

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DE PERFIL DE ALTERAÇÃO DE ROCHAS DO COMPLEXO EMBU EM ITAPECERICA DA SERRA, REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

Isis Sacramento da Silva ¹; Ana Elisa Silva Abreu ²

Resumo – Os solos desenvolvidos a partir de rochas do Complexo Embu, unidade que compõe parte expressiva do planejamento de expansão da malha metroferroviária da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), apresentam características herdadas das diversas rochas que compõe esta unidade, e são intrinsecamente heterogêneos. O escopo desta pesquisa foi realizar a caracterização geológico-geotécnica de um perfil de alteração desenvolvido sobre rochas do Complexo Embu, buscando um refinamento sobre a composição e resistência destes materiais. O objetivo foi alcançado por meio da descrição macroscópica e petrográfica, individualização de horizontes, determinação de índices físicos, granulometria conjunta, limites de Atterberg e resistência ao cisalhamento direto. O perfil de alteração estudado possui 24 metros de profundidade, resultante do intemperismo de gnaisses milonitizados. Foram divididos 5 horizontes neste perfil e alguns foram divididos em subhorizontes. O contato entre estes ocorre de forma gradual e irregular. Os resultados dos ensaios não apresentam relação com a profundidade e nem podem ser estabelecidos comportamentos por cota. Características identificadas na petrografia, tais como abundância de óxidos de ferro e de filossilicatos, tipo de sutura entre os grãos de quartzo e presença de microfraturas, controlam os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento e índices físicos.

Abstract – The soils developed from rocks of the Embu Complex are expected to constitute an important part of the ground to be crossed in the expansion plan of the metro-railway network in the São Paulo Metropolitan Area (RMSP). They present characteristics inherited from the various rocks that form this unit and are intrinsically heterogeneous. The scope of this research was to carry out the geological-geotechnical characterization of an alteration profile developed on rocks of the Embu Complex, seeking a refinement on the understanding of the relations between the composition and shear strength of these materials. The method comprised macroscopic and petrographic description, definition of horizons, determination of physical indices, joint granulometry, Atterberg limits and direct shear strength. The studied soil profile is 24 meters deep, resulting from the weathering of mylonitised gneisses. 5 horizons were identified in this profile and some of them were divided into subhorizons. The contact between these horizons is gradual and irregular. Their geotechnical characteristics are not related to depth, nor can their behavior be established by elevation. Characteristics identified in the petrography, such as the abundance of iron oxides and phyllosilicates, type of suture between the quartz grains and the presence of microfractures, control the results of the shear strength tests and physical indices.

Palavras-Chave – Estabilidade de taludes, petrografia, solos residuais heterogêneos.

¹ Geól., MSc, Instituto de Geociências, UNICAMP: Campinas - SP, isisgeologia@gmail.com

² Geól., PhD, Instituto de Geociências, UNICAMP: Campinas - SP, (19) 3521-4575, aeabreu@unicamp.br

1. INTRODUÇÃO

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), composta por 39 municípios, é o maior centro urbano do Brasil e demanda constantes esforços para melhor aproveitamento do espaço físico e zoneamento urbano. As rochas e solos do Complexo Embu compreendem parte expressiva do substrato na porção oeste desta região, onde está prevista a expansão da linha 4 – amarela do Metrô-SP. Esta unidade ocorre como embasamento da Bacia de São Paulo e o mapeamento da CPRM (2006) indica que a área da expansão é composta pela intercalação, por vezes métrica, de biotita gnaisse, gnaisse migmatítico e xisto localmente migmatítico e, segundo Gurgueira (2013), estas rochas podem apresentar perfis de alteração de solo residual de até 35 metros de espessura. Este perfil aflora em alguns pontos da RMSP, mas frequentemente ocorrem sobrepostos por sedimentos da Bacia de São Paulo. Trabalhos como Oliveira (2015), Monteiro (2016), Futai *et al.* 2012 abordam características estruturais, geológico-geotécnicas e hidrogeológicas deste perfil e suas rochas de origem. Outros trabalhos, como de Cecílio Jr (2009), refinam conhecimento acerca do comportamento de perfis de solos residuais de gnaisses em solos tropicais. Apesar destes trabalhos e concordante ao afirmado por Futai *et al.* 2012, não existe um volume de dados significativo para definir um padrão de controle do comportamento geotécnico do manto de intemperismo do Complexo Embu. Este baixo volume de dados, somado ao fato de que a expansão da malha metro ferroviária da RMSP escavará grande parte dos solos do Complexo Embu, revelou a oportunidade de realizar uma pesquisa de maior detalhamento dos horizontes destes solos.

Este artigo apresenta os resultados de uma caracterização geológico-geotécnica detalhada de um perfil de solos desenvolvidos sobre o Complexo Embu, a fim de colaborar com o planejamento das novas escavações e demais intervenções no meio físico nos solos do Complexo Embu na RMSP e em ambientes de substrato semelhante.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A escolha da área para detalhamento iniciou-se com trabalhos de campo na região de expansão da linha 4 do metrô de São Paulo visando a localização de um afloramento representativo, que pertencesse ao Complexo Embu e com diversos níveis de solos, onde fosse possível realizar a descrição e amostragem de cada um destes níveis e a descrição dos limites entre eles (Figura 1). A área selecionada encontra-se às margens da BR-116, sentido Paraná, a sudoeste do Município de Itapeverica da Serra, coordenadas UTM (WGS84-Fuso23K) 305170.18, 7369906.49. Trata-se de um talude de corte onde há diversos horizontes de solo expostos em cerca de 24 metros de altura.

