

EFEITO DO ZINCO E COBRE NA DESAGREGAÇÃO DE SEIS SOLOS DO DISTRITO FEDERAL, BRASIL

Effect of zinc and copper in the disaggregation of six soils of the Federal District, Brazil

Newton Moreira de Souza*

Maria Eugenia Gimenez Boscov**

Cláudia Marcia Coutinho Gurjão***

RESUMO – O efeito desagregador de lixiviados gerados em aterros de resíduos sobre as partículas sólidas de *liners* de solo compactado, com consequente alteração das propriedades mecânicas e hidráulicas da barreira mineral, é ainda mais preocupante no caso de solos tropicais lateríticos, nos quais os argilo-minerais estão aglomerados em concreções cimentadas por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. A agregação é geralmente estudada com base no teor de argila do solo obtido por ensaios com e sem agentes desagregadores, químicos e/ou mecânicos. Este trabalho apresenta o comportamento à desagregação química por hexametáfosfato de sódio e soluções monoespécies de zinco e cobre (50 a 800 mg/L) e à desagregação física por ultrassom de seis solos do Distrito Federal, Brasil, representativos de seis classes da Classificação MCT (Miniatura, Compactação, Tropical) de solos tropicais. O zinco e o cobre causaram desagregação dos solos estudados, com exceção dos solos NA e NA', que pouco são afetados por possuírem pequena quantidade de argila. O efeito da desagregação provocada por esses metais é mais notável no solo NS'. O cobre causa maior desagregação quando comparado com o zinco. Por outro lado, os dois metais promoveram um aumento da resistência à ação desagregadora do ultrassom nos solos estudados, à exceção do solo NS'. Esse aumento foi maior para os solos contaminados com zinco. Assim se pode dizer que soluções de cobre podem causar maior dano que as de zinco a um *liner* de solo compactado.

SYNOPSIS – The disaggregation effect of leachate from waste disposal sites on the solids of clay liners, with consequent alteration of mechanical and hydraulic properties, may be significant in lateritic tropical soils, in which clay-minerals are agglomerated and cemented by iron and aluminum oxides. Aggregation is generally measured by comparison between clay content valued in laboratory tests carried out with and without a chemical and/or mechanical disaggregating agent. This paper presents the behavior to chemical disaggregation by sodium hexametaphosphate and zinc and copper solutions (50 to 800 mg/L), and to physical disaggregation of six soils of the Federal District, Brazil, representing six classes of MCT (Miniature, Compacted, Tropical) classification for tropical soils. Zinc and copper caused chemical disaggregation of the investigated soils (copper more than zinc), on the other hand they promoted resistance against the disaggregation caused by ultrasound (zinc more than copper). NA and NA' soils were little affected by the disaggregation agents, inasmuch as their clay content is very low. NS' was the most affected soil by chemical disaggregation, and the least sensitive to improvement of resistance against disaggregation by ultrasound. Results indicate that copper solutions may cause more damage to clay liners than zinc solutions.

PALAVRAS CHAVE – Desagregação, cobre, zinco, solo laterítico.

* Professor Associado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.

E-mail: nmsouza@unb.br

** Professor Titular, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Universidade de São Paulo.

E-mail: meboscov@usp.br

*** Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.

E-mail: cgurjao@unb.br

1 – INTRODUÇÃO

Uma das preocupações no comportamento de *liners* (revestimentos impermeabilizantes de fundo de solo compactado) em locais de disposição de resíduos é o efeito desagregador que soluções produzidas nessa massa podem causar nas partículas sólidas do solo utilizado, com consequente alteração das suas propriedades mecânicas e hidráulicas (Quigley *et al.*, 1988; Shackelford *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2005; Frempong e Yanful, 2007, 2008; Boscov *et al.*, 2009; Braga, 2010; entre outros). Essa preocupação é ainda mais relevante no caso de solos tropicais lateríticos, nos quais os argilo-minerais estão agregados em concreções cimentadas por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (Nogami e Villibor, 1995) que podem atingir dimensões de grãos de areia e até de pedregulhos.

