

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/617

Desempenho de Quatro Dispersantes Químicos na Análise Granulométrica da Fração Fina dos Solos Tropicais Lateríticos

Whilson Marques Mendonça

Técnico de laboratório, Universidade Federal de Ouro Preto -UFOP, Ouro Preto, Brasil, whilson@ufop.edu.br

Mariana Queiroz Pinho

Técnica de laboratório, UFOP, Brasil, mariana.pinho@ufop.edu.br

Diogo Reis Stavaux Baudson

Técnico de laboratório, UFOP, Ouro Preto, Brasil, diogo.baudson@ufop.edu.br

Karina Furst Ferreira

Graduanda em Engenharia Urbana, UFOP, Ouro Preto, Brasil, karinna.ferreira@aluno.ufop.edu.br

Lucas Deleon Ferreira

Professor Adjunto, UFOP, Ouro Preto, Brasil, lucas@ufop.edu.br

RESUMO: Os solos tropicais possuem peculiaridades típicas da sua pedogênese, incluindo classes que apresentam perfis de solo residuais altamente intemperizados, caracterizados pela concentração de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, além de argilas não expansivas do tipo 1:1. A análise granulométrica da fração fina dos solos no Brasil, para fins de geotecnia, é comumente obtida pela velocidade de sedimentação das partículas em uma solução aquosa utilizando um agente químico dispersante que promove a defloculação das partículas de solo aglutinadas por meio da repulsão dos íons. O hexametáfosfato de sódio é o agente dispersante indicado pela norma brasileira para análise granulométrica dos solos por sedimentação dos grãos - NBR 7181 (ABNT, 2016), sendo o mesmo agente recomendado pela norma americana D7928 (ASTM, 2021), embora vários estudos indiquem que esse defloculante não é o mais eficiente para solos tropicais com alto grau de intemperização. O objetivo desse trabalho foi comparar as porcentagens das frações silte e argila obtidas pelo método da sedimentação utilizando quatro agentes químicos. Os dispersantes utilizados foram o hexametáfosfato de sódio, o trifosfato de sódio, o pirofosfato de sódio e o hidróxido de sódio. Para realização das análises, dez solos tropicais foram selecionados de diferentes localidades de Minas Gerais. De forma complementar, foi realizada a análise granulométrica por difração a laser para cinco amostras, utilizando os mesmos defloculantes adotados na análise por sedimentação. O pirofosfato de sódio mostrou-se o defloculante mais eficiente na dispersão dos solos finos, seguido pelo hexametáfosfato de sódio. O ensaio de granulometria a laser apresentou significativa variação dos resultados em relação ao processo de sedimentação para todos os defloculantes.

PALAVRAS-CHAVE: Agente Dispersante, Sedimentação, Análise Granulométrica, Solo Tropical

ABSTRACT: The tropical soils exhibit typical characteristics of their pedogenesis, including the presence of highly weathered residual soils, characterized by the concentration of iron and aluminum oxides and hydroxides, as well as non-expansive 1:1 type clays. Granulometric analysis of the fine fraction of soils in Brazil for geotechnical purposes is commonly obtained by the sedimentation rate of particles in an aqueous solution, which utilizes a chemical dispersing agent that promotes the deflocculation of soil particles aggregated through ion repulsion. Sodium hexametaphosphate is the dispersing agent indicated by the Brazilian standard for sedimentation grain size analysis, and it is also recommended by the American standard D7928 (ASTM). However, several studies indicate that this deflocculant is not the most efficient for tropical soils with a high degree of weathering. The aim of this study was to compare the percentages of silt and clay fractions obtained by the sedimentation method using four chemical agents. The dispersants used were sodium hexametaphosphate, sodium tripolyphosphate, sodium pyrophosphate, and sodium hydroxide. For the analyses, ten tropical soils were selected from different locations in Minas Gerais. Additionally, laser

diffraction granulometric analysis was performed for five soils with the same deflocculants used in the sedimentation analysis. Sodium pyrophosphate proved to be the most efficient deflocculant in dispersing fine soils, followed by sodium hexametaphosphate. The laser granulometry test showed significant variation in results compared to the sedimentation process for all dispersants.

