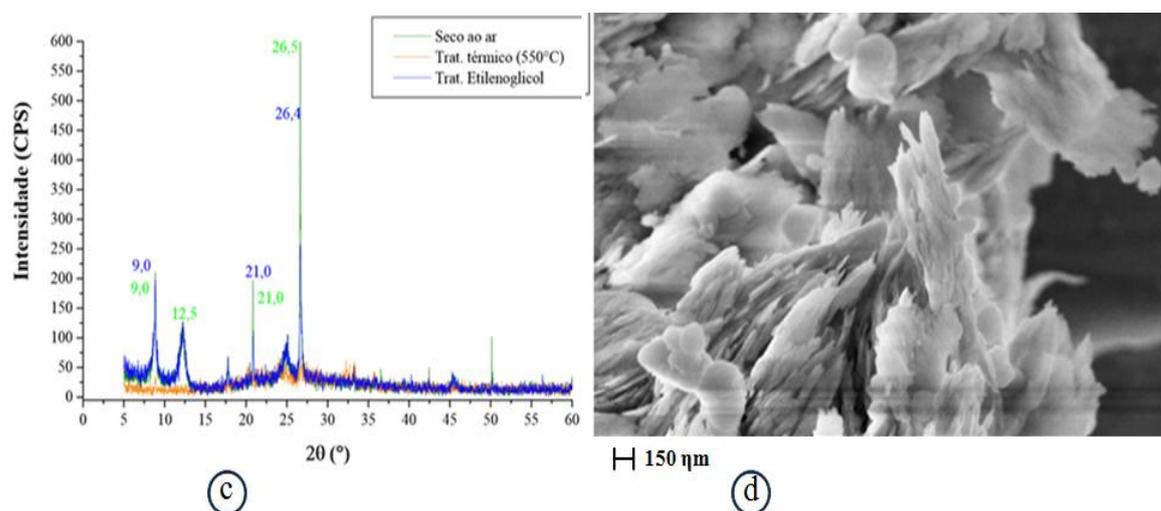


Figura 43 - Amostra AM-02: (c) difração de raio - X; lado direito (d) Imagem de M.E.V.

Na Figura 44 visualiza-se os resultados da amostra AM-03. Ao lado esquerdo da mesma figura, poder ser visualizado os resultados da difração de raio-X. É de fácil visualização que se constata picos de intensidade que se destacam com bastante clareza.

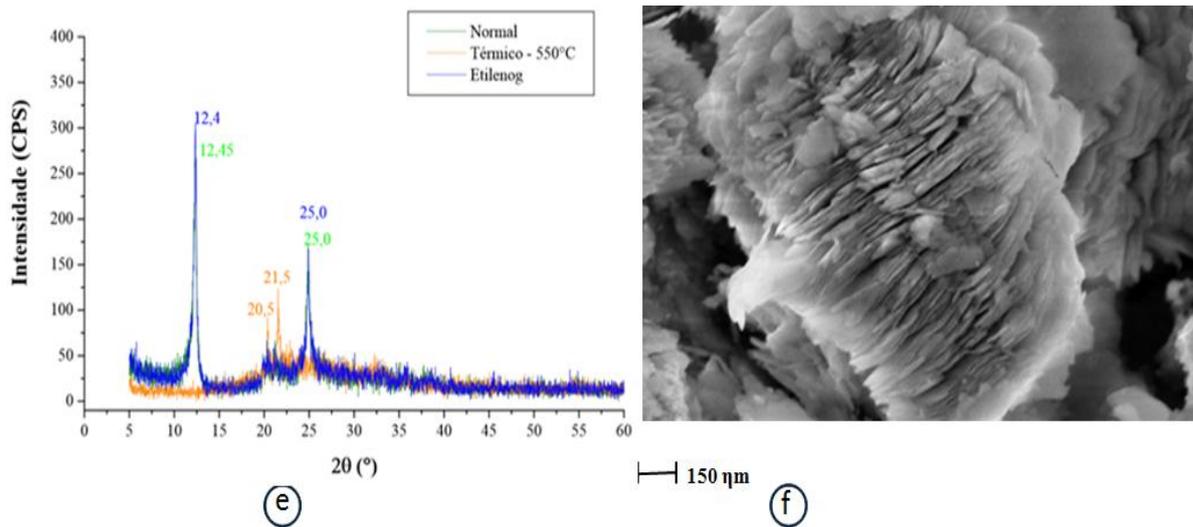


Figura 44 - Amostra AM-03: ao lado esquerdo (e) difração de raio - X; lado direito (f) Imagem de M.E.V.

Na Figura 44 (f) também é possível identificar que a amostra AM-03 possui um padrão de estrutura que se repete. Este padrão geométrico em forma de pacotes emparelhados tem semelhança com o padrão encontrado no grupo das caulinitas.

Na Figura 45 (g) visualiza-se os resultados obtidos pelo ensaio de difração de raio-X da amostra AM-04, onde podemos visualizar facilmente a presença de picos com intensidade bastante definidos, e que nos remetem a identificação de argilominerais como Halosita, Sepiolita, além de Quartzo. Ao visualizar a Figura 45 (h) é possível verificar que não há um padrão de estrutura totalmente definido, constata-se um emparelhamento das estruturas mesclado com foliações, o que de certa forma pode ser justificado pela mescla de argilominerais que a amostra apresenta.

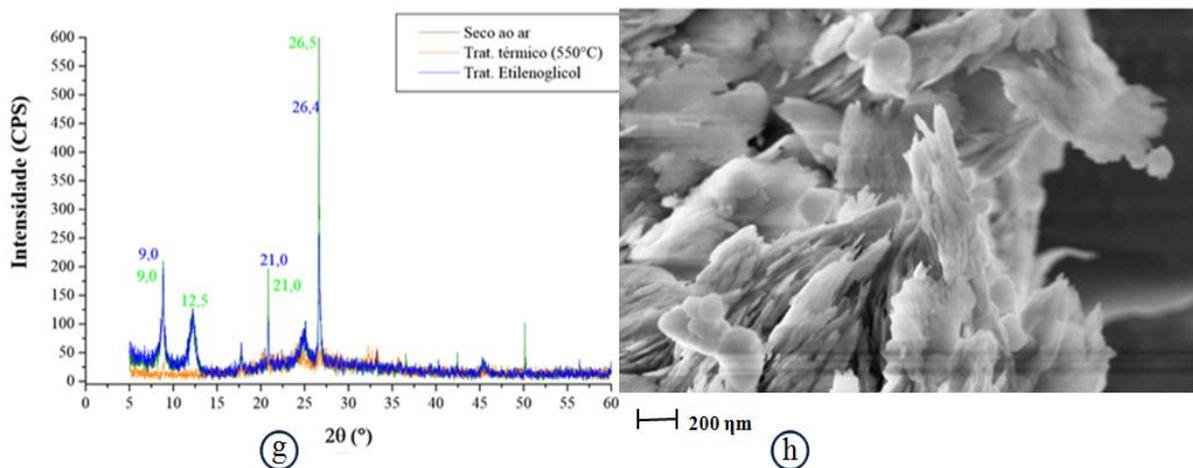


Figura 45 - Amostra AM-04: ao lado esquerdo (g) difração de raio-X; ado direito (h) Imagem M.E.V.

Ao visualizar os resultados do ensaio de difração de raio-X da amostra AM-05 (Figura 46 i), percebe-se picos bem definidos que remetem à identificação de argilominerais como Caulinita, Pargosita, Halosita além de Feldspato. Esta mescla de argilominerais é refletida na Figura 46(j), onde podemos perceber padrões diferenciados de estruturas.

Visualizam-se formas emparelhadas típicas de argilominerais como a Haloisita, e formas folheadas misturando-se tipicamente como ocorridas nas amostras anteriores.

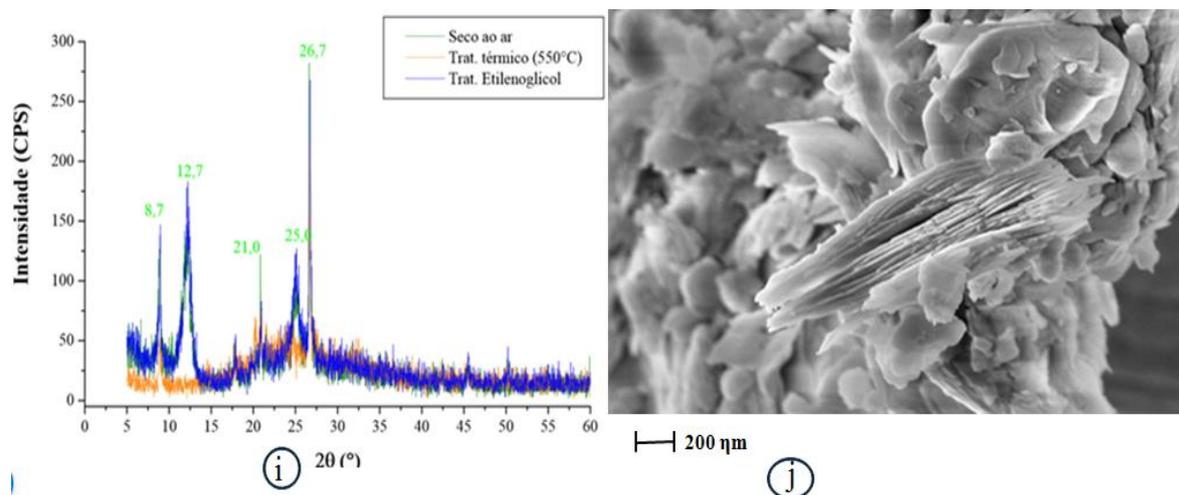


Figura 46 - Amostra AM-05, ao lado esquerdo (i) difração de raio – X; lado direito (j) Imagem de M.E.V.

6.2.2. Variação da Alcalinidade e pressão osmótica do Solo com adição de diferentes concentrações de NaOH

Na Figura 47 é possível visualizar a variação do *pH* da amostra AM-01, em relação às adições de diferentes porcentagens de *NaOH*. Nesta mesma figura, oportunamente, também pode ser visualizado o comportamento da pressão osmótica face às alterações ocorridas no *pH* da amostra.

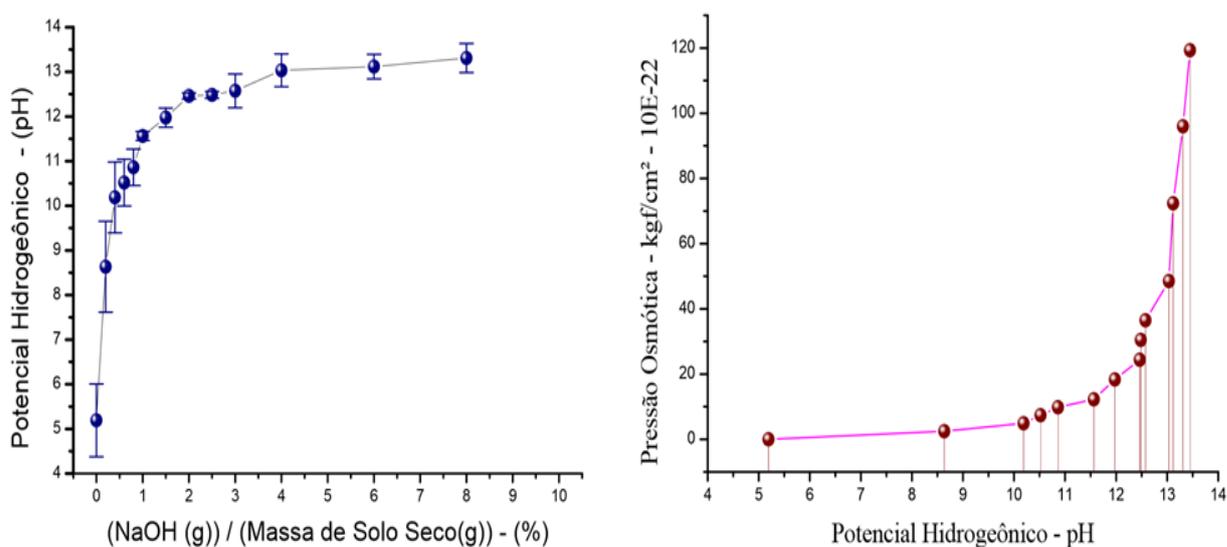


Figura 47 - Amostra AM-01, a esquerda variação de *pH* em relação a massa de *NaOH* adicionada; e a direita da figura pressão osmótica gerada em relação a variação o *pH*.

Percebe-se que inicialmente o solo da amostra AM-01, encontrava-se na região de acidez média. Após a adição de 1% de reagente, foi possível alterar a condição de inicial de acidez média para alcalinidade elevada, e conseqüentemente, iniciar o processo de desenvolvimento de forças de repulsão entre as partículas, isso devido à pressão osmótica que a variação de *pH* pode causar.

A amostra AM-02 apresentava inicialmente uma acidez média. Diferentemente da AM-01, a AM-02 apresentou uma reação de variação bastante contundente já no segundo ponto de adição de NaOH (0,20%).

Os demais pontos de adição mantiveram-se de forma semelhante. Percebe-se que na amostra AM-02, para que se eleve o *pH* a uma condição alcalinidade elevada são necessários adições de quantidades próximas a 1,5% de NaOH. A reatividade em relação à pressão osmótica apresenta valores evidentemente mais significativos a partir de valores onde o *pH* é maior que 12. Ver Figura 48.

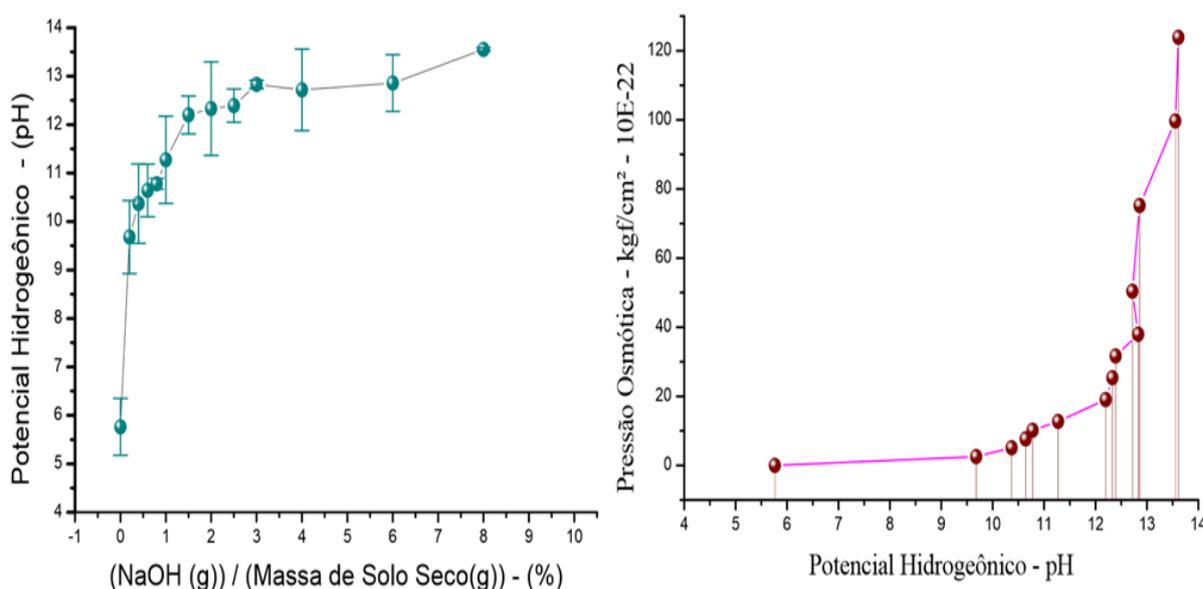


Figura 48 - Amostra AM-02, à esquerda: variação de *pH* em relação a massa de *NaOH* adicionada, e à direita: pressão osmótica gerada em relação a variação do *pH*.

De forma semelhante às amostras AM-01 e AM-02, a amostra AM-03 também apresenta reatividade notável em relação à variação do *pH* e da pressão osmótica desenvolvida. No geral, percebe-se até o momento, que, adições de 1,5% de *NaOH*, promovem variação significativa destes parâmetros nas amostras estudadas (Figura 49).

As amostras AM-01 e AM-02, e a amostra AM-03 apresenta comportamento quase linear no desenvolvimento da pressão osmótica para valores próximos a *pH* = 13, e, rapidamente após esse valor, a curva que representa o desenvolvimento das pressões osmóticas alcança um padrão de crescimento vertical. Neste novo padrão de comportamento, leves incrementos no valor do *pH* representam alterações bastante significativas no valor de pressão osmótica (Figura 49).

Na amostra AM-04 é possível perceber que a condição inicial deste solo está classificada como medianamente ácida ($pH = 5,3$). Constata-se que as alterações do parâmetro pH variam praticamente linearmente até a adição de 1,5% de $NaOH$. Após estes valores, nota-se na curva um padrão de variação de forma pouco menos intenso. O mesmo comportamento é percebido no gráfico que representa os valores de pressão osmótica entre as partículas de solo (Figura 50).

