

ANÁLISE GEOTÉCNICA DO PERFIL DE SOLO RESIDUAL DE GRANITOIDES NO MUNICÍPIO DE ALEGRE (ES).

Geotechnical analysis of residual soil profile of granitoids in the municipality of Alegre (ES)

Éder Carlos Moreira^a, Patricio José Moreira Pires^b

^a Departamento de Geologia, Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil.

^b Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil.

RESUMO – A caracterização geotécnica do perfil de nitossolo vermelho foi realizada em quatro campos de trabalho na malha urbana de Alegre (ES). A possibilidade de ocorrência de solos colapsíveis foi estudada visto que pode ser um problema significativo para a ocupação e o desenvolvimento urbano. Os valores encontrados para coesão e ângulo de atrito não estão diretamente correlacionados com aqueles apontados na bibliografia. Os valores de coesão oscilaram entre 2,4 kPa a 4,1 kPa em média (condição saturada), mas um campo de trabalho apresentou valor de 12 kPa. O ângulo de atrito variou de 20,81° a 26,94°. Observou-se recalque significativo em um dos campos de trabalho, indicando baixa colapsibilidade. Uma análise mais detalhada da condição de amostragem é apontada neste trabalho.

ABSTRACT – The geotechnical characterization of the red nitosol profile was carried out in four work fields in the urban area of Alegre (ES). The possibility of occurrence of collapsible soils was analyzed once can be a significant problem for urban occupation and development. The values found for cohesion and friction angle are not directly correlated with those indicated in the bibliography. Cohesion values ranged from 2.4 kPa to 4.1 kPa on average (saturated condition), but including a value of 12 kPa. The friction angle ranged from 20.81° to 26.94°. One work field showed a significant shift in the void curve, indicating low collapsibility. Observing the geological settlement, an analysis of the sampling condition is considered in this work.

Palavras Chave – solo colapsível, nitossolo vermelho, caracterização geotécnica.

Keywords – collapsible soil, red nitosol, geotechnical characterization.

1 – INTRODUÇÃO

No Município de Alegre (ES) tem se observado recalques em obras civis, com o surgimento de trincas horizontais e verticais. Essa é uma característica que aponta para a possibilidade de ocorrência de solos colapsíveis. A presença de solos colapsíveis pode ser um problema significativo para a ocupação e o desenvolvimento urbano.

O município de Alegre está localizado no sul do estado do Espírito Santo (Figura 1) e segundo dados do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), a população do município é de 30.784 habitantes. O município de Alegre é cortado pela rodovia BR-482, estando a 60 km de Cachoeiro de Itapemirim, cerca de 50 km da divisa com Minas Gerais (Dores do Rio Preto) e 60 km da divisa com o Rio de Janeiro (Bom Jesus do Norte).

E-mails: eder.c.moreira@ufes.br (E. Moreira), patriciopires@gmail.com (P. Pires)

ORCID: orcid.org/0000-0002-4715-3341, orcid.org/0000-0001-5445-1753

Um solo colapsível (Conciani et al., 1995) pode ser definido como sendo aquele cuja estrutura apresenta alta porosidade, composto basicamente de areia e silte, não lixiviados e não saturados, com ligações entre grãos formadas por argilas e colóides.

Os solos colapsíveis apresentam uma estrutura que é composta por grãos cimentados por argilas ou carbonatos e que quando são umedecidos ou são sujeitos a sobrecargas tem estas pontes quebradas. Os solos colapsíveis apresentam baixo valor de densidade, baixo valor de massa específica e alta porosidade. Uma variável que pode ser apontada como favorável para a ocorrência de terrenos com solos colapsíveis é a sazonalidade climática, com regime pluviométrico extremamente variável, com períodos de seca extrema alternando com períodos de chuvas intensas, permitindo a elevação do nível freático regional ou local.

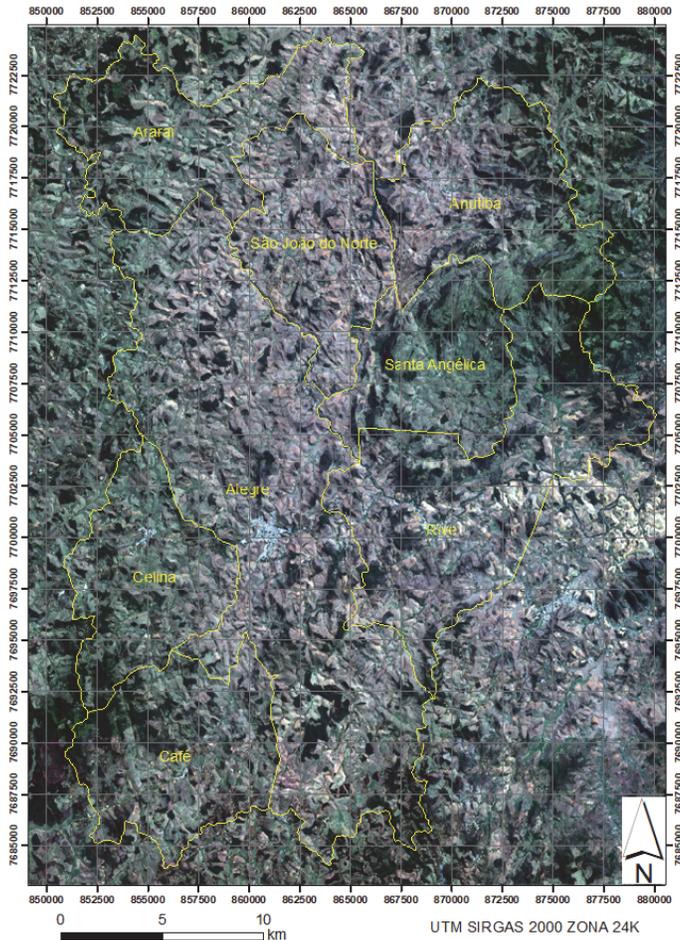


Fig. 1 – O Município de Alegre e os distritos. Em destaque no centro da imagem, observa-se a malha urbana de Alegre. Fonte: Geobases, 2016.

O objetivo deste trabalho é realizar a caracterização geotécnica de um perfil de solo residual de granitoide, na área da malha urbana de Alegre (ES). O trabalho tem como objetivo específico analisar a colapsibilidade dos horizontes presentes no perfil do nitossolo vermelho.

2 – REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 – Relevo, Vegetação e Clima

Regionalmente, pode-se dizer que a região sul do Estado do Espírito Santo encontra-se na faixa de dobramentos remobilizados, sendo sua unidade geomorfológica os Patamares Escalonados do Sul Capixaba (RADAMBRASIL, 1983).

Segundo Ab'Saber (1966), a área de estudo está no domínio morfoclimático dos “Mares de Morros” florestados. A área encontrava-se com a vegetação original de floresta (mata atlântica), até praticamente o início do século XIX.

Essa região de patamares escalonados evidencia que o planalto granítico apresenta um relevo energético em razão do dissecamento por ciclos sucessivos desde o fim do Cretáceo, o que leva a uma incidência de trechos fortemente ondulados a montanhosos, afloramentos de rochas, vales em V fechado, com vertentes muito íngremes e diferenças significativas entre o talvegue e o topo (Lani, 1987).

A vegetação da área está inserida no Domínio da Mata Atlântica, na região fitogeográfica da Floresta Estacional Semidecidual, que está relacionada ao clima de duas estações, uma seca e outra chuvosa (Nascimento, 2004).

Os climas predominantes no sul do Estado do Espírito Santo são Cwa e Aw. O clima Cwa é o clima mesotérmico de inverno seco em que a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C e a do mês mais quente ultrapassa 22°C, correspondente às áreas de cotas altimétricas superiores a 600 m (Embrapa, 1978). O clima Aw é o clima tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno.

A precipitação média anual se encontra na faixa de 1300 a 1500 mm (Incapar, 2021), sendo o período chuvoso compreendido nos meses de outubro a março e o período seco de abril a setembro (Nóbrega et al., 2008).

2.2 – Geologia local e solos

Segundo Sardou Filho et al. (2013), o Espírito Santo é caracterizado em maior parte como um planalto, por fazer parte do maciço do atlântico, com altitude média de 600 a 700 metros de altura, com picos, pontões e pães de açúcar isolados. A cidade de Alegre, área de estudo, está localizada no Caparaó Capixaba, com relevo acidentado de cristas e vales encravados, com cotas superiores a 1000m de altitude.

Geologicamente, a área de estudo está localizada na Região de Transferência da Faixa Móvel Ribeira para a Araçuaí, pertencente a Província Mantiqueira, caracterizada pela passagem pelo *trend* de lineamentos estruturais de NE-SW para NNE-SSW. Estas faixas de origem brasileira (neoproterozoica-cambriana) são produto da orogenia entre o Brasil e a África, possuindo um conjunto de componentes geológicos que caracterizam seu caráter colisional (Almeida et al, 1977).

Os paragnaisses (neoproterozóicos) do Complexo Paraíba do Sul são encontrados na área de estudo, também conhecidos como biotita gnaisse (Figura 2). Vieira (1997) dividiu os paragnaisses do Complexo Paraíba do Sul em 9 unidades (ps1 a ps9). De acordo com Vieira (1997), a unidade ps9 está representada por anfibólio-biotita gnaisse. Macroscopicamente, são observados porfiroblastos e/ou porfiroclastos de k-feldspato disseminados, geralmente xenomórficos, com tendências oclares, orientados e tabulares. Sua abundância e homogeneidade de distribuição dão à rocha um aspecto de gnaisse granitoide grosseiro.

Na área de estudo, é comum observar a ocorrência de gnaisse com planos de foliação de direção preferencialmente NNE-SSW e altos valores de mergulhos.

O tipo de solo predominante na área é o nitossolo vermelho (GEOBASES, 2016), como se pode observar na Figura 3.

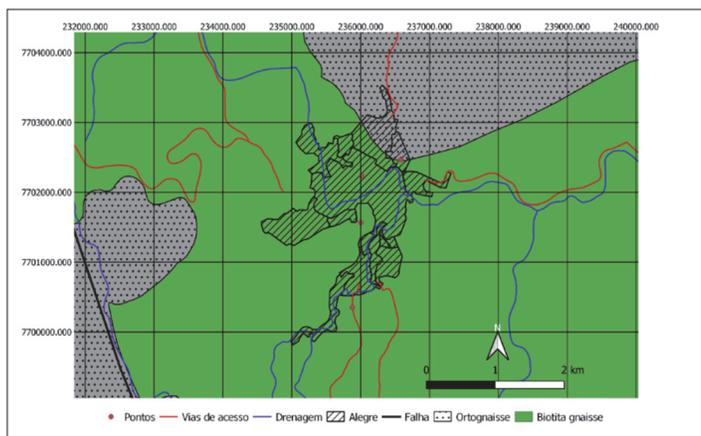


Fig. 2 – Mapa geológico da área de estudo. Fonte: Adaptado de Vieira et al. (2018).