KEYWORDS: Dispersing Agent, Hydrometer Analysis, Grain Sizes Analysis, Tropical Soil.

1 INTRODUÇÃO

Os solos tropicais lateríticos são conhecidos não só por se localizarem nas regiões tropicais, mas também por apresentarem propriedades físico-químicas e comportamento mecânico muito distintos da mecânica dos solos clássica (Carvalho et al., 2015). Decorrentes da evolução pedogenética de solos residuais superficiais em regiões tropicais úmidas, os solos lateríticos sofrem elevado intemperismo químico, em consequência das altas temperaturas e intenso regime de chuvas aos quais estão submetidos (Santos, 2006; Reschetti Jr, 2008). Em razão das diversas condições de formação desses solos, associadas a processos pedológicos e geológicos distintos, torna-se imprescindível o conhecimento de suas características e propriedades nos estudos geotécnicos.

A fração argilosa destes solos é marcada pela presença de argilominerais do grupo caulinita (de baixa atividade coloidal) e de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Estes constituintes têm a capacidade de conferirem uma coloração característica, como o vermelho e/ou amarelo, além de agirem como agentes cimentantes entre as partículas, desempenhando importante papel na formação dos agregados (torrões) e concreções lateríticas. Em algumas situações, os agregados podem apresentar dimensões muito pequenas, exibindo argilominerais aglutinados em formas de “nuvens” ou “pipocas” (Nogami e Villibor, 1995).

Análises de microscopia eletrônica de varredura, destinadas a avaliar a microestrutura desses solos, mostraram que as partículas individuais de argila não são, no geral, distinguíveis. Quando são, aparecem com pouca nitidez (Nogami e Villibor, 1995). Considerando as particularidades desses solos, especialmente relacionadas às partículas finas, ensaios considerados triviais nos laboratórios de mecânica dos solos, como a análise granulométrica, demandam maior cautela na escolha de algumas metodologias, bem como na análise e interpretação dos resultados.

Os ensaios granulométricos são fundamentais para caracterização e classificação dos solos, possibilitando determinar a distribuição do tamanho das partículas e a compreensão de propriedades físicas importantes, sendo constituídos das etapas de peneiramento (fração grossa) e sedimentação (fração fina). As análises via sedimentação podem ser executadas pelo método da pipeta ou através de leituras em um densímetro graduado (Arora, 2003). O princípio físico do ensaio é baseado na lei de Stokes, na qual a velocidade de queda dos grãos é diretamente proporcional ao quadrado do diâmetro das partículas. Entretanto, devido à presença de cargas elétricas na superfície das argilas, há predisposição para formação de flocos, tornando necessária a adição de agentes dispersivos que promova a individualização dos grãos (Ranjan e Rao, 1991). No Brasil, a metodologia utilizada para o ensaio de granulometria é padronizada pela NBR 7181 (ABNT, 2016), que sugere a utilização do agente químico hexametáfosfato de sódio dissolvido em água destilada e tamponado com carbonato de sódio para separação das partículas.

Existem ao menos três normativas internacionais que utilizam o mesmo defloculante adotado na norma brasileira, porém, em diferentes concentrações: BS 1377/2 (BS, 1990), IS 2720/4 (IS, 1985), e *International Soil Reference and Information Center* (ISRIC, 2002). Além do hexametáfosfato de sódio, outros agentes dispersivos foram avaliados em diversos estudos da literatura, com destaque para o silicato de sódio, oxalato de sódio, pirofosfato de sódio e o tetrapirofosfato de sódio (Lambe, 1951; TMH1, 1986; Schuurman & Goedewaagen, 1971; Yoo & Boyd, 1994; Kaur e Fanourakis, 2016).