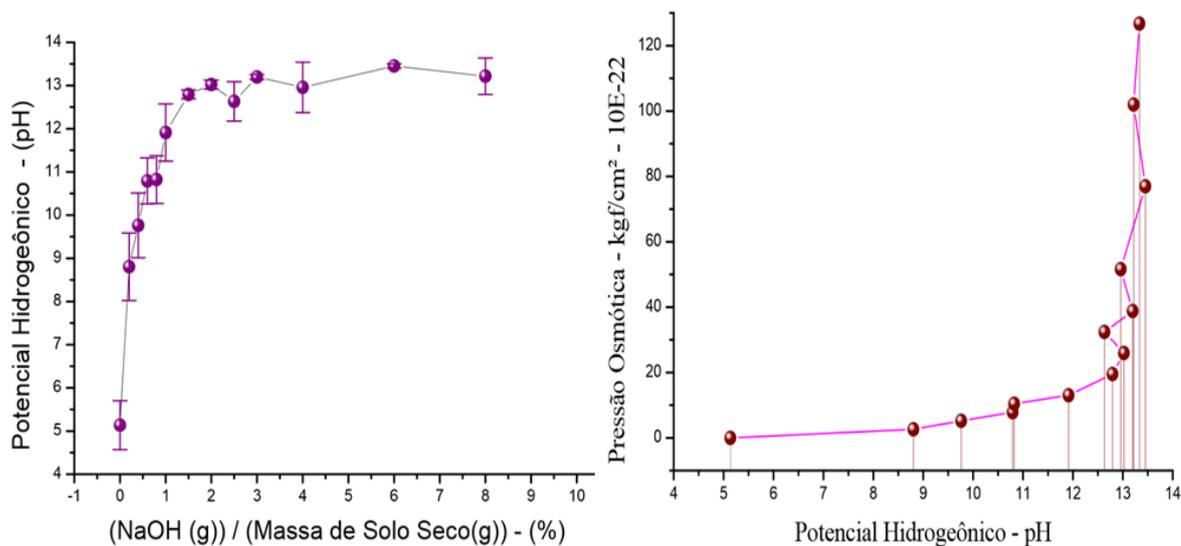


Figura 49- Amostra AM-03, à esquerda variação de pH em relação a massa de $NaOH$ adicionada; e à direita da figura pressão osmótica gerada em relação a variação de pH .

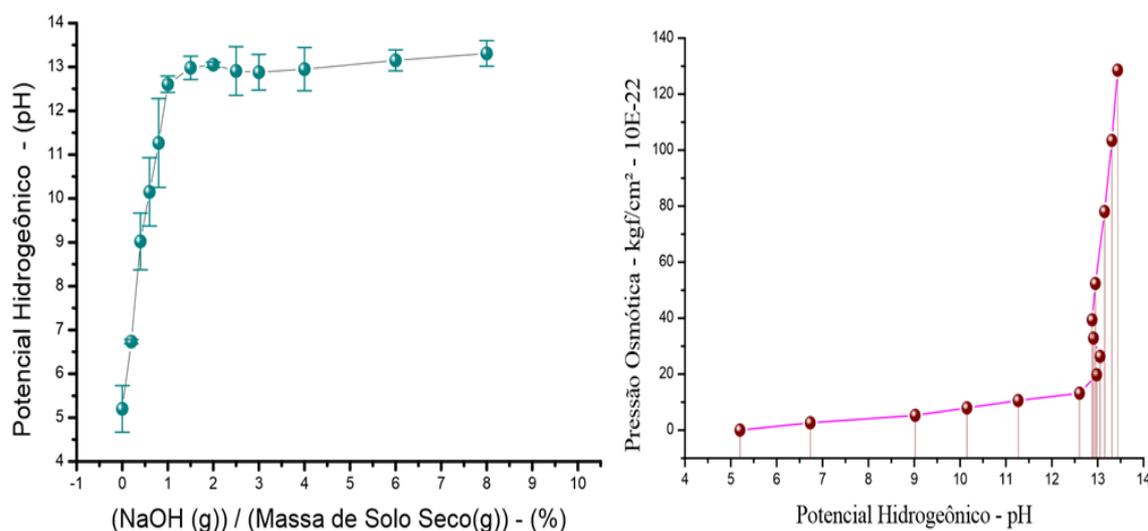


Figura 50 - Amostra AM-04, à esquerda variação de pH em relação a massa de $NaOH$ adicionada; e à direita da figura pressão osmótica gerada em relação a variação do pH .

Na amostra AM-05 a intensidade em que o parâmetro pH é alterado não foge do padrão percebido até agora em todas as amostras ensaiadas.

De certa forma, quando adicionada massa de dispersante que representa valores entre 1,0 a 1,5% da massa de solo seco, o solo estudado pode atingir padrões de alcalinidade elevado. As mesmas considerações também são válidas para o

desenvolvimento da pressão osmótica, pois após constatar valores de pH maiores que 12,5, a forma geral da curva de pressão osmótica se assemelha as demais amostras (Figura 51).

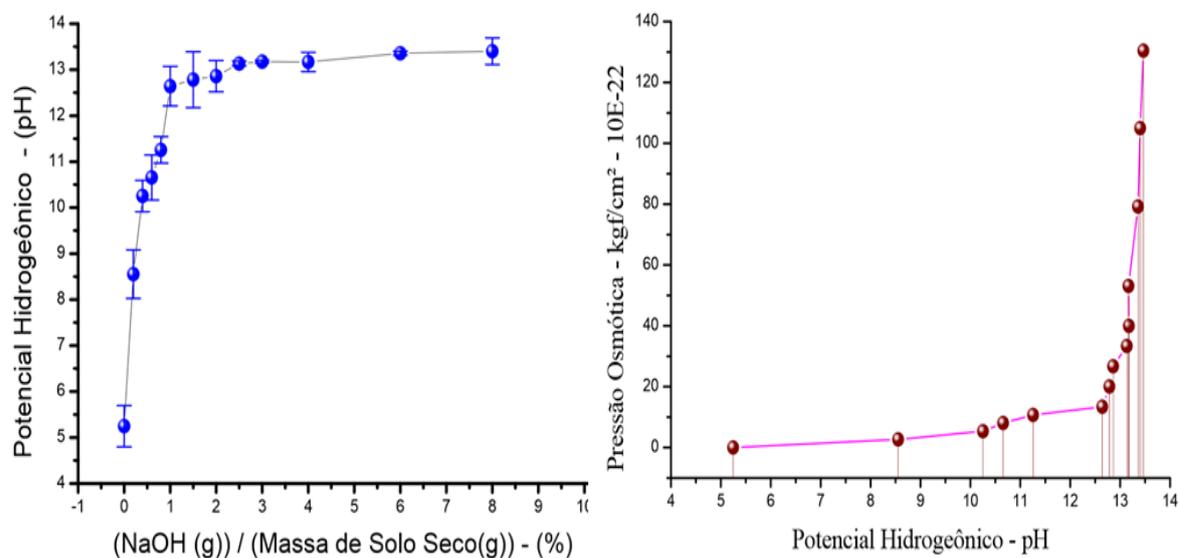


Figura 51 - Amostra AM-05, à esquerda alterabilidade de pH em relação a massa de NaOH adicionada, e à direita da figura pressão osmótica gerada em relação a alterabilidade o pH.

No geral nota-se, que a adição do reagente/dispersante NaOH apresenta bastante eficácia com adições que variam entre 0 e 3%. Além destes valores, percebemos que são necessárias quantidades significativas de reagente para que possa modificar o pH das amostras de forma mais contundente.

Estes resultados apresentam certa coerência com as publicações sobre variação de pH dos solos encontradas em EMBRAPA (2010), Pozzi & Galassi (1994), Cotton et al. (1999), que de forma clara pode nos indicar que a melhor eficiência em relação ao uso deste dispersante encontra-se entre 1 e 3%, e que o uso acima desta faixa de valores pode ser considerado desnecessário.

6.2.3. Variação da Condutividade Elétrica e resistividade dos Solos em função da adição de NaOH

Com a mudança da condição hidrogeônica dos solos, são também constatadas alterações significativas nas distribuições dos elétrons em torno das partículas nos mesmos. Estas mudanças podem ser refletidas de forma física na condutividade elétrica que o solo pode adquirir. Esta condição está intimamente ligada com a alteração do cátion (H^+), que é que é contabilizada pela função $\log(H^+)$, e que é sensivelmente alterada pelos níveis de pH .

Para contabilizar os efeitos do reagente NaOH em relação aos parâmetros que facilitam a passagem da corrente elétrica, o material foi submetido a condição de saturação até a umidade que corresponde ao limite de liquidez. Desta forma, pôde-se reproduzir em laboratório situações de escavação mecanizada abaixo da linha freática, o que é comum ocorrer nas tuneladoras.

A amostra AM-01 quanto sujeita as adições do dispersante NaOH apresentou variação de forma bastante crescente entre os valores de 1 a 3% deste dispersante. Essas alterações podem ser visualizadas na parte esquerda da Figura 52. Nota-se que a resistividade do meio alcança valores entre 1 e 20 $\Omega.m$.

Facilmente pode ser visto, que até a adição de 3% de NaOH, o material apresenta alterações que vai desde 0.01mS/cm para 30mS/cm. E em relação a sua resistividade elétrica, constata-se alterações que variaram desde 160 $\Omega.m$ na condição saturada, para 20 $\Omega.m$ (para valores próximos a 3% de adição de dispersante).

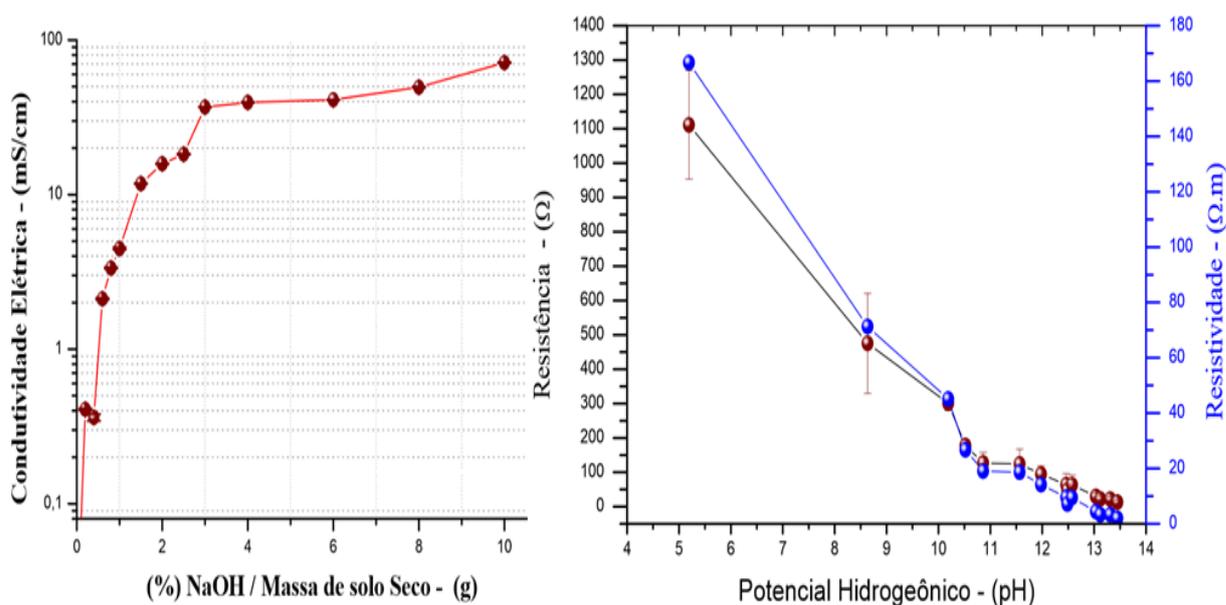


Figura 52 - AM-01: à esquerda condutividade elétrica; à direita resistência elétrica dos solos e suas respectivas resistividades elétricas.

Na amostra AM-02 percebemos uma reação mais branda em relação à variação da condutividade elétrica, em resposta a adição de *NaOH*.

Na Figura 53, percebemos que a condutividade elétrica apenas alcança um patamar mais estável após adições de quantidades superiores a 6% de dispersante. Para os valores próximos a 6% de adição NaOH, a mistura (solo, água e dispersante) apresenta uma condição de resistividade bastante baixa, segundo os critérios apresentados por Modena & Sueta (2011).

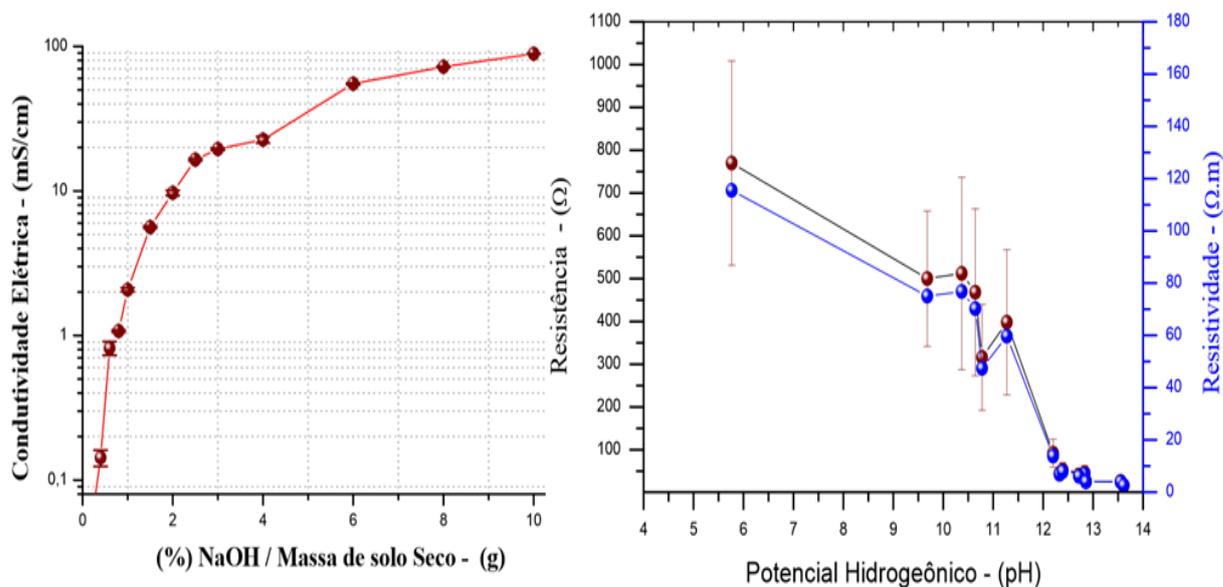


Figura 53 - AM-02: à esquerda condutividade elétrica; à direita resistência elétrica dos solos e suas respectivas resistividades elétricas.

O mesmo não ocorre na amostra AM-03. É possível notar, que neste material as condições de adição de NaOH apresentam uma maior efetividade a partir de adições próximas à 2,5% de dispersante.

Neste caso, o solo parece atingir uma região estável em relação à condutividade elétrica. Também é possível perceber que a resistência e a resistividade elétrica na região de 2,5% de NaOH, alcança valores menores que 20 $\Omega.m$, o que, de acordo com a NBR 7117, Modena & Sueta (2011), OBO (2012) são valores extremamente baixos (Figura 54).

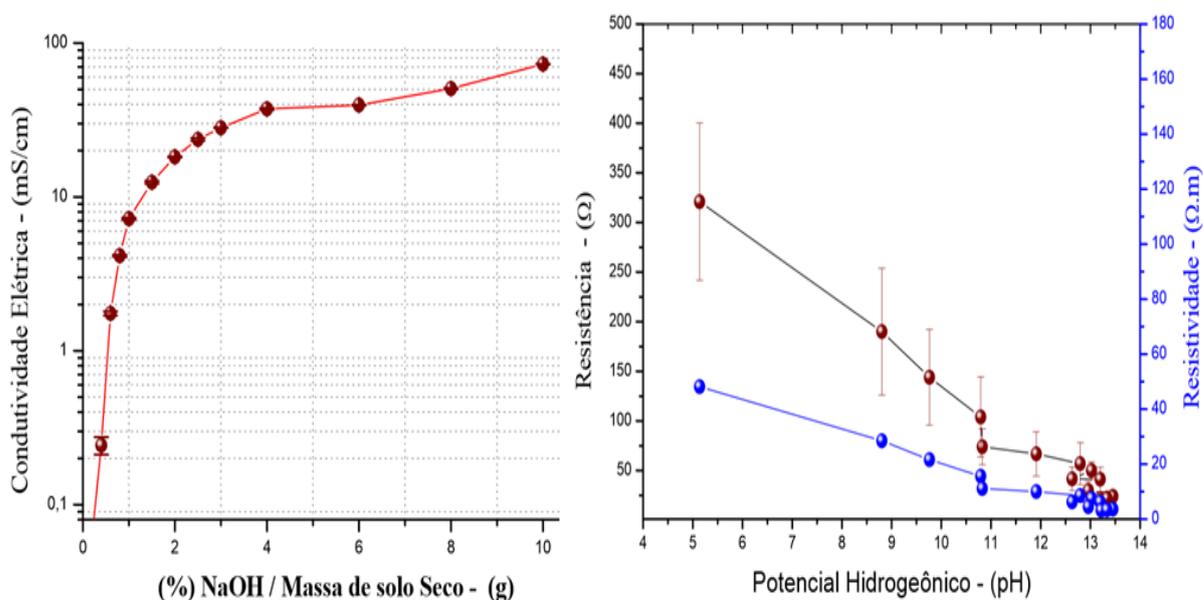


Figura 54 - AM 03: à esquerda condutividade elétrica, à direita resistência elétrica dos solos e suas respectivas resistividades elétricas.