De acordo com Pacheco (2011), na bacia hidrográfica do rio Alegre, a classe predominante é o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVAd), correspondendo a mais de 80% da área. No total da unidade de mapeamento LVAd existem as inclusões de Argissolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Amarelo, Cambissolo Háptico e afloramentos de rocha. A segunda unidade de mapeamento de maior expressividade são os Cambissolos Hápticos (CXbd) com um pouco mais de 13% da área. Na unidade de mapeamento dos Cambissolos Hápticos (CXbd1) são observadas inclusões de Latossolo Vermelho-Amarelo e de Cambissolo Húmico.

A discussão sobre a classificação dos solos poderá ser baseada no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2018).

Nitossolos é o grupamento de solos com horizonte B nítico abaixo do horizonte A. Este tipo de solo apresenta avançada evolução pedogenética pela atuação de ferralitização com intensa hidrólise, originando composição caulínico-oxídica ou virtualmente caulínica, ou com presença de argilominerais 2:1 com hidróxi-Al entrecamadas (VHE e EHE). O critério para discernir este solo é observar o desenvolvimento (expressão) de horizonte B nítico, em sequência a qualquer tipo de horizonte A, com pequeno gradiente textural, porém apresentando estrutura em blocos subangulares ou angulares ou prismática, de grau moderado ou forte, com cerosidade expressiva e/ou caráter retrátil.

Argissolos é o grupamento de solos com B textural, com argila de atividade baixa, ou atividade alta desde que conjugada com saturação por bases baixa ou com caráter alumínico. Estes solos apresentam evolução avançada com atuação incompleta de processo de ferralitização, em conexão com paragênese caulínico-oxídica ou virtualmente caulínica ou vermiculita com hidróxi-Al entrecamadas na vigência de mobilização de argila da parte mais superficial do solo, com concentração ou acumulação em horizonte subsuperficial. O desenvolvimento (expressão) de horizonte diagnóstico B textural em vinculação com atributos que evidenciam a baixa atividade da fração argila ou atividade alta desde que conjugada com saturação por bases baixa ou com caráter alumínico.

Nesse momento, é importante também rever o conceito de cambissolo. É o grupamento de solos pouco desenvolvidos com horizonte B incipiente. A pedogênese é pouco avançada, evidenciada pelo desenvolvimento da estrutura do solo, com alteração do material de origem expressa pela quase ausência da estrutura da rocha ou da estratificação dos sedimentos, cromas mais altos, matizes mais vermelhos ou conteúdo de argila mais elevado que o dos horizontes subjacentes. O critério para diferenciar este solo é o desenvolvimento de horizonte B incipiente em sequência a horizonte superficial de qualquer natureza, inclusive o horizonte A chernozêmico, quando o B incipiente deverá apresentar argila de atividade baixa e/ou saturação por bases baixa (Embrapa, 2018).



Fig. 3 – Tipos de solos que ocorrem no município de Alegre. Observa-se na área da mancha urbana a ocorrência de Nitossolo Vermelho, ao centro da imagem. Fonte: Geobases (2016).

3 – METODOLOGIA

Inicialmente, foram determinados quatro campos experimentais, a saber: Alto Universitário (P1); talude do Bairro Nova Alegre (P2); talude na saída de Alegre, ES 181, Km 01 (P3); e Talude no Campo de Aviação (P4). Os pontos estão localizados na malha urbana de Alegre e podem ser observados na Figura 9. Um trabalho de campo foi realizado para levantar a morfologia dos terrenos, a descrição dos perfis pedológicos, coleta de amostras deformadas e indeformadas.

As amostras indeformadas e deformadas foram retiradas a profundidades maiores do que 1,40m, variando a profundidade de 1,45m a 1,65m. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da UFES, sob a Coordenação do Professor Patrício Pires. Todos os ensaios seguiram as normas técnicas preconizadas pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

Pode-se considerar que o horizonte A tratado aqui é equivalente a um horizonte eluvial, o horizonte B é o solo de transição e o horizonte C é o solo de alteração.

4 – RESULTADOS LABORATORIAS

4.1 – Umidade de campo e granulometria

Inicialmente é apresentado o resultado de umidade de campo das amostras deformadas coletadas nos pontos P1, P2, P3 e P4 (ABNT-NBR6457/2016), conforme mostra o Quadro 1.

Quadro 1 – Umidade de campo das amostras deformadas (média %).

Ponto 1	12,79
Ponto 2	10,88
Ponto 3	8,08
Ponto 4	12,48

A amostra do Ponto P3 é a que mostrou a menor umidade e que foi caracterizada em campo como silte arenoso, mas que se mostrou em ensaio granulométrico como areia siltosa, como será mostrado futuramente. As amostras dos pontos P1 e P4 são argilas arenosas do horizonte A, enquanto a amostra P2 é argila arenosa do horizonte B.

O ensaio de granulometria foi realizado por sedimentação (ABNT-NBR 7181/2016). Esse ensaio permite determinar as frações granulométricas e a densidade específica dos grãos.

4.2 – Cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado segundo as normas ABNT-NBR 6457 (2016) e ABNT-NBR 7182 (2016); os corpos de prova foram moldados e colocados na máquina utilizada para cisalhamento direto segundo a norma ASTM (American Society for Testing and Materials) D3080 (2004).



Fig. 4 – Ensaio de cisalhamento unidirecional, com a amostra 1 do ponto 1 sendo inundada e sofrendo adensamento.

O equipamento utilizado foi o tipo cisalhamento uniaxial da Contenco/Pavitest (Figura 4). O ensaio é semiautomatizado, monitorado por CPU/programa próprio do equipamento. O carregamento para o adensamento é manual.

Após 24 h de adensamento, observou-se que a diferença da deformação vertical se estabilizou. Então, procedeu-se ao ensaio de cisalhamento unidirecional, soltando os parafusos da caixa metálica para promover um pequeno afastamento para evitar atrito entre as partes metálicas. A velocidade de deslocamento determinada foi de $v = 0,04$ mm/min. Após 24h, observou-se que o cisalhamento já havia ocorrido e os dados foram tomados no computador que acompanha e monitora o ensaio. Novos carregamentos foram realizados em dois outros corpos de prova, com 2 kgf/cm^2 e 3 kgf/cm^2 .

4.3 – Peso Específico Real dos Sólidos (peso específico dos sólidos).

O peso específico real dos sólidos foi calculado durante o ensaio de sedimentação (ABNT-NBR6508/1984). Os valores obtidos são apresentados no Quadro 2. Esses valores representam a média aritmética simples de três ensaios (em três picnômetros diferentes) em cada ponto.

Quadro 2 – O peso específico real dos sólidos.

Ponto	ρ_s (g/cm ³)	Classificação granulométrica
P1	2,72	argila arenosa
P2	2,70	argila arenosa
P3	2,73	areia siltosa
P4	2,72	argila arenosa

Entende-se que a classificação granulométrica do horizonte A no ponto 1 é argila arenosa. Essa classificação corresponde à observação de campo.

O Quadro 2 apresenta o resultado da classificação granulométrica, indicando que o horizonte B, no ponto 2, é uma argila arenosa. Esse resultado confere com o que foi observado em campo. Em comparação ao ponto 1, horizonte A, é um pouco menos siltosa. O horizonte A no ponto 1 é de coloração amarelo avermelhada, enquanto no ponto 2, o horizonte B é vermelho.

O resultado do ensaio de classificação granulométrica indica o horizonte C, no ponto 3, como areia siltosa (Quadro 2). No entanto, a amostra foi classificada em campo como silte arenoso. De fato, o resultado apresenta 45% de areia e 40% de silte, ou seja, areia siltosa.

É possível identificar a amostra deformada do ponto 4, no horizonte A, como sendo argila arenosa. Em campo, a amostra foi identificada por análise tátil-visual como sendo argila arenosa também.

A classificação do tipo de solo utilizando as escalas granulométricas apresentou argila arenosa para os pontos P1, P2 e P4, enquanto para o ponto P4 foi areia siltosa, conforme se observa no Quadro 3.

Quadro 3 – Frações granulométricas dos pontos amostrados.

Ponto 1 - Horizonte A					
Classificação	Argila	Silte	Areia fina	Areia média	Areia grossa
ABNT	54%	8%	14%	14%	10%
SUCS	54%	10%	18%	14%	-
MIT	54%	8%	14%	14%	10%

Quadro 3 (cont.) – Frações granulométricas dos pontos amostrados.

Ponto 2 - Horizonte B					
Classificação	Argila	Silte	Areia fina	Areia média	Areia grossa
ABNT	52%	6%	10%	18%	14%
SUCS	52%	8%	22%	18%	-
MIT	52%	6%	10%	18%	14%
Ponto 3 - Horizonte C					
Classificação	Argila	Silte	Areia fina	Areia média	Areia grossa
ABNT	12%	36%	18%	22%	12%
SUCS	12%	38%	32%	18%	-
MIT	12%	36%	18%	22%	12%
Ponto 4 - Horizonte A					
Classificação	Argila	Silte	Areia fina	Areia média	Areia grossa
ABNT	60%	8%	12%	12%	8%
SUCS	60%	10%	20%	10%	-
MIT	60%	8%	12%	12%	8%

4.4 – Índice de Plasticidade (IP)

O índice de plasticidade foi calculado para os pontos P1, P2 e P4 (ABNT-NBR 7180/2016). O cálculo do IP, foi realizado com base na fórmula $IP = LL - LP$ (ABNT-NBR 6459/2017). Não foi possível calcular o IP e o LP para o ponto P3. O Quadro 4 apresenta os resultados obtidos.

Quadro 4 – Índices de consistência dos horizontes analisados (%).

Ponto	LL	LP	IP
P1 (horizonte A)	60	31	29
P2 (horizonte B)	56	31	25
P3 (horizonte C)	60	-	-
P4 (horizonte A)	54	31	23

4.5 – Resultado do Ensaio de Cisalhamento Direto

Após a realização de um conjunto de ensaios, sendo que foram realizados três ensaios por ponto com carregamentos verticais a 1kgf/cm^2 , 2kgf/cm^2 e 3kgf/cm^2 , foi definida a velocidade de corte de $0,04\text{ mm/min}$. Os resultados dos parâmetros de resistência drenados são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 – Resultados de coesão e ângulo de atrito para as amostras analisadas.

Ponto	Horizonte	Classificação granulométrica	Coesão, c' (kPa)	Ângulo de atrito, ϕ' (°)
P1	A	Argila arenosa	2,4	26,94
P2	B	Argila arenosa	3,2	25,65
P3	C	Areia siltosa	12	20,81
P4	A	Argila arenosa	4,1	24,59

4.6 – Resultados do Ensaio de Adensamento

O procedimento do ensaio é normatizado pela ABNT-NBR 16853 (2020): Solo – Determinação de Adensamento Unidirecional. As amostras dos pontos P1, P2, P3 e P4 foram analisadas, como se pode observar na Figura 5.