Em relação aos estudos nacionais, destacam-se os trabalhos de Sousa et al. (2009) e Rodrigues et al. (2011), que comparam diferentes dispersantes químicos e suas combinações em solos tropicais, sendo eles: hidróxido de sódio, hexametáfosfato de sódio e carbonato de sódio, ácido clorídrico e hidróxido de sódio e hidróxido de lítio. Segundo Donagemma et al. (2019), o dispersante mais indicado para análises granulométricas em solos brasileiros tem sido o hidróxido de sódio. No entanto, para solos com pH mais elevado (> 6,0), devido à presença de cátions floculantes como o Ca^{2+} e Mg^{2+} , recomenda-se o hexametáfosfato de sódio.

Diante das dificuldades inerentes à determinação textural do solo, principalmente para fração fina, técnicas como a difração a laser (granulometria a laser), têm se apresentado como uma alternativa para o ensaio, sendo amplamente discutida por diversos pesquisadores (Eshel et al., 2004; Falheiro et al., 2011; Dias, 2014; Capelli, 2016). Segundo estes autores, o método apresenta vantagens em relação à sedimentação, como a alta repetibilidade, necessidade de pouca quantidade de amostra, rapidez nas análises e maior eficiência para avaliação de partículas finas ($< 2 \mu\text{m}$). A metodologia é baseada no princípio da absorção e difração da luz do laser na amostra, sendo a concepção da técnica fundamentada pelos modelos óticos de Fraunhofer e Mie, devido ao refinamento que considera os fenômenos de absorção, refração e reflexão do laser nas partículas do solo (Pinheiro et al. 2018).

O objetivo deste estudo consistiu na investigação do efeito de quatro agentes dispersantes químicos no ensaio de sedimentação em dez solos tropicais lateríticos. Visando comparar os resultados da sedimentação com uma metodologia diferente para determinação do diâmetro das partículas, também foram realizados ensaios de granulometria a laser.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Solos

As amostras de solo utilizadas nessa pesquisa fazem parte do banco de amostras do Centro Tecnológico de Geotecnia Aplicada da Escola de Minas (Universidade Federal de Ouro Preto), onde foram realizados todos os experimentos dessa pesquisa. Os solos selecionados de pesquisas anteriores foram todos coletados no estado de Minas Gerais e são de comportamento tipicamente laterítico, sendo identificados como S1 a S10. Resultados anteriores apresentaram diferenças significativas nas análises de sedimentação desses solos, quando utilizado (ou não) o defloculante químico, evidenciando a presença de partículas aglomeradas.

2.2 Agentes químicos defloculantes

A escolha dos agentes químicos defloculantes e suas concentrações em solução aquosa foi baseada em indicações de estudos anteriores consultados na bibliografia. Wintermyer e Kinter (1995) utilizaram 19 diferentes agentes químicos em solução padrão 0,4N (normalidade) na análise por sedimentação de 16 tipos de solos, incluindo um solo laterítico de Porto Rico. De acordo com os autores, o fosfato trissódico (Na_3PO_4) e o pirofosfato de sódio ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) foram os mais efetivos para o solo laterítico. Para Borja et al. (2015), o hidróxido de sódio (NaOH) foi o dispersante mais eficiente em análises comparativas realizadas utilizando nove amostras de solo. A mistura de hexametáfosfato de sódio ($[\text{NaPO}_3]_6$) com carbonato de sódio (Na_2CO_3) – calgon – e o pirofosfato de sódio mostraram-se mais efetivos nos estudos realizados por Kaur e Farnourakis (2016).

A partir dos resultados obtidos de estudos anteriores, nas recomendações de norma e em manuais da Embrapa (Sá, 2021) foram escolhidos quatro dispersantes químicos para as análises de sedimentação dos solos tropicais. A concentração química em solução aquosa foi fixada com normalidade igual a 0,4N, ou seja, uma concentração baseada em íons equivalentes do soluto, à exceção do hexametáfosfato de sódio, sendo utilizada a concentração recomendada pela NBR 7181 (ABNT, 2016). A Tabela 1 apresenta a descrição dos agentes e a concentração das soluções utilizadas nessa pesquisa.

