

DISCIPLINA 0440500 – TRABALHO DE FORMATURA – 2024

Monografia de Trabalho de Formatura N° 24/56

**Caracterização Geotécnica das Argilas Rijas a Duras da Formação Resende no
Município de Guarulhos-SP**

Aluno: Vitor Chiurciu de Souza (10738652)

Orientador: Prof. Dr. Edilson Pizzato

Coorientador: Me. Davi Carvalho Beck

São Paulo

Novembro de 2024

RESUMO

Souza, V.C., 2024. Caracterização geotécnica das argilas rijas a duras da Formação Resende no município de Guarulhos-SP. [Monografia], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) abriga o maior contingente populacional do país, e grande parte de sua área é recoberta por sedimentos das bacias de São Paulo e Taubaté, que representam o preenchimento do Rift Continental do Sudeste do Brasil. O preenchimento da Bacia de São Paulo ocorreu em um período correspondente à deposição do Grupo Taubaté, que é composto pelas formações São Paulo, Tremembé e Resende. A Formação Resende corresponde à formação de maior preenchimento da Bacia de São Paulo, e suas argilas cinza-esverdeadas, conhecidas como Taguá, se destacam por sua heterogeneidade de granulometria e parâmetros geotécnicos. Estudos geotécnicos dos sedimentos terciários da Bacia de São Paulo, em especial das argilas rijas a duras da Formação Resende, já foram realizados na cidade de São Paulo. Entretanto, informações geotécnicas desta formação na cidade de Guarulhos ainda são ausentes, e de extrema importância para a caracterização de solos na RMSP. Dessa forma, o presente estudo propôs a análise e caracterização geotécnica de argilas rijas a duras da Formação Resende no município de Guarulhos a partir de dados de sondagens a percussão e ensaios triaxiais. A caracterização e classificação de solos possibilita a previsão de comportamentos mecânicos e hidráulicos deles, além da compreensão da geometria de camadas e elaboração de mapas e seções, que são essenciais na realização de obras de engenharia, ambientais e de mineração. A maior disponibilidade de dados geotécnicos referentes às argilas da Formação Resende na cidade de Guarulhos, assim como a determinação de parâmetros de resistência, compressibilidade e deformabilidade permite uma comparação e correlação com dados já existentes, auxiliando em uma compreensão geológica e geotécnica maior desta formação na RMSP.

Palavras-chave: argilas duras, Taguá, Formação Resende, ensaio triaxial, sondagem a percussão.

ABSTRACT

Souza, V.C., 2024. Geotechnical characterization of stiff to hard clays from the Resende Formation in the municipality of Guarulhos-SP. [Undergraduate Thesis], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

The Metropolitan Region of São Paulo (MRSP) hosts the largest population concentration in Brazil, with much of its area covered by sediments from the São Paulo and Taubaté basins, representing the infill of the Southeast Brazilian Continental Rift. The São Paulo Basin was filled during the deposition of the Taubaté Group, which comprises the São Paulo, Tremembé, and Resende formations. The Resende Formation, the main filling unit of the São Paulo Basin, is characterized by greenish-gray clays, known as Taguá, notable for their heterogeneity in grain size and geotechnical parameters. Previous geotechnical studies on the Tertiary sediments of the São Paulo Basin, particularly on the stiff to hard clays of the Resende Formation, have been conducted in São Paulo city. However, geotechnical data for this formation in Guarulhos are still lacking and are crucial for soil characterization in the MRSP. Thus, this study aims to analyze and characterize the stiff to hard clays of the Resende Formation in Guarulhos through data from standard penetration tests and triaxial tests. Soil characterization and classification facilitate the prediction of mechanical and hydraulic behavior, as well as the understanding of layer geometry, and support the creation of maps and cross-sections essential for engineering, environmental, and mining projects. Increased availability of geotechnical data on the Resende Formation clays in Guarulhos, along with the determination of resistance, compressibility, and deformability parameters, allows for comparisons and correlations with existing data, contributing to a broader geological and geotechnical understanding of this formation in the MRSP.

Keywords: hard clays, Taguá, Resende Formation, triaxial test, standard penetration test.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
3. ÁREA DE ESTUDO	3
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
4.1. O <i>Rift</i> Continental do Sudeste do Brasil	3
4.2. A Bacia de São Paulo	5
4.3. A Formação Resende	7
5. CONTEXTO GEOTÉCNICO - ARGILAS RIJAS E DURAS	8
5.1. Formação e adensamento de argilas rijas e duras	8
5.2. Resistência ao cisalhamento – Argilas rijas a duras	10
5.3. Deformabilidade de argilas rijas a duras	11
5.4. Ensaio Triaxiais – Argilas rijas a duras	12
6. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DE ARGILAS RIJAS A DURAS DO BRASIL	13
6.1. Argilas duras da Formação Resende (Taguá)	14
6.2. Argilas Rijas a Duras da Formação Guabirotuba	17
7. MATERIAIS E MÉTODOS	20
7.1. Materiais de estudo	20
7.2. Métodos	21
7.2.1. Sondagem a percussão	21
7.2.2. Ensaio Triaxial	24
8. RESULTADOS OBTIDOS	25
8.1. Sondagens a percussão	25
8.2. Triaxial CD	26
8.3. Dificuldades surgidas e alterações	29
9. INTERPRETAÇÕES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	30

10. CONCLUSÕES

32

11. REFERÊNCIAS

34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa geológico da Região Metropolitana de São Paulo. Extraído de Monteiro et al. (2012).....	2
Figura 2: Localização do município de Guarulhos, em vermelho, no estado de São Paulo.	3
Figura 3: Contexto geológico regional do Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) - 1) embasamento pré-cambriano; 2) rochas sedimentares paleozóicas da Bacia do Paraná; 3) rochas vulcânicas toleíticas eocretáceas da Formação Serra Geral; 4) rochas relacionadas ao magmatismo alcalino mesozóico-cenozóico; 5) bacias cenozóicas do rift (1- Bacia de Itaboraí, 2- Gráben de Barra de São João, 3- Bacia do Macacu, 4- Bacia de Volta Redonda, 5- Bacia de Resende, 6- Bacia de Taubaté, 7- Bacia de São Paulo, 8- Gráben de Sete Barras, 9- Formação Pariqüera-Açu, 10- Formação Alexandra e Gráben de Guaraqueçaba, 11- Bacia de Curitiba, 12- Gráben de Cananéia); 6) zonas de cisalhamento pré-cambrianas, em parte reativadas durante o Mesozóico e Cenozóico. Extraído de Riccomini et al. (2004).	4
Figura 4: Quadro litoestratigráfico e evolução tectono-sedimentar do segmento central do RCSB - Letras: p - leques aluviais proximais; m-d - leques aluviais medianos a distais associados a planície aluvial de rios entrelaçados; t - depósitos de tálus; c – depósitos coluviais; ca – depósitos colúvio-aluviais; a – depósitos aluviais. Extraído de Riccomini et al. (2004).	6
Figura 5: Curvas de compressão de sedimentação para sedimentos argilosos normalmente adensados. Extraído de Skempton (1970).	10
Figura 6: Comportamento típico de argilas sobreadensadas e normalmente adensadas. Extraído de Serafim (2024).	11
Figura 7: Trajetórias de tensão de argilas (a) NA e (b)PA. Extraído de Ortigão (2007).	13
Figura 8: Curvas típicas de ensaios triaxiais para solos argilosos. Extraído de Pinto (2019).	13
Figura 9: Perfil geotécnico obtido com o ensaio Camkometer na região do parque Ibirapuera. Extraído de Pinto e Abramento (1998).	15
Figura 10: Parâmetros obtidos em ensaios DMT e palheta, na região da Estação Sacomã do Metrô de São Paulo. Extraída de Negro et al. (2012).	16
Figura 11: Mapa geológico da região de estudo, com as áreas 1 e 2 hachuradas em vermelho.	20
Figura 12: Equipamentos utilizados na sondagem a percussão manual. Extraído de Castro e Garcia (2017).	22
Figura 13: Curvas tensão desviadora x deformação axial referentes a amostra AT-04 7 a 8.	27

Figura 14: Curvas tensão desviadora x deformação axial referentes a amostra AT-04 12 a 13.	28
Figura 15: Círculos de Mohr e envoltória de ruptura referentes a amostra AT-04 7 a 8.	29
Figura 16: Círculos de Mohr e envoltória de ruptura referentes a amostra AT-04 12 a 13. ...	29

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros geotécnicos de argilas rijas a duras presentes na literatura.	19
Tabela 2 - Sondagens a percussão utilizadas para as áreas 1 e 2.	21
Tabela 3 - Valores de N_{spt} e profundidade do Taguá das áreas 1 e 2.	26
Tabela 4 - Características iniciais dos corpos de prova estudados.	27
Tabela 5 - Valores de coesão e ângulo de atrito obtidos para cada amostra	28
Tabela 6 - Variação de valores de N_{spt} observados na literatura, em comparação com os obtidos nas sondagens.	30

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

c = Coesão

c' = Coesão efetiva (kPa)

CD = Ensaio Triaxial Adensado Drenado

CDR = Velocidade Constante de Deslocamento

CTE = Caminho (Trajetória) de tensões efetivas

CTT = Caminho (Trajetória) de tensões totais

EU = Ensaio Triaxial Adensado não Drenado

DMT = Ensaio Dilatométrico

E_i = Deformabilidade

E_s = Módulo de Deformabilidade Secante

$G_{0.1}$ = Módulo Cisalhante

K_0 = Coeficiente de Empuxo

OCR = “Overconsolidation Ratio”

RCSB = Rift Continental do Sudeste do Brasil

RMSP = Região Metropolitana de São Paulo

RSA = Razão de Sobreconsolidamento

s'_p = Pressão Pré-adensamento

SP = Sondagem a Percussão

SPT = “Standard Penetration Test”

S_u = Resistência não Drenada (kPa)

UU = Ensaio Triaxial não Adensado não Drenado

ϕ = Ângulo de Atrito Interno

σ'_v = Tensão Efetiva (kPa)

1. INTRODUÇÃO

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) é atualmente o maior aglomerado populacional do país e, conseqüentemente, é um dos maiores polos de construção civil e de mobilidade urbana. Nela está inserida a cidade de Guarulhos, que é de grande relevância no contexto geológico devido a sua posição estratégica na Bacia de São Paulo.

Devido a sua relevância no processo de urbanização e crescimento populacional, na RMSP está concentrada uma grande quantidade de obras geotécnicas em subsolo, inclusive algumas de grande importância, como a ampliação de linhas do Metrô de São Paulo, o que evidencia a necessidade de estudos acerca das características geológicas e geomecânicas locais. Esses estudos podem ser realizados a partir de sondagens e ensaios *in situ* e em laboratório, fornecendo informações que permitem o entendimento litoestratigráfico da subsuperfície, além da obtenção de parâmetros geotécnicos, como densidade, compressão, e resistência do solo.

A geologia da RMSP é composta por um embasamento pré-cambriano, sedimentos paleógenos a neógenos da Bacia de São Paulo e coberturas quaternárias (**Figura 1**) (Monteiro et al., 2012), e está inserida no contexto do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB). O RCSB é uma feição tectônica de idade cenozoica, que se apresenta morfologicamente na direção ENE, entre as cidades de Curitiba, no Paraná, e Barra de São João, no Rio de Janeiro, como uma faixa estreita e deprimida, com uma extensão de pelo menos 800km (**Figura 3**) (Riccomini, 1989).

A Bacia de São Paulo é a principal fonte de sedimentos presentes na RMSP, com destaque à Formação Resende, que abrange a maior parte do preenchimento da bacia. Uma parte significativa da Formação Resende é composta por argilas rijas a duras, que são de grande relevância tanto para o entendimento da geologia local, como para a engenharia civil e geotecnia. As argilas rijas a duras possuem características particulares que evidenciam sua relevância. Elas apresentam condições geológico-geotécnicas de destaque devido ao seu sobreadensamento, presença de fissuramento e outras descontinuidades, além da dificuldade de amostragem e dependência da caracterização de suas propriedades a partir de sua natureza, variação de tensões e tempo de carregamento.

Conforme foram iniciadas as obras de construção das linhas de metrô na cidade de São Paulo, na década de 1970, tiveram grandes avanços os estudos acerca de solos rijos na região. Além disso, a construção das novas linhas do metrô de São Paulo, bem como outras obras de infraestrutura, contribuíram para a ampliação das informações sobre este solo. Porém, atualmente ainda são necessários estudos mais detalhados com foco nas argilas rijas a duras cinza-esverdeadas da Formação Resende, conhecidas no meio geotécnico como “Taguá”.

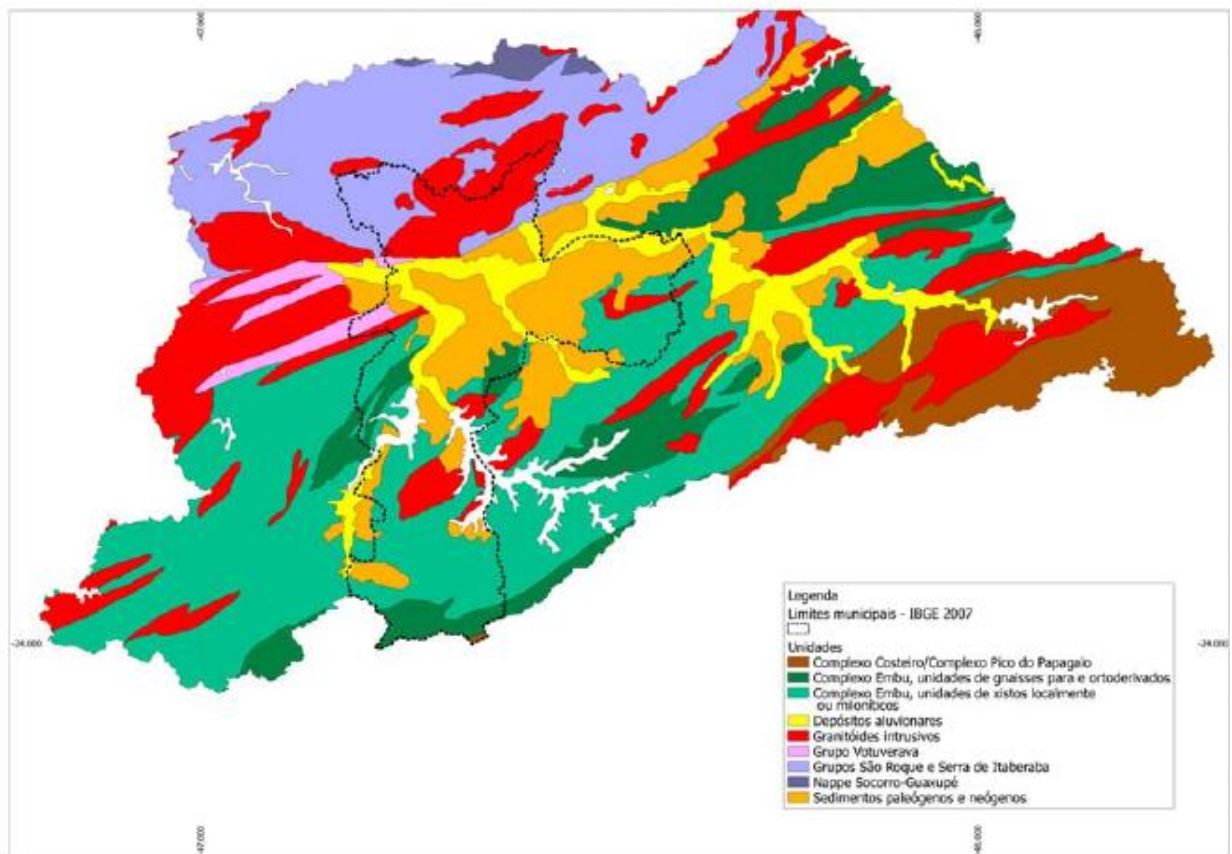


Figura 1. Mapa geológico da Região Metropolitana de São Paulo. Extraído de Monteiro et al. (2012)

Dessa forma, o presente estudo tem como finalidade realizar uma análise de dados obtidos na cidade de Guarulhos, visando ampliar o conhecimento acerca das argilas rijas a duras da Formação Resende. A partir da comparação de dados de SPT (Standard Penetration Test) e ensaios triaxiais com resultados obtidos em trabalhos anteriores, o estudo almeja contribuir para a caracterização dos solos da região e servir como ferramenta para obras subterrâneas de engenharia.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo realizar uma caracterização geotécnica, a partir de sondagens a percussão e ensaios triaxiais de argilas rijas a duras da Formação Resende no município de Guarulhos. Objetiva-se também fazer uma comparação com dados presentes na literatura desse mesmo material argiloso na cidade de São Paulo.