Fig. 5 – Ensaio de adensamento sendo realizado no equipamento ACE automatizado.

O ensaio de adensamento seguiu uma rotina de carregamento de 10, 20, 40, 80, 160, 320 e 640 kPa, seguido por um descarregamento de 320, 160 e 80 kPa. As amostras foram inundadas a 40 kPa.

Os gráficos da relação índice de vazios versus tensão (kPa) são apresentados nas Figuras 6 e 7.

Os coeficientes de compressão foram calculados com base nos dados dos gráficos apresentados anteriormente:

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log p_2 - \log p_1} \quad (1)$$

Sendo que e_1 e e_2 são os índices de vazios e p_1 e p_2 são as tensões verticais.

Os resultados do coeficiente de compressão são apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 – Valores obtidos de coeficiente de compressão.

Ponto	Coefficiente de compressão
P1	0,13177
P2	0,34553
P3	0,14666
P4	0,22315

O coeficiente de descompressão foi assim calculado:

$$C_d = \frac{e_1 - e_2}{\log p_2 - \log p_1} \quad (2)$$

sendo que e_1 e e_2 são os índices de vazios e p_1 e p_2 as tensões verticais.

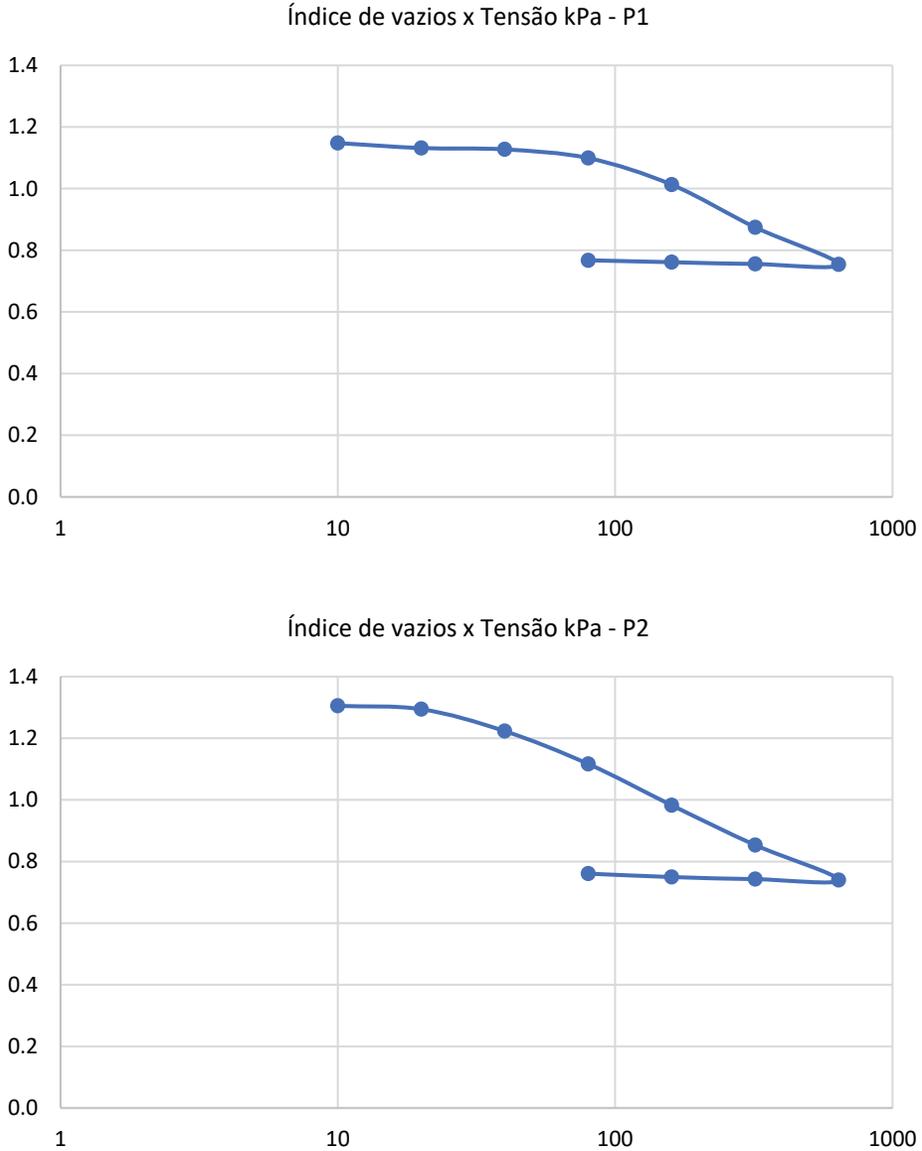


Figura 6 – Gráficos de índice de vazios x Tensão vertical em kPa – P1 e P2.

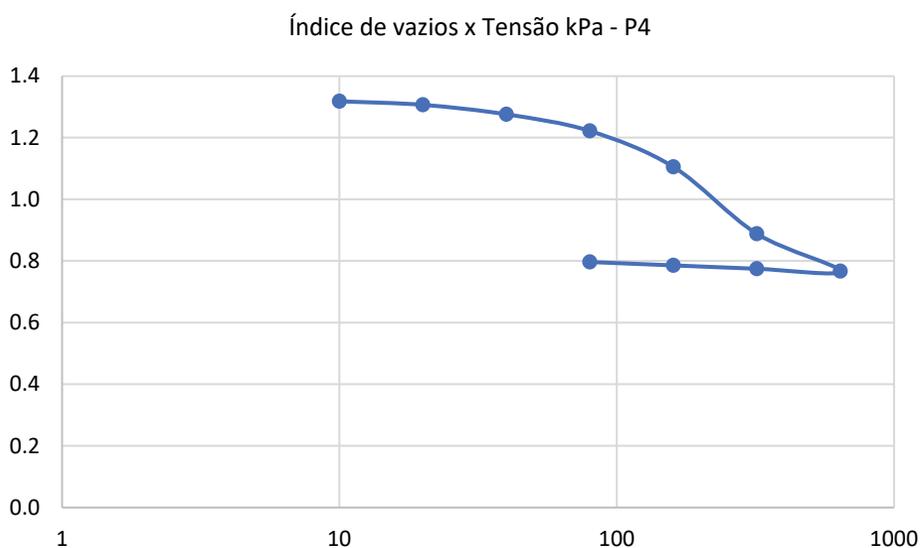
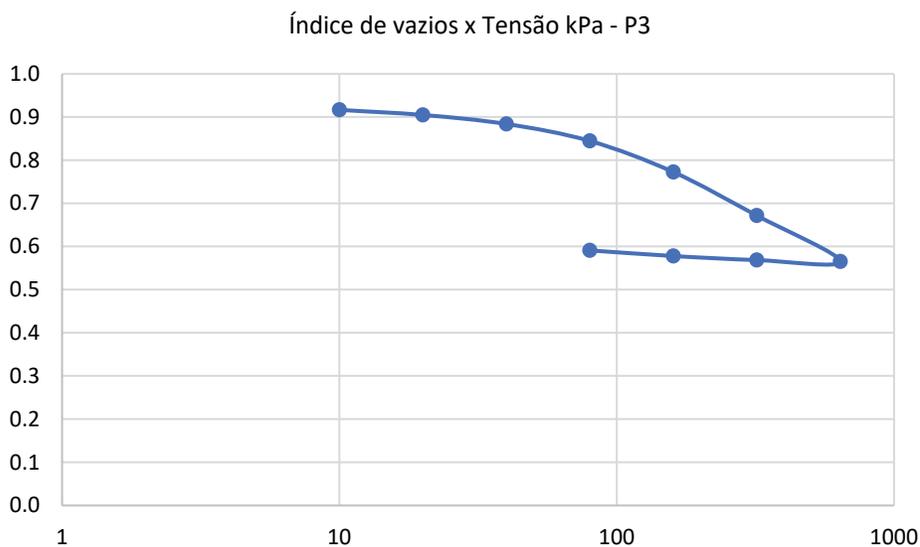


Figura 7 – Gráficos de Índice de vazios x Tensão vertical (kPa) – P3 e P4.

Desse modo, de acordo com os dados do gráfico de Índice de vazios vs. Tensão vertical, o coeficiente de decompressão pode ser calculado e os resultados são apresentados no Quadro 7.

Os valores de coeficiente de adensamento são apresentados nos Quadros 8, 9, 10 e 11, a seguir. Utilizou-se o Método de Taylor para o cálculo do coeficiente de adensamento, uma vez que a forma dos gráficos se adequou a este método. Não foi possível utilizar o método de Casagrande, devido à forma do gráfico, uma vez que não permitiu o traçado de uma tangente e uma assíntota para determinar H_{100} .

Quadro 7 – Valores obtidos de coeficiente de descompressão.

Ponto	Coeficiente de descompressão
P1	0,01991
P2	0,02982
P3	0,03732
P4	0,03621

Quadro 8 – Coeficiente de adensamento para o ponto P1.

Pressão (kPa)	t ₉₀ (raiz)	H ₉₀ (mm)	H ₀ (mm)	H ₅₀ (cm)	t ₉₀ (min)	t ₉₀ (s)	C _v (cm ² /s)
10	1,75242	19,897	19,931	19,912	3,071	184,26	0,456183
20	1,99824	19,865	19,870	19,867	3,993	239,58	0,349269
40	18,58408	19,705	19,812	19,752	345,368	20.722,08	0,003992
80	2,59749	19,469	19,568	19,513	6,747	404,82	0,199399
160	2,96175	18,701	18,916	18,796	8,772	526,32	0,142312
320	2,59749	17,409	17,645	17,513	6,747	404,82	0,160635
640	5,70683	16,271	16,471	16,359	32,568	1954,08	0,029037

Quadro 9 – Coeficiente de adensamento para o ponto P2.

Pressão (kPa)	t ₉₀ (raiz)	H ₉₀ (mm)	H ₀ (mm)	H ₅₀ (cm)	t ₉₀ (min)	t ₉₀ (s)	C _v (cm ² /s)
10	2,59749	19,928	19,944	19,935	6,747	404,82	0,208119
20	21,18910	19,831	19,874	19,850	448,978	26.938,68	0,003101
40	18,58408	19,205	19,760	19,451	345,368	20.722,08	0,003871
80	1,75242	18,401	19,038	18,684	3,071	184,26	0,401652
160	2,59749	17,182	17,533	17,338	6,747	404,82	0,157424
320	2,59749	16,056	16,310	16,168	6,747	404,82	0,136910
640	2,59749	15,074	15,299	15,174	6,747	404,82	0,120580

Quadro 10 – Coeficiente de adensamento para o ponto P3.