Os horizontes de solo foram identificados, descritos e amostrados. As descrições tiveram como base as recomendações de Dobereiner *et al.* (1993) e *Geological Society Engineering Group Working Party Report* (1995). Também foi utilizada a recomendação da IAEG (1981) de aplicar apenas os graus de intemperismo e ignorar as variações de bandamento composicional em solos heterogêneos. Adaptações realizadas estão expostas em Silva (2021).

Em todos os horizontes foram coletadas amostras deformadas utilizadas para ensaio de granulometria conjunta, determinação de índices físicos e limites de Atterberg, realizados com base nas Normas Brasileiras (NBR-ABNT) vigentes no período deste estudo. Nos horizontes de solo residual mais profundos (e menos friáveis) foram coletadas amostras indeformadas utilizadas para determinação de índices físicos, moldagem dos corpos de prova para os ensaios de cisalhamento direto (CD), e para confecção de lâminas petrográficas. Durante a confecção de corpos de prova de um dos horizontes de solo houve rompimentos inesperados, comprometendo as relações de índices físicos. Em função disso, estas relações foram refeitas por Ribeiro (2020).

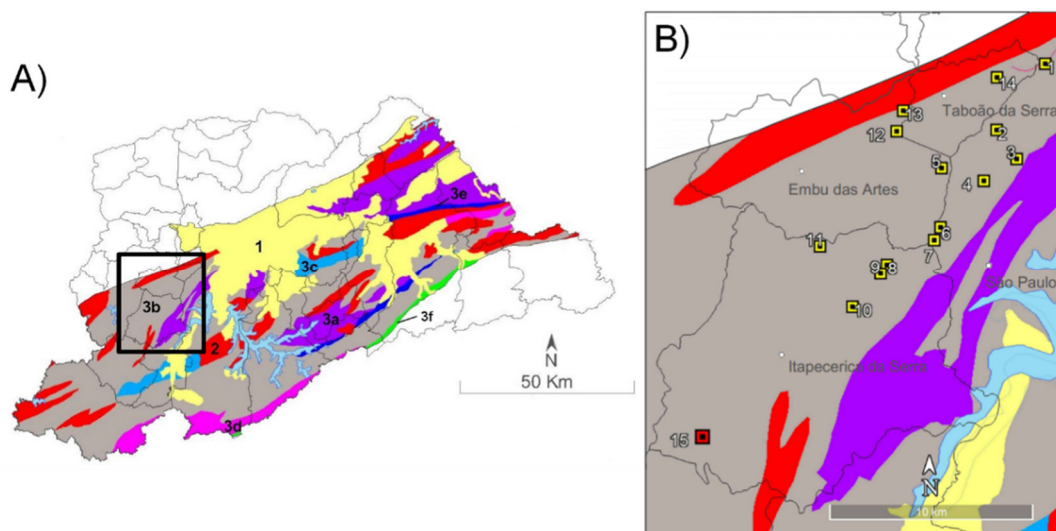


Figura 1: A) Terreno Embu nos limites da RMSP com destaque em preto da área estudada. 1) Sedimentos recentes da Bacia de São Paulo; 2) Granitóides intrusivos; 3) Rochas do Complexo Embu: 3a) Biotita gnaiss, gnaiss migmatítico; 3b) Xisto localmente migmatítico; 3c) Filito e Sericita Xisto; 3d) Biotita gnaiss, granidiorito e tonalito; 3e) Milonito; 3f) Granitóide e localmente rocha metassedimentar milonitizada, gnaiss milonítico. Fonte: Modificado de CPRM 2006 1:750.000. B) Afloramentos percorridos em amarelo e afloramento escolhido para este estudo em vermelho.

Os ensaios CD foram executados segundo Stancati *et al.* (1981), em corpos de prova com diâmetro de 6,35 cm e de duas formas: com a estrutura principal (foliação) perpendicular (Pe) e paralela (Pa) à direção da tensão cisalhante imposta pelo ensaio. Os ensaios nas amostras com a estrutura paralela à tensão cisalhante foram realizados por Almeida *et al.* (2020). As tensões normais variaram de 50 a 200 kPa. Os subhorizontes não foram ensaiados porque houve rompimentos inesperados, deformando a amostra. Todas as amostras foram saturadas por capilaridade. Os ensaios foram realizados no Laboratório do Departamento de Geotecnia e Transportes da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP.

As amostras indeformadas foram impregnadas para confecção das lâminas petrográficas com dimensão de 5 cm por 10,5 cm. Foi utilizado corante para melhor análise de microfissuras e poros. As lâminas petrográficas foram confeccionadas no Laboratório de Laminação do Instituto de Geociências da UNICAMP e descritas em microscópio petrográfico no Laboratório de Microscopia do Instituto de Geociências da UNICAMP.