A partir das sondagens e ensaios, que constituem métodos de avaliação geotécnica, podem ser realizadas análises geológicas do solo da região, além da obtenção de características e parâmetros geotécnicos de solos frente a condições de deformabilidade, compressão e cisalhamento.

3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no município de Guarulhos, situada na Região Metropolitana de São Paulo (**Figura 2**). Sua população de mais de 1 milhão de habitantes a configura como a segunda cidade mais populosa do estado. Seu território apresenta uma área de aproximadamente 319 km² (IBGE, 2022).

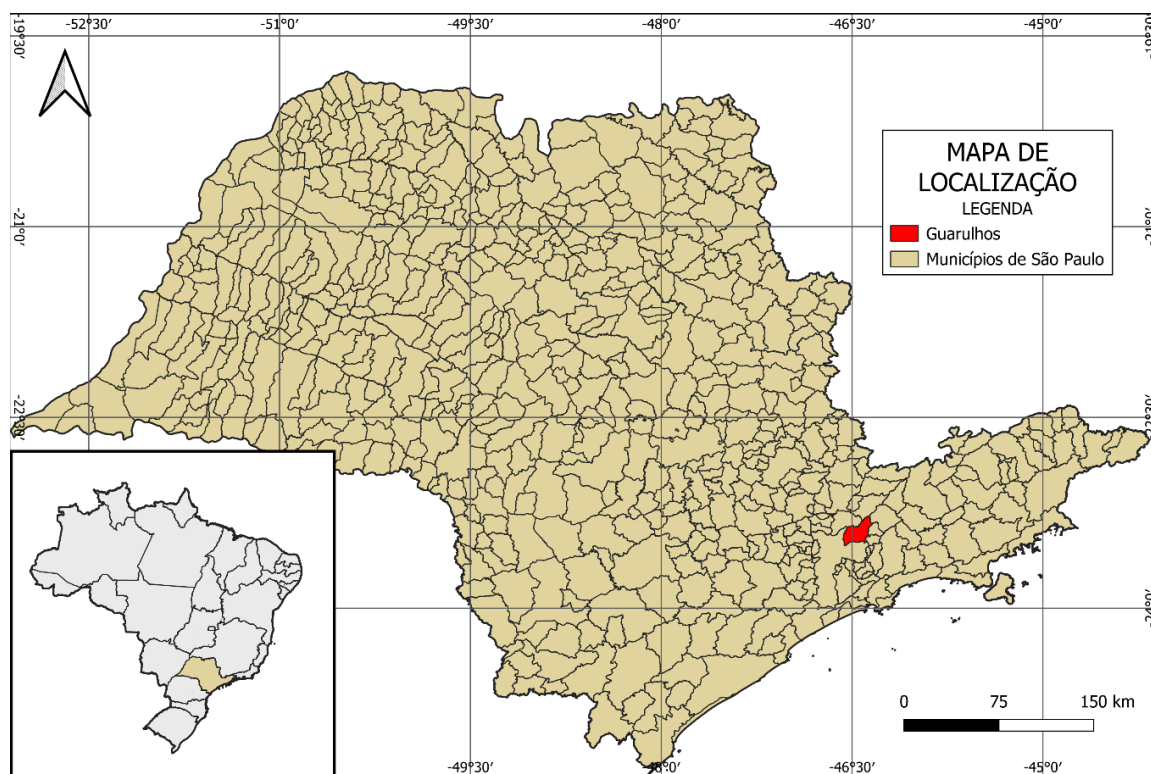


Figura 2: Localização do município de Guarulhos, em vermelho, no estado de São Paulo.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. O *Rift* Continental do Sudeste do Brasil

A Bacia Sedimentar de São Paulo é uma bacia de origem tectônica, e está inserida em um complexo de depressões tectônicas e soerguimentos denominado originalmente por Almeida (1976) de *Sistema de Rifts da Serra do Mar*. Essa feição foi designada vinculando a genética entre as depressões tectônicas ocupadas parcialmente por bacias sedimentares e o soerguimento de regiões montanhosas por falhas, com destaque ao acidente topográfico do Sudeste do Brasil representado pela Serra do Mar. Com o avanço dos estudos na região, Riccomini (1989) nomeou o sistema como *Rift Continental do Sudeste do Brasil* (RCSB), considerando que esse sistema teria origem muito mais contínua do que visto atualmente, beirando a casa do milhar de quilômetros de comprimento. Desta forma, a alusão ao Sudeste do Brasil traria uma ideia mais abrangente da feição, em relação à Serra do Mar.

O RCSB é uma feição tectônica de idade cenozoica, que se apresenta morfologicamente na direção ENE, entre as cidades de Curitiba, no Paraná, e Barra de São João, no Rio de Janeiro, como uma faixa estreita e deprimida, aproximadamente paralela à linha de costa atual, e com uma extensão de pelo menos 800km (**Figura 3**) (Riccomini, 1989). Segundo Riccomini et al. (2000), o RCSB pode ser separado em três segmentos. Ocidental, que engloba os grábens de Guaraqueçaba, Sete Barras e Cananéia, além da Bacia de Curitiba e as áreas de ocorrência das formações Alexandra e Pariquera Açu. Oriental, integrado pelos grábens de Barra de São João e Guanabara. Central, abrangendo as bacias de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda, sendo esse último segmento o de maior interesse para esse trabalho. As bacias do segmento central, assim como a Bacia de Curitiba foram formadas em uma única calha deposicional e separadas posteriormente pelo tectonismo do *rift*. Essa origem comum entre tais bacias explica a existência de formações correlatas, que apresentam comportamentos geotécnicos semelhantes (Kormann, 2002).

Segundo Riccomini et al. (2004), há consenso de que o alojamento e desenvolvimento do RCSB estão relacionados ao Evento Sul-Atlântico (Almeida, 1976), que causou ruptura continental e abertura do Atlântico. O embasamento do RCSB está correlacionado ao Cinturão de Dobramentos Ribeira, formado por rochas metamórficas de baixo a médio grau, gnaisses e migmatitos, de idade arqueana a neoproterozoica, junto a suítes de rochas granitoides de idade neoproterozoica (Hasui et al., 1975).

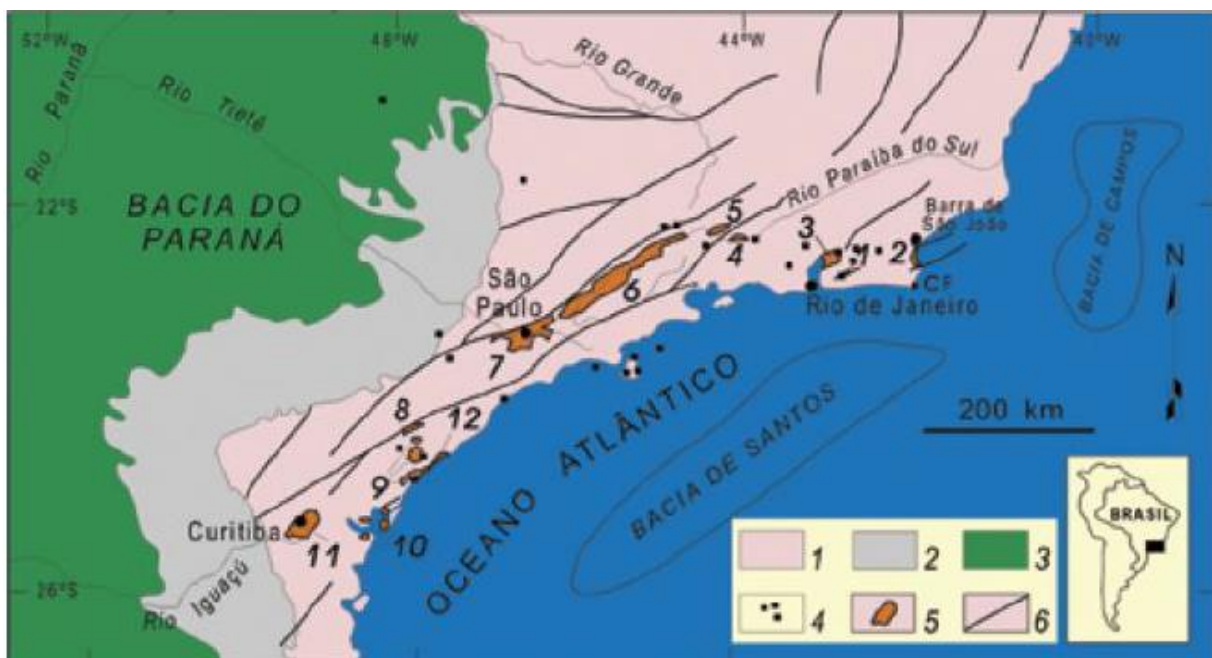


Figura 3: Contexto geológico regional do Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) - 1) embasamento pré-cambriano; 2) rochas sedimentares paleozoicas da Bacia do Paraná; 3) rochas vulcânicas toleíticas eocretáceas da Formação Serra Geral; 4) rochas relacionadas ao magmatismo alcalino mesozoico-cenozoico; 5) bacias cenozoicas do rift (1- Bacia de Itaboraí, 2- Gráben de Barra de São João, 3- Bacia do Macacu, 4- Bacia de Volta Redonda, 5- Bacia de Resende, 6- Bacia de Taubaté, 7- Bacia de São Paulo, 8- Gráben de Sete Barras, 9-

Formação Pariquera-Açu, 10- Formação Alexandra e Gráben de Guaraqueçaba, 11- Bacia de Curitiba, 12- Gráben de Cananéia); 6) zonas de cisalhamento pré-cambrianas, em parte reativadas durante o Mesozoico e Cenozoico. Extraído de Riccomini et al. (2004).

4.2. Bacia de São Paulo

A Bacia de São Paulo é uma bacia de tipo *rift*, de idade cenozoica, e faz parte de um conjunto de bacias pertencentes ao RCSB (Riccomini, 1989). Segundo Riccomini e Coimbra (1992), acredita-se que originalmente a bacia era um hemigráben, controlado por falhas normais reativadas ao longo das zonas de cisalhamento Taxaquara e Jaguari. A área da bacia é de aproximadamente 1.000 km², com eixo maior de 75 km e eixo menor de 25 km, e sua espessura máxima de sedimentos é de 290 metros, segundo Takiya (1991).

A Bacia de São Paulo, e seu embasamento, são abrigados pelo Orógeno Ribeira, que tem sua origem decorrente da orogenia neoproterozoica, Brasileiro – Panafricana, evento que resultou na formação do paleocontinente Gondwana Ocidental (Juliani, 1992). A bacia é delimitada ao norte pelas falhas Taxaquara e Rio Jaguari, ao sul pelo embasamento, em um limite irregular, e a leste e oeste por elevações no embasamento (Cozzolino, 1996).

Seu embasamento faz parte do Sistema Orogênico Mantiqueira, que corresponde à Província Mantiqueira (Almeida et al., 1977), e é integrado por rochas metamórficas e ígneas associadas ao Complexo Embu e aos grupos São Roque e Serra do Itaberaba (**Figura 1**). Além disso, ocorrem em menor quantidade rochas da Nappe Socorro-Guaxupé, Grupo Votuverava e dos complexos Costeiro e Pico do Papagaio, assim como de corpos de rochas granitídes intrusivas (Monteiro et al., 2012).

O preenchimento sedimentar da bacia é representado pelas rochas do Grupo Taubaté, de deposição paleógena (Formação Resende, Formação Tremembé e Formação São Paulo), além das rochas da Formação Itaquaquecetuba, de deposição neógena, que se encontram hoje recobertas por sedimentos quaternários (**Figura 4**). A distribuição dessas rochas pode ser observada na Figura 1. As unidades litoestratigráficas da Bacia de São Paulo podem ser ligadas a determinados sistemas deposicionais. A Formação Resende está associada a depósitos de leques aluviais, a Formação Tremembé, a depósitos lacustres e as Formações São Paulo e Itaquaquecetuba, a depósitos fluviais (Riccomini, 1989; Riccomini e Coimbra (1992).