Pressão (kPa)	t ₉₀ (raiz)	H ₉₀ (mm)	H ₀ (mm)	H ₅₀ (cm)	t ₉₀ (min)	t ₉₀ (s)	C _v (cm ² /s)
10	2,59749	19,928	19,944	19,935	6,747	404,82	0,208119
20	21,18910	19,831	19,874	19,850	448,978	26.938,68	0,003101
40	18,58408	19,205	19,760	19,451	345,368	20.722,08	0,003871
80	1,75242	18,401	19,038	18,684	3,071	184,26	0,401652
160	2,59749	17,182	17,533	17,338	6,747	404,82	0,157424
320	2,59749	16,056	16,310	16,168	6,747	404,82	0,136910
640	2,59749	15,074	15,299	15,174	6,747	404,82	0,120580

Quadro 11 – Coeficiente de adensamento para o ponto P4.

Pressão (kPa)	t ₉₀ (raiz)	H ₉₀ (mm)	H ₀ (mm)	H ₅₀ (cm)	t ₉₀ (min)	t ₉₀ (s)	C _v (cm ² /s)
10	7,41889	19,685	19,700	19,691	55,040	3.302,40	0,024893
20	4,38987	19,601	19,631	19,614	19,271	1.156,26	0,070539
40	1,99824	19,376	19,496	19,429	3,993	239,58	0,334042
80	1,99824	18,911	19,163	19,023	3,993	239,58	0,320216
160	1,99824	18,240	18,668	18,430	3,993	239,58	0,300571
320	3,37683	16,090	16,391	16,223	11,403	684,18	0,081559
640	1,99824	15,091	15,314	15,190	3,993	239,58	0,204177

O recalque pode ser calculado, entre duas tensões de interesse σ_1 e σ_2 , utilizando a equação seguinte:

$$\rho = \frac{C_c * H_1}{(1 + e_1)} * \log\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right) \quad (3)$$

sendo que C_c é o coeficiente de compressão, H_1 a altura do corpo de prova, e_1 o índice de vazios, bem como considerando que o recalque só pode ser calculado quando o solo se encontra numa situação correspondente à reta virgem.

Assim sendo, foi possível calcular o recalque de acordo com os valores apresentados no Quadro 12, para um momento específico, considerando as tensões de carregamento da ordem de 160 kPa a 640 kPa, no ramo virgem da curva de adensamento.

Quadro 12 – Valores de recalque para as tensões variando de 160 kPa a 640 kPa, no ramo virgem da curva de adensamento.

Ponto	C _c	H ₁ (mm)	e ₁	σ_2	σ_1	recalque ρ
P1	0,1318	18,640	1,0129	640	160	0,73464
P2	0,3455	17,115	0,9824	640	160	1,79602
P3	0,1467	18,145	0,7724	640	160	0,90395
P4	0,2232	17,862	1,1050	640	160	1,14002

Observou-se que o maior valor de recalque é para o Ponto P2 que mostrou um significativo deslocamento na curva de vazios quando a amostra foi saturada a 40 kPa. Todos os ensaios de adensamento foram realizados com saturação a 40 kPa.

4.7 – Permeabilidade

Os ensaios de permeabilidade foram realizados a carga constante de 5 kPa (ABNT-NBR 13292/2021). O ensaio foi realizado na mesma prensa onde se faz o adensamento, em momento distinto. Inicialmente, o corpo de prova fica submerso por algum tempo para saturar. Findo esse tempo, mais ou menos duas horas, se considera o corpo de prova saturado. Logo após os ajustes de equipamentos, a carga inicial é de 2 kPa; após 5min decorridos, a carga é constante e igual a 5 kPa. Há uma bureta ligada ao recipiente onde está o corpo de prova e que permite as leituras de nível de água. Assim iniciou-se o ensaio, observando-se que a água que desce pela bureta passa pelo corpo

de prova no sentido de baixo para cima. E a partir daí são realizadas as leituras na bureta, a cada dez segundos, conforme a água desce e passa pelo corpo de prova.

Os resultados do coeficiente de permeabilidade são apontados no Quadro 13.

Quadro 13 – Resultados do coeficiente de permeabilidade.

Ponto	Coeficiente de permeabilidade (cm/s)
P1	$6,84 \cdot 10^{-4}$
P2	$1,42 \cdot 10^{-3}$
P3	$2,74 \cdot 10^{-4}$
P4	$1,74 \cdot 10^{-3}$

5 – DISCUSSÃO

No decorrer do trabalho foi observado o contraste entre as informações contidas no Mapa Geológico do Espírito Santo com o que foi visto no trabalho de campo. Então, a fim de estabelecer uma relação definitiva entre o que pôde ser observado em campo e as informações do Mapa Geológico do estado do Espírito Santo (Vieira et al., 2018), 1:400.000, coube uma análise comparativa, descrita a seguir.

- **Ponto 1:** No Mapa Geológico, essa área é definida como “Depósito aluvionar”, informação que é inválida com o que foi visto em campo. Foi possível observar no ponto 1 os horizontes A e C. De modo que o horizonte A é caracterizado por uma argila arenosa de coloração amarela avermelhada e o C, apresenta bandamento gnáissico e bolsões fêlsicos de composição predominantemente de plagioclásio, indicando a formação a partir de um paragnaisse (protólito sedimentar).

É possível entender que o trabalho de Vieira et al. (2018) foi realizado numa escala regional, enquanto este trabalho foi realizado numa escala local e por isso é possível observar essas diferenças. Foi verificado que nas áreas de vale não há depósitos aluvionares com areia arcoseana. Isso deve ocorrer somente nas calhas dos rios na região. O que pode ser observado é a presença de uma espessa camada de argila cinza (gleissolo) decorrente da deposição de sedimentos de granitoides (gnasseis e granitos) da região, sendo que estas argilas apresentam esta coloração por estar sob ação do lençol freático raso. Esta evidência foi observada em trabalhos experimentais na região.

- **Ponto 2:** Esta área está assinalada no Mapa Geológico como “Ortognaisse Muniz Freire”. No ponto 2, é possível observar claramente os horizontes A e B. O horizonte A se apresentando como uma argila arenosa de coloração amarela avermelhada, com a presença de grãos de quartzo e de concreções ferruginosas milimétricas a centimétricas. O horizonte B é caracterizado por uma argila arenosa, apresentando coloração avermelhada e uma quantidade considerável de concreções ferruginosas. Bem próximo ao local do ponto 2 é possível observar rocha *in situ* de composição granitóide se aproximando muito do biotita-gnaisse.

- **Ponto 3:** A área onde se localiza este ponto no mapa geológico é definida como “biotita-gnaisse (Bom Jesus do Itabapoana)”. No ponto 3 foi possível observar um horizonte C bem expressivo caracterizado por uma areia-siltosa, sendo que foi possível observar a presença de grãos de quartzo, uma grande quantidade de mica, principalmente muscovita, e também bolsões de argila (ocre) e lentes de quartzo e biotita. Nas imediações pode-se observar a rocha *in situ*, sendo esta de composição granítica de granulação fina a média bandada, da qual foi retirada uma amostra para confecção de lâmina para melhor descrevê-la. Colli (2020) caracterizou a rocha como gnaisse milonítico, enquanto entende-se neste trabalho tratar-se de uma rocha granitóide (com aspectos graníticos). A rocha apresenta composição granítica (quartzo, biotita, plagioclásio e feldspato) e textura inequigranular fanerítica de granulação fina a média. Também é importante observar que os matacões que estão na base podem ter se movido, talvez durante a realização da obra de

retaludamento. Esses matacões sofrem um processo de esfoliação esferoidal. Foi possível observar uma foliação incipiente nesses matacões. A 10 metros na direção norte foi possível observar rocha sã caracterizada como metagranitoide. Nesse afloramento, foi possível medir a atitude do bandamento 282°/62°, que é a mesma atitude da foliação da biotita. Essa foliação é muito próxima àquela encontrada nos matacões. Foi possível observar um plano de fratura 214°/73°. Esse sistema de fratura é subverticalizado, cortando perpendicularmente a foliação.

- **Ponto 4:** A área onde se encontra o ponto foi caracterizada no Mapa Geológico como “Depósito aluvionar”. No ponto 4, é possível observar os horizontes A, B e C. O horizonte A é caracterizado por uma argila arenosa de coloração amarela avermelhada. O horizonte B se dá como uma argila arenosa vermelha. No pé do talude foi possível observar o horizonte C, onde se vê claramente a presença de estruturas reliquias (bandamento gnáissico), e ainda há a presença de grãos expressivos de plagioclásio rotacionados, dando indícios de uma zona de cisalhamento. Devido à sua composição e às características estruturais, pode-se definir o protólito como sedimentar, caracterizando assim como paragnaisse milonítico.

Outras divergências entre a literatura e as informações em campo foram observadas. O Quadro 14 apresenta esta relação.

Alguns pontos foram observados em busca de entender o substrato rochoso da região. Gouvea et al. (2020) realizaram um levantamento geológico na região. Este levantamento foi numerado de pontos 10 a 49. As Figuras 8 e 9 apresentam os mapas geológicos construídos a partir de análise dos dados de Vieira et al. (2018), Gouvea et al. (2020) e pelos autores do presente trabalho. Esta área é maior do que o objeto do presente estudo, mas serve para correlacionar os litotipos e classes de solos.

Quadro 14 – Comparação entre litologias descritas por Vieira et al. (2018) e pelos autores do presente trabalho.