De forma muito semelhante ao comportamento da amostra AM-03, a amostra AM-04 apresenta facilidades em relação às modificações da condutividade elétrica com pequenas adições de *NaOH*.

Inicialmente são constatados valores de resistividade elétrica próximos a 70 $\Omega.m$, e imediatamente após a adição de 2% de *NaOH* este valor é alterado para 1 e 5 $\Omega.m$ (Figura 55).

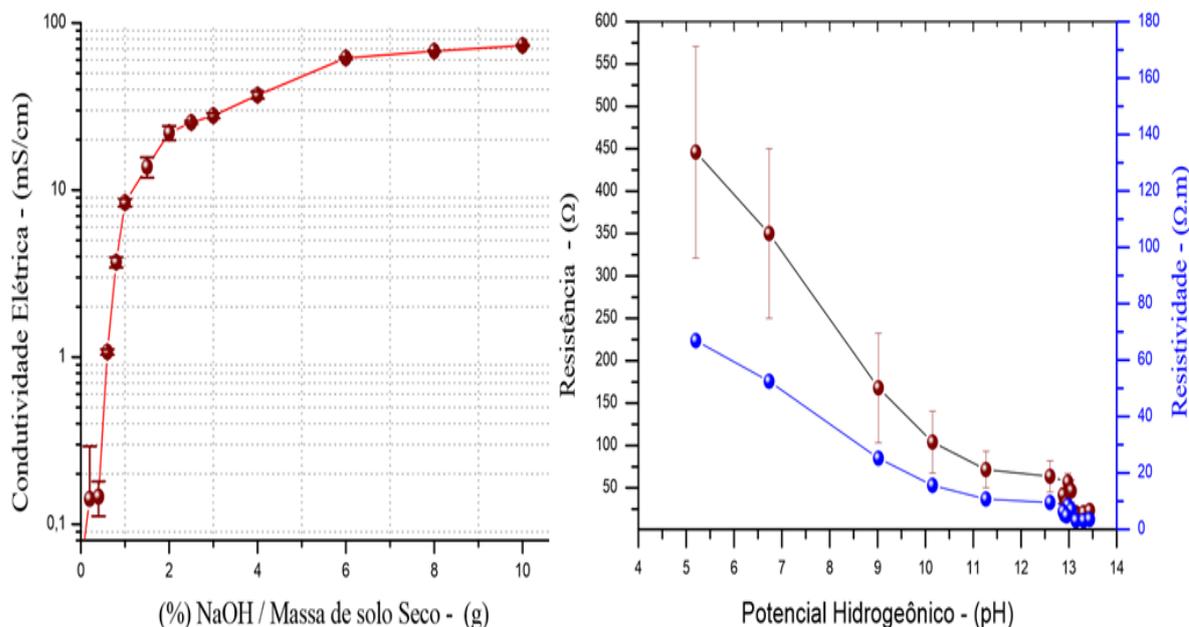


Figura 55 - AM 04, á esquerda condutividade elétrica, á direita resistência elétrica dos solos e suas respectivas resistividades elétricas.

Os resultados obtidos com a AM-05 dentre os materiais estudados, é o que apresentou maior facilidade de modificações da condutividade, resistência e resistividade elétrica.

Nota-se que com valores de adição de dispersante *NaOH* próximos a 1%, praticamente é possível alcançaram uma região onde são constatadas resistividade e resistência bastante baixas, quando comparamos com literatura já explicitada neste capítulo (Figura 56).

Pode-se perceber que a maioria dos materiais aqui estudados após adições entre 1 e 3% *NaOH*, pode alterar a condição de alta resistividade elétrica para uma condição exatamente contrária. Com exceção da amostra AM-02, as demais amostras se encaixam nesta descrição.

Entretanto, mesmo com a exceção constatada na amostra AM-02, quando adicionado 3% de massa de reagente em relação, é possível alcançar baixos valores de resistividade elétrica do material. Mesmo essa amostra, as quais consideraram uma pequena exceção, ainda se encontra nos padrões de adição de dispersante de acordo com Cunha (2013).

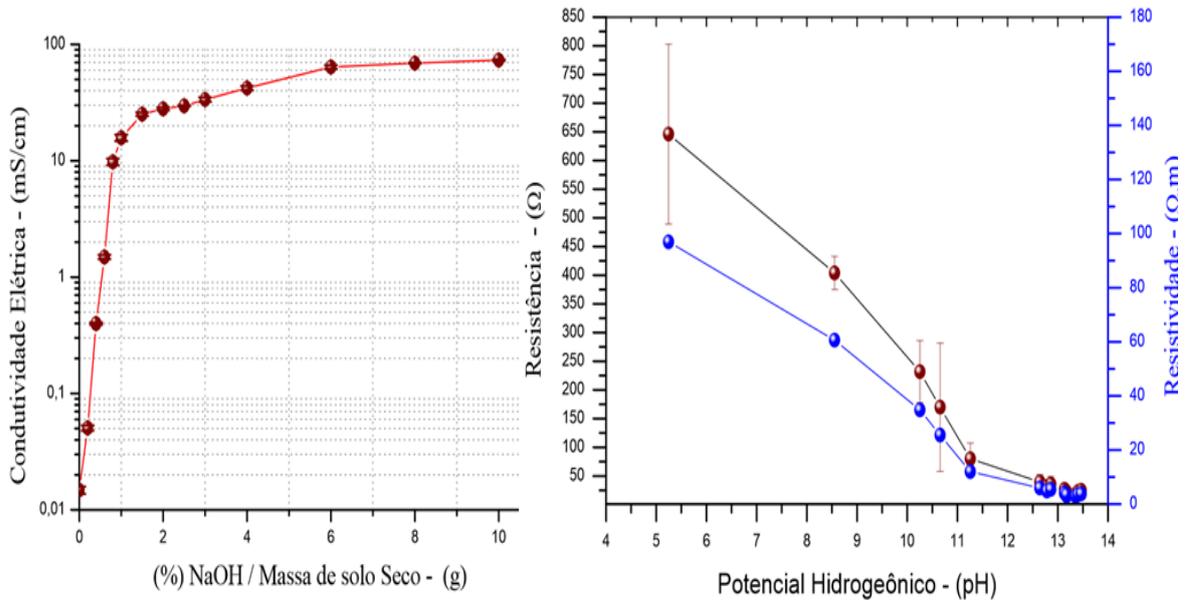


Figura 56 - AM 05: à esquerda condutividade elétrica; à direita resistência elétrica dos solos e suas respectivas resistividades elétricas.

As resistividades inicialmente encontradas nas amostras AM-01, 02, 03, 04 e 05 quando em seu estado natural, podem ser caracterizadas como pouco ou nada condutoras de corrente elétrica, Lago (2007), IEE (2000).

Após as modificação em seu pH, autores como Gandolfo (2007), Modena & Sueta(2011), OBO (2012), Flores (2014), ressaltam que, quando constatado resistividades elétricas abaixo de $150 \Omega.m$, os solos podem ser considerados como condutores elétricos. Logo, inferimos que após as adições de NaOH, foi possível atribuir este adjetivo às amostras estudadas, que antes eram consideradas pouco ou nada condutoras de corrente elétrica.

6.3. Condicionamento para TBM-EPB

Após a avaliação dos principais parâmetros (físicos e químicos) que influenciam diretamente no condicionamento do solo para TBM-EPB, nessa terceira etapa do trabalho verificou-se essa avaliação através da aplicação de algumas condições avaliadas.

6.3.2. Aderências de Solos à Superfícies Metálicas e Dispersão do Clogging em função da adição de diferentes % de NaOH e Corrente Elétrica

O TBM de forma simplificada pode ser comparado a um grande cilindro metálico, e que, contém em seu interior sistemas elétricos e eletrônicos sensíveis. Durante sua operação em regime de escavação, estes sistemas são essenciais para seu funcionamento, além de possuir trabalhadores em seu interior que cumprem variadas funções na operação. Certamente o uso de corrente elétrica imposta a estas condições de contorno deve ser extremamente cuidadoso e controlado. Neste caso, o uso de corrente elétrica direcionada é extremamente conveniente.

Outro ponto que deve ser observado com muita atenção, é quão intensa essa corrente pode ser. Neste trabalho, optou-se por utilizar intensidade variável com corrente máxima não superior a máxima de 4A e voltagem fixa de 30V (limite do aparelho). Visando as condições de segurança publicadas por ABNT -IEC60079-14: 2006, Kindermann (2007), Neitzel (2008), Muniz (2013) e Eston (2016). De acordo com estes autores este nível de intensidade e voltagem é inofensivo ao corpo humano.

Os testes realizados para verificação da condição de clogging do material seguiram as orientações publicadas em Zummsteg & Puzrin (2012), e obedeceu a seguinte sequência: Na Tabela 14, podemos visualizar a umidade natural das amostras durante a coleta.

- Verificar a condição natural sem adição de *NaOH*, variando a umidade do material entre o LL e LP;
- Ensaiar as quantidades de 1, 2 e 3% de adição de massa de *NaOH* em relação a massa se solo seco;
- Ensaiar as quantidades de 1, 2 e 3% de adição de massa de *NaOH* em relação a massa se solo seco acoplado a corrente elétrica contínua (CC);

Nos resultados não são demonstradas as curvas correspondentes aos valores testados na condição 0% de *NaOH*, pois os resultados são semelhantes a condição 0% de *NaOH+CC*, evitamos plotar estes valores, pois os resultados estariam sobrepostos, não sendo possível visualizarmos.

De acordos com os limites publicados em Zumsteg & Puzrin (2012), que pode ser visualizado na Tabela 13, torna-se possível analisar os resultados obtidos através do condicionamento de solo proposto.

Tabela 13 - Intensidade do potencial de adesividade de solos (Zumsteg & Puzrin, 2012).

λ	Intensidade do Clogging
$\lambda > 0.40$	alta
$0.20 < \lambda < 0.40$	Media
$\lambda < 0.20$	Baixa

Na Tabela 14, é possível visualizar os valores da umidade natural dos solos no momento de coleta das amostras.

Tabela 14 - Umidade natural das Amostras na coleta

Amostra	h_{natural} (%)
AM-01	30
AM-02	45
AM-03	33
AM-04	32
AM-05	41

Inicialmente percebemos através dos resultados obtidos na amostra AM-01, que melhorias notáveis em relação ao clogging são constatadas somente com a adição do reagente *NaOH*. É perceptível, que após a adição do dispersante, as curvas 1, 2 e 3% apresentam valores de λ menores que a curva de concentração 0% de NaOH, isso em todos os pontos (Figura 57).

No entanto, nota-se uma melhora significativa quando usamos de maneira conjunta a adição do NaOH e CC. O uso da combinação entre o reagente NaOH, umidade e a CC modifica ligeiramente os resultados de intensidade do clogging de uma condição "alta" para "baixa" intensidade de clogging, com valores de λ , próximos a zero (Figura 57).

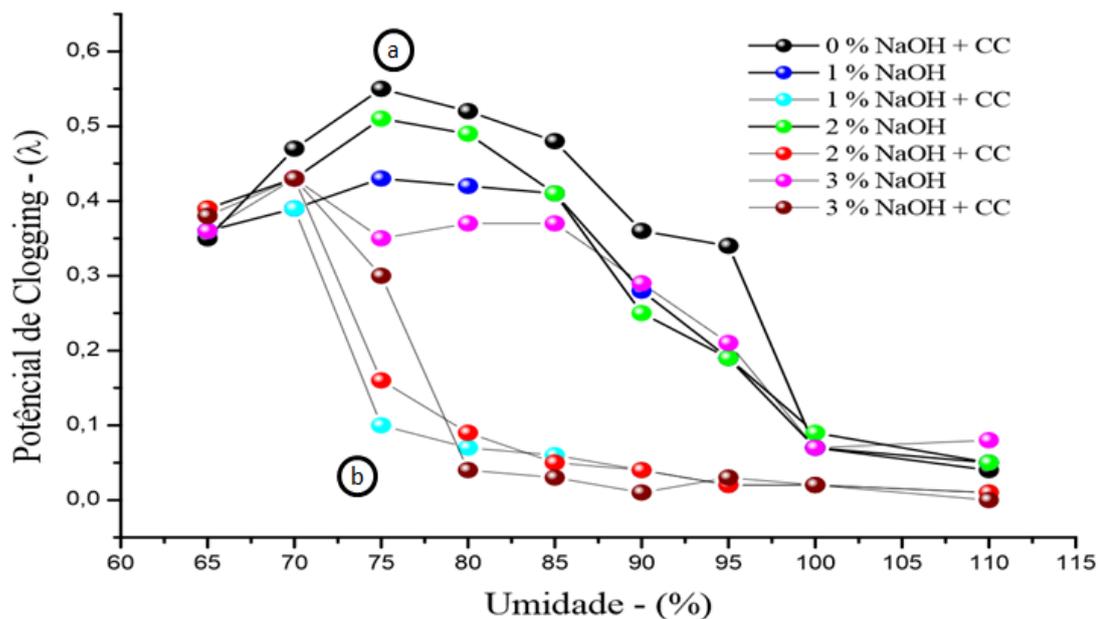


Figura 57 - AM-01 ensaio adesividade em superfície metálica.

Observando a Figura 57, é possível visualizar as regiões (a) e (b), que é ilustrada na Figura 58, onde são constatadas as diferenças entre, antes e depois da aplicação da corrente elétrica combinada com NaOH.



Figura 58 - AM 01 - comparativo de eficiência (a) antes da passagem da corrente elétrica, 1% NaOH (b) após aplicação de corrente contínua de 30V, 4A na condição 1% NaOH+CC.

Os resultados obtidos através da amostra AM-02, também apresentam melhorias significativas quando se observa separadamente a adição do dispersante NaOH em relação a solo em sua condição natural. Porém, é evidente que o acoplamento da CC promove melhora muito mais significativa em relação a aderência do solo à superfície metálica (Figura 59).

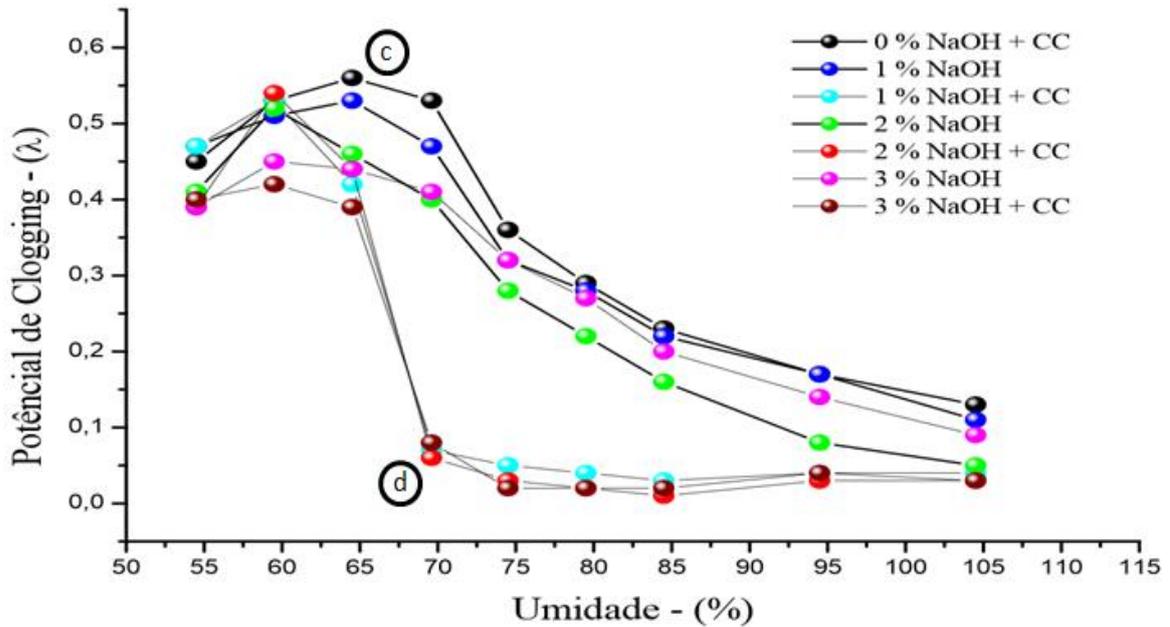


Figura 59 - AM-02 ensaio adesividade em superfície metálica.

Na Figura 59, ilustrativamente são indicadas as regiões (c) e (d), que se relacionam com a Figura 60, onde são demonstrados os resultados obtidos com adição de 2% de NaOH. O ponto (c) representa a condição antes de passagem da corrente elétrica, e (d) imediatamente após a corrente elétrica.