3. RESULTADOS

Foram delimitados 5 horizontes de solo, denominados da superfície para a base: HO - solo orgânico; H1 - solo transportado; H2, H3 e H4 - solo residual. As principais características que permitiram a separação destes pacotes foram: grau de alteração, coerência e percentagem de minerais visíveis a olho nú exceto quartzo. Durante as descrições tátil visuais notaram-se a variações laterais de coerência no H3 e no H4, que levaram à sua subdivisão em H3-0 e H3-1 e em H4-0, H4-1, H4-2 e H4-3. Por se tratar de materiais altamente friáveis, não foi possível a coleta de amostras indeformadas do H2 e H3-0. Os horizontes de solos residuais estão delimitados na Figura 2 e são descritos com detalhes a seguir.

Horizonte 2 (H2): Areia fina, média e grossa siltosa com lentes siltosas de até 5 cm de espessura. A estrutura principal é a foliação preservada da rocha pretérita, que é ondulada. O material esmigalha-se com facilidade sob o golpe do martelo. Há níveis ricos em quartzo leitoso (de 1 a 2 cm) e veios de quartzo preservados com aproximadamente 1 cm de espessura, paralelos à estrutura principal. Possui espessura de até 0,78 cm e nenhuma resistência ao ser raspado pelo canivete. O limite com o H3 é gradual, definido pelo aumento da coerência.

Horizonte 3: O primeiro nível deste horizonte é o subhorizonte H3-0, composto por areia fina, média e grossa, siltosa, apresenta foliação composta por níveis milimétricos a centimétricos onde há predominância de níveis de muscovita completamente alteradas, intercalados com níveis compostos majoritariamente por quartzo. O óxido avermelhado ocorre predominantemente de forma paralela a foliação preservada, porém também está presente formando feições circulares sem orientação preferencial. No geral, o material esmigalha-se com facilidade sob o golpe do martelo, porém a presença de bandas irregulares de quartzo recristalizado condiciona o aumento de resistência de forma pontual.

Ocorre aumento da coerência, e o material pode ser raspado por canivete com dificuldade, porém não há mudanças macrovisuais de alteração e na composição do H3-0 para o H3-1. O H3-1 possui espessura variável e, por vezes, está ao lado do H3-0, o óxido avermelhado ocorre de forma preferencial nas bandas ricas em mica e o bandamento composicional ocorre de forma mais preservada. A estrutura preservada sugere que a rocha pretérita seja um gnaiss muito fino a fino ou xisto, ou ainda, uma intercalação de 2 litotipos, gerando as seguintes alternâncias de níveis, do mais frequente para o menos: 1) Silte muito arenoso ou areia fina, muito siltosa, com estrutura preservada, marrom avermelhado; 2) Areia fina, média e grossa, com esparsos pedregulhos finos e médios. A porção rica em quartzo apresenta de forma subordinada mica e caulinita, branco amarelado.

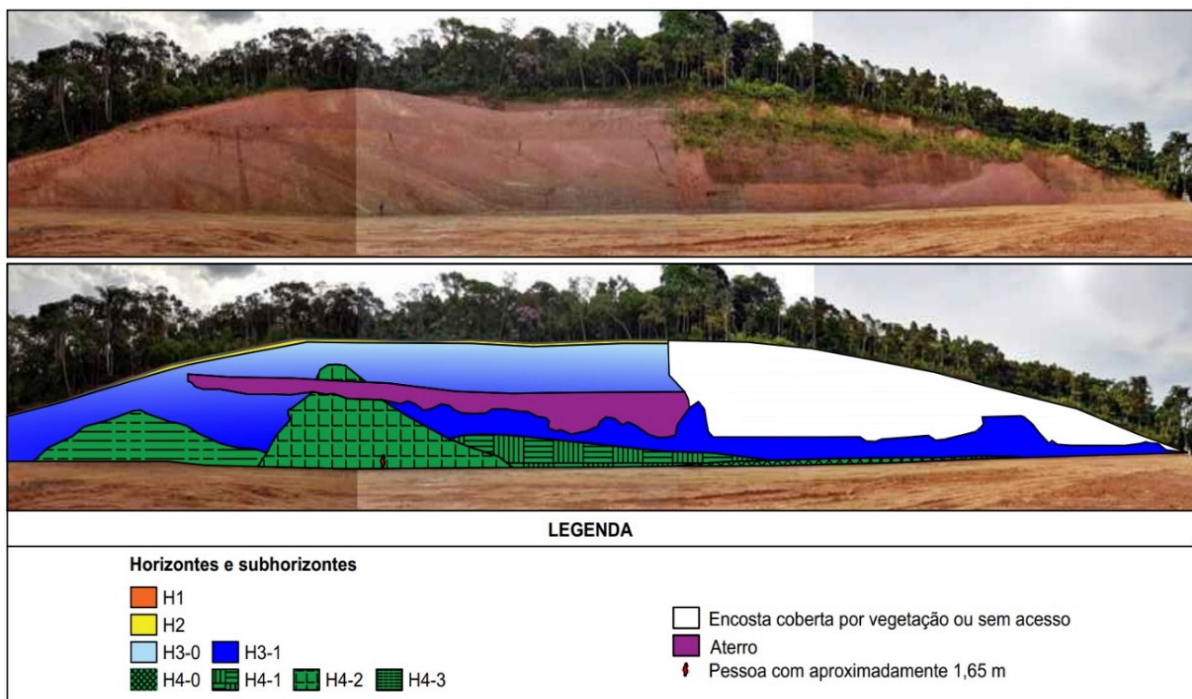


Figura 2:- Perfil de alteração geológico-geotécnico de gnaisses do Complexo Embu delimitado em campo.