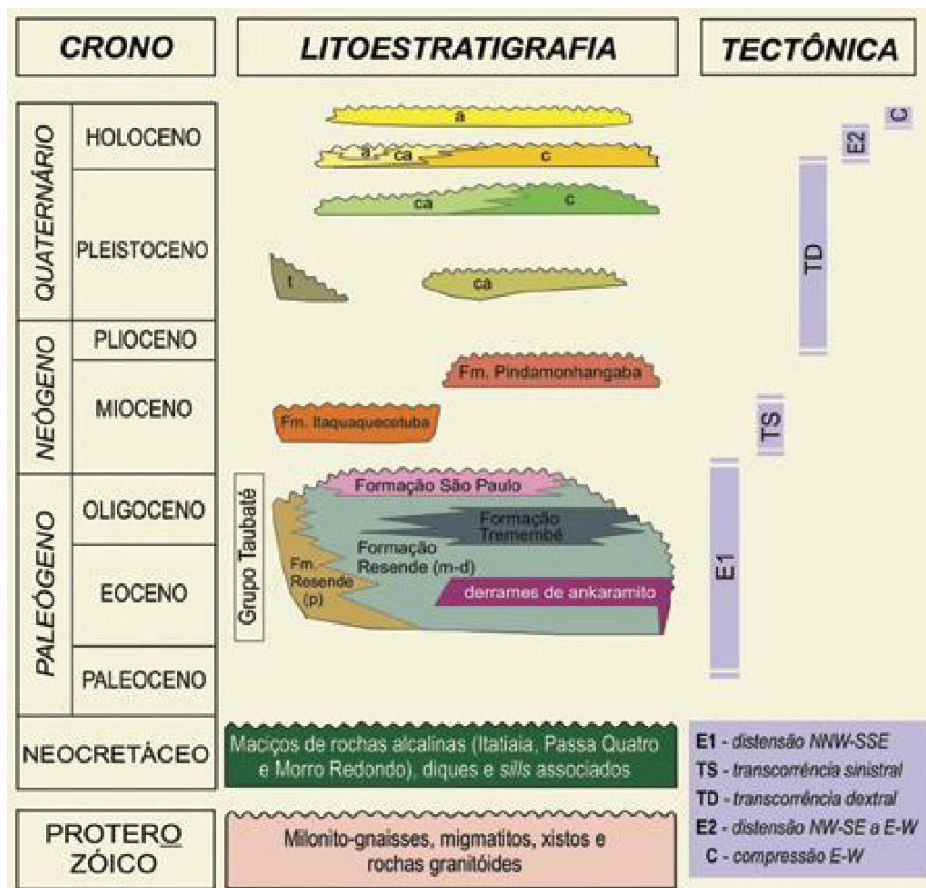


Figura 4. Quadro litoestratigráfico e evolução tectono-sedimentar do segmento central do RCSB - Letras: p - leques aluviais proximais; m-d - leques aluviais medianos a distais associados a planície aluvial de rios entrelaçados; t - depósitos de tálus; c – depósitos coluviais; ca – depósitos colúvio-aluviais; a – depósitos aluviais. Extraído de Riccomini et al. (2004).

A Bacia de São Paulo apresenta grande heterogeneidade de solos, proveniente de sua origem tectônica com reativações derivadas de esforços por falhas de antigas zonas de cisalhamento (Riccomini, 1989). Além disso, a alternância de regimes de drenagem torrencial e lacustre em sua época de deposição foram cruciais para essa diversidade pedológica. Os tipos de solos da Bacia de São Paulo podem ser correlacionados às formações geológicas da bacia.

A Formação Resende inclui argilas duras cinza-esverdeadas, denominadas como “Taguá”, que serão melhor caracterizadas adiante no trabalho, encontradas em camadas profundas da bacia (abaixo da cota 725 m). Além disso, apresenta as chamadas areias basais, de coloração amarela a avermelhada, granulometria média a grossa e pouco argilosas. Essas areias são encontradas assentadas sobre o embasamento cristalino ou até sobre as argilas cinza-esverdeadas.

A Formação São Paulo dispõe de dois tipos principais de solos. As argilas porosas vermelhas, oriundas de solos parcialmente erodidos. São enriquecidas em óxidos de ferro,

geradas por laterização, e são encontradas nas camadas mais superficiais da bacia (cotas 825 – 750 m). Além dele, encontram-se argilas rijas e duras vermelha, amarela e cinza, correspondentes a camadas de transição (cotas 800 – 750 m). Essas argilas apresentam características semelhantes às das camadas superficiais, como sua plasticidade e granulometria. Entretanto, seus poros não são aparentes, possuem maior teor de sílica e grande quantidade de concreções de limonita (Massad, 1980).

A Formação Tremembé apresenta solos compostos por argilas rijas e areias finas a médias de coloração variada (coloração denominada no meio geotécnico como “variegada”). Suas cores podem variar de tons amarelos a vermelhos, vermelho-azul e branco. Se destacam por sua heterogeneidade de granulometria e valores de resistência e compactação (Pinto e Massad, 1972).

As coberturas sedimentares quaternárias podem ser separadas em depósitos pleistocênicos e holocênicos. Elas são representadas por associação colúvio-aluviais, com distribuição restrita a proximidades de drenagens atuais.

Os depósitos pleistocênicos correspondem a coluviões argilo-arenosos, com lentes argilosas a conglomeráticas, podendo conter madeira fóssil e aluviões subordinados constituídos por conglomerados basais sobrepostos por areias grossas a conglomeráticas, gradando para areias médias a finas, com porções argilosas (Melo et al., 1987).

Por outro lado, os depósitos holocênicos são caracterizados aluviões e coluviões de espessuras inferiores a 10 m. Os depósitos aluviais são constituídos por camadas arenosas e argilosas ricas em matéria orgânica, encontrados em terraços baixos e várzeas. Já os depósitos coluviais ocorrem de maneira descontínua.

4.3 Formação Resende

A Formação Resende consiste na unidade basal e lateral do Grupo Taubaté e, segundo Riccomini e Coimbra (1992), corresponde à formação de maior preenchimento sedimentar da Bacia de São Paulo (até 80%), com cerca de 256 m de espessura. É representada por um sistema de leques aluviais associados à planície fluvial de rios entrelaçados. No contexto desse sistema, encontram-se litofácies referentes às porções proximais e distais em relação à fonte.

Os depósitos de porções proximais são representados por diamictitos e conglomerados polimíticos esverdeados, dispersos em matriz lamítica a arenosa, com graduação normal a inversa (Riccomini, 1989; Sant’anna, 1999). Essas rochas ocorrem ao longo da borda norte da bacia, com espessura decamétrica, se acunhando em direção à porção central da bacia.

Nas porções intermediárias e distais são encontrados lamitos argilosos (rochas relacionadas às argilas esverdeadas “Taguá”) e areno-argilosos esverdeados, junto a arenitos médios a grossos cinza esverdeados, com estratificação cruzada acanalada, definidos por Vargas (1980) como areias basais, referentes aos rios entrelaçados. A matriz dos lamitos é composta por argilominerais esmectíticos de origem detrítica, com baixas porcentagens de quartzo, feldspato, micas e minerais máficos (Sant’anna, 1999). Pode-se encontrar, de acordo com Takiya (1991), caulinita na matriz, decorrente da alteração das esmectitas.

As grandes espessuras de lamitos presumem a presença de regolito argiloso extenso na área fonte, de natureza pelítica, gerado pelo intemperismo de rochas granitoides em um ambiente de condições climáticas quentes e úmidas e alto intemperismo (Riccomini, 1989). Desta forma, acredita-se que este regolito foi gerado em fase úmida, prévia a deposição destes lamitos de clima árido (Riccomini, 1989; Riccomini e Coimbra, 1992).

Nos lamitos são encontrados argilominerais expansivos, além da ausência de um fracionamento granulométrico significativo, uma vez que são encontradas porcentagens consideráveis de sedimentos mais grossos e mal selecionados entre sedimentos de natureza siltico-argilosa. Esses fatores são possíveis indicativos de clima semiárido e drenagem ineficaz (Riccomini, 1989; Riccomini e Coimbra, 1992).

As argilas são compostas majoritariamente por esmectitas detríticas, sendo indicativas da ausência de alteração diagenética. Essa ausência de alteração pode ser explicada por eventos de corrida de material lamoso, que geram ambientes de baixa porosidade e permeabilidade, impedindo a percolação de fluidos e, conseqüentemente, a alteração das esmectitas (Riccomini, 1989).

5. Contexto geotécnico - Argilas rijas a duras

5.1. Formação e adensamento de argilas rijas e duras

O comportamento de argilas rijas e duras pode ser compreendido por meio dos processos de formação dessas argilas, impactadas por agentes geológicos como a sedimentação do material, processos erosivos, intemperização, presença de discontinuidades, ciclos de ressecamento e umedecimento, soterramento, entre outros. A partir de fatores como esses torna-se possível o entendimento da evolução de materiais argilosos ao longo do tempo.

O adensamento pode ser definido como o processo de redução gradual do volume de um solo saturado devido à expulsão de água dos seus poros, sob a ação de uma carga aplicada. O adensamento ocorre em solos argilosos de forma mais lenta, uma vez que o movimento da água pelos poros ocorre mais devagar quando comparado a areias. Como

resultado, há um aumento gradual de tensão efetiva e uma redução do volume total do solo ao longo do tempo (Terzaghi, 1943).

À medida que a água é expulsa dos poros de solo, há um rearranjo de suas partículas, que resulta em uma redução na porosidade e no índice de vazios. O estudo da compressão do solo gerada por adensamento é de grande importância na engenharia geotécnica, visto que pode resultar em recalques significativos. Portanto, a análise de adensamento de um solo pode ser utilizada para prever o comportamento de fundações e estruturas sobre solos compressíveis.

Os solos podem ser caracterizados como normalmente adensados ou sobreadensados. Caso a tensão vertical efetiva de um solo seja a maior pela qual este solo já foi submetido, ele será considerado normalmente adensado. Entretanto, se este solo já foi em algum momento submetido a uma tensão vertical efetiva superior à tensão atual, será um solo sobreadensado. A razão de sobreadensamento (OCR, do inglês overconsolidation ratio) é definida pela Equação 1:

$$OCR = \sigma'_{vm} / \sigma'_{vo} \quad [1]$$

σ'_{vm} corresponde a maior tensão vertical efetiva que este solo já foi submetido, enquanto σ'_{vo} representa a tensão vertical efetiva atual.

Solos sobreadensados, como no caso das argilas rijas a duras da Formação Resende, sofrem deformações menores em relação a solos normalmente adensados, uma vez que o efeito do carregamento no trecho de recompressão é inferior. Dessa forma, quanto maior o OCR de uma amostra, menor será a deformação no adensamento (Pioli, 2023).

Skempton (1970) estudou o adensamento de argilas a partir de curvas de compressão, relacionando índice de vazios e teor de umidade com a tensão vertical efetiva em diferentes tipos de sedimentos (**Figura 5**). Para cada solo estudado, o autor definiu uma Linha de Compressão de Sedimentação (SCL), uma vez que observou uma relação linear entre esses fatores em argilas normalmente adensadas. A posição da SCL de cada solo é dependente dos argilominerais presentes, assim como a quantidade de cada um deles.

As argilas vão constantemente sofrendo aumento de pressão efetiva, e redução de umidade. Em argilas sobreadensadas, há uma sobrecarga muito alta, oriunda da deposição de diversas camadas sobre ela, que foram posteriormente removidas por erosão. Com essa remoção de sobrecarga originada pela erosão há um aumento no teor de umidade, mas ainda muito inferior à diminuição desse teor ocorrido no processo de adensamento elevado. Dessa forma, as partículas em uma argila sobreadensada estarão em um estado mais denso, e conseqüentemente terá um teor de umidade muito inferior ao de uma argila normalmente adensada, assim como uma maior resistência ao cisalhamento (Skempton, 1964).

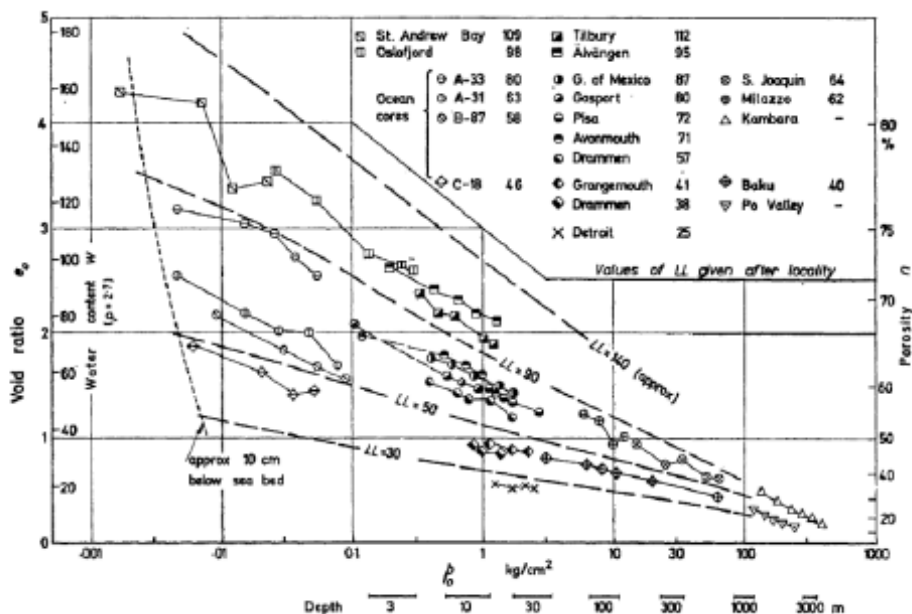


Figura 5 - Curvas de compressão de sedimentação para sedimentos argilosos normalmente adensados. Extraído de Skempton (1970).

5.2. Resistência ao cisalhamento – Argilas rijas a duras

Segundo Skempton (1964), um solo argiloso, dependendo de seu histórico de tensões e rupturas, pode apresentar três diferentes tipos de envoltórias de resistência ao cisalhamento: sobreadensada, normalmente adensada e residual. Os ensaios de resistência em argilas rijas são essenciais para a obtenção de fatores como a resistência de pico e a resistência residual, além de parâmetros de deformabilidade para níveis mais elevados de deformação.

A resistência de pico pode ser definida como o limite de resistência a um cisalhamento crescente, sob uma determinada tensão efetiva. Passado o limite de resistência, conforme há um aumento do deslocamento, ocorre uma diminuição da resistência (**Figura 6**). Essa diminuição também apresenta um limite, que corresponde à resistência mantida pela argila mesmo quando submetida a grandes deformações. Esse limite é denominado de resistência residual e, mesmo em campo, como em casos de rupturas ou deslizamentos, a resistência ao cisalhamento de argilas sobreadensadas não pode ser inferior ao valor de resistência residual (Skempton, 1964).

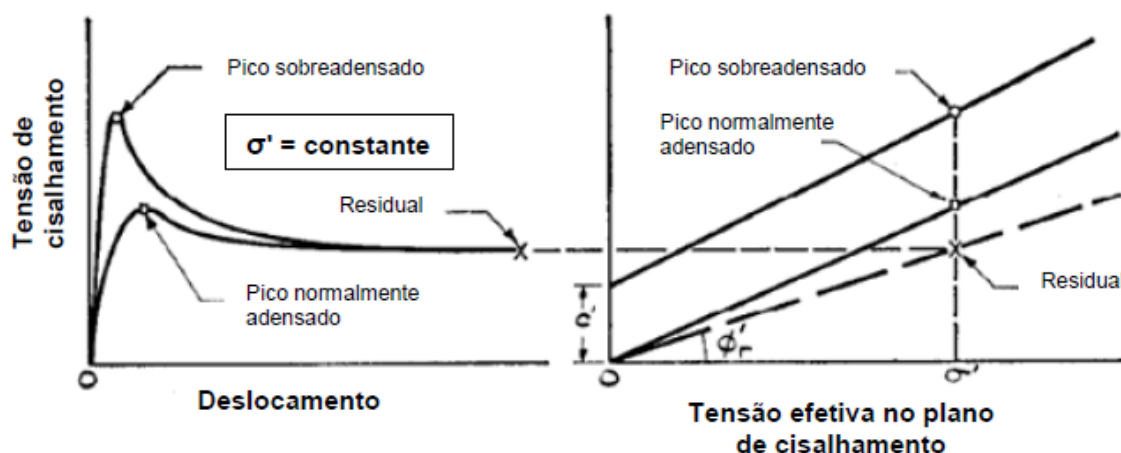


Figura 6 - Comportamento típico de argilas sobreadensadas e normalmente adensadas. Extraído de Serafim (2024).