Figura 60 - AM 02 - comparativo de eficiência (c) antes da passagem da corrente elétrica, 2% NaOH (d) após aplicação de corrente contínua de 30V, 4A na condição 2% NaOH + CC.

Analisando os resultados obtidos a partir da amostra AM-03, podemos constatar uma eficiência superior as demais amostras, usando somente o dispersante na concentração de 1%, isso quando comparado ao solo em seu estado natural.

De forma semelhante aos demais resultados até aqui apresentados, constata-se uma grande eficiência acoplando CC mais dispersante NaOH. Outro ponto que também chama atenção, é que nos resultados obtidos da amostra AM-03, a concentração de 1% de NaOH, mais a CC, somente apresenta eficiência após a umidade de 65%. Já para as dosagens de 2 e 3%, é possível observar uma eficiência já a partir de umidades superiores a 55%, ou seja, a polaridade da água também têm papel fundamental nesta forma de condicionamento de solos (Figura 61).

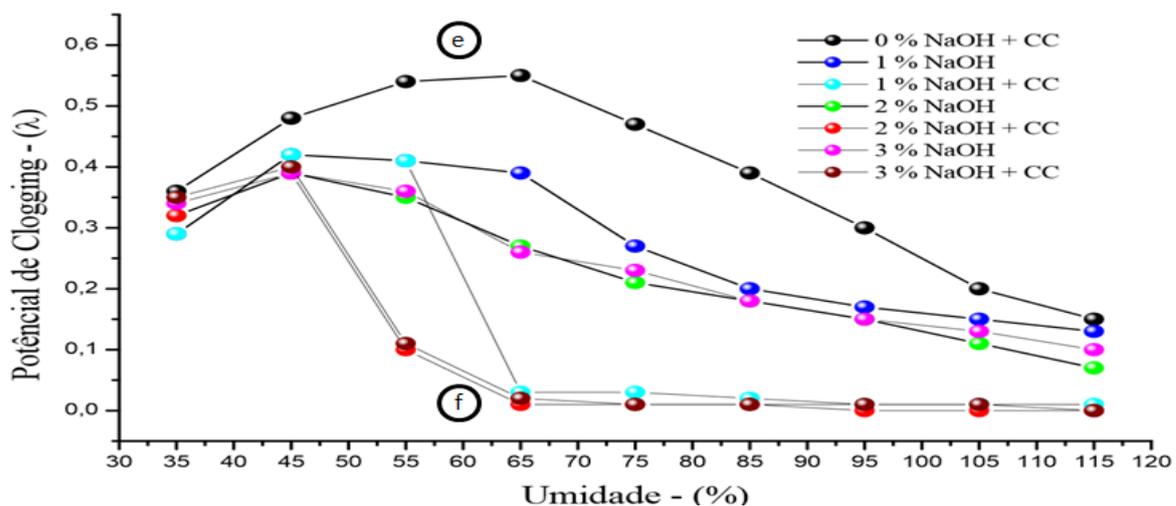


Figura 61 - AM-03 ensaio adesividade em superfície metálica.

Relacionando a Figura 61 com a Figura 62, podemos observar que as regiões (e) e (f), que aqui ilustram os resultados de adição de 2% NaOH na umidade de 65%. Nesta região constata-se um valor de λ entre 0,30 a 0,35, valores estes considerados altos de acordo com Zumsteg & Puzrin (2012). Na Figura 62, o ponto (e) representa o resultado antes da passagem da corrente elétrica e (f) representa o resultado após a passagem da corrente elétrica.



Figura 62 - AM 03 comparativo de eficiência (e) antes da passagem da corrente elétrica, 2% NaOH (f) após aplicação de corrente contínua de 30V, 4A na condição 2% NaOH +CC, umidade de 65%.

Observando os resultados obtidos através da AM-04, podemos notar que para as adições de dispersante superiores a 1%, o solo apresenta semelhança com as demais concentrações de dispersante, ou seja, neste caso concentrações maiores que 1% de NaOH parecem não promover melhorias quanto á aderência na superfície.

Oportunamente, também se pode constatar que quando combinado o uso do dispersante mais a CC entre as umidades de 50 a 55%, a melhoria do índice λ pode ser notada como nas demais amostras (Figura 63).

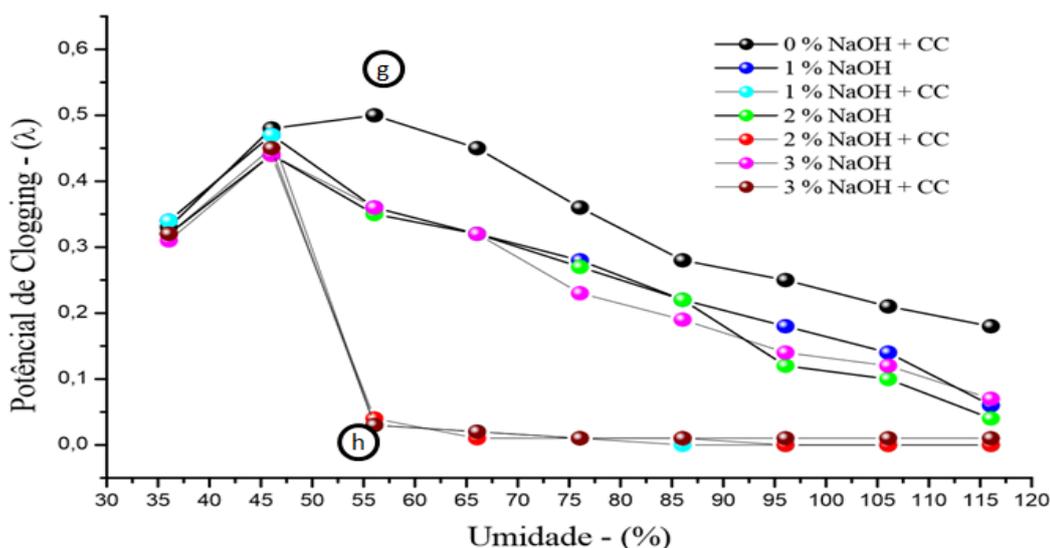


Figura 63 - AM-04 adesividade em superfície metálica.

Na Figura 64 apresentam se os resultados obtidos através da amostra AM-04. O ponto ilustrado corresponde a condicionamento do solo com adição de 1% de NaOH, umidade de 55%. De forma semelhante às amostras demonstrada anteriores, (g) representa o resultado obtido com condicionamento de solo somente com dispersante, e (h), representa o resultado obtido após acoplamento da CC ao sistema, pá misturadora, solo umidade e dispersante.



Figura 64 - AM 04 comparativo de eficiência (g) antes da passagem da corrente elétrica, 1% NaOH (h) após aplicação de corrente contínua de 30V, 4A na condição 1% NaOH +CC, umidade de 55%.

Os resultados obtidos a partir das amostras de solo AM-05, não apresentam forte indicio de melhora usando utilizando somente o dispersante NaOH. Podemos perceber, que os resultados obtidos nas adições de 0, 1, 2 e 3% de dispersante apresentam valores de λ próximos. No entanto, quando acoplada a CC entre as umidades de 70 e 75%, também se comprova o efeito benéfico em relação ao enfraquecimento da adesividade do material à superfície da pá misturadora (Figura 65).

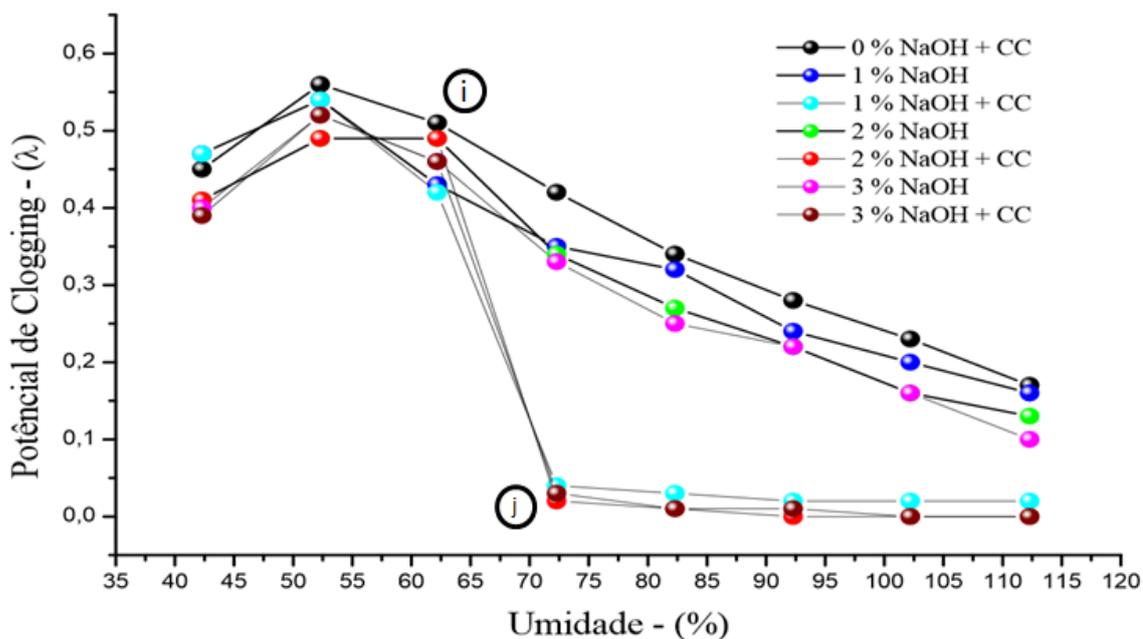


Figura 65 AM -05 adesividade em superfície metálica.

Ilustrando a eficiência do condicionamento de solo, quando observamos a Figura 66, temos na região (i) adição de 2% de NaOH, e umidade de 72,5%, e na região (j) o mesmo ponto, porém após o acoplamento da CC através da amostra.

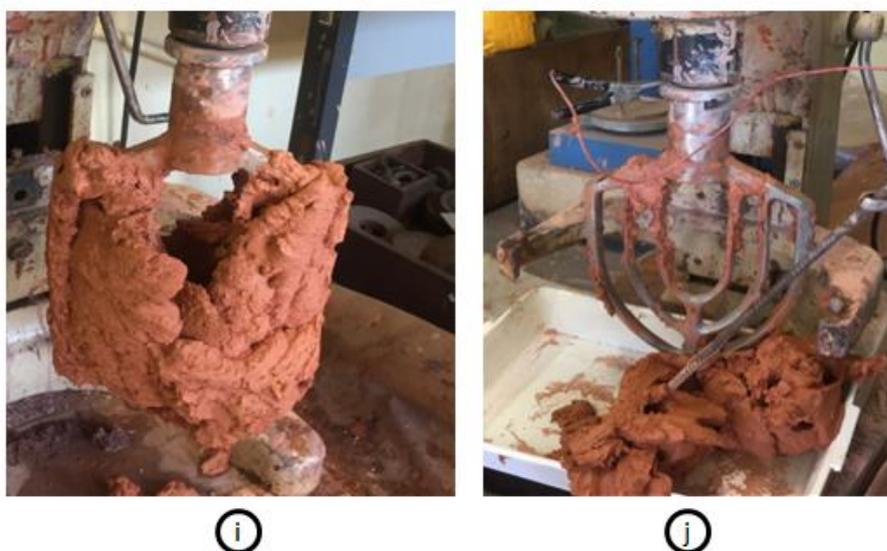


Figura 66 - AM 05 comparativo de eficiência (i) antes da passagem da corrente elétrica, 1% NaOH (j) após aplicação de corrente contínua de 30V, 4A na condição 1% NaOH +CC, umidade de 72,5%.

Após analisar os resultados obtidos através das amostras de solo estudadas, de maneira geral, percebemos que a adição de NaOH é capaz de promover benefícios ao enfraquecimento da adesividade em relação as superfícies metálicas. Entretanto, percebe-se também que o ponto ótimo de adição de NaOH está entre concentrações de 1 e 2% de dispersante NaOH em relação a massa de solo seco. Quantidades superiores a 2% de dispersante não proporcionam benefícios significativos em relação ao enfraquecimento das adesividade do material à superfície metálica.

Outro ponto que também deve ser observado, é que, somente é constatado benefícios ao condicionamento do solo após certo nível de umidade das amostras. De maneira geral, os solos apresentaram bastante eficiência no condicionamento quando as amostras apresentavam umidade entre 20 e 30%, superior ao LP somadas com a CC.

Notou-se também, que ao acoplar a CC nas amostras, o fluxo desta, por ser direcionado, parece arrastar a água para a superfície metálica da pá misturadora. Esse pequeno filme de água que é arrastado para a superfície da pá misturadora, conseqüentemente diminui o atrito entre material e superfície, que oportunamente enfraquece a aderência entre os materiais culminando com seu desprendimento. Exemplo disso pode ser visualizado na Figura 67, onde é possível observar parte da superfície totalmente limpa.



Figura 67 - Vista da superfície da massa de solo imediatamente após a passagem da corrente elétrica.

Observarmos após os resultados das cinco amostras ensaiadas, é possível perceber que o material alcança uma condição de "baixo" potencial de clogging também quando aditivado com o dispersante NaOH em umidades elevadas, em geral acima de 110%. É importante lembrar, que estamos supondo uma escavação mecanizada em modo TBM-

EPB, e nesta condição, temos (umidade acima de 110%) o material demasiadamente fluído, o que de certa forma não cumpre os requisitos de densidade aparente e trabalhabilidade que o modo de escavação exige. De acordo com critérios publicados por Quebaud (1998), Langmaack (2000), Vinai (2006), Wehrnemeyer (2007), Peila et al. (2009), Maidl et al. (2012), algumas necessidades básicas como dissipação de pressões e trabalhabilidade precisam ser cumpridas neste modo de escavação.

Para se estimar a tensão elétrica necessária capaz de promover os benefícios comprovados através dos ensaios demonstrados neste capítulo, se faz necessário substituir a equação (17) na equação 18 - (Bis da equação 14).

$$i = \frac{V}{R} \quad (17)$$

Onde:

i = Corrente elétrica (A);

V = Tensão elétrica (V);

R = Resistência elétrica do meio (Ω);

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (18)$$

Onde:

R = Resistência (Ω);

L = Comprimento (m);

S = Área (m^2);

ρ = Resistividade ($\Omega.m$).

Depois de substituir a equação 17 na equação 18, podemos reescrever a equação 20. lembrando que a densidade da corrente elétrica pode ser expressa pela equação 19.

$$J = \frac{i}{A} \quad (19)$$

Onde:

J = Densidade de corrente elétrica (A/m^2);

i = Corrente elétrica (A);

A = Área (m^2);

Reescrevendo o ultimo termo da equação 19 e substituindo $L.S = \text{volume (vol)}$, podemos apresentar a equação 20:

$$V = \rho \cdot \frac{L}{S} \cdot i = \rho \cdot L \cdot J \quad (20)$$

Onde:

V = Tensão (V);

i = Corrente elétrica (A);

L = Comprimento(m);

S =Área (m²);

J = Densidade de corrente elétrica (A/m²);

Aplicando a equação 20 nos resultados demonstrados neste capítulo, podemos observar a Tabela 15, o valor da tensão em CC necessária para promover a limpeza da superfície. Na coluna 05 desta mesma tabela podemos observar os valores necessários para promover a limpeza da superfície da pá misturadora.

Tabela 15 - Estimativa de tensão elétrica para promover limpeza de superfícies metálicas da pá misturadora.

Amostras	J (A/cm²)	ρ ($\Omega.m$)	Area pá (m²)	Vcc Exper. (V)
AM-01	0,00805	1,95	0,09940	15,6
AM-02	0,00805	2,51	0,09940	20,1
AM-03	0,00805	3,33	0,09940	26,6
AM-04	0,00805	3,51	0,09940	28,1
AM-05	0,00805	3,71	0,09940	29,7

Será considerada uma situação hipotética de escavação de um TBM-EPB de aproximadamente 9,40m de diâmetro (comum em traçado de metrô), onde o efeito clogging pode ocorrer na região do escudo da roda de corte (ver Figura 68 esquemática).

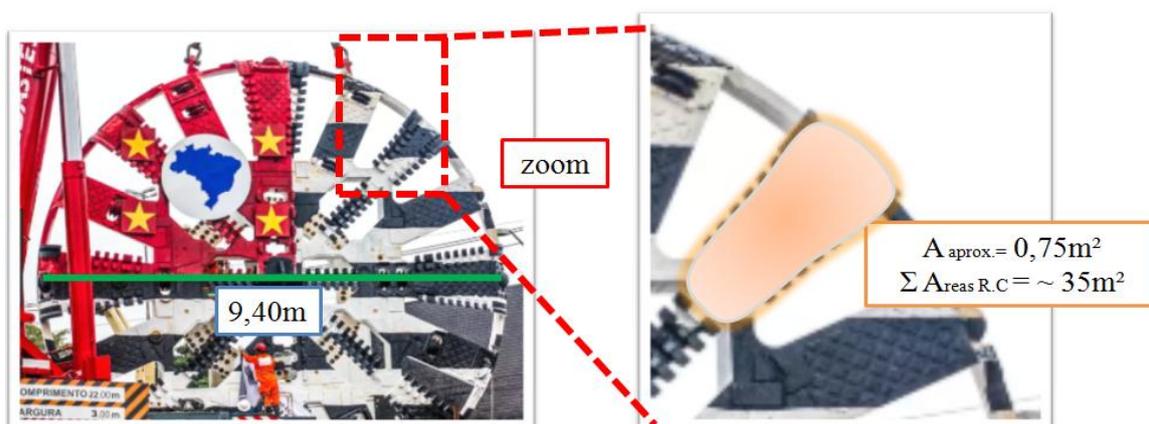


Figura 68 - Cálculo de áreas esquemáticas de roda de corte TBM-EPB (modificado de Lopes, 2013).