Na análise petrográfica é possível confirmar a composição mineral observada em campo e que, além destes, há biotita compondo lentes em avançado grau de intemperismo. Também concordante ao campo, a orientação principal é composta por bandas regulares compostas majoritariamente por quartzo recristalizado intercaladas com bandas ricas por muscovita e biotita (Figura 3A). Este arranjo define o bandamento composicional típico de gnaisses. De forma subordinada, também ocorre uma orientação de filossilicatos sobrepondo a foliação principal. O quartzo apresenta características comuns à todas as amostras, como extinção ondulante, grãos fraturados, está recristalizado e o contato entre grãos reto a lobado. Também há grãos de quartzo rotacionados, envoltos por biotita em avançado grau de intemperismo. A biotita ocorre com pleocroísmo baixo em função do alto grau de intemperismo. Porções de grãos de tamanho inferior aos demais formam o aspecto triturado principalmente nas bandas ricas em quartzo. Este aspecto sobrepõe o

bandamento composicional e, somado a presença de mica *fish*, indicam que a rocha pretérita deste solo foi milonitizada.

Frente as demais amostras analisadas, a característica mais marcante deste horizonte é a expressiva quantidade de óxido avermelhado nas bandas ricas em filossilicatos, como produto de alteração de lentes de biotita. Com menor frequência, há percolação destes óxidos nas bordas do quartzo, demonstrando que até as bandas ricas em quartzo com contato suturado estão em estágio de degradação suficiente a permitir percolação de óxidos. Esta percolação dá impressão de relevo alto para o quartzo. Os espaços vazios ocorrem principalmente como produto da alteração completa de minerais da rocha pretérita e, por vezes, os minerais da borda estão orientados com formato semicircular. Estas feições sugerem que o grão completamente alterado foi rotacionado. A borda destes espaços é composta por todos os minerais presentes na amostra e é comum a presença de óxidos. A segunda forma recorrente de espaços vazios são os intragranulares, com bordas rugosas, oblíquos a foliação, totalmente ou parcialmente preenchidos com óxidos. E a terceira é a presença de espaços vazios dentro dos grãos de biotita, condicionados pela clivagem do mineral, como produto da alteração.

O H4 apresenta variação lateral no grau de alteração, coerência e quantidade de minerais visíveis, composição mineral e estruturas, por isso, é subdividido em 4, chamados de H4-0, H4-1, H4-2 e H4-3. Estes quatro materiais foram entendidos como pertencentes ao mesmo horizonte apenas por ocorrerem na mesma cota, fortemente estruturados, com contato gradual lateral, ondulados e dobrados, por vezes, sobrepostos.

O H4-0 é composta por areia fina, média e grossa, siltosa e pedregulhos finos e médios. Neste horizonte, não é possível raspar o solo com canivete, mas fragmentos podem ser obtidos com golpe de martelo com relativa facilidade. A espessura máxima visível deste horizonte é de 0,6 m na área estudada. A estrutura principal preservada sugere que a rocha pretérita é fina a muito fina. A muscovita é moderadamente alterada e as bandas ricas em quartzo ocorrem com grãos de quartzo recristalizados. As bandas ricas em filossilicatos apresentam espessura centimétrica e com a presença de óxido de cor avermelhada. Há esparsas lentes de quartzo leitoso com aproximadamente 0,3 cm de espessura. A cor predominante deste subhorizonte é cinza amarelado e avermelhado.

Na escala microscópica confirmou-se a expressiva quantidade de filossilicatos orientados frente a presença inferior de bandas de quartzo recristalizado, bem como a presença de óxidos preferencialmente nas bandas de filossilicatos como produto da alteração da biotita. A Figura 3B apresenta um arranjo mineral típico deste subhorizonte. A biotita apresenta-se leve a moderadamente alterada e o bandamento composto por ela e pela muscovita por vezes chega a 1 cm de espessura. Assim como em todas as amostras, os filossilicatos que compõem o bandamento são subeuédricos. Este horizonte apresenta fraturas paralelas ao bandamento nos níveis ricos em filossilicatos e, de forma incipiente, perpendiculares a foliação parcialmente preenchidas por óxidos. Estas fraturas paralelas às bandas ricas em filossilicatos, são produto da alteração de biotita, formam espaços vazios. Além destes, os espaços vazios também ocorrem no lugar de minerais completamente alterados, mas não possuem óxido nas bordas e ocorrem paralelos a foliação ou com aspecto rotacionado nas bordas.