Este artigo foi desenvolvido com base nos dados da tese de Gurjão (2005) e tem como objetivo avaliar o estado de agregação de solos tropicais do Distrito Federal, Brasil, em seu estado natural e a alteração do estado de agregação quando submetidos ao contato com soluções monoespécies de zinco e de cobre com concentrações de 50 mg/L até 800 mg/L. Trata-se de uma das etapas da investigação do comportamento geoambiental desses solos com vista à seleção e ao projeto de locais para disposição de resíduos.

Para avaliar o estado de agregação das partículas sólidas de um solo geralmente comparam-se as curvas de distribuição granulométrica obtidas com e sem a adição de um agente desagregador. Esse agente pode ser de origem química, mecânica ou da combinação dos dois. O ensaio de potencial zeta também fornece informações sobre a agregação do solo em função do pH da solução intersticial (Alkan *et al.*, 2005), delimitando as faixas de pH em que o solo se comporta como floculado e como disperso.

Os agentes químicos que promovem a desagregação dos solos em ensaios correntes em geotecnia ou em engenharia agrônoma no Brasil, são, respectivamente, o hexametáfosfato de sódio (ABNT, 1984) e o hidróxido de sódio (EMBRAPA, 2011). Outros agentes, como água destilada (Head, 1992) e soluções de cloreto de cálcio (Shackelford, 1994) para estudo da expansão livre das argilas, assim como soluções contaminantes para avaliação de compatibilidade, também podem dar uma indicação da agregação dos solos.

Dentre os agentes mecânicos encontram-se a variação de umidade, impacto, esmagamento, aplicação de vácuo e agitação mecânica, que ocorrem na preparação de amostras conforme a NBR 7181 (ABNT, 1984), e a agitação sonora, como no uso do ultrassom nos ensaios de granulometria a laser. Neste trabalho, os procedimentos de secagem, destorroamento e agitação mecânica na preparação das amostras seguiram a norma brasileira e não foram objeto de investigação.

A norma brasileira NBR 13 602 (ABNT, 1996) define procedimento para avaliar a dispersibilidade do solo por meio do método sedimentométrico comparativo. Atente-se que a dispersibilidade é neste caso entendida como consequência da alteração das forças entre as superfícies carregadas eletricamente dos argilo-minerais, quando as forças de repulsão sobrepujam as forças de atração entre partículas. O fenômeno está associado à quantidade de cátions de sódio nas camadas duplas dos argilo-minerais e à quantidade de cátions de sódio, potássio, cálcio e magnésio na água intersticial. Com base nesta norma, foram avaliadas a agregação natural dos solos investigados e a desagregação química causada pelo hexametáfosfato de sódio.

Considera-se, contudo, que a agregação de partículas de argilo-minerais nos solos laterizados também se deve à cimentação por óxidos de ferro, alumínio e outros metais, não dependendo exclusivamente dos cátions adsorvidos e de fenômenos de camada dupla. Neste caso, a agregação pode também ser afetada por procedimentos mecânicos. A desagregação mecânica foi avaliada a partir da análise dos resultados de granulometria obtidos no granulômetro a laser com e sem o uso do ultrassom.

Ademais, o efeito desagregador de soluções de zinco e de cobre foi avaliado com base nos ensaios de granulometria realizados com o granulômetro a laser, em amostras previamente contaminadas com esses metais, e realizados com e sem o uso do ultrassom.

2 – SOLOS ESTUDADOS

Inicialmente foram coletadas 26 amostras de solo na região do Distrito Federal com as quais se realizaram ensaios de classificação expedita MCT- Miniatura, Compactado, Tropical (Godoy *et al.*, 2002), com o objetivo de encontrar os sete tipos característicos da classificação MCT. Dessas amostras, selecionaram-se 13 para realizar a classificação completa MCT (DNER-ME256/94, 258/94 e 254/97) e confirmar a obtenção de um solo de cada classe. Com os resultados da classificação completa, foram selecionados seis solos representativos da classificação MCT: CG1 (NA), CG2 (NA'), CG3 (NS'), CG4 (NG'), CG5 (LA') e CG6 (LG'). O tipo de solo LA não foi encontrado na região.