Consideram-se os valores e as variáveis anteriormente abordadas neste capítulo, extrapolando estes números para uma roda de corte hipotética, adotando toda a área do contato entre maciço escavado e TBM-EPB. Neste caso a situação hipotética simula a condição para um TBM-EPB com ϕ 9,41m. Neste caso, seriam necessárias correntes e potências demonstradas na Tabela 16, para promover a limpeza total da roda de corte em possível ocorrência de clogging.

Tabela 16 - Tensão em CC para TBM-EPB com diâmetro de 10m, situação hipotética.

Amostras	TBM- EPB ϕ 9,40m (V)	TBM- EPB ϕ 9,40m - Pot(W)
AM-01	102	13.058
AM-02	131	16.807
AM-03	174	22.298
AM-04	184	23.504
AM-05	194	24.843

Trabalho de bastante impacto na área sobre o tema de clogging publicado recentemente por Oliveira (2018), aborda misturas artificiais entre areia + Bentonita e areia + Caulonita. Aquele trabalho condiciona estas mistura de materiais com uso de produtos comerciais (espumas simples e espumas com adição de polímeros anti-argila). Os resultados encontrados apresentam eficiência significativa, pois é possível conduzir o material desde uma condição de "alto potencial de clogging" para uma condição de "médio potencial de clogging", ou até mesmo, para uma condição de "baixo potencial de clogging". Porém, quando se analisa esta eficiência obtida nas misturas compostas por Bentonita e por Caulinita, há certo desequilíbrio nos resultados. No caso da mistura que leva Bentonita, a eficiência é de 58% e na mistura que leva Caulinita é de 40% para as misturas de solos condicionadas com o produto A (espuma simples). Já as misturas condicionadas com os produtos B e C (espumas com agentes anti-argila), nos solos que levam Bentonita temos eficiência entre 80 e 90% e para as misturas de solos que levam Caulinita, a eficiência está entre 55 e 60%.

No caso da pesquisa apresentada neste trabalho, nota-se um equilíbrio maior da eficiência do condicionamento dos solos, pois de maneira geral, foi possível observar que a eficiência é sempre maior que 95% em todos os materiais. Outro ponto que devemos abordar, é que neste estudo conduzimos o condicionamento de solos em materiais naturais com as mais diferentes composições. É possível visualizar através das figuras esboçadas neste capítulo, que após a aplicação da CC + condicionamento de solo com NaOH, que a quantidade de material que permanece na pá misturadora é pequena.

Apenas a título de informação testou-se o uso de corrente alternada com voltagem de 30, 60, 110 e 220 V, e corrente variando entre, 4, 8, 20 e 30A respectivamente. De forma resumida, constatou-se que parte da corrente alternada ao passar pela amostra foi dissipada em calor e promoveu uma secagem da amostra, tornando ainda mais intenso o poder de adesividade da amostra de solo à superfície da pá misturadora. Conceitualmente este resultado era esperado já que os íons não se movem apenas em um sentido.

6.3.3. Teste de Escavabilidade (Slump Test e Densidade Aparente dos Solos)

O principal foco em condicionar um material escavado em uma escavação mecanizada, é proporcionar a este material uma condição para que a técnica do TBM-EPB possa ser realizada adequadamente, e ajude o equipamento atingir a melhor eficiência possível, seja ela por meio de impedir fenômenos como clogging, ou sob forma de dissipações de pressões. Neste último item a densidade aparente do material e sua trabalhabilidade são pontos extremamente importantes.

Após submeter os materiais ao condicionamento exposto nos capítulos anteriores, foi necessário comprovar que além do efeito de enfraquecimento da adesão entre a superfície metálica e o material, o condicionamento ainda é capaz de atender os parâmetros de escavabilidade em um TBM-EPB. De acordo com os ensaios realizados, apresentaremos somente as melhores condições adquiridas nas etapas anteriores. Em resumo, os testes foram realizados nas concentrações de NaOH 0, 1 e 2%. A concentração de 0%, representa o solo em estado natural, e serve como base comparativa às concentrações de 1 e 2% de *NaOH*. Todos os ensaios foram realizados com umidade crescente, assim como realizado os testes de aderência do material.

Nesta etapa de condicionamento dos solos, não foi acoplada a CC. Entendemos que o seu uso têm papel fundamental no desprendimento do material à roda de corte do TBM-EPB. Para se testar o uso da CC nos termos de trabalhabilidade e densidade aparente, um modelo reduzido de parafuso sem fim seria necessário. Sabemos que o clogging também é uma problemática neste componente de um TBM-EPB, entretanto o principal foco desta pesquisa não é este.

Inicialmente, nos resultados obtidos através da amostra AM-01, foi possível perceber que na condição natural (0% de dispersante NaOH), que o material apresenta valores de abatimento de cone menor que quando comparado aos resultados onde há adição de dispersante na concentração 1 e 2%. Neste caso, no teste de abatimento de cone, valores menores implicam em material menos trabalhável.

Isso comprova que a adição de NaOH promove melhorias em relação à trabalhabilidade do material. O mesmo ocorre nos resultados de densidade aparente. Inicialmente, é possível visualizar que a concentração de 0% apresenta maior densidade aparente. Notadamente a adição de NaOH pode tornar o material menos denso (Figura 69).

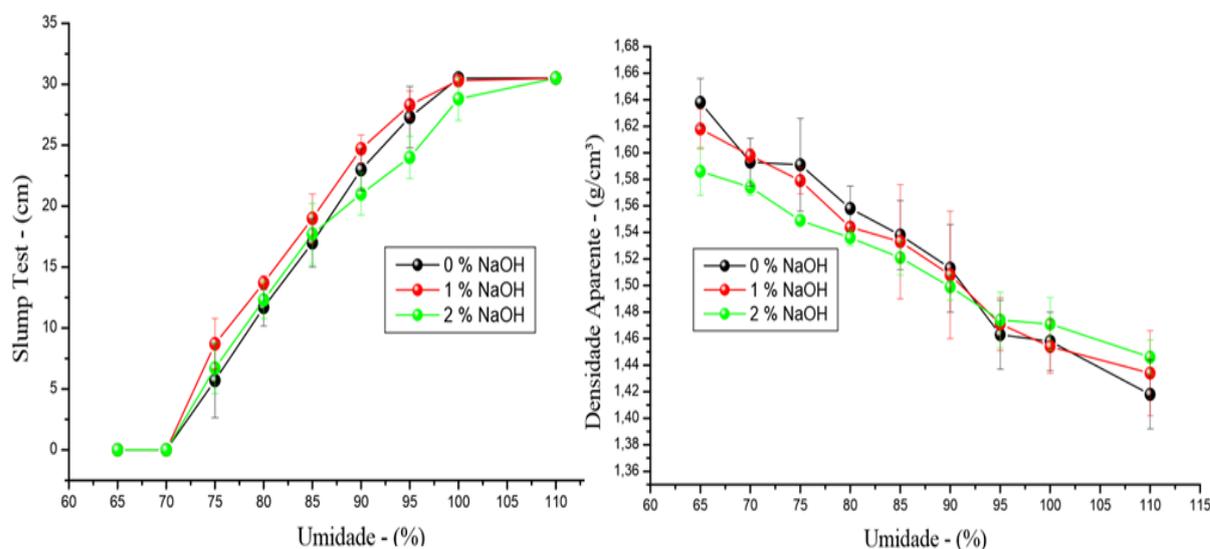


Figura 69 - AM 01, a esquerda resultados de ensaio de abatimento de cone, a direita resultada de ensaios de densidade aparente.

Os resultados obtidos no ensaio de enfraquecimento de adesividade da amostra AM-01, indicam uma eficiência bastante elevada entre as umidades de 80 e 85%. Neste sentido, quando se analisa as umidades tanto no resultado de abatimento de cone, quanto no resultado de densidade aparente, é possível notar que os padrões citados por Peila et al. (2009), Langmaack (2000) são atendidos (Figura 70).



Figura 70 - Amostra AM-01 resultados de abatimento de cone com umidade de 85% e concentração de NaOH de 2%.

Nos resultados obtidos através da amostra AM-02, é possível perceber que o material quando realizadas as adições de dispersante NaOH não apresenta melhoras significativas, pois, nota-se que os resultados na concentração 0, 1 e 2% são demasiadamente próximos. Já quanto à densidade aparente do material, percebe-se que nas as umidades maiores que 80%, maior eficiência é constatada para concentração de 1% de NaOH (Figura 71).

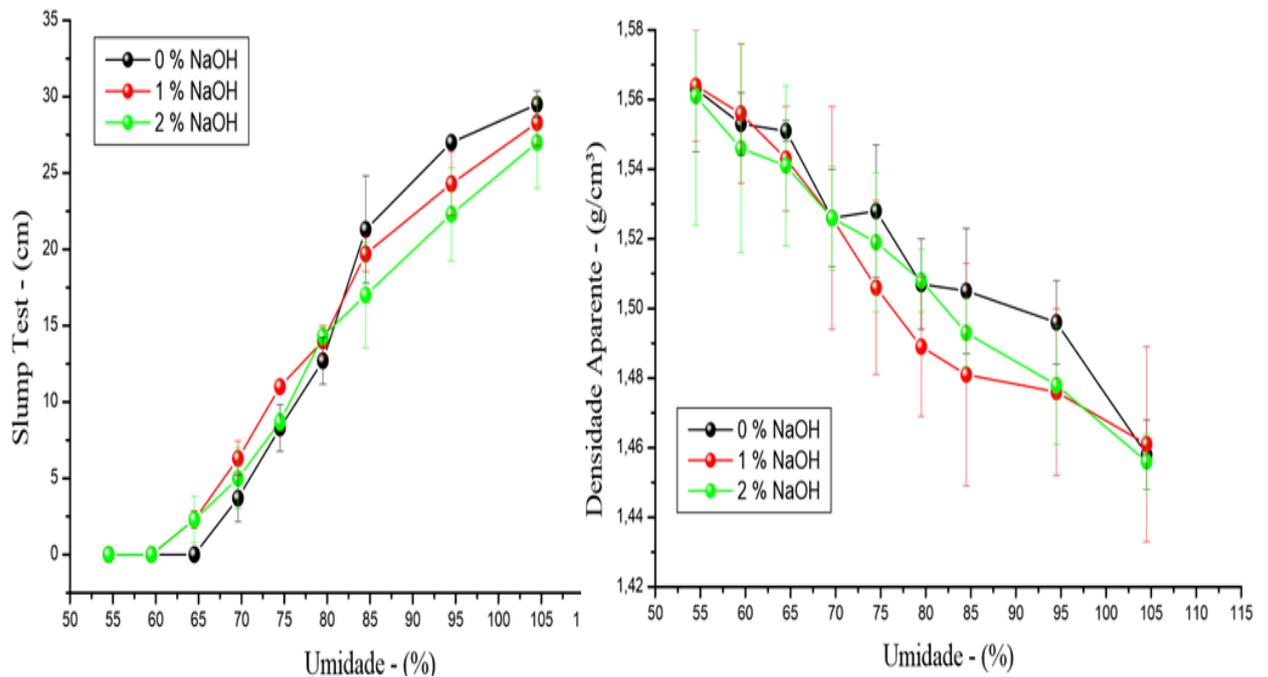


Figura 71 - AM 02, a esquerda resultados de ensaio de abatimento de cone, a direita resultada de ensaios de densidade aparente.

Os resultados obtidos no ensaio de adesividade das superfícies metálica para a amostra AM-02 demonstram que o condicionamento apresentou eficiência elevada entre as umidades de 70 e 75%. Nesta faixa de valores, temos abatimento de cone entre 7,5 e 10 cm, valores estes, que estão abaixo dos padrões de trabalhabilidade (10 e 20 cm) citados por Quebaud et al (1999), Peila et al. (2009) e Maidl et al. (2012).

Já os resultados obtidos através dos ensaios de densidade aparente encontram-se nos padrões esperados para uma escavação TBM-EPB, pois, entre os valores de umidade de 70 e 75% (as concentrações de 0, 1 e 2% de NaOH), é possível visualizar valores entre 1,6 e 1,8 g/cm³, e que são compatíveis com a literatura.

Nos resultados obtidos através da amostra AM-03, verificou-se uma eficiência no enfraquecimento de adesividade à superfície metálica e o material com umidades variando entre 55 e 60%. Facilmente, é possível notar que nestas umidades o material não apresenta a trabalhabilidade citada por Werhнемeyer (2007), Peila et al. (2009) e Lagmaack (2000).

Neste caso para que se atendam os padrões seria necessário de abatimento de cone o material deve estar entre a faixa de umidade de 65 a 90%.

Para o fator densidade aparente do material, praticamente todos os resultados estão dentre a faixa de valores especificados pela literatura (1,4 e 2,0 g/cm³), Herrencknecht & Rhen (1999) (Figura 72).

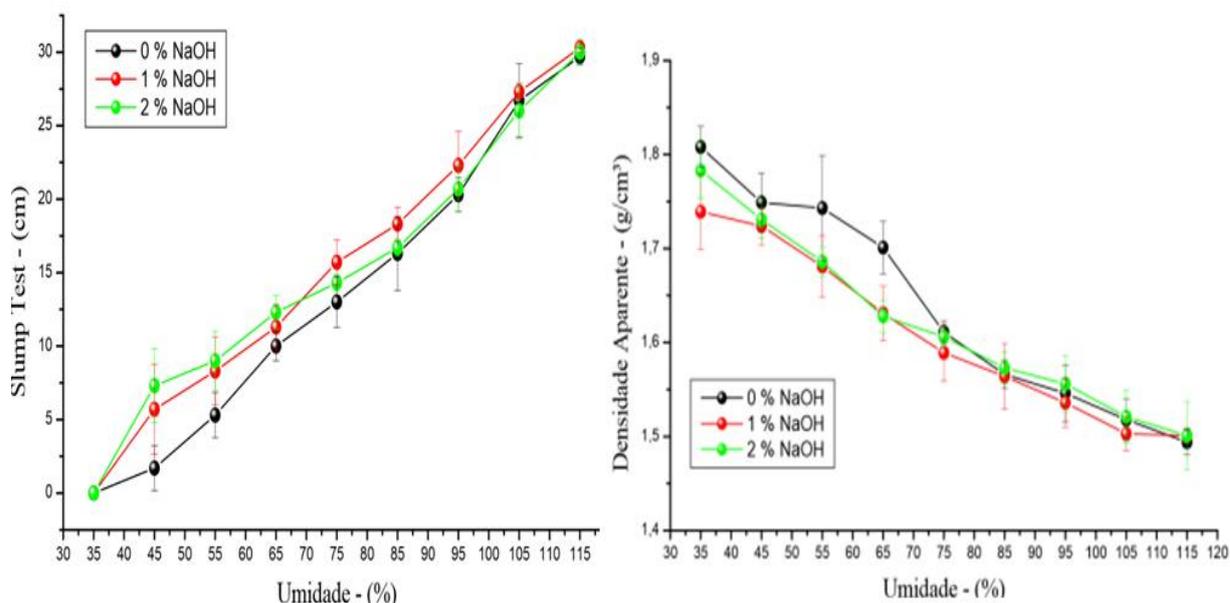


Figura 72 - AM 03, a esquerda resultados de ensaio de abatimento de cone, a direita resultada de ensaios de densidade aparente.

Na ocasião se ilustra o ensaio de abatimento de cone da amostra AM-03, que foi realizado na umidade de 75% e concentração de NaOH igual a 1%. Neste ensaio, obtivemos abatimento de cone de 16,5cm, e densidade aparente do material 1,66g/cm³,

resultados que satisfazem as condições ideais para uma escavação TBM-EPB, segundo a literatura citada por Langmaack (2000), Oliveira (2018) e Diederichs (2018), (Figura 72).



Figura 73 AM-03 abatimento de cone de 16,5cm umidade de 75% e concentração de 1% de *NaOH*.

Nos resultados obtidos a partir da amostra AM-04, é possível perceber que em umidades acima de 90% o efeito do dispersante NaOH não apresenta resultados contundentes em relação à trabalhabilidade deste material.

No capítulo anterior, também foi possível notar que a eficiência de enfraquecimento à adesividade para este material ocorreu a partir de umidades acima de 70%. Entretanto, a umidade que nos indica um padrão de trabalhabilidade desejável para as escavações TBM-EPB pode ser encontrada entre as umidades de 75 e 100% (Quebaud et al. 1999).