O H4-1 é composto por areia fina, média, grossa siltosa com pedregulhos finos a médios. É o material menos alterado dentre todos os descritos, marcado pela presença de biotita sã a pouco alterada concordante à foliação, compondo bandas ricas em filossilicatos. Este bandamento composicional ocorre crenulado. Nas porções com predominância de quartzo a biotita é reduzida. Não é possível raspar o solo com canivete e os fragmentos podem ser obtidos com golpe de martelo com relativa dificuldade.

Em análise petrográfica, assim como observado em campo, há expressiva quantidade de biotita em fase inicial de alteração. Conforme exposto na Figura 3C, esta amostra possui mais fraturas e

porções com aspecto triturado que todas as amostras analisadas. Estas porções trituradas tendem a ser paralelas a foliação. Há presença de minerais opacos. Os espaços vazios são predominantemente intragrãos, observados principalmente na biotita, como produto de intemperismo, condicionado pela clivagem. Também ocorrem como produto da alteração de minerais da rocha pretérita, porém, nesta amostra, as bordas destes não possuem óxido.

O óxido ocorre de forma predominante como produto da alteração da biotita, paralelo ao bandamento, compondo o material de preenchimento nas fraturas. As fraturas são abundantes na amostra analisada e ocorrem paralelas e oblíquas a foliação, fechadas, abertas e parcialmente abertas. As paralelas são produto da alteração de biotita, apresentam paredes menos rugosas que as oblíquas. As oblíquas apresentam as paredes rugosas compostas por todos os minerais que compõe a rocha. As abertas e parcialmente abertas possuem abertura submilimétrica, impossibilitando a descrição em campo. As paralelas e oblíquas ao bandamento ocorrem de três formas em relação ao preenchimento por óxidos: sem preenchimento, com preenchimento total e parcialmente preenchida. Foram observadas 7 fraturas cortando a foliação com ângulo semelhante, indicando a possibilidade de uma família de descontinuidade.

O H4-0 está sobreposto pelo H4-1, onde o contato é gradual, com cerca de 0,3 m de espessura. Neste caso observa-se claramente que o subhorizonte de cima (H4-1) é menos alterado que o subhorizonte de baixo.

A piora no grau de alteração, coerência, uma leve diminuição na quantidade de minerais visíveis, somadas a quantidade acentuada de muscovita definem o H4-2. É composto por areia média, fina a grossa, siltosa, com pedregulhos finos. A percolação de óxidos não ocorre de forma preferencial em alguma estrutura. não é fácil raspar o solo com canivete, mas fragmentos podem ser obtidos com golpe de martelo com relativa facilidade. A análise petrográfica confirma a elevada quantidade de filossilicatos, cerca de 50% da composição total dos minerais que compõe a amostra. A biotita, visível apenas em microescala, ocorre em avançado grau de intemperismo, porém o óxido ocorre em menor quantidade em relação as demais amostras. A biotita em avançado grau de intemperismo, somado a baixa presença de óxidos pode estar associada a lixiviação.

O aumento lateral na alteração estabelece o H4-3. Nesse subhorizonte o material esmigalha-se com facilidade sob o golpe do martelo e o material pode ser raspado por canivete com dificuldade. A percentagem de muscovita e quartzo é praticamente igual a olho nú. A biotita compõe cerca de 15%. A percolação de óxido de ferro ocorre preferencialmente nas bandas ricas em quartzo. A composição é areia fina, média, grossa, siltosa, com pedregulhos finos e médios. Neste horizonte há boudins paralelos à xistosidade principal, compostos por núcleos com resistência inferior ao restante do horizonte.

De forma discordante ao observado em campo, a amostra analisada em escala microscópica revela reduzida quantidade de bandas composicionais de filossilicatos (Figura 3D) em relação as demais amostras. Quando ocorrem, estas são irregulares e, por isso, a biotita (em leve estado de alteração) não possui quantidade de cristais orientados de forma suficiente a gerar planos de fraqueza como ocorre em outras amostras. O quartzo ocorre com extinção ondulante, formando bandas regulares compondo por grãos recristalizados com contato reto a lobado. O aspecto triturado ocorre de forma abundante, mas em porcentagem menor que na amostra H4-1. Os espaços vazios são formados a partir da decomposição de minerais completamente alterados. As paredes das descontinuidades e dos espaços vazios são rugosas e nestas não há percolação de óxidos. Estas estruturas não ocorrem em uma banda de forma preferencial, ou seja, a margem das descontinuidades e dos poros possui todos os minerais que compõe a rocha.