Segundo a Carta Geológica do Distrito Federal - DF (Freitas-Silva e Campos, 1988), a amostra CG5 (LA') é proveniente do Grupo Canastra, e todas as demais amostras são do Grupo Paranoá sendo que: a CG1 (NA) e a CG3 (NS') são provenientes da Unidade metarritmito arenoso; a CG2 (NA'), da Unidade quartzito médio; a CG4 (NG'), da Unidade metarritmito argiloso; e a G6 (LG'), da Unidade ardósia.

A caracterização geotécnica dos solos estudados, obtida por meios dos ensaios padronizados pela ABNT e a Classificação Unificada dos Solos – USCS, encontra-se no Quadro 1.

Quadro 1 – Caracterização geotécnica dos solos estudados.

Amostra	w ₀ (%)	ρ _s (g/cm ³)	w _L (%)	w _p (%)	I _p (%)	w _{L,cone} (%)	Classificação USCS
CG1 (NA)	0,16	2,70	NL	NP	-	33	SM
CG2 (NA')	0,75	2,69	NL	NP	-	23	SM
CG3 (NS')	0,36	2,65	39	25	14	42	ML
CG4 (NG')	2,28	2,65	35	27	8	40	ML
CG5 (LA')	2,09	2,73	28	22	6	35	SM
CG6 (LG')	7,49	2,73	49	35	14	56	ML

Legenda: w₀: teor de umidade higroscópica; ρ_s: massa específica dos grãos; w_L: limite de liquidez; w_p: limite de plasticidade; I_p: índice de plasticidade; w_{L,cone}: limite de liquidez por ensaio de penetração de cone; USCS: *Unified Soil Classification System* segundo a ASTM D 2487 (2006).

3 – DESAGREGAÇÃO DOS SOLOS NÃO CONTAMINADOS

3.1 – Desagregação por efeito do hexametáfosfato de sódio

Segundo a NBR 13 602 (ABNT, 1996), a porcentagem de dispersão é dada pela razão entre a porcentagem em massa das partículas de diâmetro menor ou igual a 0,005 mm (fração argila) sem e com defloculante. Os resultados assim determinados estão apresentados no Quadro 2. Utilizou-se o termo “desagregação química 1” ao valor complementar de 100% da porcentagem de dispersão.

Quadro 2 – Resultados dos ensaios de granulometria realizados com e sem defloculante.

Granulometria (%)*	CG1 (NA)		CG2 (NA')		CG3 (NS')		CG4 (NG')		CG5 (LA')		CG6 (LG')	
	s/d	c/d	s/d	c/d	s/d	c/d	s/d	c/d	s/d	c/d	s/d	c/d
Argila (<0,005 mm)	3	8	5	18	2	42	4	34	5	32	2	54
Silte (0,005–0,075 mm)	9	7	13	9	93	53	69	40	48	25	80	30
Areia (0,075–4,8 mm)	82	79	82	73	5	5	26	25	46	43	18	16
Pedregulho (>4,8 mm)	6	6	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
Dispersão segundo a NBR 13 602 (%)	38		28		5		12		16		4	
Desagregação química 1 (%)	62		72		95		88		84		96	

Tipo de ensaio: s/d - sem defloculante, c/d - com defloculante. *Frações segundo a ASTM D 422 (1998).

Ressalta-se que a porcentagem de dispersão pela NBR 13 602 (ABNT 1996) só deve ser calculada para solos que apresentem a fração argila maior do que 12% obtida segundo a NBR 7181 (ABNT, 1984), isto é com defloculante, o que desqualificaria o solo NA. Observa-se ainda que os solos apresentam fração argila pouco dispersiva. A série de ordem crescente de desagregação química por ação do hexametáfosfato de sódio é NA, NA', LA', NG', NS' e LG'.