Ponto	Vieira et al. (2018)	Análise de campo
p1	Depósito aluvionar (Areia arcoseana)	Horizonte A - Argila arenosa
p2	Ortognaisse Muniz Freire (Ortognaisse)	Horizonte A e B - Argila arenosa
p3	Bom Jesus do Itabapoana (Granada-biotita gnaisse/Biotita gnaisse)/(Anfibolito)	Horizonte C - Areia siltosa
p4	Depósito aluvionar (Areia arcoseana)	Horizonte A - Argila arenosa
p5	Depósito aluvionar (Areia arcoseana)	Paragnaisse
p6	Ortognaisse Muniz Freire (Ortognaisse)	Gnaisse (??)
p7	Ortognaisse Muniz Freire (Ortognaisse)	Paragnaisse
p8-A	Bom Jesus do Itabapoana (Granada-biotita gnaisse/Biotita gnaisse)/(Anfibolito)	Horizonte C - Areia argilosa
p8-B	Bom Jesus do Itabapoana (Granada-biotita gnaisse/Biotita gnaisse)/(Anfibolito)	Gnaisse granítico
p8-C	Bom Jesus do Itabapoana (Granada-biotita gnaisse/Biotita gnaisse)/(Anfibolito)	Granitóide (??)
p9	Depósito aluvionar (Areia arcoseana)	Paragnaisse milonítico
p50	Ortognaisse Muniz Freire (Ortognaisse)	Biotita Gnaisse

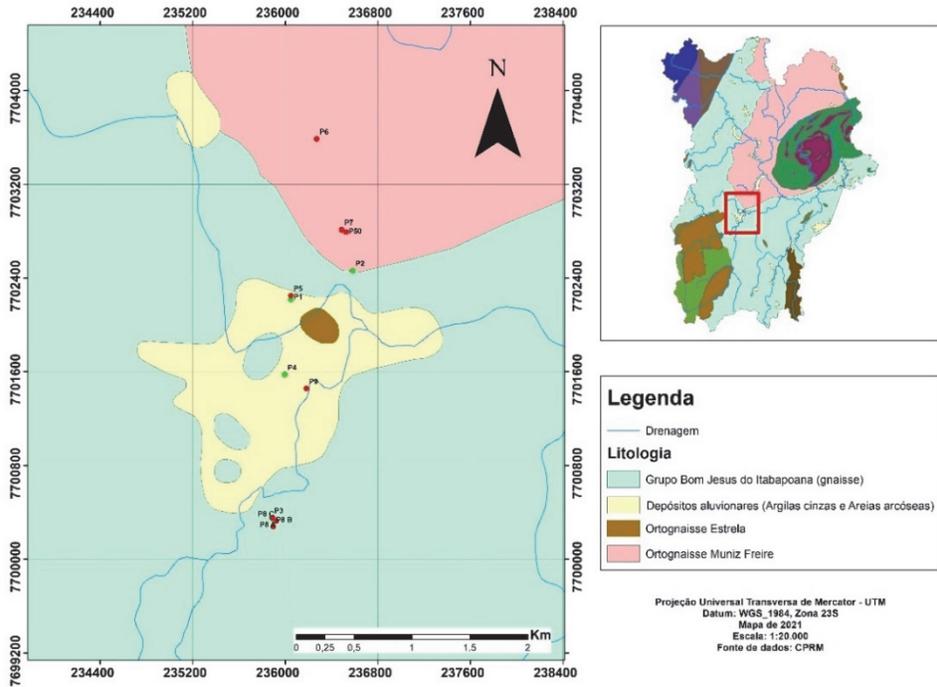


Fig. 8 – Mapa Geológico dos limites da malha urbana de Alegre (ES). Fonte: Modificado de Vieira et al. (2018).

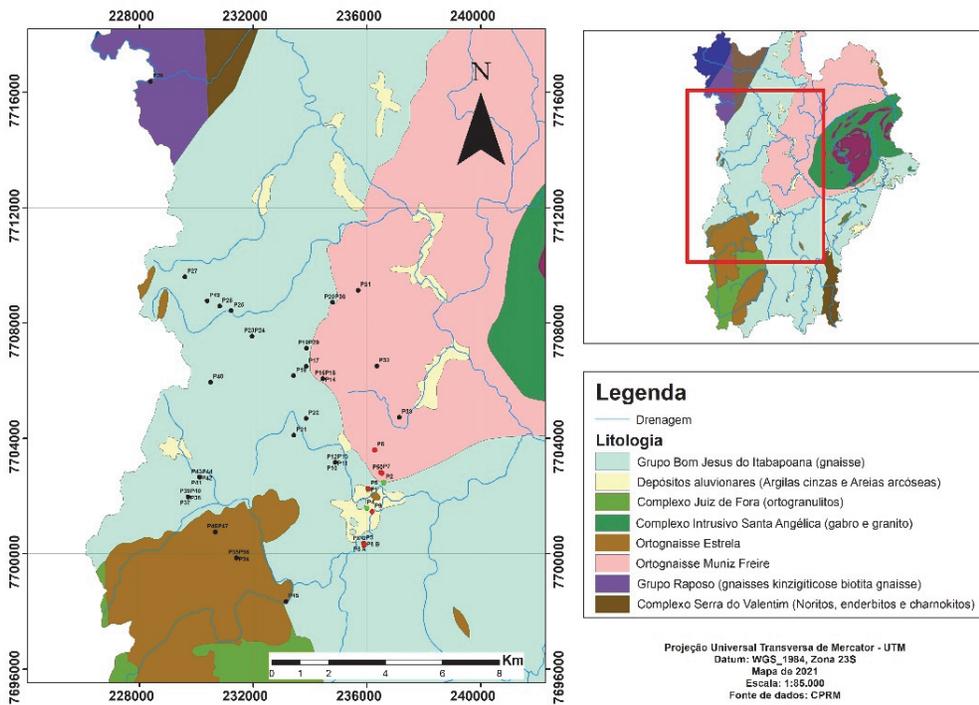


Fig. 9 – Mapa geológico ampliado de Alegre (ES). Fonte: Modificado de Vieira et al. (2018).

Com esta avaliação, entendeu-se que há a necessidade de um trabalho específico na área de mapeamento geológico em escala local para a malha urbana de Alegre (ES) que deve ser realizado futuramente.

A granulometria dos materiais foi realizada por análise táctil-visual em campo e em laboratório, indicando que os materiais são: no ponto P1, argila arenosa (horizonte A); no ponto P2 tem-se argila arenosa (horizonte B); no ponto P3 tem-se areia siltosa (horizonte C) e no ponto P4 tem-se argila arenosa (horizonte A). Essas classificações seriam aquelas esperadas para um perfil de solo residual de gnaiss, sendo que no horizonte A, a argila é transportada para o horizonte B, onde é possível observar maior concentração de argila que no horizonte A. O horizonte C mostra as estruturas reliquias da rocha e é uma areia siltosa, evidenciada pela presença de quartzo, feldspato, plagioclásio e micas.

De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), os nitossolos são solos minerais homogêneos com pequena ou nenhuma diferenciação de cor com a profundidade. Este solos apresentam horizonte B nítrico, abaixo do horizonte A, com argila de atividade baixa ou atividade alta (desde que conjugada com caráter aluminico). Nitossolos possuem textura argilosa ou muito argilosa desde a superfície do solo, estrutura em blocos subangulares ou angulares ou prismática, de grau moderado ou forte, com cerosidade expressiva e/ou caráter retrátil (EMBRAPA, 2018).

A sua estrutura favorece a retenção de água, porém mantém uma boa drenagem, além de que, possui propriedades físicas extremamente desejáveis em condições de sazonalidade climática e estação seca prolongada (IAC, 2021).

Nas situações em que as características de Nitossolos e Argissolos Vermelhos ou Vermelho-Amarelos forem coincidentes, deve-se utilizar a policromia (que se caracteriza pela variação de cor dentro de 150cm a partir da superfície do solo), como descrita abaixo, como critério adicional para distinguir esses dois solos. Os Nitossolos apresentam policromia pouco acentuada, no perfil, sendo assim, devem satisfazer os seguintes critérios de cores: a) Para solos apresentando cores dos horizontes A e B, exceto BC, dentro de uma mesma página de matiz, admitem-se variações de no máximo 2 unidades para valor e/ou 3 unidades para croma; b) Para solos apresentando cores dos horizontes A e B, exceto BC, em duas páginas de matiz, admite-se variação de ≤ 1 unidade de valor e ≤ 2 unidades de croma; c) Para solos apresentando cores dos horizontes A e B, exceto BC, em mais de duas páginas de matiz, não se admite variação para valor e admite-se variação de ≤ 1 unidade de croma (EMBRAPA, 2018).

Os argissolos são o grupamento de solos com B textural, com argila de atividade baixa ou alta desde que conjugada com saturação por bases baixas ou com caráter aluminico (EMBRAPA, 2018).

Ademais, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), os latossolos são constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer um dos tipos de horizonte diagnóstico superficial, exceto histórico. São solos em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos como resultado de enérgicas transformações no material de origem. São solos muito profundos, possuem uma sequência de horizontes A, B, C com pouca diferenciação de sub-horizontes e as transições são normalmente difusas ou graduais. De um modo geral, os teores da fração argila deste solo aumentam gradativamente com a profundidade ou permanecem constantes ao longo do perfil. A cerosidade, quando presente, é pouca e fraca (EMBRAPA, 2018).

Sendo assim, pode-se dizer que solos lateríticos são homogêneos, com pouca diferenciação entre os horizontes ou camadas, reconhecidos facilmente pela cor quase homogênea do solo com a profundidade. Os Latossolos são bem drenados e com baixa capacidade de troca de cátions, com textura média ou mais fina, ou seja, argilosa ou muito argilosa (IAC, 2021).

De acordo com os resultados de granulometria obtidos, presentes no Quadro 3, que compreendem o Horizonte B no ponto 2, pode-se observar que boa parte do solo é composto por argila e provavelmente se trata de um horizonte B nítrico. Esses resultados são condizentes com os dados recentes do Geobases (2016), Figura 3, onde aponta este solo como Nitossolo Vermelho, mas,

segundo Pacheco (2011), a bacia do Rio Alegre é composta 80% de Latossolo Vermelho-Amarelo (LVAd) e apresenta inclusões de Argissolo Vermelho-Amarelo.

Entende-se que nos pontos P1, P2 e P4, foi possível observar os horizontes A, B e C, uma vez que se observou diferenças de cores entre os horizontes, isto é, policromia. O horizonte A é representativo de um perfil de nitossolo vermelho com a presença de argila arenosa. A cerosidade observada nos pontos P1, P2 e P4 é marcante no horizonte B. O horizonte C nesses pontos mostra as estruturas reliquias do substrato rochoso.

No ponto P3, trata-se de um perfil de cambissolo, uma vez que os horizontes A e B são incipientes e até mesmo inexistentes dependendo da posição que se observa o talude. A consideração sobre os perfis da bacia hidrográfica do Rio Alegre serem de argissolos também pode ser levada em conta, como observou Pacheco (2011), mas é necessário observar a escala de trabalho para se generalizar. No caso desse estudo, entende-se que a escala de trabalho é determinante para a verificação e classificação dos perfis.

Os constituintes minerais do solo devem estar associados ao tipo de rocha (magmática, sedimentar ou metamórfica). Alguns minerais ocorrem no solo como ocorriam nas rochas, enquanto outros se formaram a partir de reações que se estabeleceram no produto de intemperização das rochas (Freire, 2006). Os primeiros são os minerais primários e os últimos, minerais secundários. Os minerais primários são minerais resistentes à intemperização e por isso, constituem a fração grosseira do solo, ao passo que, os minerais secundários predominam na fração fina do solo, especialmente na fração argila. Dentre os minerais primários, que são encontrados formando a areia do solo, estão os seguintes: quartzo, turmalina, zirconita, ortoclásio, plagioclásio, hornblenda, micas e augita. Dentre os minerais secundários, que compõem a fração fina do solo estão os argilominerais do grupo da montmorilonita e da caolinita, hematita e limonita, além de outros.

Na bibliografia da área de pedologia aparecem vários termos que se referem a complexos e específicos processos de formação dos solos, tais como podzolização, calcificação, laterização, entre outros como cita Lepsch (2011). Esses processos atuam não somente na transformação de um material de origem em solo, mas também se referem a mudanças que operaram – e ainda, estão operando e modificando os solos. Essas modificações refletem-se na morfologia e nos atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo.