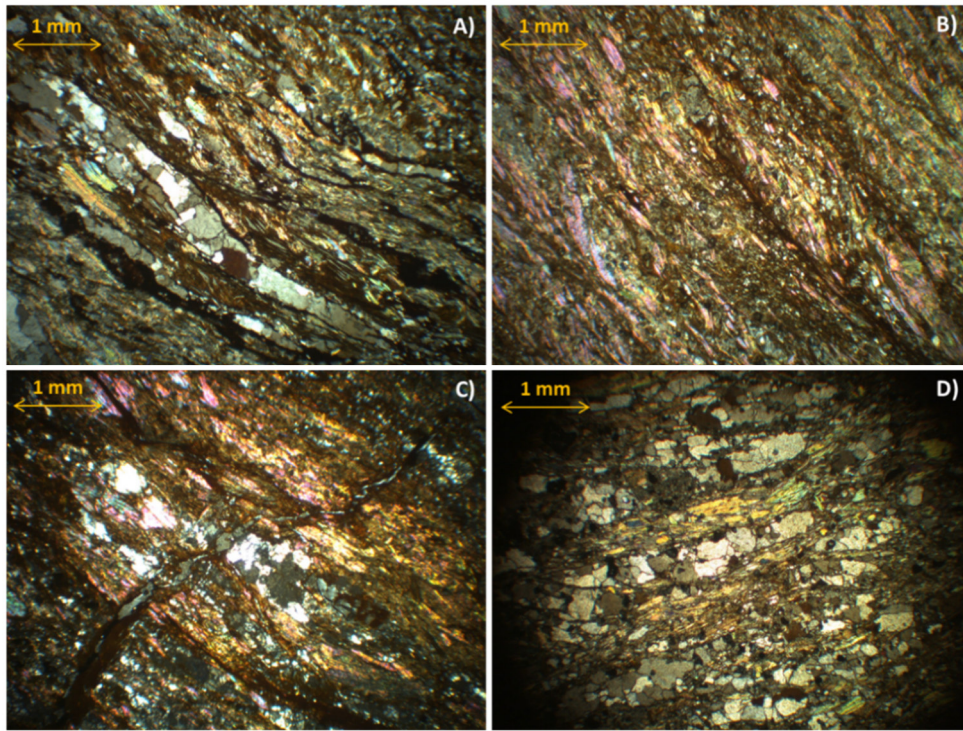


Figura 3: Estruturas observadas nas lâminas petrográficas. A) Predomínio e bandas micáceas muito alteradas e forte presença de óxidos do H3-1. B) Banda micássea do H4-0. C) Família de fraturas perpendiculares e paralelas a foliação do H4-1. D) Bandas ricas em quartzo do H4-3.

Após análise em campo e petrográfica pôde-se inferir a composição mineral de cada subhorizonte analisado (Tabela 1). A fim de obter-se maior precisão nesta estimativa priorizou-se a composição mineral observada em microescala nos subhorizontes onde foi possível a confecção das lâminas. Essa tabela também apresenta os resultados dos índices físicos determinados para os horizontes de solos residuais. São apresentadas as médias de três determinações para cada horizonte. Aspectos da caracterização geotécnica desses horizontes são apresentados também em Almeida *et al.* (2020).

Tabela 1: Composição mineral dos subhorizontes analisados em macro e microescala e índices físicos.

Amostra	Minerais e densidades (g/cm ³)*			Teor de umidade (%)	ρ: Massa específica do solo (g/cm ³)	Massa específica seca (g/cm ³)	Massa específica dos sólidos (g/cm ³)	Índice de Vazios	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)
	Quartzo	Muscovita	Biotita							
	2,65*	2,77-2,88*	2,70-3,30*							
H2	100**	0**	0**	24	-	-	2,94	-	-	-
H3-0	60**	40**	0**	13	-	-	2,88	-	-	-
H3-1	60	40	0	15	2,07	1,80	2,89	0,60	38	70
H4-0	50	40	10	10	2,33	1,92*	2,85*	0,48*	33*	59*
H4-1	40	20	40	13	2,12	1,88	2,92	0,56	36	75
H4-2	45	40	15	12	1,96	1,75	2,69	0,54	35	60
H4-3	50	35	15	10	2,10	1,91	2,90	0,52	34	57

*Fonte: (Deer *et al.* 2000)

**Estimativa macrovisual

***Determinado por Ribeiro (2020)

As envoltórias de resistência obtidas nesta pesquisa são apresentadas na Figura 4. De forma sucinta, a sequência de resistência dos materiais do mesmo horizonte de solo, do mais resistente para o menos, é das amostras indeformadas com estruturas perpendiculares para as amostras com estrutura paralelas ao plano de cisalhamento. O subhorizonte H4-2 apresenta resistência semelhante nas direções Pe e Pa para baixas tensões normais (até cerca de 50kPa), porém, com o aumento da tensão normal, a amostra ensaiada nas posições Pe apresenta aumento da resistência superior à amostra ensaiadas na posição Pa. Nas outras duas amostras onde foi

realizado o rompimento com a estrutura paralela a resistência foi inferior às perpendiculares. Estes e outros resultados de caracterização geotécnica dessas amostras são apresentados e discutidos em Silva (2021) e Almeida *et al.* (2020).