A desagregação química pode também ser estimada pela subtração de cada fração granulométrica obtida com e sem o uso do defloculante (Quadro 3). O valor de referência da desagregação seria então a soma das diferenças positivas ou o módulo das diferenças negativas, a que se chamou de “desagregação química 2”. A série de ordem crescente de desagregação é a mesma que a anterior, mas o Quadro 3 mostra que boa parte da argila está agregada na forma de grãos na fração silte. Exceto nos solos arenosos não lateríticos (NA e NA'), a contribuição da desagregação veio basicamente da fração silte, predominante nos demais solos. Ressalta-se que o solo LA', areia laterítica, tem expressiva fração areia (43%), mas a grande contribuição para a desagregação química ainda provém da fração silte.

Quadro 3 – Desagregação medida pela diferença do teor em cada fração com e sem defloculante.

Granulometria (%)*	CG1 (NA)	CG2 (NA')	CG3 (NS')	CG4 (NG')	CG5 (LA')	CG6 (LG')
	c/d - s/d					
Argila (<0,005 mm)	5	13	40	30	27	52
Silte (0,005–0,075 mm)	-2	-4	-40	-29	-23	-50
Areia (0,075–4,8 mm)	-3	-9	0	-1	-3	-2
Pedregulho (>4,8 mm)	0	0	0	0	-1	0
Desagregação química 2 (%)	5	13	40	30	27	52

Tipo de ensaio: s/d - sem defloculante, c/d - com defloculante. *Frações segundo a ASTM D 422 (1998).

3.2 – Desagregação por efeito do ultrassom

Índices semelhantes foram utilizados para verificar a dispersão por ação mecânica a partir dos resultados dos ensaios no granulômetro a laser com e sem aplicação de ultrassom. Assim adotou-se como porcentagem de dispersão por ação mecânica a razão entre a porcentagem em massa das partículas de diâmetro menor ou igual a 0,005 mm (fração argila) nos ensaios realizados com o granulômetro a laser sem e com ultrassom (Quadro 4), e a desagregação mecânica 2 foi estimada pela subtração de cada fração granulométrica obtida com e sem o uso do ultrassom (Quadro 5).

Quadro 4 – Resultados dos ensaios com granulômetro a laser realizados com e sem ultrassom.

Granulometria (%)*	CG1 (NA)		CG2 (NA')		CG3 (NS')		CG4 (NG')		CG5 (LA')		CG6 (LG')	
	s/u	c/u	s/u	c/u	s/u	c/u	s/u	c/u	s/u	c/u	s/u	c/u
Argila (<0,005 mm)	5	11	2	17	27	36	7	30	7	35	7	44
Silte (0,005–0,075 mm)	3	8	9	22	69	60	17	38	28	42	10	44
Areia (0,075–4,8 mm)	86	75	89	61	4	4	75	31	65	23	83	12
Pedregulho (>4,8 mm)	6	6	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Dispersão (%)	45		12		75		23		20		16	
Desagregação mecânica 1 (%)	55		88		25		77		80		84	

Tipo de ensaio: s/d - sem defloculante, c/d - com defloculante. *Frações segundo a ASTM D 422 (1998).

Quadro 5 – Desagregação medida pela diferença do teor em cada fração com e sem ultrassom.

Granulometria (%)*	CG1 (NA)	CG2 (NA')	CG3 (NS')	CG4 (NG')	CG5 (LA')	CG6 (LG')
	c/u - s/u					
Argila (<0,005 mm)	6	15	9	23	28	37
Silte (0,005–0,075 mm)	5	13	-9	21	14	34
Areia (0,075–4,8 mm)	-11	-28	0	-44	-42	-71
Pedregulho (>4,8 mm)	0	0	0	0	0	0
Desagregação mecânica 2 (%)	11	28	9	44	42	71

Tipo de ensaio: s/d - sem defloculante, c/d - com defloculante. *Frações segundo a ASTM D 422 (1998).