Ao que se refere à densidade aparente adquirida pela amostra AM-04, nota-se que melhoras significativas são constatadas com o acréscimo de concentração de dispersante. No geral, percebemos que os valores obtidos estão entre densidades aparentes que variam entre 1,46 a 1,66 g/cm³, ou seja, a amostra em seu estado natural teoricamente já estaria entre os limites citados na literatura (Figura 74).

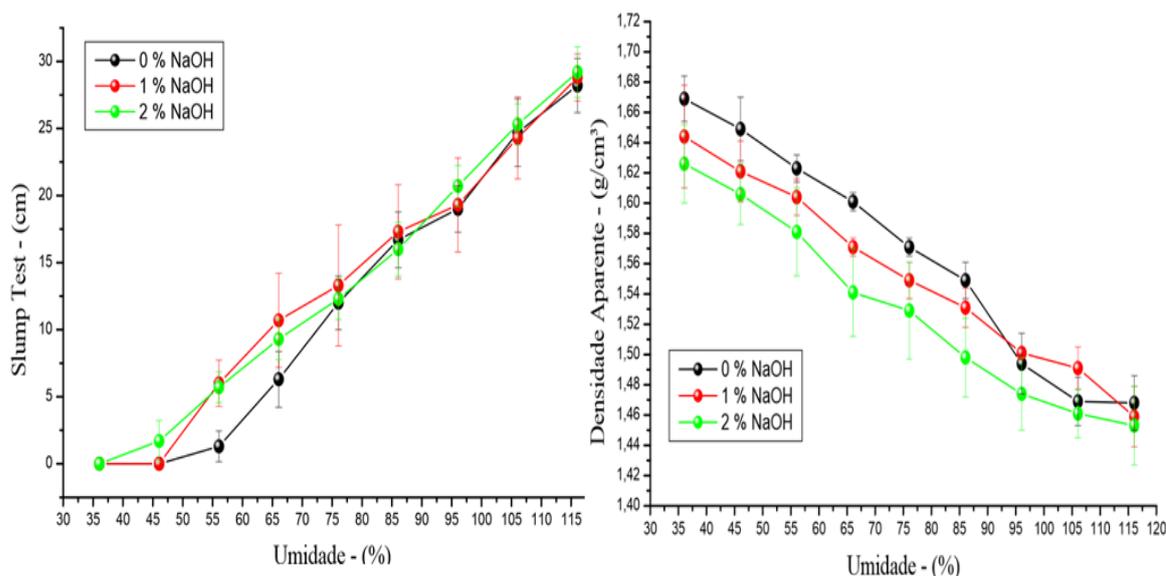


Figura 74 - AM 04, a esquerda resultados de ensaio de abatimento de cone, a direita resultada de ensaios de densidade aparente.

Analisando os resultados obtidos através a amostra AM-05, nota-se um efeito bastante pronunciado com os acréscimos de concentração de NaOH. No capítulo anterior, podemos constatar que nas concentrações de 1 e 2% de NaOH, obtivemos um efeito satisfatório no enfraquecimento da adesão à superfície metálica, isso para as umidades superiores a 70%. Porém, o material apenas adquire trabalhabilidade requerida para os padrões TBM-EPB em umidades que variam entre 75 e 95%.

Esta trabalhabilidade é refletida entre valores de abatimento de cone que estão entre 10 e 20 cm (Peila et al., 2009). O que não ocorrem nos resultados de densidade aparente. Nesta amostra temos um material condicionado que varia entre 1,70 a 1,50 g/cm³. Desta forma, percebe-se de maneira clara, que o efeito do acréscimo de concentração do NaOH, está associado a um decréscimo entre 3 e 4% nos valores de densidade quando se acrescenta o dispersante na proporção de 1 e 2% (Figura 75).

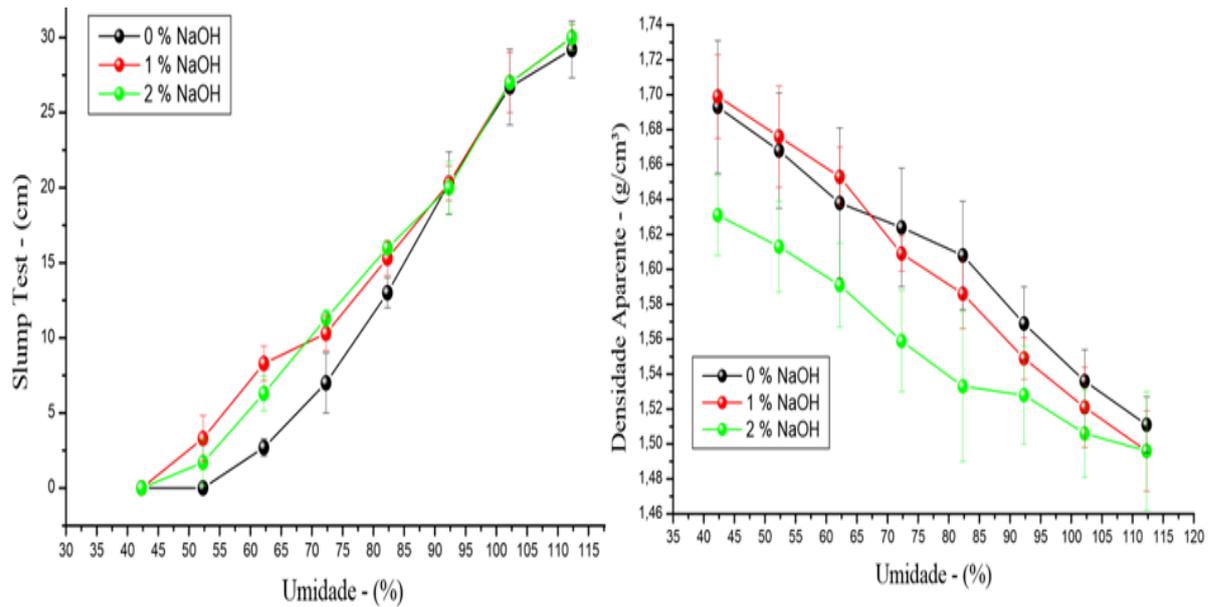


Figura 75 - AM 05, a esquerda resultados de ensaio de abatimento de cone, a direita resultada de ensaios de densidade aparente.

No geral, foi possível perceber que as umidades e concentrações em que se refletem uma boa trabalhabilidade do material para o modo de escavações TBM-EPB, estão ligeiramente deslocadas cerca de 10 a 15% acima do ponto onde se tem o máximo aproveitamento quanto a dispersão do efeito clogging. Assim, entendemos que após a ação dissipação do clogging, o material necessitaria de adições de pequenas quantidades de água, para que os padrões citados por diversos autores como: Quebaud et al. (1999), Langmaack (2000), Peila et al. (2009), Maidl et al. (2012), Herencknecht & Renh (2012), Thewes & Holmann(2012), Garroux (2018) sejam atendidos.

Em relação à densidade aparente do material, percebemos que os valores compatíveis com as referências literárias são encontrados. Além disso, é possível visualizar com clareza que os resultados obtidos com a adição do dispersante NaOH, pode sim ajudar a diminuir a densidade aparente do material condicionado, hora com maior intensidade (AM-04 e AM-05), hora com menor intensidade (AM-01, AM-02 e AM-03), entretanto as melhorias são constatadas.

6.4. Análise Comparativa de imagens de Microscopia Antes e Após o Condicionamento de Solos

Depois de cumprir as etapas de condicionamento dos solos para escavações TBM-EPB, e submeter o material aos mais diversificados procedimentos (mudança de pH , passagem de corrente elétrica), se fez necessário a obtenção de imagens onde fosse possível visualizar e contabilizar as mudanças físicas ocorridas na estrutura do material, a qual denominamos de 4 etapa do trabalho.

Inicialmente, na estrutura do material que compõe a amostra AM-01 (Figura 76-a), na imagem que representa a amostra em seu estado natural, é possível visualizar que a estrutura que compõe o material, de maneira geral é composta por formas foliadas e orientadas em todos os sentidos. Este mesmo padrão não pode ser observado na estrutura do material após o condicionamento (Figura 76-b).

Nota-se que após condicionamento dos solos, a estrutura deixa de apresentar forma foliada e contínua, e dar lugar a uma estrutura totalmente desorganizada.

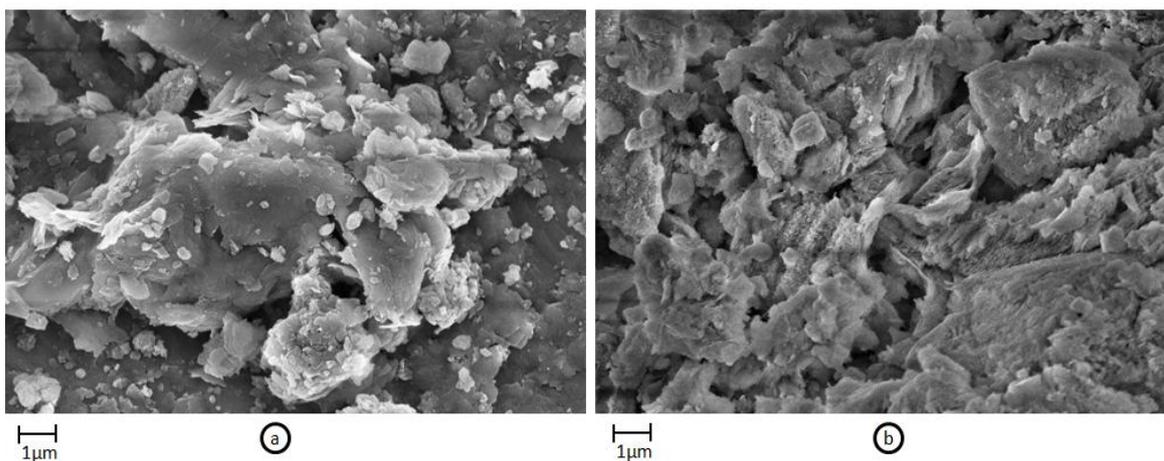


Figura 76 - AM-01, (a) imagem MEV antes do condicionamento do solo com $NaOH$, (b) imagem MEV após o condicionamento do solo com $NaOH$ e passagem da corrente elétrica.

Os resultados obtidos na amostra AM-02 pode ser observado Figura 77 (c) e (d). Inicialmente a amostra AM-02 antes de ser submetida ao processo de condicionamento de solos, apresentava uma estrutura composta por lamelas justapostas e adjacentes bastante fechadas (Figura 77-c).

Após o condicionamento dos solos a estrutura agora observada (Figura 77-d), é composta por uma estrutura totalmente descontínua e vazada. De forma geral, é possível perceber a presença de alvéolos que anteriormente não podiam ser visualizados. De forma mais clara que constatado na amostra AM-01, na amostra AM-02, a estrutura fisicamente visualizada no pós-condicionamento dos solos não guarda nenhuma semelhança física da estrutura original.

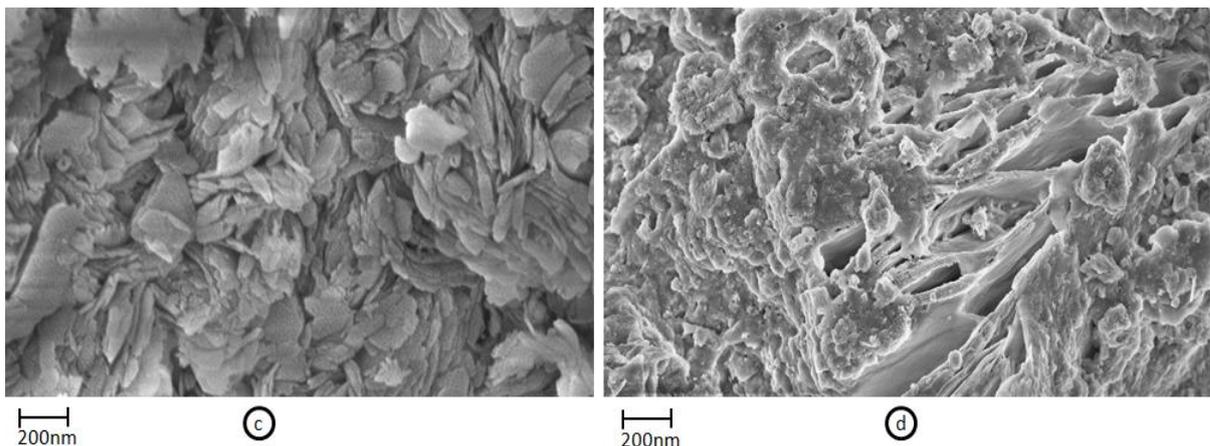


Figura 77 - AM-02, (c) imagem MEV antes do condicionamento do solo com $NaOH$, (d) imagem MEV após o condicionamento do solo com $NaOH$ e passagem da corrente elétrica.

Na amostra AM-03, as modificações constatadas fisicamente antes e após o processo de condicionamento de solos não apresenta uma modificação exorbitante como na amostra AM-02.

Quando comparamos as imagens (Figura 78 (e) e (f)), onde (e) representa a estrutura do material antes do condicionamento e (f) após, é possível perceber que de maneira geral a estrutura emparelhada de lamelas é preservada. No entanto, percebemos que no pós-tratamento se nota uma estrutura mais aberta.

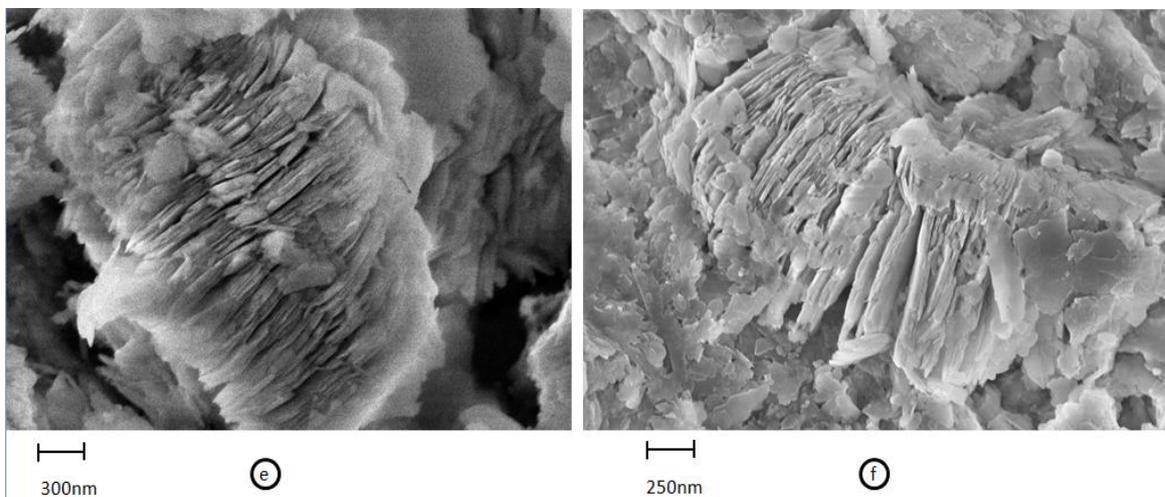


Figura 78 - AM-03, (e) imagem MEV antes do condicionamento do solo com $NaOH$, (f) imagem MEV após o condicionamento do solo com $NaOH$ e passagem da corrente elétrica.

Analisando as imagens da amostra AM-04 visualizadas na Figura 79, (g) representa a estrutura do material antes do processo de condicionamento do material, e (h) representa a estrutura do material após o condicionamento dos solos.

Antes do processo de condicionamento a estrutura do material é representada por pacotes lamelares emparelhadas de forma organizada. No entanto, após o processo de condicionamento do material os pacotes aparecem menores, guardam uma aparência de

quebrados e não organizados. De forma clara, parecem ter adquirido orientações diferenciadas criando oportunamente espaços por onde a CC e a água possam fluir.

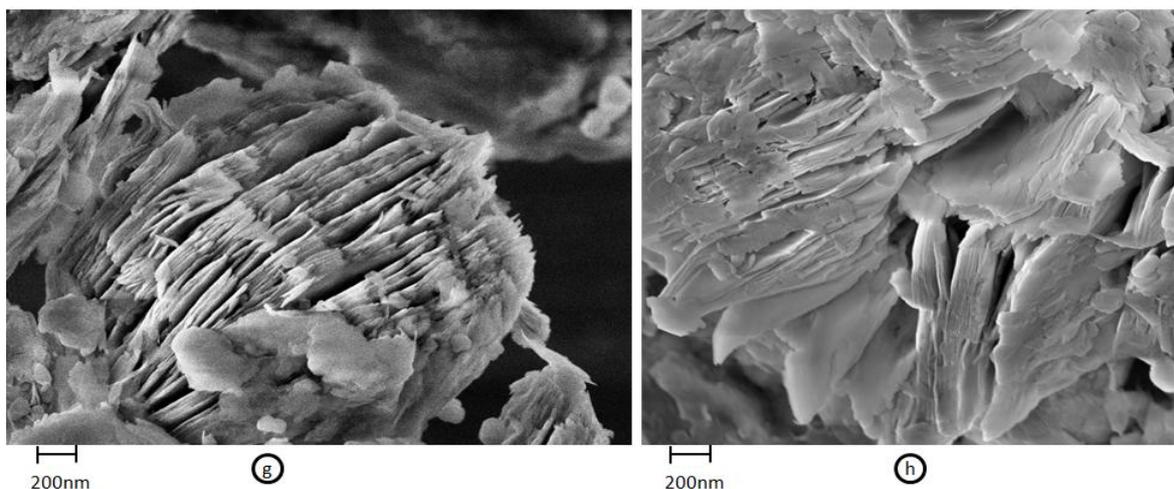


Figura 79 - AM-04, (g) imagem MEV antes do condicionamento do solo com NaOH, (h) imagem MEV após o condicionamento do solo com NaOH.