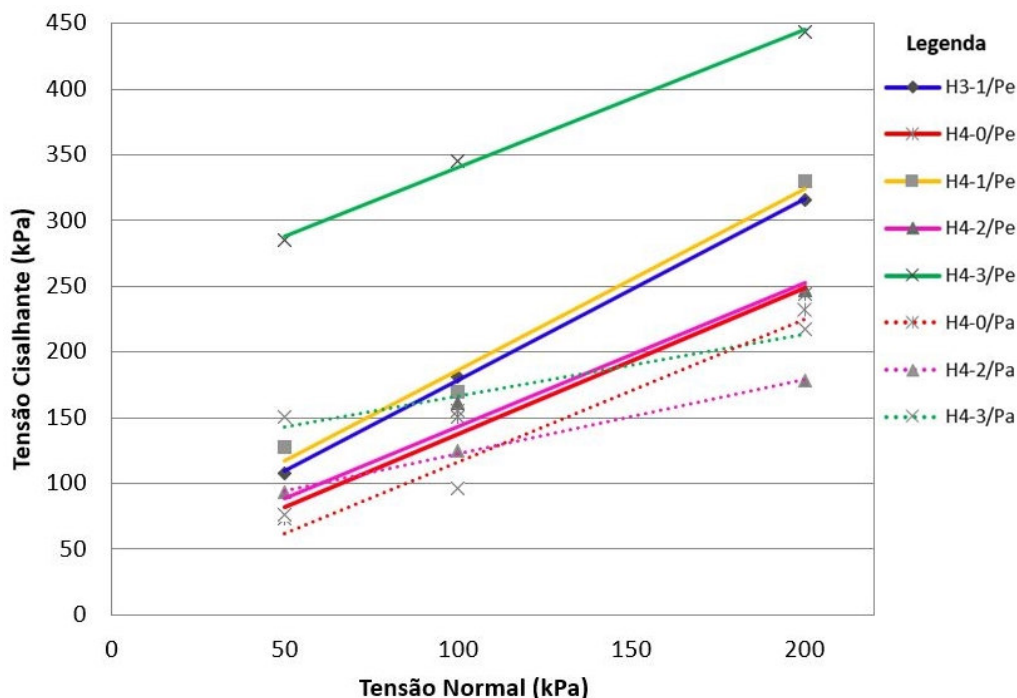


Figura 4: Envoltórias de Mohr-Coulomb resultantes dos ensaios de Resistência ao CD. Nota: Pe = Foliação perpendicular ao plano de cisalhamento, Pa = Foliação paralela ao plano de cisalhamento.

4. DISCUSSÃO

Diferente de parte dos estudos de perfis de alteração em gnaisses, como de Cecílio Jr. (2009) onde há um horizonte próximo a superfície não estruturado, chamado de solo maduro, a área estudada apresenta todos os horizontes e subhorizontes com estrutura preservada da rocha reliquiar. Portanto, todo o perfil estudado, segundo a classificação utilizada por Cecílio Jr. (2009), encontra-se no grupo de Solo Residual Jovem.

Ao comparar os índices físicos dos horizontes H2, H3 e H4, nota-se que o índice de vazios e a porosidade tendem a diminuir com o aumento da profundidade. A massa específica seca e a massa específica dos sólidos não seguem padrão definido frente à profundidade. Os resultados referentes a essas massas podem estar associados à composição dos materiais e à atuação de agentes de intemperismo. A maior massa específica dos sólidos é do H2. Este resultado pode estar associado a elevada presença de óxidos percolados provenientes da alteração de minerais ferromagnesianos.

Observa-se que o H3-0 e H3-1 possuem elevado valor de massa específica dos sólidos pela mesma razão. H4-1 Também durante a análise microscópica, foi possível relacionar o elevado resultado de massa específica dos sólidos a presença acentuada de biotita e óxidos em baixo grau de intemperismo. O resultado de massa específica dos sólidos no subhorizonte H4-2, inferior aos demais, deve-se ao elevado grau de alteração da biotita e a baixa presença de óxidos frente as demais amostras.

As amostras do H4 (H4-0, H4-1, H4-2 e H4-3), separadas em campo principalmente pela variação na quantidade de micas, cor, espessura do bandamento composicional, parâmetros de alteração e coerência também possuem comportamentos de resistência distintos. Mediante estas variações laterais fica evidente que em solos desenvolvidos a partir de rochas heterogêneas não é possível inferir parâmetros geotécnicos típicos por cota, pois, em uma mesma profundidade, os resultados podem variar lateralmente em questão de poucos metros.

Apesar do H4-0 apresentar a segunda melhor classificação de grau de alteração e coerência, obteve os resultados mais baixos de resistência nas amostras ensaiadas com estrutura paralela e perpendicular à direção imposta pelo ensaio. Estes resultados indicam que as variações nos resultados de resistência não são sempre concordantes aos parâmetros de alteração e coerência identificados por descrição macroscópica em campo.

O horizonte H4-3 apresenta anomalia no resultado de coesão das amostras indeformadas. Nas remoldadas o mesmo horizonte apresenta a segunda menor coesão entre todos os horizontes. Assim como os resultados supracitados de resistência ao cisalhamento, apresentados de forma sucinta, este resultado reforça a importância da estrutura da rocha pretérita nestes solos para a resistência. Assim como mencionado por Almeida *et al.* (2020), a resistência das amostras não possui relação com a quantidade de mica na composição mineral, pois todas as amostras possuem de 40 a 60% de filossilicatos, porém a amostra H4-3 apresentou a resistência elevada, entendida como anômala nas amostras perpendiculares e paralelas.