Outra característica de interesse está em que as argilas sobreadensadas demonstram uma significativa tendência à expansão, especialmente após o pico de resistência, característica associada, em parte, ao aumento do teor de umidade e à alta densidade do material. Ademais, outro fator de importância é o aparecimento de faixas finas orientadas na superfície de cisalhamento, alinhadas na direção do esforço aplicado. Essa orientação das partículas pode estar diretamente ligada à redução da resistência nessas argilas. Apesar de alguns autores sugerirem que essas faixas de orientação são formadas em fases iniciais de deformação, tanto experimentos laboratoriais quanto observações de campo evidenciam domínios de orientação bem definidos em amostras de argila submetidas a grandes deformações (Goldstein et al., 1961, apud Skempton, 1964).

A presença de fissuras e juntas também tem impacto no comportamento de argilas. Elas podem ter sua resistência diminuída, visto que essas fissuras agem como planos de fraqueza e concentradores de tensão, tornando pouco provável que a resistência em uma fissura seja muito superior à resistência residual dessa argila (Hight et al., 2007). Portanto, a resistência de uma argila sobreadensada fissurada estaria mais distante de sua resistência de pico, e mais próxima de sua resistência residual (Skempton, 1964).

5.3. Deformabilidade de argilas rijas a duras

A deformabilidade de solos consiste no estudo das relações entre tensões atuantes num solo e as deformações provocadas pela alteração no seu estado de tensões. Essas características de tensão-deformação são base para a avaliação de propriedades geotécnicas de um solo. A curva de tensão obtida em ensaios é a base para determinar parâmetros que determinam a rigidez de um material.

Segundo Clayton (2011), a rigidez de um solo é medida em função da tensão efetiva aplicada e, no caso de solos saturados, existem duas situações que exigem a determinação de parâmetros de rigidez. A primeira é a situação não drenada, onde ocorreram deformações cisalhantes, mas o excesso de poropressão permanece e não há ocorrência de deformações volumétricas. A segunda é a situação drenada, onde ocorreram deformações volumétricas e cisalhantes e qualquer excesso de poropressão gerado durante o carregamento foi totalmente dissipado.

Os parâmetros de rigidez podem ser considerados constantes em deformações pequenas, mas tendem a diminuir com o aumento das deformações. Como dito anteriormente, módulos de rigidez podem ser determinados sob diferentes condições de tensão-deformação em ensaios em condições drenadas e não-drenadas.

O módulo de solo (E_s) foi referido por Briaud (2001) e Ranjan (2000) como módulo secante do solo. Esse módulo pode ser obtido por meio da curva de tensão-deformação axial. O módulo E_u (*undrained*) ou E_s (secante) é encontrado a partir de ensaios triaxiais não drenados, enquanto o módulo E_d (drenado) é obtido por ensaios em condições drenadas.

O módulo secante E_s consiste na razão da diferença de tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_3$) e a deformação axial correspondente (ϵ_a), como visto na Equação 2:

$$E = \Delta(\sigma_1 - \sigma_3) / \Delta\epsilon_a \quad [2]$$

5.4. Ensaios Triaxiais – Argilas rijas a duras

O ensaio triaxial é de extrema importância para a caracterização geotécnica de argilas, uma vez que permite a aplicação de um determinado estado de tensões no solo. Os ensaios triaxiais permitem a definição de diversas trajetórias de tensão e condições de adensamento, além das condições de drenagem nas fases de adensamento e cisalhamento. Em ensaios não-drenados pode ser analisado o comportamento do solo referente a sua capacidade de contração e dilatação durante o cisalhamento.

O estado de tensões é representado por círculos de Mohr. O círculo é definido por um ponto em que a tensão cisalhante possui um módulo máximo. A sequência desses pontos é definida como caminho de tensões, e pode ser determinada em termos efetivos (CTE – caminho de tensões efetivas) ou totais (CTT – caminho de tensões totais). Esses caminhos são plotados em uma correlação de $t \times s'$ (CTE) ou $s \times t$ (CTT) (Pioli, 2023).

Ortigão (2007) mostrou as trajetórias de tensões efetivas (TTE ou CTE) e trajetórias de tensões totais (TTT ou CTT) por meio de um plano de tensões triaxiais, $t \times s'$, de argilas NA (normalmente adensada) e PA (sobreadensada) (**Figura 7**). Nota-se que as argilas NA e

PA apresentam grandes diferenças em suas trajetórias, devido à diferença de poropressão (Δu).

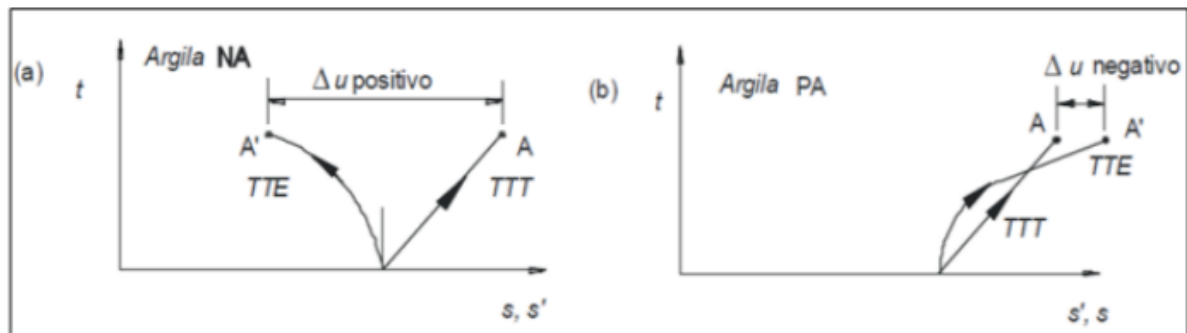


Figura 7 - Trajetórias de tensão de argilas (a) NA e (b) PA. Extraído de Ortigão (2007).

Os resultados dos ensaios triaxiais são mostrados por gráficos de deformação axial (ϵ_a) x tensão desviadora (σ_d) e deformação axial x acréscimo de poro-pressão (Δu). Curvas típicas de argilas foram apresentadas por Pinto (2019), destacando solos argilosos normalmente adensados (OCR=1), levemente pré-adensados (OCR=2) e altamente pré-adensados (OCR=8) (**Figura 8**).

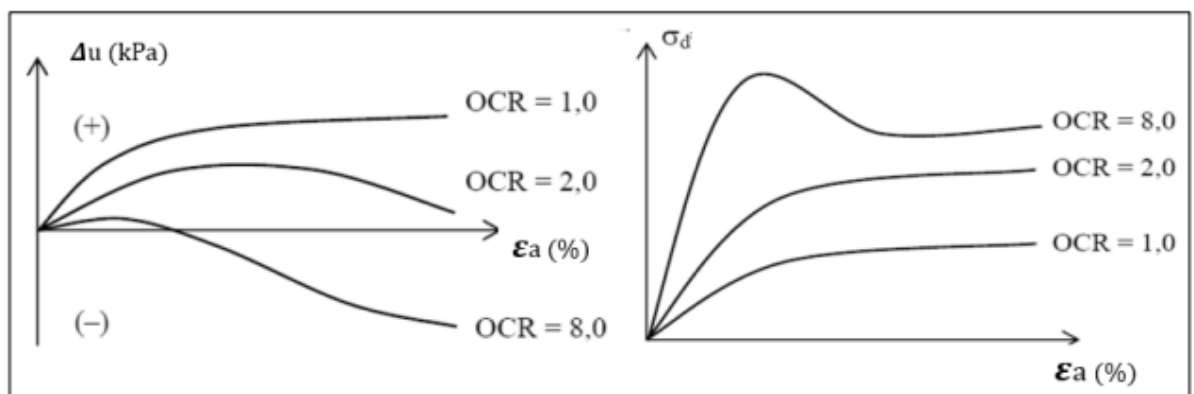


Figura 8 - Curvas típicas de ensaios triaxiais para solos argilosos. Extraído de Pinto (2019).

6. Caracterização geológico-geotécnica de argilas rijas a duras do Brasil

O estudo e caracterização geotécnica de depósitos compostos por argilas denominadas rijas a duras no Brasil, ainda é raro. Essas argilas de consistência elevada são em geral caracterizadas por fatores como sobreadensamento elevado, comportamento expansivo, presença de descontinuidades, cimentação e tensões horizontais elevadas. Para estudo de algumas dessas propriedades, podem ser realizados ensaios triaxiais, de adensamento, cisalhamento e SPT (*Standard Penetration Test*). Dessa forma, pode-se destacar no Brasil duas principais formações para análise geotécnica: a Formação Resende, da Bacia de São Paulo; e Formação Guabirotuba, da Bacia de Curitiba.

Ambas as formações citadas são pertencentes a bacias que compõem o Rift Continental do Sudeste do Brasil – RCSB, o que explicaria a presença de feições em comum entre elas. A litologia da área fonte de seus sedimentos, ambiente e mecanismos de deposição, a granulometria e composição dos solos são fatores em que podem ser vistas similaridades entre tais formações.

6.1. Argilas duras da Formação Resende (Taguá)

As argilas cinza-esverdeadas, pertencentes à Formação Resende, são encontradas distribuídas na Bacia de São Paulo, localizadas geralmente abaixo do lençol freático. Tais argilas foram descritas por Cozzolino (1972); Massad (1980); Gurgueira (2013), entre outros, destacando sua plasticidade de média a muito plástica, com alta coesão, consistência rija a dura, sobreadensamento elevado e cor cinza-esverdeado a cinza-azulado, que podem variar para um aspecto marrom amarelado frente a alterações intempéricas. Ocorrem geralmente associadas a lentes de areias finas muito compactas, argilosas, de coloração cinza-escura.

Essas argilas podem ser vistas em profundidades abaixo da cota 725 m e, segundo Vargas (1992), são encontradas sobrepostas ao embasamento pré-cambriano, mas também às areias basais, apresentando alternâncias em sua deposição ao longo da Bacia de São Paulo. Muitas vezes ocorre recobrindo os vales dos rios Tietê e Pinheiros (Cozzolino, 1972).

As características de argilas duras, assim como suas propriedades, são dependentes de diversos fatores, entre eles, pode-se citar o fissuramento, uma vez que estas argilas são compostas por material friável, dificultando sua amostragem (Demarchi, 2019). As argilas rijas e duras podem apresentar fissuras, formando pequenos blocos que, segundo Penna (1982), tendem a ocorrer em porções mais próximas ao topo da camada. Esse fissuramento pode ser explicado como resultado da ação de intemperismo físico e químico, assim como pode estar relacionado a alívios de tensão ocasionados por remoções de carga durante eventos erosivos (Penna, 1982).

A compreensão do padrão de fissuramento das argilas duras é de extrema importância, uma vez que juntas e fissuras representam superfícies de fraqueza que diminuem a resistência das argilas nesses locais. As fissuras geram um rompimento progressivo do solo, oriundo da concentração de tensões que cedem a resistência de pico (Skempton, 1969).

Outra característica de destaque dessas argilas é o sobreadensamento. Estudos anteriores tentaram explicar a origem desse sobreadensamento (Cozzolino, 1972; Vargas, 1980; Massad, 1980; Penna, 1982), e a hipótese mais provável consiste na erosão dos vales dos rios Tietê e Pinheiros, onde cerca de 100 m de material teriam sido removidos. Entretanto,

Penna (1982) obteve valores de pré-adensamento superiores às máximas tensões efetivas já atuantes, indicando que a carga de soterramento não poderia ser o único fator deste sobreadensamento. Dessa forma, outras hipóteses sugeridas por Penna (1982) seriam o pré-adensamento aparente propiciado por agentes químicos gerados por intemperismo e cimentação, além de um efeito de pré-adensamento causado por ciclos de umedecimento e ressecamento das argilas na fase de sedimentação, onde há variações no nível d'água.

Em relação a parâmetros geotécnicos das argilas da Formação Resende, Penna (1982) e Massad (1992) encontraram valores similares de limite de liquidez (40-75%) e limite de plasticidade (15-30%), que colocam este solo argiloso acima da linha A na Carta de Plasticidade de Casagrande. Por outro lado, Negro et al. (2012) obtiveram resultados que se encontram abaixo da linha A. Já Demarchi (2019) indicou limites de liquidez de 95% e de plasticidade de 40%.

Tratando de pressões de pré-adensamento, Pinto e Massad (1972) chegaram a valores de pressão entre 700 e 850 kPa, enquanto Penna (1982) indicou valores até 2150 kPa. Já no trabalho de Pinto e Abramento (1998), foi apontada a possibilidade desses valores chegarem até 4800 kPa.

Pinto e Abramento (1998), por meio de ensaios pressiométricos (Camkometer) realizados em argilas rijas a duras da Formação Resende encontradas na região do parque Ibirapuera, apresentaram os valores de SPT de acordo com a profundidade, além de valores de coeficiente de empuxo em repouso (K_0), resistência não drenada dessas argilas (S_u) e módulo cisalhante ($G_{0.1}$) (**Figura 9**). Foram encontrados valores relativamente baixos de SPT (próximos a 20) e valor de K_0 da ordem de 2 a 3 para as argilas rijas cinza-esverdeadas.

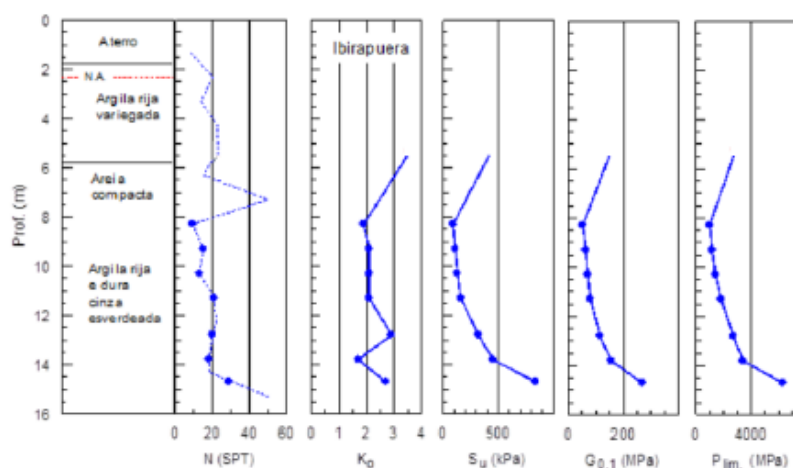


Figura 9 - Perfil geotécnico obtido com o ensaio Camkometer na região do parque Ibirapuera. Extraído de Pinto e Abramento (1998).

Negro et al. (2012) também obtiveram valores de K_0 e S_u , junto à razão de sobreadensamento (RSA), através de ensaios de palheta (Vane Test) e ensaios dilatométricos (DMT) na região da Estação Sacomã do Metrô de São Paulo (**Figura 10**). Além desses parâmetros, Negro et al. (2012) também notaram a ocorrência de valores de N_{SPT} relativamente baixos, com números inferiores a 30 batidas, seguido de valores maiores (até 80 golpes) com o aumento da profundidade, apresentando similaridade aos números apresentados por Pinto e Abramento (1998). Ambos os ensaios indicam que há a ocorrência de uma zona do “taguá” amolecida, próxima ao topo da camada de argila, seguida de um alto gradiente de crescimento da resistência com o aumento da profundidade.