Os resultados obtidos a partir da amostra AM-05 podem ser visualizados através da Figura 80, onde (i) representa a estrutura antes o processo de condicionamento e (j) representa a estrutura após o processo de condicionamento.

De maneira geral é possível perceber que a estrutura é conservada, semelhante o que ocorre na amostra AM-04. No entanto, percebemos que as estruturas se encontram mais espaçadas, gerando assim oportunamente um número maior de espaços.

Na amostra AM-05 de maneira diferente ao visualizado em outras amostras (AM-04 e AM-02), a estrutura após o condicionamento mantém sua direção orientada como originalmente. É possível perceber que o aspecto geral da estrutura original foi mantido (Figura 80).

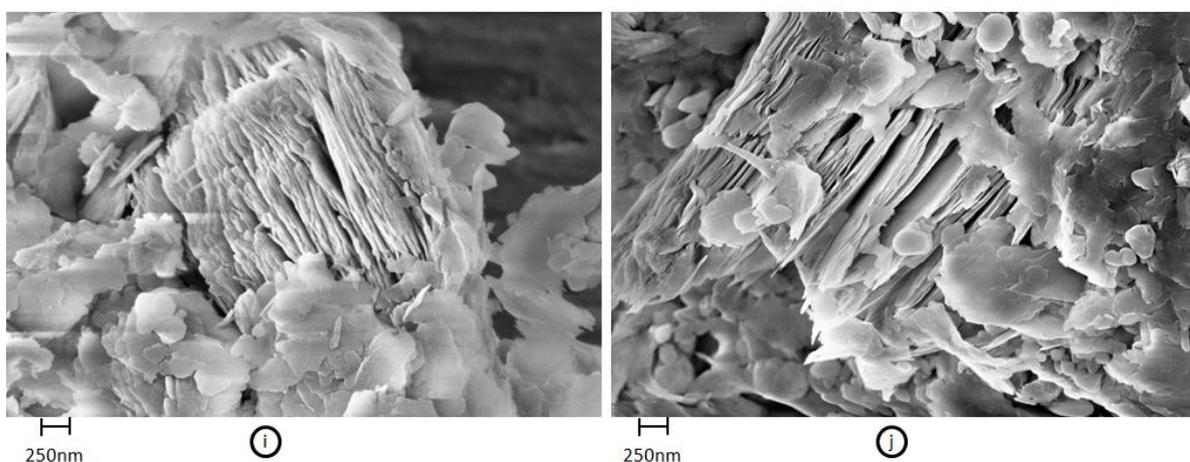


Figura 80 - AM-05, (i) imagem MEV antes do condicionamento do solo com NaOH, (j) imagem MEV após o condicionamento do solo com NaOH.

Foram constatadas alterações físicas na estrutura das amostras após o uso dos agentes e processos condicionantes dos solos. Em algumas amostras estas mudanças apresentam uma mudança bastante contundente, em outras estas mudanças não são grandemente impactantes, entretanto elas existem e podem ser constatadas. De forma bastante clara, as mudanças observadas nos material pós-condicionamento culminam com abertura de espaços entre elas. O que pode ser explicado pela pressão osmótica que é gerada na alteração do pH das amostras. Esse efeito, de forma acertada é aproveitado pela água e a CC para promover a ação de melhoria na aderência destes materiais em superfícies metálicas.

7. Considerações Finais

Com a caracterização geotécnica dos materiais foi possível perceber que, os materiais alvo deste estudo é composto por de amostras de solos com altas porcentagens de finos, cujas suas características marcantes, sobretudo, se destacavam altos índices plasticidade como LL, LP, LC, IC e IP. Supostamente como foi realizado um estudo com foco em escavações subterrâneas através de tuneladoras TBM-EPB, ficou implícito o risco de ocorrência de clogging. Esta condição foi verificada através dos métodos teóricos publicados por diversos pesquisadores da área, que em seus métodos envolvem curvas granulométricas, índices de plasticidade (IP e IC) do material. Como principal resultado da fase de caracterização geotécnica, conclui-se que estes materiais ao serem escavado por um TBM-EPB, supostamente apresentariam sérios problemas de clogging, pois as verificações teóricas indicam potencial formador do fenômeno entre médio a alto.

Para lidar com o suposto problema de desenvolvimento de formação de clogging também se fez necessário identificar os possíveis argilominerais que as amostras detêm. Pois cada argilomineral apresenta comportamentos diferenciados em relação à intensidade e formação do clogging em tuneladoras. Em quase todas as amostras foi possível identificar com abundância os argilominerais caulinita, sepiolita, clorita e feldspato. Estes argilominerais são comuns em solos da formação Corumbatai e Latossolos Roxos e avermelhados comuns dos horizontes geológicos A-B-C do processo de intemperismo da região de São Carlos-SP.

Devido ao processo de intemperismo químico, que é comum em países de clima tropical como Brasil, é normal que os solos apresentem pH levemente ácido. Isso ficou comprovado na caracterização realizada neste estudo. As amostras AM-01, 02, 03, 04 e 05 apresentaram resultados de pH natural de 5,2; 5,7; 5,2; 5,3; e 5,4 respectivamente.

Foi possível constatar que pequenas adições do dispersante NaOH era suficientemente capaz de alterar a condição ácida do pH, para uma condição de alcalina forte. Para atingir a condição em que o pH é classificado como alcalino forte, pequenas quantidades de dispersante precisaram ser adicionadas ao solo. De forma geral, esta condição foi modificada com quantidade entre 1, 2 e esporadicamente 3% de massa de NaOH em relação a massa de solo seco.

Quando alterada a condição do pH das amostras, foi possível constatar diversas outras alterações físicas nas amostras de solo. Este fator está diretamente correlacionado com a cátion H^+ do meio aquoso composto por solo e a água. O fato é que quando se altera o parâmetro citado anteriormente, a resistividade, condutividade elétrica do meio também são alterados.

Os solos aqui estudados em sua condição inicial possuíam índices de resistividade elétrica extremamente altas, e, no entanto, quando se alterou esta condição, registraram-se valores de resistividade elétricos extremamente baixos. Em geral, com adições variando até

de 3% de dispersante, foi possível alcançar níveis de pH entre 11 e 13, o que proporcionou ao material resistividades elétricas entre 1 e 10 Ω .m.

Outra alteração física bastante importante realizada pela alteração do pH do meio, é a pressão osmótica desenvolvida entre partículas de solo. Esta alteração pode ser fisicamente visualizada, quando se compara a estrutura do material antes e após o condicionamento de solos com uso do dispersante NaOH. Facilmente se pode notar através das imagens de varredura de microscopia eletrônica, que, após o condicionamento há aberturas maiores entre as estruturas de um mesmo material.

A alteração do pH da amostra se mostrou fundamental neste estudo, pois todos os parâmetros físicos enumerados acima contribuíram positivamente com a passagem da corrente elétrica pelo material. Em princípio, a variação ocorrida em relação à resistividade elétrica facilitou o fluxo de corrente elétrica direcionada pelo solo. A pressão osmótica gerada contribuiu de forma bastante efetiva proporcionando aberturas em meio à estrutura do material facilitando a passagem da corrente elétrica e da água. A soma destes fatores pode ser evidenciada de forma que: Quando se aplicou a corrente elétrica ao sistema, a água contida na amostra era direcionada e arrastada para a superfície metálica. Este fenômeno foi capaz de criar um filme de água entre o material e a superfície da pá misturadora, que, conseqüentemente diminuir a adesão entre estes materiais culminou com o desprendimento do solo. Neste sentido, para promover a limpeza da roda de corte de um suposto TBM-EPB com ϕ aproximado de 10 m escavando as amostras estudadas, seriam necessárias tensões em corrente contínua de 102, 131, 174, 184 e 194 V para as amostras AM-01, 02, 03, 04 e 05 respectivamente.

Para se verificar se um condicionamento de material pode ser utilizado em modo de escavações TBM-EPB, alguns requisitos mínimos devem ser cumpridos. Dentre estes requisitos destacamos a trabalhabilidade que o material deve atingir e também sua densidade aparente. Os materiais estudados após serem submetidos a estas verificações ofereceram resultados que estiveram entre os parâmetros indicados pela literatura (densidade aparente entre 1,4 a 1,8g/cm³ e abatimento de cone entre 10 e 20 cm). Após o condicionamento de solos com o dispersante NaOH, no geral as amostras de solo estiveram com parâmetros de densidade aparente entre 1,44 a 1,70 g/cm³, e abatimento de cone variando entre 10 e 18cm.

Por fim, entendemos que o condicionamento de solo através do dispersante NaOH acoplado com o uso de corrente elétrica contínua de baixa intensidade, pode ser útil no combate ao efeito clogging em tuneladoras em modo de escavação TBM-EPB. Notou-se que a eficiência do condicionamento pode atingir melhorias de até 95% em relação ao desprendimento do solo aderido à superfície metálica. Além da eficiência comprovada através dos resultados dos testes de adesividade realizados, os requisitos de trabalhabilidade e densidade aparente também foram cumpridos. Ou seja, além de apresentar alto poder de limpeza o método também pode ser capaz de permitir atingir a densidade aparente e a trabalhabilidade necessárias para o solo ser extraído pelo parafuso sem fim, além de ser possível dissipar as pressões entre câmara de escavação e o túnel.

8. Sugestões de Novos Trabalhos

Como sugestões de novos trabalhos, entendemos para o aprimoramento da concepção final do uso deste modo de condicionamento de solo, ainda se faz necessário explorar temas que tratam da aplicabilidade da técnica em modelos reduzidos, controle e aplicação da corrente elétrica controlada, forma de aplicação da corrente elétrica na roda de corte do TBM-EPB, possíveis danos mecânicos/elétricos que as soluções alcalinas podem causar aos componentes do TBM, e por fim, forma de correção do pH do material de escavação para ser disposto no ambiente de forma correta.

Inicialmente deve-se ter em mente, que para a aplicação deste sistema de condicionamento de solos em um TBM-EPB, a forma de aplicação da corrente elétrica através da roda de corte deve ser amplamente estudada e detalhada. Certamente estes estudos necessitam de detalhamentos consistentes e sistemas que devem ser implementados na roda de corte de uma tuneladora. Estes sistemas devem abordar o posicionamento e segurança da aplicação da corrente elétrica na roda de corte de forma controlada e segura.

Outro tema que também deve ser explorado, é que, ainda não se sabe quais são os possíveis danos mecânicos que podem ocorrer em sistemas como mangueiras, sensores, ferramentas de corte, sistemas de refrigeração entre outros ao transportar água com pH alcalino em seu interior. Além destes, o tema de descarte de material de escavação com pH elevado também deve ser explorado. Pois é preciso equilibrar o pH do material de descarte da escavação de forma neutra (pH=7,0) para que problemas de contaminação de áreas exteriores, como dano aos vegetais, animais e contaminação de águas subterrâneas não sejam gerados no meio ambiente.

A aplicação econômica da metodologia exposta neste trabalho também deve levar em consideração a viabilidade econômica e consumo de materiais utilizados. Para facilitar o entendimento desta variável adotaremos situação hipotética em que: Teríamos um TBM-EPB com diâmetro de 9,40m com ciclos de avanço de 1,50m escavando um solo cuja densidade de 18 KN/m³. Neste Caso na , podemos verificar quantidades medias devem ser usadas para espumas convencionais e dispersante NaOH e CC.

Tabela 17 - Comparativo entre agentes químicos e solução proposta.

Amostras	γ (kN/m ³)	TBM- EPB ϕ 9,41m Vol./esca. (m ³)	NaOH - 1% + CC (ton/km de tunel)	Espuma (ton/Km de tunel)
AM-01	28,08	104	1952,84	20863,65
AM-02	30,06	104	2090,54	
AM-03	29,04	104	2019,60	
AM-04	27,05	104	1881,21	
AM-05	29,26	104	2034,90	

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, G.: Túneis escavados em solo por meio de Tuneladora: Conceituação Comportamento do Maciço e Modelagem numérica / G. Aguiar, São Paulo, 2017. Dissertação de Mestrado. - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotecnia

ARAUJO, J.C.; VETTORAZZI, C.A.; MOLIN, J.P. Estimativa da produtividade e determinação de zonas de manejo, em cultura de grãos, por meio de videografia aérea multiespectral. Acta Scientiarum, Maringá, v.27, n.3, p.437-447, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - Solo Análise Granulométrica - NBR 7181 - (1984).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - Determinação dos Limites de Plasticidade - NBR 7180 - (1984).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - Solo - Ensaio de Compactação - NBR 7182 - (1986).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - Abertura de poço e Trincheira de inspeção - NBR 9604 - (2016).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - Identificação de amostras de solo obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos - NBR 7250 - (1982).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - Determinação do Limite de Liquidez do solos - NBR 6459 - (2012).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - Determinação do Limite de contração dos solos - NBR 6459 - (1984).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - Medição da Resistividade e determinação da estratificação do solo - NBR 7117 - (2012).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - Determinação da massa específica dos solos - NBR 6508 - (2017).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - Atmosferas explosivas, Parte 14: Projeto, seleção e montagem de instalações elétricas - IEC 60079 - 14 - (2016).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - Trabalho Sob Condições Hiperbáricas, Anexo -06 - NR - 15 - (2014).

ASTM D2488-17; Standard Practice for Description and Identification of soils - (2017)

ALBERS, A.P.F.; MECHIADES, F.G.; MACHADO, J.B.; BALDO, . BOSCHI, A.O.; Um método de simples caracterização de argilo minerais por difração de raios X.

ADAMS, F. Soil Acidity and Liming: The chemistry of Soil Acidity. Grant W. Thomas and William L. Hargrove. Second Edition. Number 12 in the series Agronomy Publisher Madison. Wisconsin, USA. p. 380, 1984.

ALCARDE, J. C. Seminário Sobre Corretivos Agrícolas: Corretivos da acidez dos Solos: Características de Qualidade. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ. Fundação Cargill. Piracicaba – São Paulo. cap. III, p. 97, 1985.

BALMER, P.; - Das Speziell Konzipiert Mixshildsystem Fur den Bau des Zweispi[urigen Eisenbahntunnels Grauholz. Felsbau 10 (1992), 32-38

BATISTA, G. B. - Resumos de Pedologia, Universidade de Lisboa, versão 0.02, Lisboa, 2000.

BABENDERERDE, L. (2003). TBM mit Slurry- oder Erddruckstützung – Einsatzbereiche und Zuverlässigkeitsanalyse Felsbau 21 (2003), No.5, p. 155 ff.

Babendererde, S., Hoek, E., Marinos, P.G., and Cardoso, A.S. 2005. EPB-TBM face support control in the Metro do Porto Project, Portugal. Rapid Excavation and Tunneling Conference. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc., Littleton.

Baille, W. 2014. Hydro-mechanical behaviour of clays – significance of mineralogy. Doctoral Thesis, Faculty of Civil and Environmental Engineering of the Ruhr-Universität Bochum.

BERGAYA, F; LAGALY, G.; General Introduction: Clays, clays minerals, And Clay Science. Handbook of the clay science. 2006 Elsevier Ltd. All rights reserved.

BRINDLEY, G W,. BROWN, G (Eds), 1980. Crystal Structures of the clay Minerals and their X-ray

BUCKMAN, H.O., - Natureza e Propriedades dos solos, 3ª Ed./ Rio de Janeiro , Freitas Bastos 1974.

Budach, C. 2012. Untersuchungen zum erweiterten Einsatz von Erddruckschilden in grobkörnigem Lockergestein. Doctoral Thesis, Ruhr-Universität Bochum, Institute for Tunnelling and Construction Management.

Budach, C., and Thewes, M. 2013. Erweiterte Einsatzbereiche von EPB-Schilden. Geotechnik 36 (2): 96–103. doi: 10.1002/gete.201200012.

Budach, C., and Thewes, M. 2015. Application ranges of EPB shields in coarse ground based on laboratory research. Tunnelling and Underground Space Technology 50:296–304. doi: 10.1016/j.tust.2015.08.006.

C.Prabhakare R.A.Deshpande. Evaluation of soil resistivity and design of grounding system for hydroelectric generating station in a hilly terrain #x2014; a case study. Em Advances in Energy Conversion Technologies (ICAECT), 2014 International Conference on, páginas 104–107, Jan 2014. doi:10.1109/ICAECT.2014.675707

CAMPOS, M. P., LACERDA, M.P.C., PAPA,R. A., GUIMARAES, E.M., COSTA NETO, S.F. - Difratometria de raios X aplicada na identificação de gibbsita e caulinita em Latossolos do distrito federal. II Simpósio Internacional das Savanas Tropicais. 12 a 17 de Outubro de 2008.