Sob a ótica da lupa binocular, foi possível observar nos pontos P1, P2 e P4, minerais primários como quartzo, plagioclásio, turmalina. Também foi possível observar muscovita, biotita e outros argilominerais (de fração muito fina). O ponto P3 apresentou no solo de alteração ou horizonte C minerais primários como quartzo e plagioclásio; na fração fina pode-se observar muscovita, vermiculita, biotita e outros argilominerais (de fração muito fina). O que indicou a princípio que os solos dos horizontes P1, P2 e P4 aparentemente apresentam comportamento laterítico, enquanto o perfil do ponto P3 pode ser não laterítico. O que chamou a atenção foi a presença de atividade coloidal no ponto P3 e as concreções lateríticas nos pontos P1, P2 e P4, sendo que nesses pontos são menores no nível A e maiores no horizonte B.

A granulometria dos materiais foi realizada por análise tátil-visual em campo e em laboratório, indicando que os materiais são: no ponto P1, argila arenosa (horizonte A); no ponto P2, argila arenosa (horizonte B); no ponto P3, areia siltosa (horizonte C) e no ponto P4, argila arenosa (horizonte A). Essas classificações seriam aquelas esperadas para um perfil de solo residual de gnaiss, sendo que no horizonte A, a argila é transportada para o horizonte B, onde é possível observar maior concentração de argila que no horizonte A. O horizonte C mostra as estruturas reliquias da rocha e é uma areia siltosa, evidenciada pela presença de quartzo, feldspato, plagioclásio e micas.

As amostras de solo coletadas durante o estudo foram caracterizadas com base no Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e nos padrões de classificação da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Dessa forma, foi possível entender as propriedades de cada amostra analisada.

É importante ressaltar que dos quatro pontos amostrados para o trabalho não foi possível realizar a caracterização do solo do ponto P3, representativo do horizonte C, uma vez que não foi possível calcular o índice de plasticidade e o limite de plasticidade.

Os solos dos três pontos analisados (P1, P2 e P4) possuem a mesma classificação granulométrica, todos são do tipo argila-arenosa, com mais de 50% de grãos finos em sua composição.

A Figura 10 apresenta a classificação de cada um dos três pontos com base na carta de Casagrande e nos padrões do sistema unificado. Como se pode notar, todos os três solos se localizam muito próximos da linha A (linha que divide os solos de comportamento do tipo argila dos de tipo silte). Pinto (2006) definiu que, em casos como este, é aberta uma exceção na nomenclatura e duas classificações são utilizadas para o mesmo solo, já que esse possui um tipo de comportamento intermediário. No caso do P1, P2 e P4, seu comportamento seria intermediário entre um solo do tipo CH (argila de alta plasticidade) e do tipo MH (silte de alta plasticidade), portanto, sua classificação correta seria como um solo do tipo CH-MH, ou seja, solo de comportamento intermediário entre argila e silte com alta plasticidade.

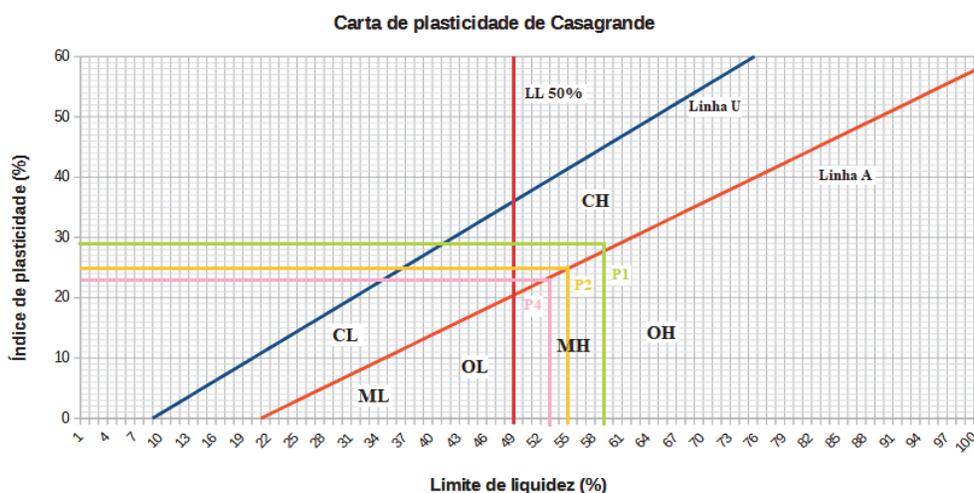


Fig. 10 – Locação dos pontos P1, P2 e P4 na carta de plasticidade de Casagrande. Fonte: Modificado de Pinto (2006).

Machado e Machado (1997) definem uma sequência para que se determine a classificação de solos finos dentro do sistema AASHTO (Figura 11). Seguindo as propriedades medidas para as amostras dos pontos P1, P2 e P4, os três tipos de solos se classificam como solos argilosos do tipo A-7-5.

Essa classificação é utilizada para a análise da qualidade do solo para a aplicação como base, sub-bases e subleitos de pavimento. No cômputo geral dos solos, o grupo A-7-5 reporta a solos que devem ser sempre considerados como má qualidade para aplicação como subleito. Assim, pode se classificar o solo do tipo MH (solo com características próximas ao CH-MH) como sendo de má qualidade para o uso como material de fundação.

O índice de plasticidade IP dos materiais encontrados também refletiu a composição granulométrica encontrada. Os pontos P1, P2 e P4 com argila arenosa indicou um IP com valores de 29, 25 e 23, respectivamente.

De acordo com Caputo (1988), solos com $IP \geq 15$ são altamente plásticos; assim sendo, as argilas arenosas encontradas nos pontos P1, P2 e P4 são altamente plásticas.

Não foi possível calcular o IP no ponto P3 porque é uma areia siltosa, sendo que esse fato indicou que este solo tem muito baixa plasticidade ou é desprezível, tendendo o valor do IP a zero.

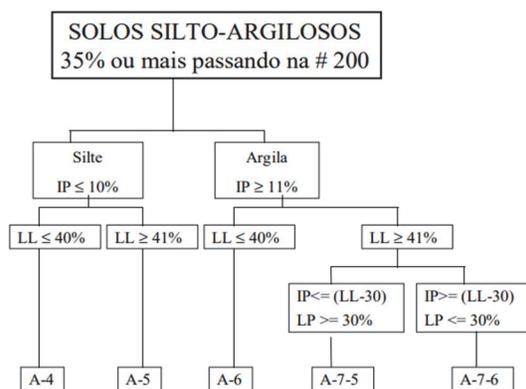


Fig. 11 – Esquema gráfico para classificação de solos finos do sistema AASHTO. Fonte: Machado e Machado (1997).

De acordo com Burmister (1949), os solos dos pontos P1, P2 e P4 têm plasticidade alta, enquanto o solo arenoso do ponto P4 é não plástico (vide Quadro 15).

Das (2008) apresenta uma discussão sobre a atividade das argilas e correlaciona esta atividade com a composição mineralógica dos solos. De acordo com Das (2008), a fração de argila em peso pode informar sobre a composição mineralógica, mas entende-se aqui que outros métodos de análise sobre a composição mineralógica como a difratometria por raios-X (DRX) e a fluorescência por raios-X podem ser métodos mais eficientes para indicar a composição dos solos.

O peso específico dos sólidos ficou em torno de 2,70 a 2,73 g/cm³, não mostrando variação significativa ao longo do perfil. De acordo com Bowles (1986), as argilas devem variar de 2,68 a 2,75g/cm³; indicando que os valores aqui obtidos são correlatos; as areias devem variar de 2,65 a 2,68 g/cm³; no entanto, o ponto P3 resultou em 2,73 g/cm³ provavelmente apontando um valor maior, devido à presença de silte e argila na composição do solo.

Quadro 15 – Classificação em função do Índice de Plasticidade (IP). Fonte: Burmister (1949).

IP	Descrição
0	Não plástico
1-5	Ligeiramente Plástico
5-10	Plasticidade baixa
10-20	Plasticidade média
20-40	Plasticidade alta
>40	Plasticidade muito alta

O Quadro 16 apresenta os resultados de parâmetros de resistências ao cisalhamento direto, para solos residuais de gnaisses (c' = coesão e ϕ' = ângulo de atrito), encontrados na bibliografia.

Os valores encontrados neste trabalho para coesão e ângulo de atrito não estão diretamente correlacionados com aqueles apontados na bibliografia, conforme se observa no Quadro 5 apresentado anteriormente.

Esses valores podem se encontrar díspares em face da profundidade de amostragem, tensão confinante, o ângulo da foliação (ou bandamento da rocha original) com a tensão cisalhante e, finalmente e mais importante, levando em consideração se o ensaio foi realizado com amostra saturada ou não saturada.

É importante observar que no horizonte A, em ambos os pontos P1 e P4, foi marcante a presença de grãos de quartzo. No horizonte B, comparativamente mais argiloso que o horizonte A, não se

observou mudança significativa na coesão. No entanto, no ponto P3, no horizonte C, observou-se um aumento significativo da coesão. Isso deve ocorrer devido ao ângulo da foliação com a tensão cisalhante. Um outro dado importante para levar em consideração foi a presença de concreções de ferro no horizonte B que pode causar descontinuidades nas curvas dos ensaios de cisalhamento direto.

No Quadro 16, os valores que mais se aproximam deste trabalho são aqueles de Marchi (2005). Além disso, é importante destacar que os resultados de cisalhamento direto deste trabalho foram obtidos sob condição saturada.

Para experimentos em termos de tensão efetiva, a coesão dos solos é inversamente proporcional ao teor de água no solo (Al-Shayea, 2001; Boeni, 2000; Braida, 2004). A diminuição do teor de água aproxima os grãos, aumentando a atração entre estes e, desse modo, aumentando a coesão (Braga, 2014). Essa condição pode refletir os dados apontados no Quadro 17, uma vez que ensaios realizados sob condições saturadas podem apresentar coesão muito baixa, enquanto sob condições não saturadas podem apresentar resultados mais elevados de coesão. Já Boszczowski (2008) trabalhou com ensaio não saturado e encontrou valores de coesão relativamente baixos.

Os resultados de Colli (2020) que são para a mesma localidade dessa pesquisa, incluindo um ponto em comum de trabalho (para o horizonte C ou solo de alteração) num talude específico em Alegre (ES), mostram valores muito maiores para coesão, uma vez que o ensaio realizado foi não saturado.

Cabe destacar ainda que o resultado de coesão e ângulo de atrito do ponto 3, nesse estudo, difere significativamente dos resultados dos pontos P1, P2 e P4; enquanto a coesão é maior, o ângulo de atrito é menor, comparativamente.