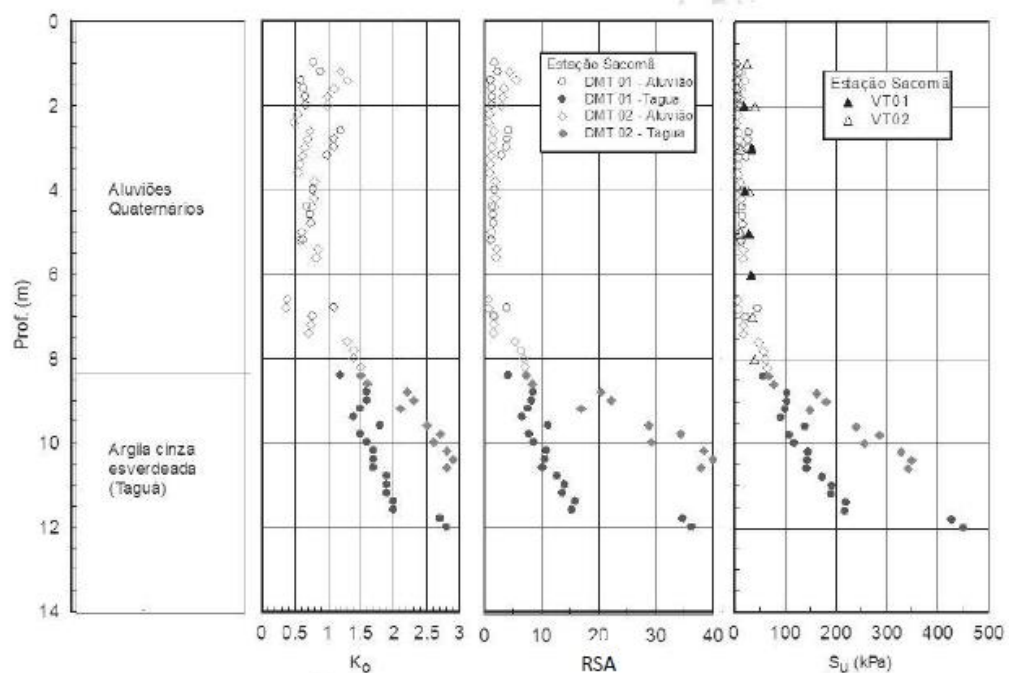


Figura 10 - Parâmetros obtidos em ensaios DMT e palheta, na região da Estação Sacomã do Metrô de São Paulo. Extraída de Negro et al. (2012).

Por meio de ensaios de cisalhamento direto em amostras indeformadas, Massad (1980) encontrou valores de coesão efetiva (c') de 40 kPa, enquanto Negro et al. (2012) correlacionaram valores de c' com dados de N_{SPT} . Para valores de SPT entre 10 e 15 golpes foi encontrada uma coesão de 50 kPa, entre 15 e 25 golpes, 75 kPa, já entre 25 e 40 golpes, 100 kPa, e para valores superiores a 40 golpes, 150 kPa. Galves e Massad (1982) também realizaram ensaios de cisalhamento direto em amostras indeformadas, com o intuito de obter dados relativos à resistência de pico e resistência residual. Os valores atingidos foram de 35 kPa para a coesão de pico e 25° a 30° de ângulo de atrito de pico. A coesão residual é nula e o atrito residual entre 10° e 14°.

Em ensaios triaxiais não drenados, Massad (1980) obteve números de ângulo de atrito efetivo entre 15 e 26 graus e coesão efetiva entre 40 e 70 kPa, enquanto Demarchi (2019),

por meio de amostras de argila reconstituídas, apontou ângulo de atrito de 21° e coesão nula. Pioli (2023) encontrou em amostras indeformadas um valor de ângulo de atrito de 37° e coesão efetiva de 79kPa.

Massad (2012) reuniu os valores de ensaios dilatométricos da Estação Sacomã com os pressiométricos realizados no Ibirapuera, mostrando a correlação entre a deformabilidade (E_i) e pressão de pré-adensamento (s'_p). Foram encontrados valores de E_i entre 80 e 500 Mpa, com média de 176 Mpa.

6.2. Argilas Rijas a Duras da Formação Guabirotuba

As argilas da Formação Guabirotuba ocorrem nas proximidades da cidade de Curitiba, e apresentam coloração cinza, cinza-esverdeada ou marrom, com consistência elevada. São conhecidas popularmente como “sabão de caboclo”, devido a sua característica escorregadia quando umedecidas. Essas argilas se destacam por seu sofrer um empastilhamento (*slacking*), oriundo do seu contato com o ar, onde há uma redução volumétrica do solo consequente de seu processo de ressecamento.

Esse aspecto empastilhado do material pode ser explicado pela predominância de montmorilonita, um argilo-mineral do grupo das esmectitas, nessas argilas. Dados de análises mineralógicas obtidos através da difratometria de raios-x, realizados por Duarte (1986), indicaram valores de 80% de predominância de montmorilonita na fração argila desse material, em comparação com 10% de caulinita e 10% de illita.

A umidade natural das argilas da Formação Guabirotuba é, em geral, elevada, apresentando, segundo Kormann (2002), valor médio de aproximadamente 32%, com desvio padrão de 4,6%. Como consequência, seu grau de saturação também é muito elevado, com valores médios de cerca de 94%, com desvio padrão de 6,8%. Esses valores altos podem ser explicados pelo fenômeno de ascensão capilar, assim como pelas condições climáticas locais, uma vez que o balanço hídrico em Curitiba é positivo em todos os meses do ano.

Outra característica de grande importância nessas argilas é a presença de descontinuidades. Essas descontinuidades podem ser separadas em superfícies polidas e fraturamentos. Os sedimentos argilosos da Formação Guabirotuba apresentam superfícies polidas (*slickensides*). Boszczowski (2001) indicou a presença de juntas e fissuras de ordem centimétrica a decimétrica, que ocorrem sem orientação preferencial. Contudo, notou que são pouco perceptíveis em solo intacto. Esse sistema de fraturas possui grande influência no comportamento geotécnico dessas argilas, uma vez que constituem planos preferenciais de ruptura. Essas fraturas atuam muitas vezes, dependendo de sua intensidade e direção, como fator de redução de resistência ao cisalhamento e aumento de permeabilidade (Kormann,

1999; Kormann et al., 1999; Boszczowski, 2001; Kormann, 2002). Além das superfícies polidas, esses solos argilosos apresentam diversos fraturamentos originados de processos tectônicos atuantes no Rift Continental do Sudeste do Brasil.

Essas discontinuidades são de fundamental importância geotécnica, visto que estão ligadas a constantes problemas observados em obras de talude, escavação e fundação. A presença de discontinuidades reduz a resistência dessas argilas, e isso ocorre porque a resistência ao cisalhamento tende a diminuir à medida que o volume de solo aumenta, produzindo efeitos de escala. Dessa forma, quanto maior a dimensão de uma amostra, menor será sua resistência.

Em relação a parâmetros geotécnicos da argila rija a dura da Formação Guabirotuba, Boszczowski (2001) apresentou dados a partir de ensaios com amostra indeformada. A partir de ensaios de adensamento edométrico de velocidade constante de deslocamento (CDR) foram encontrados valores de pressão de pré-adensamento vertical de 980 kPa e horizontal de 1030 kPa. Por outro lado, em ensaio de adensamento edométrico convencional com a mesma amostra, foi visto um valor de pressão de pré-adensamento vertical de 2800 kPa.

A Tabela 1 apresenta diversos parâmetros obtidos disponíveis na literatura em relação às argilas rijas a duras das Formações Resende e Guabirotuba.

Tabela 1 - Parâmetros geotécnicos de argilas rijas a duras presentes na literatura.

Principais parâmetros	Argila rija a dura da Formação Resende									Argila rija a dura da Fm. Guabirotuba	
	Amostras indeformadas								Amostra reconstituída	Amostra indeformada	
	Massad (1980)	Penna (1982)	Galves e Massad (1982)	Massad (1992)	Metrô de São Paulo (1994)	Pinto e Abramento (1998)	Negro et al. (2012)	Pioli (2023)	Demarchi (2019)	Kormann et al. (1999)	Kormann (2002)
Φ'	15° - 30°	-	25° - 30°	25° - 35°	20° - 27°	-	20° - 23°	37°	21°	18° - 23,9°	21,2°
c' (kPa)	40 - 70	-	0 - 35	40	40 - 100	-	50 - 150	79	0	22 - 50	108
σ_p (kPa)	800	220 - 2150	-	700 - 850	400 - 1000	300 - 4800	300 - 3000	1280	-	1280	2400 - 2900
W_L (%)	-	40 - 75	76 - 85	50 - 90	52 - 86	40 - 70	22 - 80	40	95	65	45 - 75
W_P (%)	-	15 - 30	34 - 38	20 - 40	22 - 28	-	-	23	40	35	27 - 31
I_P (%)	-	15 - 45	38 - 51	30 - 60	30 - 58	-	7 - 35	17	55	30	27 - 34
%<2 μ	-	30 - 70	72 - 74	31 - 59	-	-	-	34	93,9	-	44 - 76

7. MATERIAIS E MÉTODOS

7.1. Materiais de estudo

Os materiais utilizados neste estudo são advindos de duas áreas (Área 1 e 2) do município de Guarulhos, a nordeste do Aeroporto Internacional de Guarulhos, apresentadas em mapa geológico na Figura 11. Em ambas as áreas foram utilizados perfis de sondagem, e foi utilizado um ensaio triaxial CD na Área 2. Todos os ensaios foram realizados pela empresa Geo Coring Investigações Geotécnicas, onde o aluno estagia.

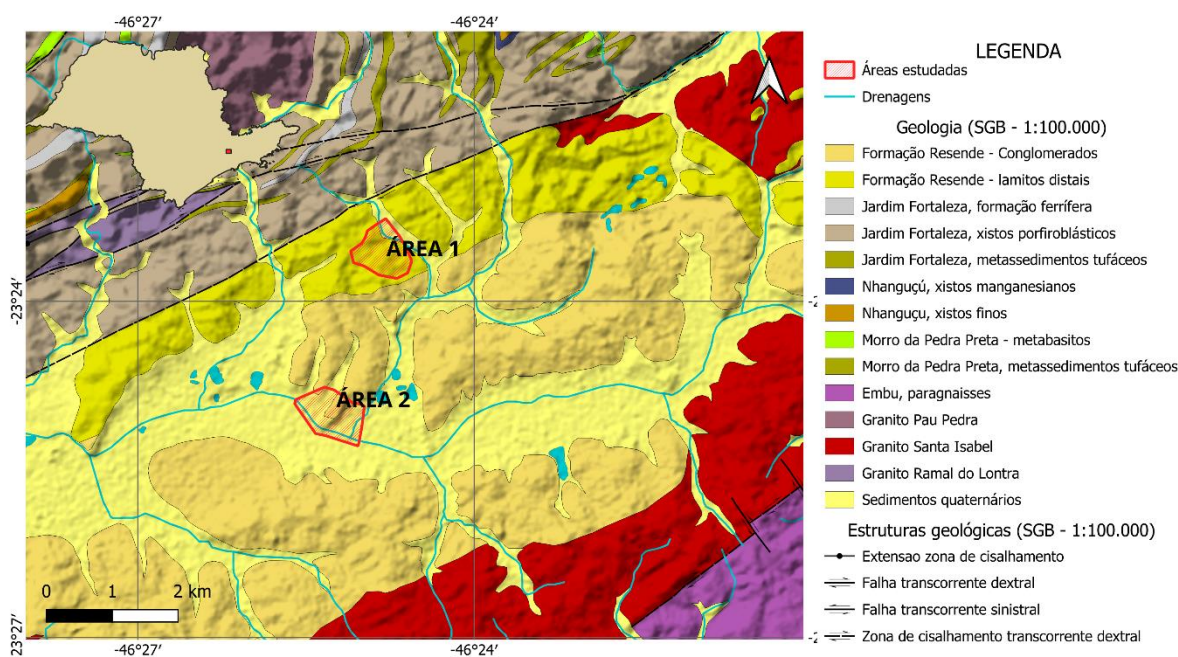


Figura 11 - Mapa geológico da região de estudo, com as áreas 1 e 2 hachuradas em vermelho.

Na Tabela 2, pode-se ver as sondagens a percussão utilizadas para as Áreas 1 e 2, incluindo a cota de cada perfuração e a profundidade final do furo. Foram utilizadas 19 sondagens, 15 presentes na Área 1 e 4 sondagens na Área 2.

O ensaio triaxial CD (Consolidated Drained - Adensado e Drenado) foi realizado pela empresa Geo Coring Investigações Geotécnicas, na condição saturação por contrapressão, nas amostras Denison AT-04 7 a 8 e AT-04 12 a 13, obtidas na Área 2.

Tabela 2 - Sondagens a percussão utilizadas para as áreas 1 e 2.

	Identificação do furo	Profundidade final da sondagem	Cota
ÁREA 1	SP-102	13,45	772,2
	SP-105	12,3	770,5
	SP-107	14,3	770,2
	SP-108	14,39	804,7
	SP-109	15,45	811,2
	SP-111	16,4	804,1
	SP-113	16,45	795
	SP-116	20,45	802
	SP-120	12,21	778,5
	SP-121	18,45	792,8
	SP-122	15,45	782,9
	SP-124	12,3	780,5
	SP-125	11,3	776,2
	SP-128	12,3	776
	SP-129	11,3	782
ÁREA 2	SP-214	16,45	-
	SP-213	16,45	-
	SP-212	17,45	-
	SP-201	13,21	-

7.2. Métodos

7.2.1. Sondagem a percussão

As sondagens a percussão visam mostrar a separação de camadas estratigráficas e classificação granulométrica de solos e rochas, facilitando a caracterização da Formação Resende.

A sondagem a percussão (SP) é o método de investigação de solo mais comum no Brasil, no qual o avanço da perfuração é feito por trado ou lavagem, com a cravação de um barrilete amostrador, que indica o índice de resistência à penetração. Além do índice de resistência, a sondagem a percussão permite a determinação do nível da água e a obtenção de amostras (ABGE, 2013). Este tipo de sondagem pode ser executado por dois sistemas, sistema de sondagem manual e sistema de sondagem mecanizado.

Com relação ao equipamento, no sistema manual (**Figura 12**) é constituído basicamente pelo tripé ou torre com roldana, tubos de revestimento em aço, hastes de aço rosqueáveis, trados concha e helicoidal, peça de lavagem (trépano), bomba d'água, barrilete-amostrador, cabeça de bater em aço, e martelo de ferro com 65 kg com haste guia. Já para o

sistema mecanizado, de maneira resumida, precisa de perfuratriz rotativa, tubos de revestimento, hastes de aço rosqueáveis, trado oco e helicoidal, tricone de perfuração, amostrador-padrão e martelo automático padronizado para cravação do amostrador (ABNT, 2020). As sondagens a percussão neste trabalho foram realizadas em sistema manual.