A série de ordem crescente de desagregação por efeito mecânico segundo o índice 1 é: NS', NA, NG', LA', LG', NA', enquanto pelo índice 2 é: NS', NA, NA', LA', NG', LG'. O índice 2 inclui a desagregação que transforma grãos de areia em grãos de silte (o que praticamente não ocorre na desagregação química), enquanto o índice 1 só considera a desagregação que altera a fração argila. O Quadro 5 mostra a grande contribuição da fração areia na desagregação mecânica, com exceção do solo NS', cuja fração areia era pequena (4%) e não foi alterada pelo ultrassom.

3.3 – Comparação entre desagregação química e mecânica

No Quadro 6 é apresentada uma síntese dos resultados dos Quadros 2 a 5 e uma comparação entre os resultados da desagregação química e mecânica sob a forma de índices. Procura-se também prover uma medida da preponderância da ação mecânica sobre a ação química por meio da diferença e da razão entre desagregação mecânica e química. O Quadro 7 apresenta uma ordenação segundo os vários critérios de avaliação da desagregação estudados.

Quadro 6 – Índices de desagregação por ação química e mecânica.

Solo	Desagregação química DQ (%)		Desagregação mecânica DM (%)		Diferença DM-DQ (%)		Razão DM/DQ	
	Índice 1	Índice 2	Índice 1	Índice 2	Índice 1	Índice 2	Índice 1	Índice 2
NA	62	5	55	11	-7	6	0,89	2,20
NA'	72	13	88	28	16	15	1,22	2,15
NS'	95	40	25	9	-70	-31	0,26	0,23
NG'	88	30	77	44	-11	14	0,88	1,47
LA'	84	27	80	42	-4	15	0,95	1,56
LG'	96	52	84	71	-12	19	0,88	1,37

Índice 1: razão entre as frações argila obtidas com e sem agente desagregador;

Índice 2: soma das diferenças entre as frações obtidas com e sem agente desagregador.

Quadro 7 – Classificação por ordem dos índices de desagregação química e mecânica.

Solo	Desagregação química DQ (%)		Desagregação mecânica DM (%)	
	Índice 1	Índice 2	Índice 1	Índice 2
NA	6°.	6°.	5°.	5°.
NA'	5°.	5°.	1°.	4°.
NS'	2°.	2°.	6°.	6°.
NG'	3°.	3°.	4°.	2°.
LA'	4°.	4°.	3°.	3°.
LG'	1°.	1°.	2°.	1°.

Índice 1: razão entre as frações argila obtidas com e sem agente desagregador;

Índice 2: soma das diferenças entre as frações obtidas com e sem agente desagregador.

Observa-se que, pelo conjunto dos critérios, os solos com maior agregação são por ordem decrescente: LG', NG', LA', NS', NA', NA. A razão entre os valores de índice 1 no Quadro 6 indica que a desagregação química pode ser considerada preponderante sobre a mecânica em todos os solos, com exceção do NA'. A importância proporcional da desagregação química sobre a mecânica é similar entre os solos, com exceção do NA', no qual prevaleceu o efeito mecânico, e do NS', no qual a ação mecânica foi relativamente menos intensa do que a química.

Por outro lado, no Quadro 6, a razão entre os valores de índice 2 separa os solos em três faixas de valores: preponderância da ação mecânica sobre a química da ordem de 2,2 para os solos NA e NA' e entre 1,4 e 1,6 para os solos LA', LG' e NG', e preponderância da ação química sobre a mecânica para o solo NS'. Neste caso, inclui-se a massa de grãos na fração areia que, desagregados, passam para a fração silte.

É importante notar que o solo NS' é bastante sensível à desagregação por agente químico (hexametáfosfato de sódio) e é pouco desagregado por ação mecânica (ultrassom). Os solos com predominância de areia (NA e NA'), como era de se esperar, apresentam muito baixa agregação, já os solos lateríticos (LG' e LA'), juntamente com o solo argiloso não laterítico (NG'), são os mais agregados; sendo o solo LG', entre esses, o que apresenta maior grau de agregação.