Quadro 16 – Parâmetros de resistências ao cisalhamento direto, para solos residuais de gnaisses.

Autor	Local	Coesão, c' (kPa)	Ângulo de atrito, ϕ' (°)
Azambuja et al. (2001)	Porto Alegre (RS)	4 a 8 kPa	20°
Bernades et al. (2005)	Porto Alegre (RS)	10 a 16 kPa	24° a 30°
Boszczowski (2008)		10,25 kPa	24,5°
Colli (2020)	Alegre (ES)	34,6 kPa (solo de alteração – hor. C) 22,16 kPa (solo de transição – hor. B)	26,49° 25,30°
Mantilla et al. (2018)	Belo Horizonte (MG)	5,3 a 9 kPa	4° a 19°
Feijó et al. (2001)	Rio de Janeiro (RJ)	16 kPa	42°
Marchi (2005)	Ponte Nova (MG)	8 kPa (solo A) 0 kPa (solo B) 9 a 16 kPa (solo C)	26° a 27° 27° a 30° 26° a 27°
Lara (2015)	Ponte Nova (MG)	20 kPa	18°
Springer (2006)	Niterói (RJ)	19 kPa	32,8°

Boszczowski (2008) discute como os valores do ângulo entre a superfície de ruptura e a xistosidade pode afetar a coesão e o ângulo de atrito do solo, conforme se vê no Quadro 17. Se amostras submersas, os valores são menores. Enquanto Maccarini (1980) aponta que não há diferenças significativas em coesão e ângulo de atrito devido a xistosidade (Quadro 18).

Quadro 17 – Coesão e ângulo de atrito de um solo residual jovem de gnaiss. Fonte: Costa Filho e de Campos (1991).

Condição de saturação	Direção da estratificação	Coesão, c' (kPa)	Ângulo de atrito, ϕ' (°)
Umidade natural	Paralelo	45,1	34,6
	Perpendicular	38,2	35,8
Submerso	Paralelo	27,3	27,8
	Perpendicular	27,2	29,2

Quadro 18 – Índice de vazios inicial e_0 , coesão c e ângulo de atrito ϕ para um solo residual jovem de gnaiss. Fonte: Maccarini (1980).

Ângulo entre a superfície de ruptura e a xistosidade	e_0	Coesão, c' (kPa)	Ângulo de atrito, ϕ' (°)
0°	1,12	46	31,4
45°	0,94	60	33,0
90°	1,02	59	32,6

Costa Filho e de Campos (1991) informam que há pouca variação no ângulo de atrito, mas na coesão há significativa diferença (Quadro 19). Aleixo (1998) também apresenta uma discussão informando que para um solo residual jovem e um solo residual maduro de gnaiss não há significativa variação quanto a direção de estratificação influenciar coesão e ângulo de atrito (Quadro 20).

Quadro 19 – Coesão e ângulo de atrito de um solo residual jovem de gnaiss. Fonte: Costa Filho e de Campos (1991).

Direção da estratificação	Coesão, c' (kPa)	Ângulo de atrito, ϕ' (°)
Xistosidade paralela	31	28,5
Xistosidade cruzada	10	30,5

No Quadro 20, pode-se observar que a saturação da amostra leva a resultados significativamente menores de coesão e pouco menores de ângulo de atrito.

Quadro 20 – Coesão e ângulo de atrito de um solo residual jovem e um solo residual maduro de gnaiss. Fonte: Aleixo (1998).

Solo residual de gnaiss	Condição de saturação	Direção da estratificação	Coesão, c' (kPa)	Ângulo de atrito, ϕ' (°)
Maduro	Saturado	Ortogonal	71,1	16
		Paralelo	68,1	16,1
Jovem	Saturado	Ortogonal	45,1	12,3
		Paralelo	43,8	12,1
Maduro	Não Saturado	Ortogonal	127,2	20,4
		Paralelo	122,3	20,6
Jovem	Não Saturado	Ortogonal	64,4	19,6
		Paralelo	60,7	19,8

Reis e Vilar (2004) apresentam uma revisão de diversos trabalhos voltados para a caracterização da resistência de solos residuais de gnaisses. Constatou-se que a resistência ao cisalhamento destes

solos é pouco afetada pela direção das tensões, tendo um comportamento isotrópico. Já com relação à deformação, o comportamento tende a ser anisotrópico.

Há variabilidade lateral no perfil dos solos, sendo que, por vezes, podem-se observar matacões e cascalhos quando se está próximo do nível C. Nos topos de serra é comum observar perfis mais profundos e mais maduros, enquanto nos talwegues os horizontes A e B tornam-se menos espessos.

Sobre a colapsibilidade dos solos, pôde-se entender que as amostras dos pontos P1 e P2 quando foram inundadas a 40 kPa, sofreram uma compressão significativa, como se pode observar nos gráficos de deformação vertical ao longo do tempo.

O coeficiente de compressão do ponto P3 apresentou valor superior aos demais pontos. É de esperar que o ponto P3 tenha esse comportamento devido à sua composição e posição no perfil pedológico, sendo um nível de alteração (ou nível C pedológico).

No entanto, o coeficiente de descompressão no ponto P1, onde se observou recalque, é o menor de todos. O que indicou uma má recuperação do terreno, reforçando o conceito de solo colapsível nesse terreno da área, correspondente ao ponto P1. É mesmo possível observar no topo do morro, nas construções mais antigas, fissuras verticais e horizontais acompanhando a estrutura da edificação. Essa situação, faz lembrar a situação do Campo de Aviação, área do ponto P4, onde também existem muitas fissuras nos imóveis.

Os coeficientes de adensamento mostram uma taxa de variação muito próxima àquela das referências. Por exemplo, pode-se comparar com os valores para terra vermelha (Quadro 21) citados por Das (2008); no entanto observou-se que há um aumento nos valores do coeficiente de adensamento antes do colapso nos pontos P1 e P2, o que deve indicar a colapsibilidade do terreno.

Pinto (2006) informa que o coeficiente de permeabilidade dos solos deve variar de 10^{-3} a 10^{-9} m/s, conforme é apresentado no Quadro 22.

Quadro 21 – Comparação do coeficiente de adensamento C_v obtido por vários métodos para carregamento variando de 400 a 800 kN/m². Fonte: Das (2008).

Tipo de solo	C_v (cm ² /s).10 ⁻⁴
Terra vermelha	12,80
Solo marrom	1,36
Solo preto	0,79
Ilita	6,45
Bentonita	0,022
Argila de Chicago	7,41

Quadro 22 – Valores típicos de coeficiente de permeabilidade. Fonte: Pinto (2006).

Tipo de solos	Coefficiente de permeabilidade (m/s)
Argilas	< 10^{-9}
Síltos	10^{-5} a 10^{-9}
Areias argilosas	10^{-7}
Areias finas	10^{-5}
Areias médias	10^{-4}
Areias grossas	10^{-3}

Desse modo, podemos entender que os resultados obtidos em ordem de 10^{-4} a 10^{-3} (m/s), dos pontos P1, P2 e P4 não estão diretamente correlacionados a este padrão indicado por Pinto (2006), mas também há que se considerar as amostras classificadas como argila arenosas contém considerável fração de areias e por isso, os resultados são compatíveis. A amostra do ponto P3, areia siltosa, pode ser considerada uma areia média, conferindo com o valor típico indicado por Pinto (2006).

O Quadro 23 apresenta os resultados de índice de vazios e permeabilidade das amostras indeformadas.

Pode-se observar que o índice de vazios é relativamente próximo para os pontos P1, P2 e P4, o que pode ser considerado satisfatório para as argilas arenosas. Enquanto isso, o índice de vazios é muito menor para o ponto P3, o que pode ter contribuído para o valor de coesão do ponto P3 ser comparativamente muito maior do que os dos outros pontos. Quanto ao coeficiente de permeabilidade os valores parecem não se distanciar significativamente. Ou seja, não há uma relação evidente desses fatores para estes tipos de solos. De modo geral, há sim uma relação: quanto mais arenosos, maior o valor do coeficiente de permeabilidade. No presente estudo, os valores são próximos e os solos estão variando de argila arenosa a areia siltosa (com presença de argila).

Quadro 23 – Comparação de coeficiente de permeabilidade e índice de vazios.

Ponto	Coeficiente de permeabilidade (cm/s)	Índice de vazios (inicial)
P1	$6,84 \cdot 10^{-4}$	1,15873
P2	$1,42 \cdot 10^{-3}$	1,31673
P3	$2,74 \cdot 10^{-4}$	0,95361
P4	$1,74 \cdot 10^{-3}$	1,35704

É importante destacar que se observou o maior valor de recalque para o Ponto P2, que mostrou um significativo deslocamento na curva de vazios quando a amostra foi saturada a 40 kPa. Esta é mais uma evidência que há uma razão para entender que o ponto P2 deve apresentar um solo colapsível.

Cabe ainda destacar que os valores de coeficiente de permeabilidade refletem a composição granulométrica, bem como a classificação CH-MH que mostra solos intermediários entre solos argilosos e solos siltosos, de alta compressibilidade.

6 – CONCLUSÃO

É importante verificar que a formação dos solos está diretamente ligada às condições exógenas (clima, vegetação, relevo) e endógenas do meio (tipos litológicos). Essas condições exógenas são determinantes para a formação dos solos; isto é, a penetração das águas meteóricas no solo, os processos de dilatação e contração devido à variação de temperatura ao longo do tempo, a ação da fauna e da flora interferindo no meio e a forma do relevo conduzindo os agentes intempéricos são fatores predominantes na formação dos solos.

Nesse sentido, a área urbana de Alegre (ES) está de fato inserida no contexto de patamares escalonados regionalmente e mares de morros localmente. Isso traduz a formação de solos mais profundos e laterizados, de modo geral. A área é constituída por vales e cristas. É possível observar as vertentes convexas formadas por solos residuais oriundos de maciços graníticos e gnássicos. Os vales encaixados são formados por depósitos de argilas cinza (gleissolo) preferencialmente. O lençol freático é bastante raso.

Os nitossolos têm características marcantes como cerosidade e presença de concreções ferruginosas, o horizonte B é nítico (apresentando policromia). Foi possível observar os perfis de solos da área e concluir que a classificação mais adequada é nitossolo para a área de estudo (nos taludes analisados).

O estudo geoquímico dos horizontes deve permitir relacionar os tipos de solos com os substratos rochosos. Esse estudo deve ser conduzido em escala de detalhe, de um afloramento. Os parâmetros drenabilidade, forma do relevo, forma das vertentes (aberta/fechada, concava/convexa) e o clima devem influenciar significativamente o processo de formação dos solos. No entanto, o estudo

geoquímico de um perfil de solos, baseado em ensaios de FRX e DRX, deve traduzir a fenomenologia de formação dos solos, considerando o substrato rochoso.