O avanço na perfuração é feito através de trado ou trépano de lavagem (Iyomasa et al., 2018). O avanço da perfuração utiliza da cravação de um barrilete amostrador bipartido, padronizado, para a medida do Índice de Resistência à Penetração. A perfuração tem em geral um diâmetro de 2,5" (cerca de 6,4 cm). A sondagem a percussão é limitada pela ocorrência de material duro, como, por exemplo, a camada rígida de transição solo-rocha, matacões, seixos ou cascalhos de grande dimensão.

Em geral, o avanço inicial no solo é feito com trado concha ou helicoidal, até atingir o nível de água ou material resistente ao trado, seguido pelo método de lavagem com circulação de água, no qual é necessário a cravação de um revestimento. A cada metro da perfuração, a partir do primeiro metro de profundidade, é feito um ensaio de cravação de um barrilete amostrador padronizado, conhecido como barrilete tipo Raymond, constituído de um tubo oco, bipartido, de 45 cm de comprimento. (Iyomasa et al., 2018).

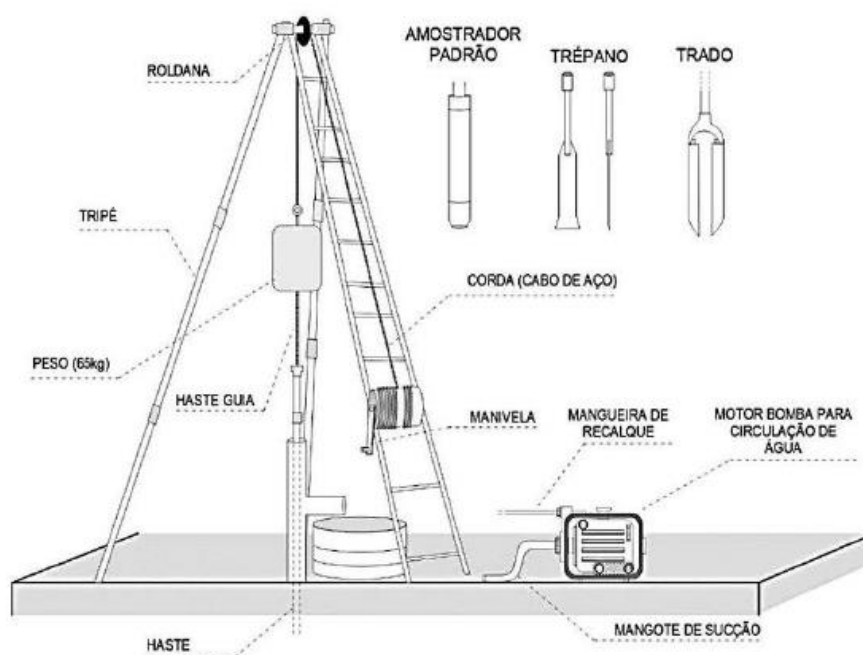


Figura 12 - Equipamentos utilizados na sondagem a percussão manual. Extraído de Castro e Garcia (2017).

Para a cravação do barrilete, é utilizado o impacto de um martelo de 65 kg, caindo em queda livre de 75 cm de altura sobre um ressalto situado na parte superior do hasteamento a ele conectado. O resultado do ensaio SPT corresponde à quantidade de golpes necessária para fazer penetrar, no fundo do furo, o barrilete amostrador, nos seus últimos 30 cm. São feitas anotações da penetração do barrilete em centímetros, quando o martelo é simplesmente

apoiado ou golpeado sobre o ressalto. A medida correspondente à penetração obtida por simples apoio, ou zero golpes, pode ser expressiva em solos moles. Na penetração, por batida do martelo, é contado o número de golpes aplicados para a penetração de cada terça parte (aproximada) dos 45 cm do barrilete amostrador. (Iyomasa et al., 2018).

Quanto ao critério de paralisação da sondagem, para o sistema mecanizado deve ser fornecida pela contratante, de acordo com a necessidade do projeto; já para o sistema manual, considera-se (i) a profundidade definida pela contratante, (ii) quando no ensaio de lavagem por tempo os avanços obtidos forem inferiores a 5 cm em cada intervalo de 10 minutos, ou (iii) na ausência do fornecimento do critério pela contratante, as sondagens devem ser avançadas até atingir um dos critérios:

- a) Avanço da sondagem até a profundidade onde foi obtido 10 m de resultados consecutivos indicando N igual ou superior a 25 golpes;
- b) Avanço da sondagem até a profundidade onde foi obtido 8 m de resultados consecutivos indicando N igual ou superior a 30 golpes;
- c) Avanço da sondagem até a profundidade onde foi obtido 6 m de resultados consecutivos indicando N igual ou superior a 35 golpes.

A posição do nível d'água na perfuração é medida todos os dias, antes do início e depois dos trabalhos de perfuração, quando a perfuração se prolonga por mais de um dia, e no dia seguinte à finalização da sondagem (ABNT, 2020).

A amostragem deve ser feita por meio da coleta e armazenamento de uma porção representativa do material obtido a cada metro, sendo devidamente identificado quanto à profundidade correspondente. No que se refere a descrição da amostra, ela é feita com base na identificação tátil-visual do material.

As amostras de sondagem a percussão foram classificadas por meio de critérios tátil-visuais. É realizada por meio da identificação das características referentes ao solo, como granulometria, plasticidade, cor e origem, além de outros parâmetros de relevância, como presença de minerais visíveis a olho nu, fragmentos de rocha, matéria orgânica, detritos vegetais e estrutura reliquiar preservada (ABNT, 2020).

A primeira identificação feita na classificação é referente à granulometria. Por meio da fricção dos dedos, os solos são separados em solos finos (argilas e siltes) e solos grossos (areias e pedregulhos). Ao tato, os solos finos apresentam aspecto macio, enquanto os solos grossos são ásperos. Posteriormente, é realizada uma segunda separação a partir da sua dimensão (granulometria), sendo as argilas e siltes menores que 0,1 mm, areias entre 0,1 e 2,0 mm, e pedregulhos maiores que 2,0 mm (ABNT, 2020). Ainda, areias e pedregulhos podem ser subdivididos em finos, médios e grossos.

As areias são facilmente identificadas por serem visíveis a olho nu e por não apresentarem coesão entre grãos quando secas ao ar. Já os siltes, são menos ásperos ao tato, em comparação às areias, porém, quando secos ao ar, formam torrões que se desmancham facilmente ao serem pressionados entre os dedos. Por sua vez, as argilas, ao serem umedecidas, apresentam plasticidade e coesão, permitindo que sejam moldadas e deformadas facilmente, e quando são secas ao ar formam torrões que não se desmancham facilmente ao pressionar entre os dedos (DEINFRA, 1994a).

Quando for observado na amostra a presença de detritos vegetais, matéria orgânica, entulhos, entre outros, faz-se necessário o complemento na classificação com os termos adequados referente a tais características (ex.: com detritos vegetais, com matéria orgânica, com entulhos etc.). Ainda, ao observar a presença de grande quantidade de micas e caulim, deve-se acrescentar os termos, micáceo e caulínítico, respectivamente, na classificação do solo (ABNT, 2020).

Com relação à coloração da amostra de solo, deve-se utilizar os termos branco, cinza, preto, marrom, amarelo, vermelho, roxo, azul e verde, podendo complementar com claro ou escuro (ABNT, 2020). Ainda segundo a NBR-6484 (ABNT, 2020), ao apresentar mais de duas cores, deve-se utilizar o termo variegado no lugar da terminologia das cores.

Por fim, tem-se a classificação genética, que está associada à origem do solo. O solo pode ser classificado como aterro, eluvio, colúvio, aluvião, sedimento (eólico, marinho), solo residual ou solo de alteração de rocha. No caso das argilas deste estudo, a classificação genética é de sedimento terciário, ou sedimento da Bacia de São Paulo.

7.2.2. Ensaio Triaxial

O ensaio triaxial é um método geotécnico amplamente utilizado para a avaliação de propriedades de resistência ao cisalhamento e à deformabilidade sob condições controladas de pressão confinante. No ensaio, uma amostra cilíndrica de solo, geralmente saturada, é inserida em uma câmara de pressão onde é submetida a uma pressão confinante uniforme, em todas as direções. Essa pressão uniforme é feita com o intuito de simular as tensões que o material experimenta no subsolo. Posteriormente, uma carga axial é aplicada até que haja a ruptura da amostra, enquanto são monitoradas as deformações resultantes (Pinto, 2006)

Um ensaio triaxial pode ser realizado adotando três tipos principais de condições de drenagem: (1) ensaio triaxial adensado drenado (CD), onde a amostra é adensada e a drenagem é permitida durante a aplicação da carga axial, simulando condições de longo prazo; (2) ensaio triaxial adensado não drenado (CU), no qual a amostra é adensada, mas a drenagem é impedida durante o carregamento axial, representando condições de curto prazo

em solos saturados; e (3) ensaio triaxial não adensado e não drenado (UU), em que a amostra não é adensada e a drenagem é impedida durante todo o ensaio, simulando o comportamento do solo logo após a aplicação de cargas rápidas (Lambe e Whitman, 1969).

Os resultados do ensaio triaxial são utilizados para determinar parâmetros de resistência, como a coesão (c) e o ângulo de atrito interno (ϕ), além de fornecer informações relativas à deformação volumétrica do solo. Esses parâmetros são fundamentais para o dimensionamento de fundações e para o estudo de problemas de estabilidade de taludes e contenções (Holtz et al., 2011).

Neste estudo, foram utilizados resultados de um ensaio Triaxial CD (adensado e drenado). As amostras Denison AT-04 7 a 8 e AT-04 12 a 13 foram analisadas em condições de saturação por contrapressão, com três corpos de prova submetidos a tensões confinantes de 75, 150 e 300 kPa.

8. RESULTADOS OBTIDOS

8.1. Sondagens a percussão

As sondagens a percussão demonstraram a presença das argilas cinza-esverdeadas em diferentes profundidades nas perfurações (a partir de 1,49 m na sondagem SP-121 e a partir de 11,75 m na sondagem SP-111) (**Tabela 3**). Essa diferença é de grande interesse para uma avaliação de valores de N_{spt} em diferentes profundidades, assim como o impacto de condições particulares nesses solos (presença de fragmentos de rocha, alteração por intemperismo).

Foram encontrados valores de N_{spt} variando entre 4 golpes (SP-121) e 58 (SP-120), entretanto, a maior parte dos valores obtidos foram superiores a 10 golpes, como visto na Tabela 3, onde é feito um comparativo entre os maiores e menores valores de N_{spt} do Taguá em cada sondagem. Os maiores valores encontrados se encontram na faixa de 45-55 golpes. Além disso, observa-se em algumas sondagens um aumento considerável dos valores de N_{spt} , uma vez que as argilas rijas e duras são atingidas na perfuração, comparado com camadas que se sobrepõem a elas, sejam aterros, aluviões, ou outros sedimentos terciários.

Outro fator que pode ser destacado está relacionado à correlação dos valores de N_{spt} com a profundidade. Nota-se que a partir das sondagens que há uma certa variação comum dos valores de N_{spt} frente à profundidade da perfuração. Em geral, os valores obtidos nos primeiros 10 m se encontram entre cerca de 10-35 golpes, atingindo valores de ordem superior em maiores profundidades.

São encontrados em casos específicos aumentos de N_{spt} em camadas nas quais foram encontradas pedregulhos ou fragmentos. Além dessas variações, constata-se que em sua grande maioria, as amostras obtidas apresentam coloração cinza-amarronzada, característica da intemperização do solo.

Tabela 3 - Valores de N_{spt} e profundidade do Taguá das áreas 1 e 2.

	Identificação do furo	Menor valor de N_{spt}	Maior valor de N_{spt}	Profundidade inicial do Taguá (m)	Profundidade final do Taguá (m)
ÁREA 1	SP-102	20	43	4,67	13,45
	SP-105	16	39	5,87	12,3
	SP-107	10	40	3,5	14,3
	SP-108	14	53	3,8	14,39
	SP-109	10	49	2,85	15,45
	SP-111	20	43	5,45	16,4
	SP-113	21	42	5,6	16,45
	SP-116	12	42	4,6	20,45
	SP-120	9	58	1,95	12,21
	SP-121	4	52	1,49	18,45
	SP-122	25	43	6,9	15,45
	SP-124	9	42	4,45	12,3
	SP-125	25	42	4,45	11,3
	SP-128	39	43	7,45	12,3
	SP-129	40	45	5,6	11,3
ÁREA 2	SP-214	10	54	4,73	16,45
	SP-213	12	53	4,67	16,45
	SP-212	13	50	4,76	17,45
	SP-201	5	32	2,89	8,74

8.2. Ensaio triaxiais

Nos ensaios triaxiais CD realizados com tensões confinantes de 75, 150 e 300 kPa, os corpos de prova das amostras AT-04 7 a 8 e AT-04 12 a 13 apresentavam as características iniciais descritas na Tabela 4. Foram realizados ensaios em amostras com saturação por compressão.

Tabela 4 - Características iniciais dos corpos de prova estudados.

	AT-04 7 a 8			AT-04 12 a 13		
Características	CD-75-S	CD-150-S	CD-300-S	CD-75-S	CD-150-S	CD-300-S
Umidade inicial (%)	30,9	27,6	25,6	25,5	20,8	35,6
Diâmetro (cm)	3,57	3,59	3,58	3,55	3,55	3,48
Altura (cm)	7,05	7,14	6,88	7,13	7	7,01
Volume (cm ³)	70,57	72,17	69,45	70,67	69,29	66,56
Massa (g)	135,54	140,05	139,12	134,03	138,27	131,73
Densidade dos grãos (g/cm ³)	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
Densidade úmida (g/cm ³)	1,92	1,94	2	1,9	2	1,98
Densidade seca (g/cm ³)	1,47	1,52	1,59	1,51	1,65	1,46
Índice de vazios	0,806	0,742	0,662	0,754	0,603	0,816
Grau de saturação (%)	100	98,5	100	89,7	91,1	100

A Figura 13 apresenta o gráfico de tensão por deformação dos corpos da amostra AT-04 7 a 8. Já a Figura 14 apresenta o gráfico de tensão por deformação para os corpos de prova da amostra CD-04 12 a 13.