4 – EFEITO DO ZINCO E DO COBRE NA DESAGREGAÇÃO DOS SOLOS ESTUDADOS

O efeito das soluções metálicas de zinco e cobre na desagregação dos solos foi estudado por meio dos teores de argila obtidos nos ensaios de granulômetro a laser para os solos não contaminados e contaminados, com e sem a aplicação de ultrassom. Foram calculados também os índices de desagregação/dispersão utilizados para os solos não contaminados.

4.1 – Teores de argila determinados sem aplicação do ultrassom

Os resultados dos teores de argila obtidos nos ensaios de granulômetro a laser para os solos não contaminados e contaminados por soluções de zinco e cobre sem aplicação de ultrassom podem ser observados nas Figuras 1 e 2, respectivamente.

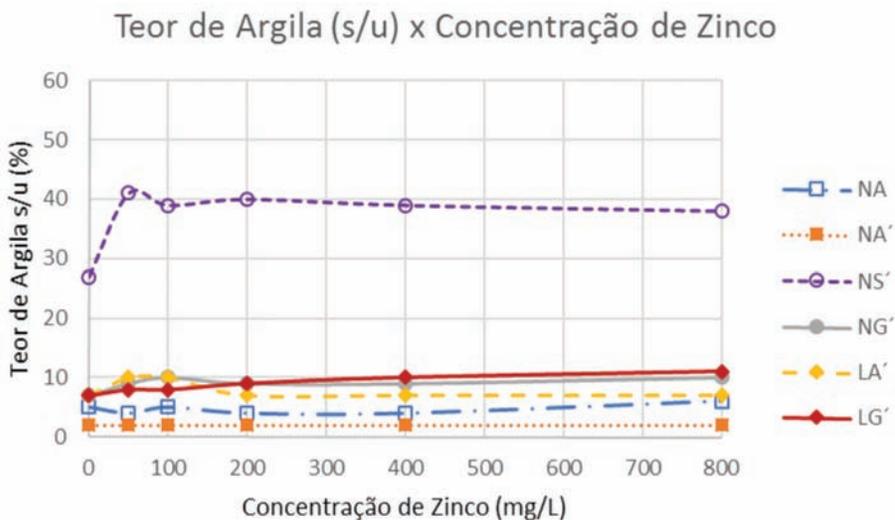


Fig. 1 – Teor de argila obtido no granulômetro a laser sem aplicação de ultrassom em função da concentração de zinco.

Teor de Argila (s/u) x Concentração de Cobre

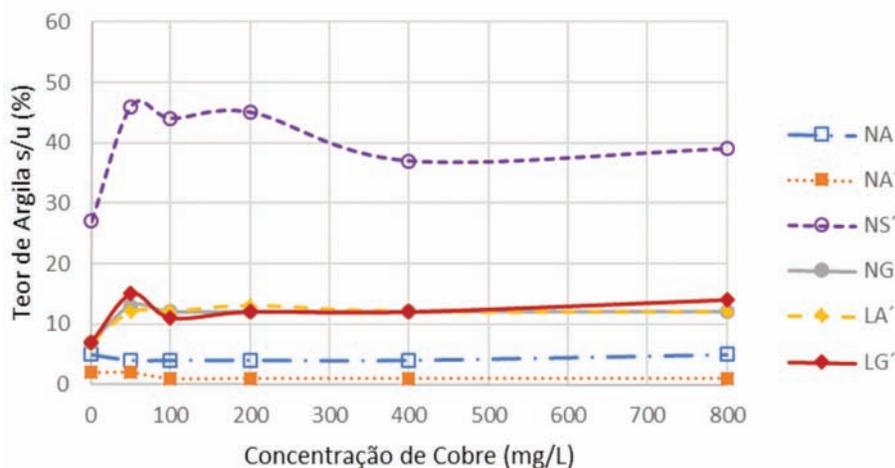


Fig. 2 – Teor de argila em função da concentração de cobre por granulômetro a laser sem aplicação de ultrassom.