Tabela 1. Descrição e concentração dos agentes dispersantes

Nome	Fórmula Química	Concentração molar (mol/L)	Concentração em massa (g/L)
Hexametáfosfato de sódio ¹	$[\text{Na}_6(\text{PO}_3)]_6$	0,07	45,70
Fosfato trissódico dodecahidratado	$\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	0,13	50,68
Pirofosfato de sódio	$\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$	0,10	26,61
Hidróxido de Sódio	NaOH	0,40	16,00

¹ Carbonato de sódio (Na_2CO_3) foi acrescentado até que o pH da solução atingisse 9,0.

2.3 Procedimentos de Ensaio

Os ensaios de sedimentação foram executados conforme os procedimentos descritos na NBR 7181 (ABNT, 2016). Previamente à execução, foi realizada a calibração da altura de queda das partículas na proveta, função da leitura do densímetro e do tipo de defloculante utilizado, sendo gerada para cada defloculante uma curva de calibração, modelada por uma função polinomial de 3º grau. A altura de ascensão do menisco também foi utilizada na correção das leituras efetuadas.

Para cada amostra seca ao ar, destorroada e passada na peneira #10 (2 mm), foram separadas quatro frações de 70 g ($\pm 0,1$) que foram adicionadas a 125 mL das soluções com o defloculante. Após um período de 12 h, o material foi disperso a 10.000 rpm durante 15 min. Posteriormente, o material foi transferido para uma proveta com água destilada (completando-se o volume até 1.000 mL) e sendo agitado por um minuto (Figura 1). As leituras de densidade relativa e temperatura foram realizadas conforme os intervalos sugeridos pela norma brasileira NBR 7181 (ABNT, 2016).



Figura 1. Ensaio de sedimentação em andamento

Os dados gerados durante os ensaios foram tratados em planilha eletrônica, sendo realizadas as devidas correções de leituras para a geração das curvas granulométricas. Apesar de terem sido realizadas as etapas de peneiramento grosso e fino dos materiais, os resultados serão apresentados apenas em termos da fração correspondente à sedimentação, ou seja, menor que 0,075 mm (faixa granulométrica que sofre efeito direto da ação dos defloculantes).

Os ensaios comparativos realizados via difração a laser foram executados com cinco amostras de solos, para cada um dos quatro defloculantes. Nesse procedimento, 1,0 mL da solução de defloculante foi adicionado a 0,5 g de solo. A quantidade de solo adotada foi a que mostrou mais adequada para atingir a taxa de obscurecimento ideal indicada pelo software do aparelho. Para circulação do material por via úmida nas lentes de difração do laser foi utilizado uma taxa de 3000 rpm na bomba de água Hydro 2000 MU. O granulômetro a laser utilizado foi o modelo Mastersizer 2000, da Malvern Panalytical. O tratamento dos dados para obtenção dos diâmetros e porcentagem em volume das partículas foi realizado segundo o modelo óptico de Franhoufer.

O parâmetro adotado para avaliar a eficiência dos defloculantes utilizados nessa pesquisa foi a porcentagem passante dos materiais em três diferentes diâmetros: 0,002 mm (fração argila), 0,06 mm (fração silte) e 0,075 mm (fração fina). Dessa forma, quanto maior a porcentagem de material passante nos respectivos diâmetros, melhor a dispersão das partículas, o que pode estar associado a uma maior eficiência do defloculante.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ensaios de sedimentação foram executados com êxito utilizando as concentrações propostas inicialmente para cada defloculante, ou seja, não ocorreu reação adversa que levasse à floculação visível das partículas. Entretanto, os solos dispersos com hidróxido de sódio apresentaram duas peculiaridades após a dispersão mecânica. As soluções com esse defloculante, após serem vertidas na proveta, formaram uma quantidade de espuma que impossibilitava a leitura no densímetro, sendo necessário a adição de álcool isopropílico em quantidade inferior a 1 mL para eliminar a espuma formada. Além da espuma, as leituras

iniciais de temperatura nas soluções com o hidróxido de sódio foram, em média, um grau Celsius acima das demais. Após o período de uma a duas horas, a temperatura se equalizava com as outras soluções. Os outros defloculantes não apresentaram comportamento atípico.