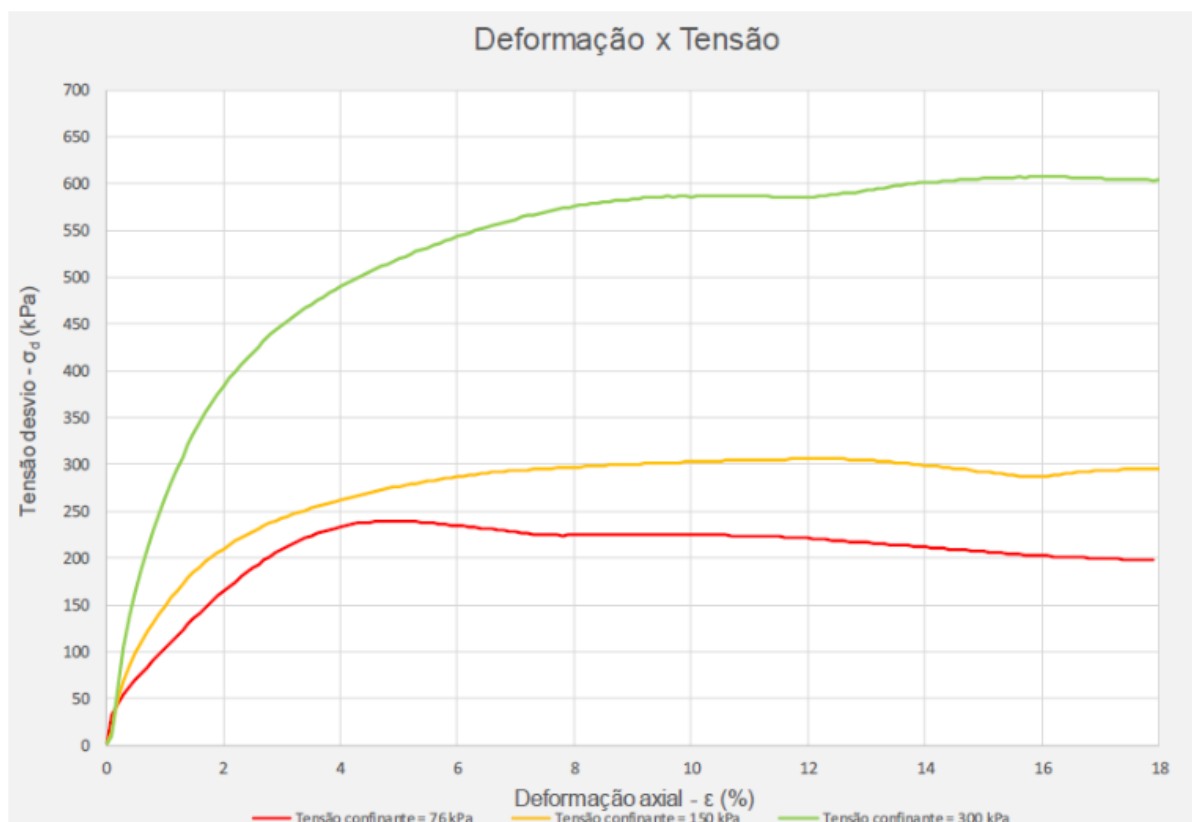


Figura 13 - Curvas tensão desviadora x deformação axial referentes a amostra AT-04 7 a 8.

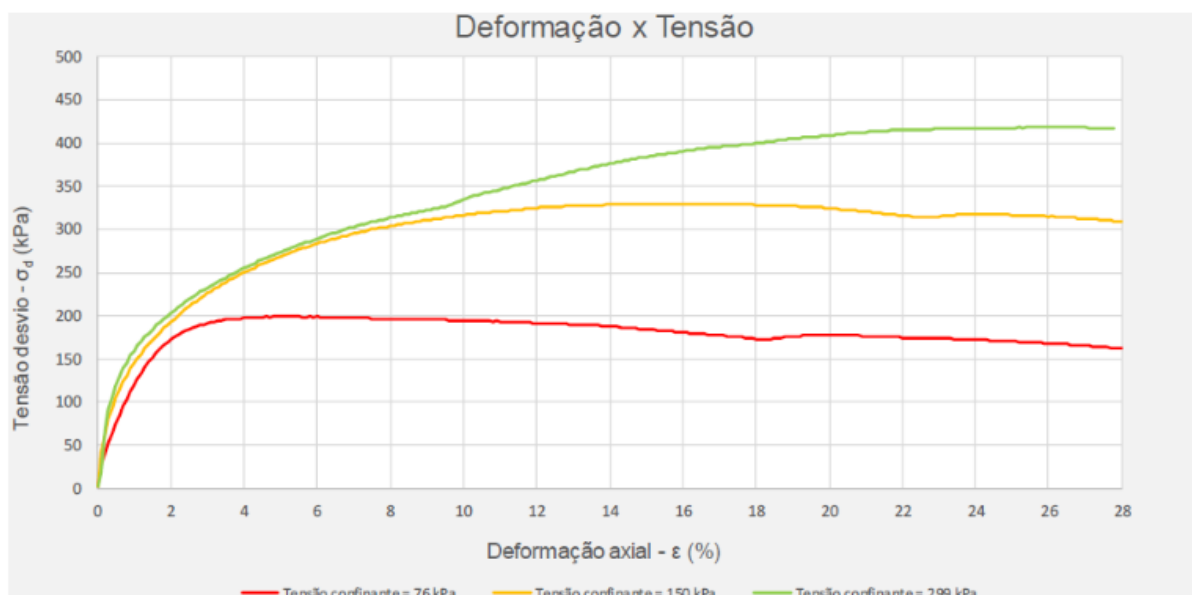


Figura 14 - Curvas tensão desviadora x deformação axial referentes a amostra AT-04 12 a 13.

Nos ensaios realizados com a amostra AT-04 7 a 8, as curvas obtidas demonstraram um rápido desenvolvimento de tensões a partir de pequenas taxas de deformação. Para as confinantes de 75 e 150 kPa, as tensões aumentaram rapidamente logo no início do ensaio e atingiram seu valor máximo próximo a uma taxa de deformação de 3 a 6%, e então se estabilizaram para taxas de deformação maiores. No ensaio de confinante 300 kPa, entretanto, o valor máximo de tensão só foi atingido próximo à deformação de 10%, uma taxa consideravelmente maior em relação aos outros ensaios.

Nos ensaios realizados com a amostra AT-04 12 a 13, a curva obtida com tensão confinante de 75 kPa, assim como na amostra AT-04 7 a 8, apresentou um aumento rápido de tensões com pequena taxa de deformação, cerca de 3%, se estabilizando em taxas maiores. Nos ensaios de confinantes de 150 kPa e 300 kPa seus valores máximos foram atingidos respectivamente em taxas de deformação de 10 e 20%.

As Figuras 15 e 16 apresentam os círculos de Mohr com sua envoltória de ruptura. Os parâmetros obtidos de coesão e ângulo de atrito estão apresentados na Tabela 5:

Tabela 5 – Valores de coesão e ângulo de atrito obtidos para cada amostra.

Amostras	C'	Φ'
AT-04 - 7 a 8	28	25
AT-04 - 12 a 13	54	20

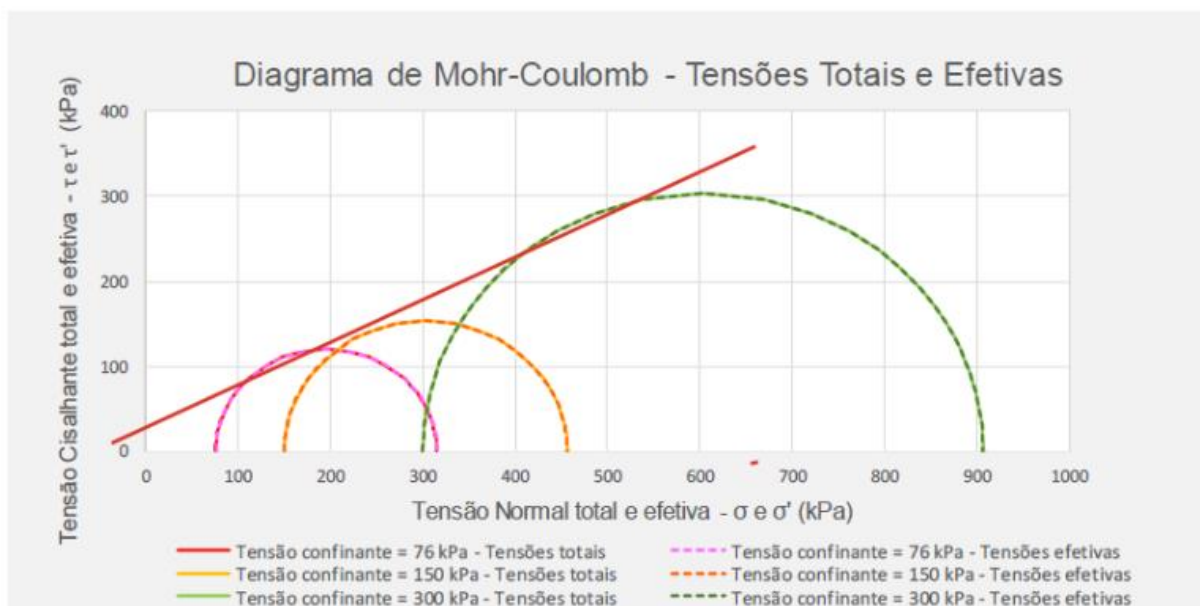


Figura 15 - Círculos de Mohr e envoltória de ruptura referentes a amostra AT-04 7 a 8.

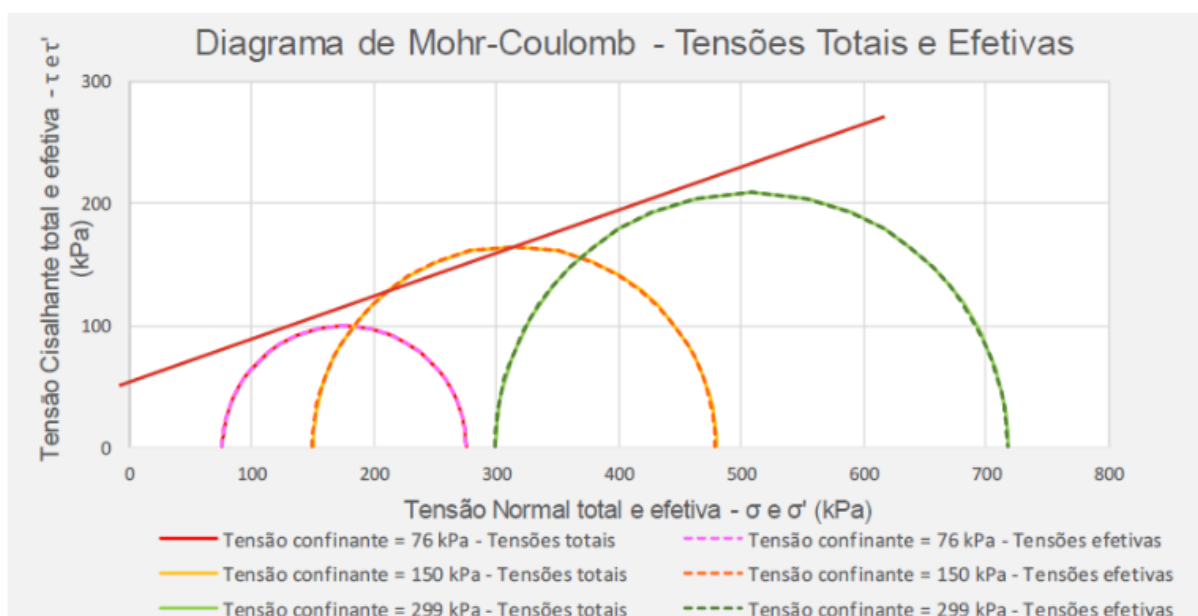


Figura 16 - Círculos de Mohr e envoltória de ruptura referentes a amostra AT-04 12 a 13.

8.3. Dificuldades surgidas e alterações

No desenvolvimento do presente trabalho, foram realizadas algumas modificações entre o relatório de progresso (RP) e o trabalho final, em razão de ajustes necessários para a caracterização do solo da Formação Resende. Uma das principais alterações foi relacionada à falta de dados de amostras no RP. Durante a fase de elaboração do relatório, encontrava-se pendente a coleta de amostras necessárias para a caracterização. No entanto, após a conclusão da coleta e obtenção das amostras, foram analisadas as informações presentes referentes à Formação em questão. Foram então selecionadas duas áreas consideradas

representativas para o desenvolvimento do trabalho, em função da disponibilidade de dados sobre sondagem e ensaio triaxial, que foram considerados os mais apropriados para a caracterização e a realização de análise dos parâmetros geotécnicos da Formação Resende.

Foi realizada também uma alteração no título do trabalho, visando garantir maior precisão e consistência nos dados apresentados. Levando em consideração as amostras utilizadas, bem como a disponibilidade de dados na literatura, foi decidido realizar a caracterização somente dos sedimentos argilosos cinza-esverdeados da Formação Resende (Taguá).

Além disso, durante a elaboração do trabalho, ao analisar os dados do ensaio triaxial da área 1, constatou-se que os resultados obtidos eram referentes a outro tipo de solo, que não corresponde à Formação Resende, provavelmente referentes a amostras de aterro. Como o objetivo do trabalho é focar na caracterização geotécnica da Formação Resende, esses dados foram desconsiderados.

9. INTERPRETAÇÕES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As argilas rijas a duras possuem características e parâmetros geotécnicos que as destacam dos demais solos argilosos. Por meio das sondagens a percussão e ensaios triaxiais realizados é possível uma comparação com parâmetros obtidos na cidade de São Paulo, presentes na literatura.

Os valores de Nspt obtidos nas sondagens foram similares aos presentes na literatura, visto que foram encontrados números na faixa de 10-50 golpes, com exceção de alguns valores inferiores obtidos em sondagens em que o Taguá se encontrava mais raso, entre 1,5 e 3 m de profundidade (sondagens SP-120, SP-121 e SP-124). Valores maiores, como os apresentados por outros autores, não foram atingidos devido aos critérios de paralisação nas perfurações realizadas, que impediram a continuação das perfurações. Acredita-se que em profundidades maiores, valores próximos aos vistos na literatura seriam atingidos. A Tabela 6 apresenta os valores encontrados na literatura em comparação com os deste estudo.

Tabela 6 - Variação de valores de Nspt observados na literatura, em comparação com os obtidos nas sondagens.

	Penna (1982)	Pinto e Abramento (1998)	Negro et al. (2012)	Gurgueira (2013)	Presente estudo
Nspt	10 - 78	10 - 30	10 - 80	10 - 50	9 - 58

Os números de Nspt encontrados até aproximadamente 10 m variaram em geral entre 10-35 golpes, valores esses que se assemelham aos encontrados por Gurgueira (2013), onde houve um predomínio de 10-30 golpes nos primeiros 10 metros. Esses valores corroboram também com as análises de ensaios de Pinto e Abramento (1998) e Negro et al. (2012), que indicaram uma zona de Taguá amolecido até 12 m, com valores de Nspt inferiores a 30 golpes. Em profundidades maiores, os valores altos de 40-55 golpes estão de acordo com a literatura e sustentam a interpretação de um alto gradiente de crescimento da resistência com o aumento da profundidade, também descrita por Negro et al. (2012).

Parte das amostras classificadas apontaram a presença de pedregulhos e fragmentos de quartzo, assim como citado por Gurgueira (2013) em amostras da Linha 17 do Metrô de São Paulo. A alteração das amostras por intemperismo também foi comum entre as sondagens analisadas, visto que a maior parte das amostras descritas apresentava coloração cinza-amarronzada.