Nas Figuras 1 e 2, observa-se que os teores de argila sem ultrassom dos solos NA e NA' são inferiores a 10% e pouco se alteram com a ação do zinco e do cobre.

Para os solos NG' e LG', o teor de argila aparentemente aumenta ligeiramente com o aumento da concentração de zinco, enquanto o solo LA' apresenta um aparente pico para 100 mg/L, contudo a variação pode estar dentro dos erros experimentais (Figura 1). Já o cobre tem efeito mais desagregador para esses solos, verificando-se que o teor de argila aumenta em contato com o cobre, porém não varia significativamente para concentrações entre 50 e 800 mg/L (Figura 2). Cabe lembrar que concentrações de zinco e cobre de 50 mg/L são muito elevadas em comparação às determinadas em lixiviados de aterros brasileiros (Souto, 2009).

O solo NS', por sua vez, que possui 27% de argila, passa a valores da ordem de 40% quando submetido às soluções contaminantes (Figuras 1 e 2). Tanto o zinco como o cobre atuam claramente como agentes desagregadores desse solo, sendo a ação do cobre maior que a do zinco.

4.2 – Desagregação química

A desagregação química pelos metais em estudo foi avaliada pela análise da razão entre os teores de argila do solo contaminado e do solo não contaminado, sem aplicação de ultrassom. As Figuras 3 e 4 apresentam os teores relativos de argila de todos os solos em função da concentração de zinco e de cobre, respectivamente.

As Figuras 3 e 4 evidenciam o efeito desagregador dos dois metais para os solos. Observa-se que a desagregação do zinco faz com que o teor de argila tenha um aumento da ordem de 10 a 40% comparado com o solo não contaminado, enquanto para o cobre esse aumento é da ordem de 60 a 120%.

Os resultados para os solos NA e NA' não são conclusivos. Como a fração argila desses solos é muito baixa, pequenas variações na determinação do teor de argila, dentro da faixa dos erros experimentais, resultam erroneamente em alterações significativas no teor relativo. Por exemplo, o solo NA' teve o seu teor de argila reduzido de 2% para 1% com a adição de cobre, o que resulta em um teor relativo de 50%. Não se pode afirmar, entretanto, se o teor de argila foi efetivamente reduzido, manteve-se constante ou aumentou ligeiramente.

Efeito do Zinco no Teor Relativo de Argila (s/u)

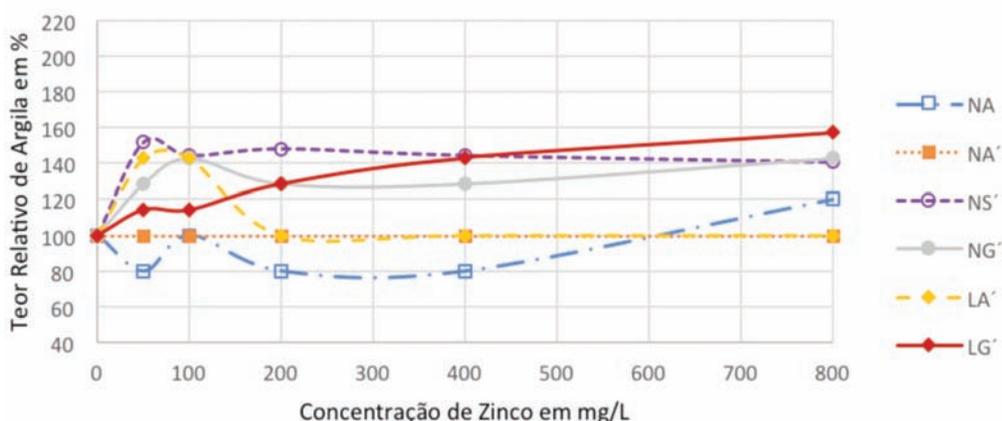


Fig. 3 – Teor de argila relativo (solo contaminado em relação a solo não contaminado) em função da concentração de zinco por granulômetro a laser sem aplicação de ultrassom.