Os valores de densidade relativa e temperatura registrados durante o processo de sedimentação de todos os 40 ensaios foram utilizados para elaborar as curvas granulométricas da fração fina dos solos, conforme a Lei de Stokes expressas nas fórmulas que constam na NBR 7181 (ABNT, 2016). A Tabela 2 apresenta os resultados sintetizados das curvas granulométricas geradas para os dez solos, exibindo a porcentagem de material menor que os diâmetros 0,002 mm (argila), 0,06 mm e 0,075 mm.

Tabela 2: Porcentagem passante por fração granulométrica para cada defloculante no ensaio de sedimentação

Identificação	Fração (mm)	Porcentagem passante (%)				Média	Desvio Padrão
		[Na(PO ₃)] ₆	Na ₃ PO ₄	Na ₄ P ₂ O ₇	NaOH		
S1	0,002	25,83	13,25	29,28	22,37	22,68	6,89
	0,06	29,95	28,28	35,36	26,47	30,02	3,84
	0,075	31,08	29,44	36,33	27,35	31,05	3,84
S2	0,002	52,04	62,89	71,05	56,75	60,68	8,22
	0,06	73,46	77,30	86,27	82,18	79,80	5,60
	0,075	74,18	77,66	86,64	82,91	80,35	5,52
S3	0,002	38,68	35,77	42,92	8,42	31,45	15,63
	0,06	80,64	77,83	85,78	78,82	80,77	3,54
	0,075	63,28	72,60	71,49	76,52	70,97	5,56
S4	0,002	56,93	55,85	65,04	50,76	57,15	5,91
	0,06	71,48	68,51	75,98	68,44	71,10	3,55
	0,075	76,61	67,53	76,23	64,08	71,11	6,29
S5	0,002	65,30	63,56	74,59	64,14	66,90	5,18
	0,06	77,69	73,77	83,74	73,99	77,30	4,66
	0,075	86,33	83,87	88,35	80,89	84,86	3,22
S6	0,002	39,32	51,27	50,24	42,86	45,92	5,78
	0,06	61,09	71,16	69,30	74,27	68,96	5,63
	0,075	72,23	68,89	76,36	68,83	71,58	3,56
S7	0,002	47,19	13,97	70,29	23,29	38,69	25,29
	0,06	84,58	82,81	87,42	80,35	83,79	2,98
	0,075	81,40	78,97	87,29	80,34	82,00	3,66
S8	0,002	71,23	64,19	76,50	60,97	68,22	6,99
	0,06	96,56	85,66	95,04	85,08	90,59	6,06
	0,075	79,21	75,23	85,61	74,35	78,60	5,13
S9	0,002	62,88	53,25	66,54	44,58	56,81	9,90
	0,06	75,55	66,37	75,12	63,17	70,05	6,24
	0,075	98,39	87,77	98,04	87,35	92,89	6,16
S10	0,002	18,93	17,87	24,66	16,55	19,50	3,57
	0,06	51,63	49,96	57,00	47,15	51,44	4,15
	0,075	53,40	51,49	58,94	47,71	52,89	4,68

A média da porcentagem de argila dos solos analisados variou de aproximadamente 20% (S1 e S10) até 70% (S5 e S8), entretanto, houve uma significativa dispersão nos resultados apresentados pelos diferentes defloculantes. A fração 0,002 mm apresentou maior desvio padrão entre os defloculantes para oito dos dez

solos estudados. Dessa forma, a alteração do tipo de defloculante é mais sensível nos resultados das partículas mais finas (argila). Já nas porcentagens referentes às frações 0,06 e 0,075 mm, os desvios registrados foram menores, na faixa de 3 a 7%.