As curvas presentes nos gráficos de tensão x deformação, obtidas dos ensaios triaxiais, apresentaram resultados parcialmente condizentes com os observados na literatura. Os corpos de prova submetidos a tensões confinantes de 75 kPa e 150 kPa da amostra AT-04 7 a 8 e 75 kPa da amostra AT-04 12 a 13 atingiram seus valores máximos de tensão desviadora em taxas de deformação entre 3 e 6%. Essas taxas são similares às observadas por Pioli (2023) e Demarchi (2019) em corpos de prova com confinantes de 50, 100 e 200 kPa.

Os corpos de prova submetidos a tensão confinante de 300 kPa (amostra AT-04 7 a 8) e 150 kPa (amostra AT-04 12 a 13) apresentaram curvas que atingiram seus valores máximo de tensão desviadora em taxas de deformação de cerca de 10%. Esse valor foi encontrado por Demarchi (2019), sob confinante de 600 kPa. Já o corpo submetido a confinante de 300 kPa (amostra AT-04 12 a 13) apresentou taxa de deformação de 20%, que se encontra fora dos padrões observados na literatura.

Em todos os corpos de prova analisados, as curvas apresentaram comportamento típico de argilas normalmente adensadas, definidas por Skempton (1970), no qual não é possível a visualização de um pico de resistência bem definido após forte ganho de resistência inicial. Essas curvas são caracterizadas por um crescimento contínuo das tensões cisalhantes e deformações até o momento de ruptura da amostra, que é seguido por uma certa estabilização dos valores. Segundo Skempton (1970), esse comportamento é típico de argilas duras muito fissuradas.

Os parâmetros de resistência obtidos (Tabela 5) se aproximaram dos vistos na literatura (Tabela 1). Galves e Massad (1982) apresentaram valores de coesão entre 0 e 35

kPa, enquanto Massad (1980) e Negro et al. (2012) indicaram valores superiores a 40 kPa. Essa variação destaca a heterogeneidade das argilas rijas a duras da Formação Resende.

Os ângulos de atrito obtidos do ensaio de ambas as amostras se mostraram muito próximos dos encontrados na literatura, e característicos dessas argilas. Massad (1980), Galves e Massad (1982), Metrô de São Paulo (1994), Negro et al. (2012) e Demarchi (2019) apresentaram valores entre 15° e 30°.

10. CONCLUSÕES

Neste trabalho, a partir de amostras de argilas rijas a duras cinza-esverdeadas da Formação Resende, provenientes do município de Guarulhos, foram realizados ensaios de resistência e sondagem a percussão de modo a melhor compreender algumas características e parâmetros geotécnicos desse material. Por meio de sondagens a percussão e ensaios triaxiais foram obtidos parâmetros geotécnicos, comparados com dados da cidade de São Paulo presentes na literatura, com o intuito de auxiliar a compreensão geotécnica de solos da RMSP, assim como a realização de obras de engenharia.

A partir de critérios tátil-visuais, foi realizada a classificação das amostras de sondagem a percussão. Por meio da análise visual, foi constatado que a maioria das amostras apresentou coloração cinza-amarronzada, característica da intemperização do solo.

Os resultados obtidos demonstraram que os valores de N_{spt} variaram de 4 a 58 golpes, contudo, a maioria dos valores obtidos foram superiores a 10 golpes. Ao correlacionar os valores de N_{spt} , com a profundidade, foi observado que os valores obtidos nos primeiros 10 metros se encontram entre cerca de 10-35 golpes, atingindo valores de ordem superior, conforme o aumento da profundidade. Esses valores se mostraram condizentes com aqueles presentes na literatura, e evidenciaram a presença de uma zona amolecida do Taguá, seguida de um alto gradiente de crescimento da resistência com o aumento da profundidade, como descrito por Negro et al. (2012).

Mediante a realização do ensaio triaxial CD, a análise dos gráficos de tensão x deformação indicou que os corpos de prova submetidos a tensões confinantes menores (75 e 150 kPa) atingiram seus valores máximos de tensão desviadora em taxas de deformação similares às observadas por Pioli (2023) e Demarchi (2019) em corpos de prova com confinantes similares. Por outro lado, em corpos de prova submetidos a tensões maiores, os valores divergiram consideravelmente. Parâmetros geotécnicos como a coesão e ângulo de atrito se encontraram dentro de intervalos descritos por diversos autores, indicando grande similaridade geotécnica dessas argilas com as analisadas na cidade de São Paulo.

Em todos os corpos de prova analisados, as curvas de tensão x deformação apresentaram comportamento típico de argilas normalmente adensadas, caracterizadas por um crescimento contínuo das tensões cisalhantes e deformações até o momento de ruptura da amostra, seguido por uma estabilização dos valores. Apesar de argilas rijas a duras da Formação Resende tenderem a ser sobreadensadas, esse comportamento de adensamento normal pode ser explicado pela alta fissuração do material argiloso (Skempton, 1970).

Dessa forma, conclui-se que as argilas rijas a duras da Formação Resende observadas no município de Guarulhos apresentam características similares às avaliadas na cidade de São Paulo. Entretanto, recomenda-se a realização diferentes ensaios para obtenção de outros parâmetros geotécnicos, que permitirão uma compreensão maior do comportamento dessas argilas na Região Metropolitana de São Paulo.

11. REFERÊNCIAS

- Almeida, F.F.M. 1976. The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências (suplemento)*. 48: p.15-26.
- Almeida, F.F.M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B.B.; Fuck, R.A. 1977. Províncias estruturais brasileiras. In: *Simpósio de Geologia do Nordeste*, 8, Campina Grande, Atas, p.363-391.
- Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE). 2013. *Manual de Sondagens*. São Paulo, ABGE, Boletim nº3, 5ª ed., 103p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). 2020. Solo - Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método e ensaio. NBR-6484/2020. Rio de Janeiro.
- Boszczowski, R.B. 2001. Avaliação da tensão lateral de campo de argilas sobreadensadas: ensaios de laboratório com um solo da Formação Guabirubá. Tese de Mestrado. Rio de Janeiro, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil. 286 p.
- Briaud, J.L. 2001. "Introduction to Soil Moduli", *Geotechnical News*, June 2001, BiTech Publishers Ltd, Richmond, B.C., Canada.
- Castro, B., Garcia, A., 2017, Cartografia geotécnica para a cidade de Palmas/TO: determinação das cotas de impenetrável e nível freático por meio de sondagem SPT. DOI: 10.13140/RG.2.2.34429.87522.
- Clayton, C.R.I. 2011. Stiffness at small strain: research and practice. *Géotechnique*, Volume 61, No. 1, p. 5 – 37.
- Cozzolino, V. 1972. Tipos de sedimentos que constituem a Bacia de São Paulo. Tese de doutoramento. Escola Politécnica da USP. São Paulo.
- Cozzolino, V. M., 1996. Areias basais fofas na área central da cidade de São Paulo. In: *Revista Solos e Rochas*. São Paulo, 19:163-174.
- Das, B. M. *Princípios de Engenharia Geotécnica*. Cengage Learning, 2013.
- Demarchi, F. 2019. Comportamento geotécnico da argila dura cinza esverdeada reconstituída da Formação Resende. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, São Paulo. 102p.
- Departamento Estadual da Infraestrutura (DEINFRA). 1994, IN-01– Instrução normativa para identificação e descrição de amostras de materiais inconsolidados (solos). Florianópolis, DEINFRA, 4p.

- Duarte, J.M.G. 1986. Um estudo geotécnico sobre o solo da Formação Guabirotuba, com ênfase na determinação da resistência residual. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 168p.
- Galves, G.; Massad, F. 1982. Características das argilas duras cinza-erverdeadas da Bacia Sedimentar de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações 7, Recife, v.5. p. 96 – 99.
- Goldstein, M. N., Misumsky, V. A., Lapidus, L. S. 1961. The theory of probability and statistics in relation to the rheology of soils. In: Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech., Paris, Vol. 1, p. 123 – 126.
- Gurgueira, M. D. 2013. Correlação de dados geológicos e geotécnicos na Bacia de São Paulo. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, São Paulo. 80p.
- Hasui, Y.; Carneiro, C.D.R.; Coimbra, A.M. 1975. The Ribeira folded belt. Revista Brasileira de Geociências, 5: 257-266.
- Hight, D. W., Gasparre, A.; Nishimura, S.; Minh, N. A.; Jardine, R. J.; Coop, M. R. 2007. Characteristics of the London Clay from the Terminal 5 site at Heathrow Airport. Géotechnique, Volume 57, No. 1, p. 3 – 18.
- Holtz, R.D.; Kovacs, W. D.; Sheahan, T. C. 2011. An Introduction to Geotechnical Engineering. Pearson College Div, BC, Canadá. 2ª ed. 853p.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Censo Demográfico 2022: Cidades e Estados. São Paulo: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 02 ago. 2024.
- Iyomasa, W. S.; Marrano, A.; Miyashiro, N. J. 2018. Investigações Geotécnicas e Geoambientais. In: Monticeli, J; Oliveira, A. M. S. (eds.), Geologia de Engenharia e Ambiental, v.2, p. 274-312. São Paulo: ABGE.
- Juliani, C. 1992. O embasamento pré-cambriano da Bacia de São Paulo. In: ABAS/ABGE/SBG-SP – Problemas geológicos e geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo, p.3-20.
- Kormann, A.C.M. 1999. Comportamento de argilas rijas: aspectos geotécnicos da Formação Guabirotuba. In: Mesa Redonda Características Geotécnicas da Formação Guabirotuba. Anais. Curitiba: ABMS/UFPR. p.119-128.
- Kormann, A.C.M. 2002. Comportamento geomecânico da Formação Guabirotuba: estudos de campo e laboratório. Tese de doutorado. Escola Politécnica da USP, 429 p.

- Kormann, A.C.M.; Chamecki, P.R.; Boszczowski, R.B.; Borga, P.C.; Nascimento, N.A. 1999. Ensaio de cisalhamento direto em argila rija da Formação Guabirotuba: influência da velocidade de deslocamento, In: Mesa Redonda Características Geotécnicas da Formação Guabirotuba. Anais. Curitiba: ABMS/UFPR. p.29-36.
- Lambe, T. W.; Whitman, R. V. 1969. Soil Mechanics. John Wiley and Sons, New York. 553p.
- Massad, F. 1980. Características e propriedades geotécnicas de alguns solos da Bacia de São Paulo. In: Mesa Redonda: Aspectos geológicos e geotécnicos da Bacia Sedimentar de São Paulo. ABGE, São Paulo.
- Massad, F. 2012. Resistência ao cisalhamento e deformabilidade dos solos sedimentares de São Paulo. Twin Cities – Solos das Cidades de São Paulo e Curitiba. ABMS, São Paulo. p. 107-133.
- Massad, F.; Pinto, C.S. & Nader, J.J. 1992. Resistência e deformabilidade. In: Solos da Cidade de São Paulo. (Ed). São Paulo, ABMS/ABEF, p. 141-180.
- Melo, M.S.; Ponçano, W.L.; Mook, W.G.; Azevedo, A.E.G. 1987. Datações C14 em sedimentos da Grande São Paulo. In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, 1, Porto Alegre, Anais, p.427-436.
- Metrô de São Paulo. 1994. Relatório técnico do Metrô de São Paulo para a Linha 4 - Amarela, RT-4.10.00.00/4C3-002. São Paulo: Metrô de São Paulo. 38p.
- Monteiro, M.D.; Gurgueira, M.D.; Rocha, H.C. 2012. Geologia da Região Metropolitana de São Paulo. In: Twin Cities – Solos das cidades de São Paulo e Curitiba. ABMS, São Paulo, p. 15-44.
- Negro, A.; Hatori, A.C.A.; Yassuda, A. J.; Rocha, H. C. 2012. Investigações para projeto e previsão de desempenho da estação Sacomã da Companhia do Metropolitano de São Paulo. SEFE 7 - Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, divulgado em CD, São Paulo.
- Ortigão, J. A. R. 2007. Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos. Terratek, Rio de Janeiro, RJ. 3ª ed., 383 p.
- Penna, A.S.D. 1982. Estudo das propriedades das argilas da cidade de São Paulo aplicado à Engenharia de Fundações. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da USP. São Paulo.
- Pinto, C. S. 2006. Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. 3ª edição – São Paulo: Oficina de Textos.

- Pinto, C. S., Abramento, M. 1998. Características das argilas rijas e duras cinzaesverdeadas de S. Paulo determinadas por pressômetro de auto-furação Camkometer. In. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 11, v. 2, pp 871-878.
- Pinto, C.S.; Massad, F. 1972. Características dos solos variegados da Cidade de São Paulo. In: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, IPT. Publicação 984, 30p. São Paulo.
- Pinto, V. R. P. 2019. Comportamento Geotécnico de Estéril de Bauxita e seu Potencial uso como Estrato de Fundação. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Publicação G.DM-327/2019, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 142 p.
- Pioli, B. 2023. Alguns aspectos do comportamento geotécnico da argila dura da cidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, São Paulo. 82p.
- Ranjan, G. 2000. Basic and Applied Soil Mechanics (second edition). New Delhi: New Age International.
- Riccomini, C. 1989. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 256p.
- Riccomini, C.; Coimbra, A.M. 1992. Geologia da bacia sedimentar. In Solos da cidade de São Paulo. Ferreira, A.A.; Alonso, U.R.; Luz, P.L (Ed). São Paulo, ABMS/ABEF, p.37-94.
- Riccomini, C.; Giannini, P. C.; Mancini, F. 2000. Rios e processos aluviais. In: Teixeira, W. (Orgs.). Decifrando a Terra. São Paulo: Edusp/Oficina de Textos, São Paulo, 2000 p. 191-210.
- Riccomini, C; Sant'anna, L.C.; Ferrari, A.L. 2004. Evolução Continental do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C. D. R.; Neves, B.B.B. (orgs). Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Beca, São Paulo, p. 385-405.
- Sant'anna, L.G. 1999. Geologia, mineralogia e gênese das esmectitas dos depósitos paleogênicos do Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese de doutoramento. Universidade de São Paulo, 291 pp.
- Serafim, R. 2024. Comportamento geomecânico da argila cinza-esverdeada da Formação Resende da cidade de São Paulo por meio de ensaios de laboratório. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, São Paulo. 165p.
- Skempton, A.W. 1964. Long-term stability of clay slopes. Géotechnique, Volume 14, p. 77-101.

- Skempton, A.W. 1969. The consolidation of clays by gravitational compaction. Q.J.Geol.Soc. 125, p. 373-411.
- Skempton, A.W. 1970. First-time slides in over consolidated clays. Géotechnique, Volume 20, p. 320-324.
- Takiya, H. 1991. Aplicação dos métodos quantitativos espaciais a dados geológicos da Bacia de São Paulo. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, São Paulo. 109p.
- Terzaghi, K. 1943. *Theoretical Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons.
- Vargas, M. 1980. Geotecnia do Terciário de São Paulo - histórico. In: Aspectos Geológicos e Geotécnicos da Bacia de São Paulo (Mesa Redonda), São Paulo, 1980. ABGE/SBG-SP, Publicação Especial, p.37-45.
- Vargas, M. 1992. Evolução dos conhecimentos. In: Solos da Cidade de São Paulo. (Ed). São Paulo, ABMS/ABEF, p. 1-35.