Durante a confecção dos corpos de prova para o ensaio de CD observou-se que a resistência das amostras indeformadas era inconstante nos horizontes H4-0 e H4-1. Por vezes ocorreram rompimentos inesperados em porções sem estruturas observáveis a olho nu que pudessem condicionar este comportamento. Também nas amostras H4-1 foi observado porções irregulares extremamente resistentes, impondo dificuldade durante a moldagem dos corpos de prova.

As fraturas fechadas, abertas e parcialmente abertas paralelas e oblíquas ao bandamento, visíveis apenas em lâmina petrográfica explicam os rompimentos inesperados durante a confecção do corpo de provas em todos os subhorizontes do H4. Esta característica foi observada de forma mais expressiva no H4-1.

Após descrição microscópica, somado aos resultados de resistência e índices físicos, entendeu-se que, apesar do alto grau de alteração do H3-1, a regularidade das bandas ricas em quartzo pode ter causado o aumento da resistência deste horizonte nos ensaios de CD. As fraturas paralelas e perpendiculares ao bandamento presentes no H4-0, somada as espessas bandas de filossilicatos e a baixa quantidade de bandas de quartzo provavelmente influenciaram no baixo resultado do CD. As bandas regulares de quartzo no subhorizonte H4-3, observadas ao microscópio, podem ter gerado o aumento na resistência deste material.

5. CONCLUSÕES

A resistência de horizontes de solos residuais provenientes de rochas gnáissicas do Complexo Embu reflete a heterogeneidade destas rochas. Não é possível estabelecer características geológico-geotécnicas e nem estimar horizontes por cota.

A composição mineral e o arranjo dos minerais influenciam diretamente nos índices físicos e resistência destes materiais.

Apenas a partir da visualização dos horizontes em escala microscópica, foi possível entender os resultados de ensaios de índices físicos e de resistência ao cisalhamento. As características identificadas ao microscópio que controlam ou influenciam os resultados dos ensaios de resistência são bandas compostas predominantemente por grãos de quartzo com contato suturado, fraturas abertas intergranulares, por vezes conectadas, presença de óxidos e minerais com alta massa específica dos sólidos, espaços vazios gerados por decomposição de minerais, porções trituradas típicas de milonito parcialmente paralelas ao bandamento gnaissico.

Estes resultados revelam a heterogeneidade destes materiais e que as estruturas que condicionam a resistência destes solos não são sempre identificadas de forma macroscópica. Por outro lado, características microscópicas parecem controlar os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento.

Desta forma, entendeu-se por meio deste estudo que o comportamento geológico-geotécnico deve ser analisado em variadas escalas, inclusive em escala microscópica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da CNPq no desenvolvimento deste trabalho, através da concessão de bolsa de pesquisa (Processo: 131800/2018-3).

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, T.N.; SILVA, I.S.; ABREU, A.E.S. (2020) “Estudo da Resistência ao Cisalhamento Direto de Solo Residual de Gnaiss do Complexo Embu.” In XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 8p.

CECÍLIO JR (2009) Estudo do Comportamento de um Túnel em Solo Residual de Gnaiss por Meio de Ensaio Triaxiais com Controle de Trajetórias de Tensões. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 204p.

CPRM (2006). Mapa Geológico do Estado de São Paulo: Breve descrição das unidades litoestratigráficas aflorantes no Estado de São Paulo. São Paulo, 1 Mapa Geológico, escala 1: 750.000. Relatório Técnico. 173p.

DOBEREINER, L.; DURVILLE, J.L.; RESTITUITO, J. 1993. Weathering of the Massiac Gneiss. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 47:79-96.

FUTAI, M.M.; CECÍLIO, M.O.; ABRAMENTO, M. 2012. Resistência ao Cisalhamento e Deformabilidade de Solos Residuais da Região Metropolitana de São Paulo. In: Twin Cities: solos das regiões metropolitanas de São Paulo e Curitiba. p.153–184

GEOLOGICAL SOCIETY ENGINEERING GROUP WORKING PARTY REPORT 1995. The description and classification in of weathered rocks for engineering purposes. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 28, 3: 207-242.

IAEG (1981). Rock and soil description and classification for engineering geological mapping - Report by IAEG Commission on Engineering Geological Mapping. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 24:235–274.

MONTEIRO, M.D. 2016. Contribuição à caracterização hidrogeológica de maciços fraturados e solos residuais em projetos de obras subterrâneas na Região Metropolitana de São Paulo. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 155 p.

OLIVEIRA, D.G.G. 2015. Televisamento óptico de sondagens – Proposta metodológica para execução e suas aplicações em obras subterrâneas. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 187 p.

RIBEIRO, P.H.B. 2020. Caracterização da condutividade hidráulica de solos de alteração das rochas do Complexo Embu – SP. Relatório final de atividades – Iniciação Científica, Instituto de Geociências, UNICAMP, 22 p.

SILVA, I.S. 2021. Caracterização geológico-geotécnica de perfil de alteração de rochas do Complexo Embu em Itapeceira da Serra, Região Metropolitana de São Paulo. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 128 p.

STANCATI, G.; NOGUEIRA, J.B.; VILAR, O.M. 1981. Ensaio de Cisalhamento Direto. In: Stancati, G.; Nogueira, J. B.; Vilar, O. M. Ensaio de Laboratório em Mecânica dos Solos. Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. p.: 158-167.