Na determinação da fração argila, o $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ apresentou maiores porcentagens para nove das dez amostras de solo analisadas. Desempenho semelhante foi registrado nas frações 0,06 e 0,075 mm. A maior porcentagem de finos pode significar uma dispersão mais eficiente das soluções com esse tipo de defloculante. O $[\text{Na}(\text{PO}_3)_6]$ e o Na_3PO_4 apresentaram desempenho intermediários nas análises, enquanto o NaOH apresentou o pior desempenho, dentre os defloculantes analisados. Para alguns solos, como o S3, após algumas horas de ensaio, a solução com NaOH apresentou turbidez visivelmente menor em relação às demais, refletindo porcentagens de argila significativamente menores.

Para solos mais argilosos, a variação no comportamento das curvas granulométricas foi mais acentuada em relação aos solos mais arenosos. Os gráficos da Figura 2 mostram as curvas granulométricas para solos de textura argilosa e arenosa. O solo S1 (arenoso) apresentou curvas mais próximas, enquanto o S2 (argiloso) exibiu maior espaçamento entre as curvas e conseqüente maior variação na porcentagem de finos. Para ambos os solos, a curva com o Na_3PO_4 teve comportamento atípico em relação às demais. Nos solos S9 e S10 essa variação é ainda mais nítida, sendo as curvas do solo S10 (arenoso) com comportamento padronizado, enquanto as curvas do solo S9 (argiloso) apresentaram maior variação, especialmente no trecho final que representa as partículas mais finas do solo.

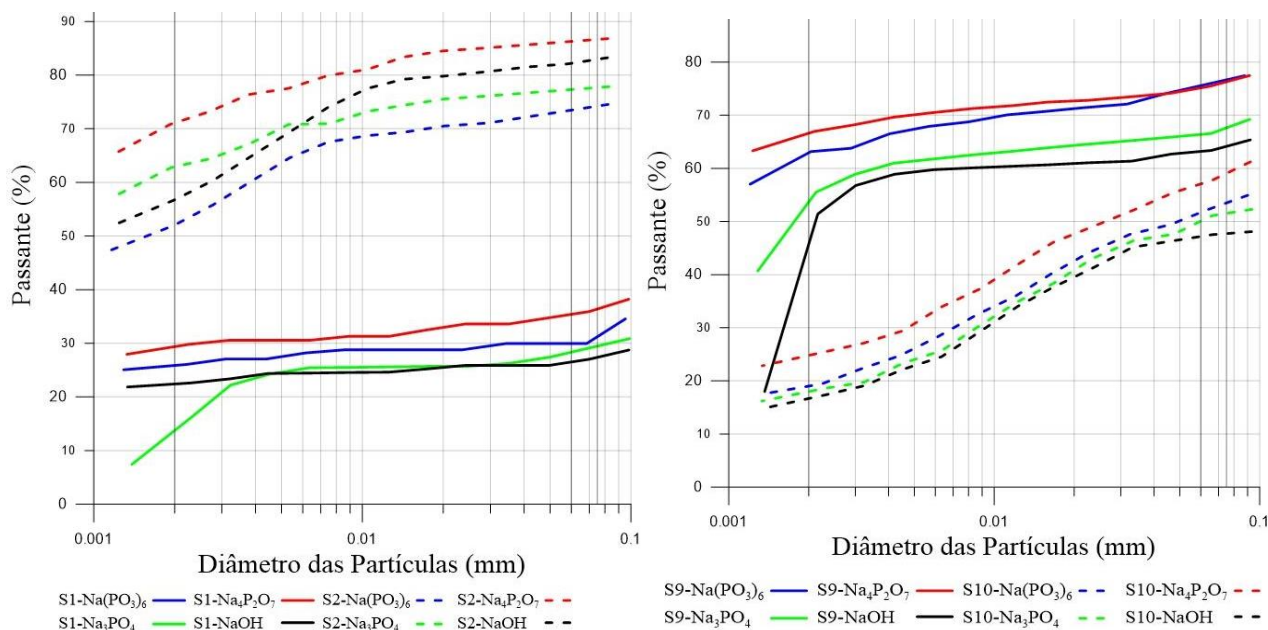


Figura 2. Curvas granulométricas dos solos S1 e S2 (esquerda) e S9 e S10 (direita)

Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos na granulometria a laser. Neste ensaio, foram ensaiadas cinco amostras: S1, S4, S5, S6 e S9. A porcentagem de argila variou de 6% (S6), passando pela faixa de 13% (S1 e S4) e chegando a 23% (S5 e S9). Esta mesma fração granulométrica apresentou menor desvio padrão entre os defloculantes para quatro dos cinco solos estudados, resultado oposto ao ensaio de sedimentação, que apresentou maior desvio padrão dos resultados para esta faixa granulométrica.

Comparando os dois ensaios, percebe-se que amostras apresentaram maior porcentagem de argila nos ensaios de sedimentação. Apenas a amostra S1 com o defloculante Na_3PO_4 apresentou porcentagem maior de argila no granulômetro a laser. Desta forma, percebe-se que o uso do equipamento não foi tão eficiente quanto a sedimentação para a fração 0,002 mm. Já em relação a fração de 0,06 mm, as amostras S5 e S6 apresentaram valores superiores para todos os defloculantes no ensaio de granulometria a laser, quando comparada com a sedimentação. Este mesmo comportamento foi observado na fração de 0,075 mm.

Na determinação da fração argila (0,002 mm), o $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ apresentou maior porcentagem em três dos cinco solos analisados. Já nas frações de 0,06 e 0,075 mm, o NaOH apresentou três solos com maior porcentagem. O defloculante $[\text{Na}(\text{PO}_3)_6]$ não apresentou nenhum valor superior em nenhuma fração dos solos analisados.

Tabela 3: Porcentagem passante por fração granulométrica no ensaio de granulometria a laser

Identificação	Fração (mm)	Porcentagem passante (%)				Média	Desvio Padrão
		[Na(PO ₃)] ₆	Na ₃ PO ₄	Na ₄ P ₂ O ₇	NaOH		
S1	0,002	11,83	15,46	13,99	10,01	12,82	2,40
	0,06	29,05	47,55	34,59	55,33	41,63	11,98
	0,075	30,88	49,23	37,42	56,64	43,54	11,57
S4	0,002	16,44	16,14	17,69	5,32	13,90	5,76
	0,06	88,38	89,26	86,77	55,18	79,90	16,51
	0,075	89,52	90,53	87,79	62,79	82,66	13,29
S5	0,002	25,72	25,34	25,73	13,79	22,65	5,91
	0,06	86,84	86,14	86,87	89,14	87,25	1,31
	0,075	88,75	87,78	89,11	91,23	89,22	1,45
S6	0,002	5,46	6,14	5,27	7,7	6,14	1,10
	0,06	33,61	34,6	32,31	40,86	35,35	3,79
	0,075	38,4	39,28	36,93	46,11	40,18	4,07
S9	0,002	26,1	26,05	36,77	3,65	23,14	13,94
	0,06	76,64	85,25	86,57	37,87	71,58	22,90
	0,075	78,36	86,64	87,45	44,47	74,23	20,26

4 CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser inferidas da pesquisa realizada:

- A determinação da porcentagem de argila dos solos é altamente sensível quanto ao tipo de defloculante utilizado;
- O defloculante pirofosfato de sódio apresentou o melhor desempenho quanto à dispersão dos materiais estudados, seguido pelo hexametáfosfato de sódio e fosfato trissódico, respectivamente. O bom desempenho do pirofosfato de sódio corrobora os resultados já relatados anteriormente por Wintermyer e Kinter (1955) e Kaur & Fanourakis (2016);
- O hidróxido de sódio apresentou maior variação nos resultados e, no geral, mostrou a pior dispersão;
- O método de análise por difração a laser pelo modelo de Franhoufer não demonstrou bons resultados quando comparado com a análise por sedimentação, subestimando a porcentagem de argila para todos os solos analisados.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradecemos o apoio institucional da Universidade Federal de Ouro Preto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arora, K.R. (2003) *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Standard Publishers Distributors, New Delhi.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7181 (2016) *Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- British Standard - BS. (1990). *Methods of test for soils for civil engineering purposes*. BS Designation 1377 Part 2, BSI, London.
- Capelli, R.B. (2016) *Comparação de métodos na análise granulométrica de rejeitos de mineração*. Monografia de Graduação. 31f. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto.