CHAMLEY, h., 1989. Clay Sedimentology. Springer, Berlin.

CUNHA, J., FREIRE, M.B.G., RUIZ, A., RAPHAEL, B.A., FERNANDES &ALVAREZ, V.H. - 2014 - Comparação de dispersantes químicos na análise granulométrica de solos do Estado do Pernambuco - Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. V.18, n,8, p.783-789, 2014.

COTTON, F.A. WILKINSON, G., MURRILLO, C.A. BOCHMANN, M. - Advanced Inorganic chemistry: A comprehensive text. 6 ed. Michinga: Wiley-blackwell, 1999. 1136p

CHEW, S.H., KURANARTNE, G. P., KUMA, V.M., TOH, M.L., HEE, A.M, 2004. A field trial for softclay consolidation using electric vertical drains. Geotext, Geomenber (2004);

Cunha, J. C. Comparação de dispersantes químicos na análise granulométrica de solos do Estado de Pernambuco. Viçosa: UFV, 2010. 67p. Dissertação Mestrado.

DAUB: Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen. Herausgegeben vom Deutschen Ausschuss für unterirdische Bauwerke. V. (DAUB) Köln, 2010.

Decifrando a Terra / Organizadores: Wilson Teixeira *et al.* - São Paulo: Oficina de Textos, 2000- 568pp. ISBN 85-86238 - 14-7 - Cap 08. - Maria Cristian Toledo, Sonia Maria B de Oliveira , Adolpho J. Melfi - pg 144 - 145.

DOBRIN, M.B. & SAVIT, C.H.; Introduction to geophysical prospecting. 4ª ed. Singapore: McGraw-Hill, 1988.767.p

DUARTE, M. A. P., 2007 - Foam as a conditioner in tunnelling: physical and mechanical properties of conditioned sands. Thesis submitted for the degree of Doctor Philosophy at the University of Oxford.

ESTABRAGH, A.R., Improvement of clay soil by electro-osmosis technique. Applied Clay Science, Faculty of Soil and Water Engineering, University of Tehran, Iran (2014).

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Manual de métodos de análises de Solo, 2 ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997.212p

Francisco Silva. Projeto otimizado de redes de terra em subestações. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, jul 2012

FERNANDES, L. A., COIMBRA, A.M., BRANDT, M.N., GESICKI, A. - Argilominerais do grupo cauiá - Revista Brasileira de Geociências, 24(2), Junho de 1994;

GANDOLFO, O.C.B., Um estudo do imageamento elétrico em investigação rasa. Tese de Doutorado. Programa de pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia. USP, São Paulo, 2007.

GRANADORI et al. (2003). Turin Metro Systems – Design and operation of EPB TBMs beyond the limits of this technology. Tunneling and Underground Space Technology, 21 (2003), No.6, p. 34 ff.

GRIM, R.E., 1953. Clay Mineralogy. McGraw-Hill, New York.

GRIM, R.E., 1962. Applied Clay Mineralogy. McGraw-Hill, New York.

GRIM, R.E., 1968. Applied Clay Mineralogy, 2nd edition McGraw-Hill, New York

GUERRA D.L.; LEMOS, V.P.; ANGÉLICA, R.S.; AIROLDI, C. Influência da razão Al/Argila no processo de pilarização da esmectita. Cerâmica, v.52, n.323, p.200-206, 2006.

GUERRA, D.L.; LEMOS, V.P.; ANGÉLICA, R.S.; AIROLDI, C.; VIANA, R.R. Aplicação de Zr / Ti-PILC no processo de adsorção Cu (II), Ni (II) e Co (II) utilizando modelos físico-químicos de adsorção. Química Nova, v.31, n.2, p.353-359, 2008.

GUERRA, D. L.; SANTOS, M. R. M. C. and AIROLDI, C. Mercury adsorption on natural and organofunctionalized smectites - thermodynamics of cation removal. Journal of Brazilian Chemical Society, v.20, n.4, p.594-603, 2009.

Herrenknecht et al. 2003. Geotechnische und mechanische Interaktion beim Einsatz von Erddruckschilden im Fels. STUVA Tagung 2003, Dortmund, p. 175 ff, Bauverlag ISBN 3 7625 3602 3

HOLLMANN, F.S., THEWES, T. 2012. Evaluation of tendency of clogging and separation of fines on shield drives. Geomechanics and tunnelling 5 (5), 574-580.

HOLLMANN, F.S.;THEWES, M.Assessment method for clay clogging and disintegration of fines in mechanized tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, V 37, p.96-106, 2013

Ieee guide for safety in ac substation grounding. *IEEE Std 80-2000*, páginas i–192, 2000. doi:10.1109/IEEESTD.2000.91902.

ITA- International Tunnelling and Underground Space Association, *Recomendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs)*.ITA-AITES, 118p., 2000.

ITA- International Tunnelling and Underground Space Association, Working Group Research. *Settlements Induced by Tunnelling in soft Ground*. *Tunnelling and Underground Space Technology*. v. 15 n.3, p.303-331, 2000.

ITA- International Tunnelling and Underground Space Association, 1999 Oslo, p. 865 ff., Balkema ISBN 90 5809 063 9 Langmaack 2000

JUCKSCH,I. - Meios mecânicos e concentração de NaOH na dispersão e estabilidades de suspenções de argilas -Tese de Doutorado , UFV, Viçosa- MG 1995.

KILMER, V.J. & ALEXANDER , L.T.- *Methods of marking mchanical analysis of soil*. *Soil sci*. 68:15-24, 1949.

KRAUSE, T.H.;*Japanische Shiidsysteme (Teil 1)*. *Baumaschine+Bautechnick* 33 (1986) 329-333.

LANGMAACK, L.:(2000). *Advanced Technology of Soil Conditioning North American Tunnelling Congress*, Boston 2000, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 2000, p. 525 ISBN 90 5809 162 7

LANGMAACK, L. (2001). *Application of new TBM Additives BAUMA 2001*, 6th int. symposium for tunnel construction Verlag Glückauf GmbH, Essen, 2001, p. 27, ISBN 3 7739 5964 8.

LANGMAACK, L. ZÁMECNÍK, M. (2009), *Advanced techonlogy of soil conditioning for tunnel boring machines (TBM)* . *Tunel* 18.rocnih-c2/2009.

LANGMAACK, IBARRA, J. (2011) *Tunnelling Association of Canada - Ontario Chapter - Tunneling Lectures 2011 - Speciality Chemicals for Tunnleing Boring Machines*

LAGO, A.L., *Investigação geofísica 2D e 3D com aplicação em meio ambiente: estudo sobre uma área de dissipação de resíduos de óleo lubrificante no município de Ribeirão Preto - SP*. Tese de Douotado do Programa de Pós-Graduação do Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas. USP, São Paulo, 2009.

LAMBE, T.W. 1958. *The structure of compacted clay*, *Jounal Of soil mechanics and foundations* . ASCE: 84 1-34.

L.M.Vilela Pinto. *MGCALC*. Edição Merlin Gerin, second edição, 1996

LUNA, F.J.; SCHUCHARDT, U. Argilas pilarizadas - Uma Introdução. Química Nova, v.22, n.1, p.104109, 1999.

MAIDL, B. HERRENKNECHT, M., MAIDEL, U., WEHMEEYER, G. 2012. Mechanised Shield Tunnelling. Ernest & Sohn, Berlin.

MAIDL, U., COMULADA, M., AGUIAR, G., SILVA, M., A., P., FERREIRA, A., (2014) Experience gained in heterogeneous ground conditioning at twin tube EPB Shield tunnels in São Paulo Metro line 5.

MAIDL, B.; HERRENKNECHT, M.; MAIDL, U.; WEHRMEYER, G.; -Mechanised Shield Tunnelling (2012), Wiley-Blackwell. Editor: Ernest & Sohn. - 470p

MAURI, J., RUIZ, H.A., FERNANDES, R.A., KER, J., REZENDE, L.- Dispersantes químicos na análise granulométrica de Latossolo. Revista Brasileira de Ciência Agronômica, V.45 p.417-426, 2014;

Mauri, J.; Ruiz, H. A.; Fernandes, R. B. A.; Ker, J. C.; Rezende, L. M. R. Dispersantes químicos na análise granulométrica de Latossolos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.35, p.1277-1284, 2011.

MEURER, E.J. - 2004 - Fundamentos de Química dos Solos 2ª Ed. - Porto Alegre: Gênese, 2004 - 11-09.

MELLO, I.S.; CARVALHO, M.A.; FERREIRA, J.N.; COGO, J.M.; SILVA, R. A.R.; GUERRA, D.L.; Revisão sobre argilominerais e suas modificações em ênfase em aplicações tecnológicas e adsorção - uma pesquisa inovadora em universidades (2011).

MITCHEL, J.K, 1994 - Fundamentals of soil behavior /James K. Mitchel, Kenichi Soga - 3rd ED. ISBN -13: 978-0-471-46302-7.

MONTE, M.B.M.; PAIVA, P.R.P.; TRIGUEIRO, F.E. Técnicas alternativas para a modificação do caulim. Série rochas e minerais industriais 2003, n.8, 50p

MODENA, J.; SUETA, H.; - Medição de Resistividade do solo - Capítulo XI, Revista o setor elétrico, Ano 6 -Edição 70 - Novembro de 2011. ISSN. 1983-0912. Ed. Atitude Editorial.

MONTE, M.B.M.; PAIVA, P.R.P.; TRIGUEIRO, F.E. Técnicas alternativas para a modificação do caulim. Série rochas e minerais industriais 2003, n.8, 50p.

MOORE, D, M.; REYNOLDS, R.C.Jr., 1997. X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of the clay minerals, 2nd edition. Oxford University Press, Oxford.

MOLIN, J.P.; CASTRO, C.N. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. Scientia Agricola, Piracicaba, v.65, p.567573, 2008

NAKAYAMA, F.S.; Defloculation of soil materials by sodium salts. *Soil Sci.* 102:388-393, 1966.

NEVES, L.E.; Estudo prático de Argilas por difratometria de raios X- - *Boletim técnico da Petrobrás.* 11, 1 (1968) 123-135.

OBO-Bettermann. *Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas e Sistema de Terras*, 2012.

Oliveira, D, G.G. - EPB Excavation and Conditioning of Coesive Mixed Soils: Clogging and Flow Evaluation - Thesis - Departament Of Geological Sciences And Geological Engineering - Queens Univesity, 2018.

PEILA, D. OGGERRI, C. BORIO, L. (2008). Influence of granulometry, time and temperature on soil conditioning for EPBs application, In: *Porocedure world Tunnel congress 2008, India*, p.881 - 891.

QUEBAUD, S., SIBAI, M. and HENRY, J.P., 1998- Use of chemical foam for improvements in drilling by earth-pressure balanced shield in granular soils. *tunnellings and Underground Space Techilogy*, Vol 13, N 2, pp. 173-180

Ren LQ, Chen DX, Hu JG. Initial analysis on the law of reducing adhesion of soil animals. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 1990;6(1):13–20

Ren LQ. *Experimental optimum technique*. Beijing, China: Mechanical Industry Press, 1987

RAIJ, B. V., PEECH, M. - *Eletrochemical properties of some Oxisols and Alfisols of the tropic* .Soils Science Society of America. v36, p. 587-593, 1972.

REN. L, QIAN. C, JIN.T, BINGCONG.C, Reducing adhesion of soil loading shovel usding bionic electro-osomosis method- *Jounal of Terramechanics* 38, 211-219 - (2001).

RESENDE, M, CARVALHO FILHO, A.& LANI, J.L.;Características do solo e da paisagem que influenciam a susceptibilidade á erosão. In: *Simpósio sobre Manejo e Conservação do Solo no Cerrado, Goiânia, 1990*. Campinas, Fundação Cargill, 1992. p. 32-67.

RESENDE, M.; CURI, N.; RESENDE, S.B.; de CORRÊA, G.F. *Pedologia: Base para distinção de ambientes*. 5ª ed. Editora UFPA, 2007. 322.p. il.

RITTIRONG, A. DOUGLAS, R.S., SHANG, J.Q., LEE, E.C., 2008. Electrokinetic improvement of soft soil clay using electrical vertical drains *Geosynth Int.* (5), 369,381.

ROCHA, H.C.; COMULADA, M., MAIDL, U.;MAIA, C. (2014) *São Paulo Metro - Developments in Shield Tunnelling*. *Geomechanics And Tunnelling*, v. 7.n.3, p237-247, 2014.

Lopes, E, J. - SP Inicia a Montagem do "megatatuzaço para ampliar a linha 5 lilás do metrô - <https://www.terra.com.br/noticias/brasil/cidades/sp-inicia-montagem-do-megatatuzaço-para-ampliar-linha-5-lilas-do-metro,dbcc6f65cbb9f310VgnVCM10000098cceb0aRCRD.html>, 2013.

SPAGNOLI, G, STEEGER, T.F. & AZZAM, R. 2010- Investigation of adherence behavior and related effects on different scales in mechanical tunnel driving. Department of Engineering Geology and Hydrogeology, Aachen - Germany.

SACPIN, M.A.; Aplicação da difração e fluorescência de raios X (WDXRF): Ensaio em argilominerais - Dissertação de Mestrado - Instituto de pesquisas energéticas nucleares, autarquia associada a Universidade de São Paulo (2003).

SILVERIO, V, F.; Aterramentos Elétricos. Artliber, 2002

SHIRLAW, J. N. (2016). Pressurized TBM Tunnelling in Mixed Face Conditions Resulting from tropical weathering of igneous rock. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 57 p. 226-240.

STAHL, W., STADLER, R.-Systeme zum Ein- oder Austrag Von Schuttgutern in oder aus Druckraumen. *Chem Ing- Tech* 56 (1984), 755-768.

SANTOS, P.S. - Ciência e Tecnologia de Argilas v.1 - Ed Edgard Blucher Ltda (1989).

SANTOS, P.S. - Ciência e Tecnologia de Argilas v.2 - Ed Edgard Blucher Ltda (1989).

S. J. Schwarz. Analytical expressions for the resistance of grounding systems [includes discussion]. *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 73(2):-, Jan 1954. doi:10.1109/AIEEPAS.1954.4498923

SCHULZE, D. G. Minerals in Soil Environments: An Introduction to soil Mineralogy. Published by: Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. 1989.

SCHNEIDER, F., AXEL D., HENNINGS, I. SCHMITTMANN, O. SEIDEL, S.: The effect of deep Tillage on Crop yield - What do we really Know. *Soil & tillage Research*, 2017 - 193-204.

THEWES, M. (1999). Adhäsion von Tonhudin beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden (Adhesion of clays During Tunnelling, with Slurry Shields. , Vol 21. University Wuppertal, Department Of Civil Engineering.

THEWES, M. (2004). Clogging risks for TBM drives in clay Tunnels & *Tunnelling International*, June 2004, p. 28 ff.

THEWES, M. budach, c. (2010). Soil conditioning with foam during EPB tunnelling. *Geomechanics and Tunnelling* 3 (3). 256 -267.

THENG, B.K.G, 1974. The Chemistry of Clay-Organic Reactions. Adam Hilger, London.

THENG B.K.G, 1979. Formation and Propriets of Clay-Polymer Complexes. Elsevier Amsterdam.

VELDE, B., Introduction to Clay Minerals. Chapman & Hall, London 198p, 1992.

VINAI, R., OGGERI, C., PEILA, D., (2007), Soil conditioning of sand for EPB applications: A laboratory research - Tunnelling and Underground Space Technology - 23 (2008) - 308-317.

VINAI, R., OGGERI, C., PEILA, D., (2007), Soil conditioning of sand for EPB applications: A laboratory research - Tunnelling and Underground Space Technology - 23 (2008) - 308-317.

VITORINO, A. C. T. et al. Mineralogia, química e estabilidade de agregados do tamanho de silte de solos da Região Sudeste do Brasil. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 38, n. 1, p. 133-141, 2003.

VINAI, R., OGGERRI, C., PEILA D.,. Soil Conditioning os Sand for EPB applications: A laboratory research. Tunnelling and Undeground Space Tecnology, v.23, n3.,p.308-317, 2007.

WEAVER, C.E., POLLARD, L.D., 1973. The chemistry of Clay Mineral. Developments in Sedimentology 15. Elsevier, Amsterdam.

Yotara H, Cange C. The cutting properties of soil (part 4). J Japan Mechanical Institute 1975;42:1606–13

ZUMSTEG, R.; PUZRIN, A.,: (2012). Stckness and adhesion of conditioned clay pastes. Tunnelling and Undeground Space Technology, 31 p. 86-96.

ZUMSTEG, R.; PUZRIN, A.,: Reduction of the Clogging potencil of clays: New chemical application an novel quantification approaches. (2013) . Geotechnique, 73.Nº4, 276-286.

ZUMSTEG, R.; PLOTZEM M. PUZRIN, A.M.. In prees. Effect of soil conditioner on the ´pressure and rate dependent shear strenght of conditioned clays . Jounarl of the Geotechnical and Geoenviorement engineering, Acept for Publications (2010)