Não foi possível relacionar diretamente os tipos de solos com os tipos litológicos. A ação do intemperismo associada às variáveis clima (temperatura, regime pluviométrico), declividade, morfologia das vertentes é um processo que transforma significativamente os materiais (rochas e solos), não permitindo estabelecer um padrão para essa relação até ao momento.

No contexto geológico, este trabalho sugere um levantamento de campo detalhado dos litotipos na malha urbana para dar continuidade a um estudo detalhado.

No talude adjacente ao ponto P3 uma série de movimentos de massa e um processo de ravinamento instalado indicam um processo de caulinitização avançado. Exatamente no ponto de coleta da amostra indeformada do ponto P3, observou-se uma variação de matizes que podem estar associadas ao desenvolvimento pedológico de níveis diferenciados devido à composição da rocha (granítica). Assim sendo, é necessário considerar além dos processos climáticos, o tipo de substrato rochoso que está sofrendo alteração para chegar a uma interpretação clara sobre a origem do perfil de solos.

Os resultados obtidos em laboratório permitiram uma caracterização geotécnica completa dos horizontes A, B e C, sendo que os horizontes A e B foram caracterizados como argila arenosa e o horizonte C como areia siltosa.

Os pontos P1 e P2 mostraram evidências que indicam um significativo grau de colapsibilidade, o que observado principalmente pelos colapsos nas curvas de adensamento e pelos resultados de recalque (especialmente o ponto P2).

Os dados desse trabalho servem como base de estudos para a implantação de obras na malha urbana de Alegre (ES) e podem ser utilizados pela Secretaria de Obras e Defesa Civil do Município de Alegre (ES).

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1984). NBR 6508 – *Solo - Determinação da massa específica. Método de Ensaio*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 8p.
- ABNT (2016). NBR 6457 - *Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Método de Ensaio*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 12p.
- ABNT (2016). NBR 7180 - *Solo – Determinação do limite de plasticidade. Método de Ensaio*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 7p.
- ABNT (2016). NBR 7181 - *Solo – Análise Granulométrica. Método de Ensaio*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 16p.
- ABNT (2016). NBR 7182 - *Solo – Ensaio de Compactação. Método de Ensaio*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 13p.
- ABNT (2017). NBR 6459 - *Solo – Determinação do limite de liquidez. Método de Ensaio*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 9p.
- ABNT (2020). NBR 16853 - *Solo – Ensaio de Adensamento Unidimensional. Método de Ensaio*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 16p..
- ABNT (2021). NBR 13292: *Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Método de Ensaio*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 13p.
- Ab'Saber, A.N. (1966). *O domínio dos mares de morros no Brasil*. Geomorfologia 2. Instituto de Geografia da Universidade de São Paulo.

- Aleixo, M.S. (1998). *Comportamento tensão-deformação de solos residuais no equipamento triaxial*, 1998. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 110p.
- Almeida, F. F. M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B. B.; Fuck, H. (1977). *Provincias estruturais brasileiras*. Simpósio de Geologia do Nordeste, v. 8, p.363-391.
- Al-Shayea, N. A. (2001). *The combined effect of clay and moisture content on the behavior of remolded unsaturated soils*. Engineering geology, v. 62, n. 4, p. 319-342.
- ASTM D3080 (2004). *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States, 9p.
- Azambuja, E.; Strauss, M.; Silveira, F. G. (2001). *Caso histórico de um sistema de contenção em solo grampeado em Porto Alegre, RS*. In: III Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE), ABMS. Anais... Rio de Janeiro, p. 435-443.
- Bernades, J. A.; Bica, A. V. D.; Bressani, L. A.; Flores, J. A. A.; Gobbi, F.; Azambuja, E. (2005). *Estudo da resistência ao cisalhamento do solo residual de gnaiss na cidade de Porto Alegre*. In: IV Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE), ABMS. Anais... Salvador, p. 173-181.
- Boeni, M. (2000). *Comportamento mecânico de solos escarificados em função do teor de água e pressão de inflação dos pneus do trator*. 2000. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Boszczowski, R. B. (2008). *Avaliação de propriedades mecânicas e hidráulicas de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba, PR* / Roberta Bomfim Boszczowski; orientador: Tácio Mauro P. de Campos – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2008. 577 f. Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.
- Bowles, J. E. (1986). *Engineering Properties of Soils and their Measurements*. 3ª ed. Nova York: McGraw Hill Education.
- Braga, F. V. A. (2014). *Estimativa dos parâmetros da resistência do solo ao cisalhamento através de Pedotransferência*. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, p. 98.
- Braida, J. A. (2004). *Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto*. 2004. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, p. 107.
- Burmister, D. M. (1949). *Principles and Techniques of Soil Identification*. Proceedings of Annual Highway Research Board Meeting. National Research Council. Washington, v. 29, p. 402-434.
- Caputo, H. P. (1988). *Mecânica dos Solos e suas Aplicações*. 6ª. Ed., Vol 1, Rio de Janeiro (RJ), 244p.
- Colli, R. N. (2020). *Caracterização Geológico-Geotécnica de um Perfil de Alteração de Gnaisses do Complexo Paraíba do Sul, em um corte da rodovia ES-181, ALEGRE-ES*. Trabalho de Conclusão de Curso. Alegre, UFES.
- Conciani, W; Soares, M.M.; Crestana, S. (1995). *Geotechnical use of a mini tomography*. In: Proc. 1., Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris. p.447-452.

- Costa Filho, L.M., De Campos, T.M.P. (1991). *Anisotropy of a gneissic residual soil*. In: IX Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vina del Mar, V. 1, p. 51-61.
- Das, B. M. (2008). *Advanced Soil Mechanics*. 3ª ed. Nova York: Taylor & Francis.
- EMBRAPA (1978). *Levantamento de reconhecimentos de solos do estado do Espírito Santo*. SNLCS - Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Rio de Janeiro, 475p. (Boletim Técnico, 45). 1978.
- EMBRAPA (2018). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos / Humberto Gonçalves dos Santos [et al.]*. – 5. ed., rev. e ampl., 356 p. : il., . – Brasília, DF.
- Feijó, R. L.; Erhlich, M. (2001) . *Resultados de Ensaios de Arrancamento em Grampos Injetados em Dois Pontos do Município de Rio de Janeiro*. In: Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encosta, 2001, Rio de Janeiro. III COBRAE. v. 1. p. 517-524.
- Freire, O.. *Solos das regiões tropicais*. Botucatu, FEPAF. 268p. il.2006.
- GEOBASES (2016). *Mapa de Solos do ES* (2016). Disponível em: https://ide.geobases.es.gov.br/layers/geonode:solos_es_2016/metadata_detail.
- Gouvea, L. P. , Medeiros, S. R., Mendes, J. C., Soares, C., Marques, R. A., Melo, M. G. (2020). *Magmatic activity period and estimation of P-T metamorphic conditions of pre-collisional opx-metatonalite from Aracuai-Ribeira orogens boundary, SE Brazil*. Journal of South American Earth Sciences.
- IAC. *Solos do Estado de São Paulo. Nitossolos*. São Paulo: Governo do Estado São Paulo. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/solosp/pdf/Nitossolos.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2021.
- INCAPER – *Instituto capixaba de pesquisa, assistência técnica e extensão rural* – http://cecam.incaper.es.gov.br/index.php?pagina=prec_acumuladoano - Acesso em 20/03/2021.
- Lani, J.L. (1987). *Estratificação de ambientes na bacia do Rio Itapemirim, no Sul do estado do Espírito Santo*. 114p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Lara, R. A. C. (2015). *Estudo de Caso: talude de Ponte Nova*. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Civil, UFSJ, 66p.
- Lepsch, I. F. (2011). *19 Lições de Pedologia*. Oficina dos Textos, SP, 456p.
- Maccarini, M. (1980). *Ensaio Triaxiais e de Cisalhamento Direto no Solo Residual Gnaissico jovem do Campo Experimental da PUC-Rio*. Gávea PUC-Rio, Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado.
- Machado, S. L., Machado, M. F. (1997). *Mecânica dos solos II: Conceitos introdutórios*. Apostila de Mecânica dos Solos, UFBA.
- Mantilla, J. N. R., Carrasco, E. V. M. (2018). *Parâmetros geotécnicos de solo residual de gnaiss da cidade de Belo Horizonte, Brasil, por meio de ensaios cone penetration test (cpt) e de laboratório*. Proceedings of the 1st Iberic Conference on Theoretical and Experimental Mechanics and Materials / 11th National Congress on Experimental Mechanics. Porto/Portugal 4-7 November 2018. Ed. J.F. Silva Gomes. INEGI/FEUP (2018); ISBN: 978-989-20-8771-9; pp. 777-780.

- Marchi, A. O. (2005). *Contribuição ao estudo de taludes em solos residuais. Estudo de caso: Ponte Nova-MG*. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, p. 102.
- Nascimento, M.C. (2004). *Mapeamento das áreas de preservação permanente e dos conflitos de uso da terra na bacia hidrográfica do rio Alegre, ES*. Viçosa – MG. UFV (Dissertação de mestrado).
- Nóbrega, N.E.F.; Silva, J.G.F.; Ramos, H.E.A.; Pagung, F.S.(2008). *Análise da distribuição sazonal e espacial da precipitação no sul do estado do Espírito Santo*. XV Congresso Brasileiro de Meteorologia – São Paulo – SP.
- Pacheco, A. A. (2011). *Pedogênese e distribuição espacial dos solos da bacia hidrográfica do rio Alegre-ES* / Anderson Almeida Pacheco. Dissertação de mestrado, 104f..UFV, Viçosa, MG.
- Pinto, C. S. (2006). *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas*. Oficina dos Textos, São Paulo (SP). 363p.
- Reis, R. M., Vilar, O. M. (2004). *Resistência ao cisalhamento de dois solos residuais de gnaiss não saturado*. In: 5º. Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados. São Carlos, V.1, p.109-114.
- RADAMBRASIL (1983). *Levantamento de recursos naturais*. Volume 32, Folha SF.23 - Rio de Janeiro e SF.24 - Vitória. Rio de Janeiro, vol. 32, 767 p.
- Sardou Filho, R; Matos, G. M. M.; Mendes, V. A.; Iza, E. R. H. F. (2013). *Atlas de Rochas Ornamentais do Estado do Espírito Santo. Projeto Geologia e Recursos Minerais do Espírito Santo*. il., CPRM.
- Springer, F. O. (2006). *Ensaio de arrancamento de grampos em solo residual de gnaiss*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 310.
- Vieira, V. S. (1997). *Cachoeiro de Itapemirim folha SF.24-V-A: estados do Espírito Santo, Rio de Janeiro e Minas Gerais*. Escala 1:250.000. Brasília: CPRM, 99 p., il. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB.
- Vieira, V. S. ; Silva, M.A. ; Côrrea, T.R. (2018). *Mapa geológico do estado do Espírito Santo*. Belo Horizonte: CPRM. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/15564?show=full>.