- Carvalho, J. C. et al. (2015) *Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.
- Dias, K.A. (2014) *High-resolution methodology for particle size analysis of naturally occurring sand size sediment through laser diffractometry with application to sediment cores: kismet, fire island, New York* Dissertação de Mestrado. 82f. Stony Brook University.
- Donagemma, G.K. et al. (2019) *Granulometria: análise convencional e teste de dispersantes químicos em solos da IX RCC*.
- Eshel, G., Levy, G.J., Mingelgrin, U., Singer, M.J. (2004) Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle-size distribution analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 68(3), 736-743.
- Falheiro, P.F., Abuchacra, R.C., Pacheco, C.E.P., Figueiredo, A.G., Vasconcelos, S.C. (2011) *Comparação de diferentes métodos de preparação de amostras de sedimento para granulometria a laser*. XIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário ABEQUA, Armação de Búzios-RJ.
- Indian Standard - IS. (1985) *Methods of tests for soils*. IS Designation 2720 Part IV, BIS, New Delhi.
- International Soil Reference and Information Centre - ISRIC. (2002) *Procedures for soil analysis*. Technical paper 9, Netherlands.
- Kaur, A., Fanourakis, G. C. (2016) The effect of type, concentration and volume of dispersing agent on the magnitude of the clay content determined by the hydrometer analysis. *Journal of South African Institution of Civil Engineers*.
- Lambe, T. W. (1951) *Soil testing for engineers*, New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Nogami, J. S., Villibor, D. F. (1995) *Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos*. Editora Villibor, São Paulo, SP.
- Pinheiro, P. O., Arantes, L. A., Pereira, E. L., Ferreira, L. D., Gomes, R. C. (2018) Proposta de utilização do granulômetro a laser para a determinação da distribuição granulométrica de rejeitos finos de mineração. In *XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador*.
- Ranjan, G., Rao, A.S.R. (1991). *Basic and applied soil mechanics*, Wiley Eastern Limited, New Delhi.
- Reschetti Junior P. R. (2008) *Avaliação do Comportamento Mecânico de um Solo Arenoso Fino Laterítico Reforçado com Fibras para Uso em Pavimentação*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.
- Rodrigues, C., Oliveira, V. Á. D., Silveira, P. M. D., & Santos, G. G. (2011) Chemical dispersants and pre-treatments to determine clay in soils with different mineralogy. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35, 1589-1596.
- Sá, M. A. C. (2021) Dispersão do solo para análise granulométrica: uma breve revisão. DF: *Embrapa Cerrados*. 25p.
- Santos, E. F. (2006) *Estudo Comparativo de Diferentes Sistemas de Classificações Geotécnicas Aplicadas aos Solos Tropicais*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.
- Schuurman, J. J., Goedewaagen, M. A. J. (1971) *Methods for the examination of root systems and roots*. Wageningen, The Netherlands: Pudoc.
- Sousa N, E. L. D., Figueiredo, L. H. A., Beutler, A. N. (2009) Dispersão da fração argila de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso e dispersantes. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, 33, 723-728.
- TMH1 (1986) *Standard methods of testing road construction materials*. Method A6. Pretoria: National Transport Commission.
- Wintermyer, A. M., Kinter, E. B. (1955). Dispersing agents for particle-size analysis of soils. *Highway Research Board Bulletin*, (95).
- Yoo, K. H., Boyd, C. E. (1994) *Hydrology and water supply for pond aquaculture*, USA: Springer.