Efeito do Cobre no Teor Relativo de Argila (s/u)

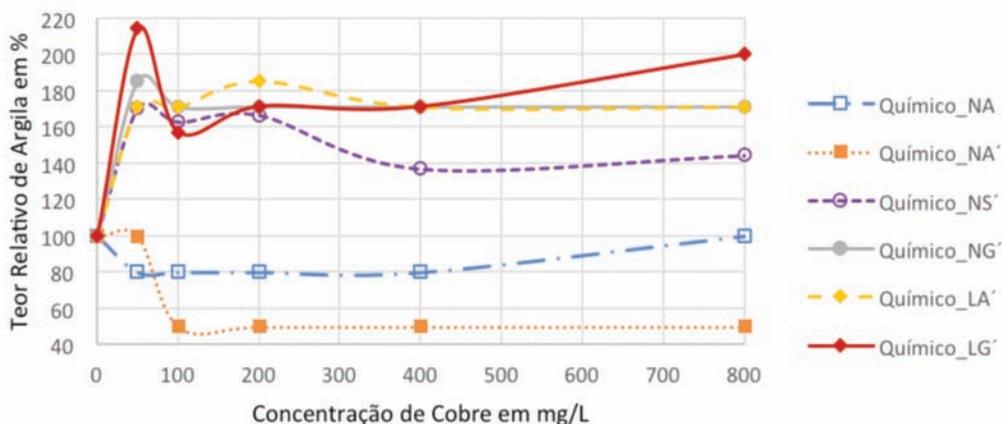


Fig. 4 – Teor de argila relativo (solo contaminado em relação a solo não contaminado) em função da concentração de cobre por granulômetro a laser sem aplicação de ultrassom.

4.3 – Teores de argila determinados com aplicação de ultrassom

Os resultados dos teores de argila obtidos nos ensaios de granulômetro a laser para os solos não contaminados e contaminados por soluções de zinco e cobre com aplicação de ultrassom podem ser vistos nas Figuras 5 e 6, respectivamente.

A utilização de ultrassom aumenta consideravelmente os teores de argila medidos quando comparados aos ensaios sem ultrassom, com destaque para o solo LG'. Os solos NA e NA' sofreram alteração pouco expressiva em comparação com os demais.

Teor de Argila (c/u) x Concentração de Zinco

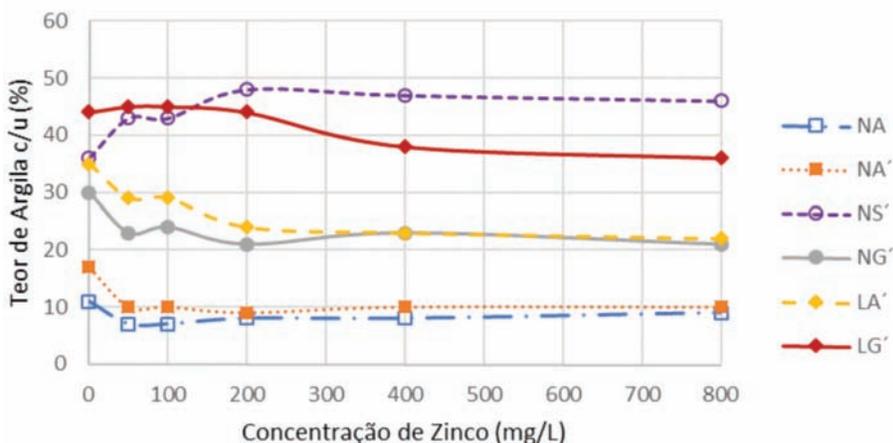


Fig. 5 – Teor de argila em função da concentração de zinco por granulômetro a laser com aplicação de ultrassom.

Teor de Argila (c/u) x Concentração de Cobre

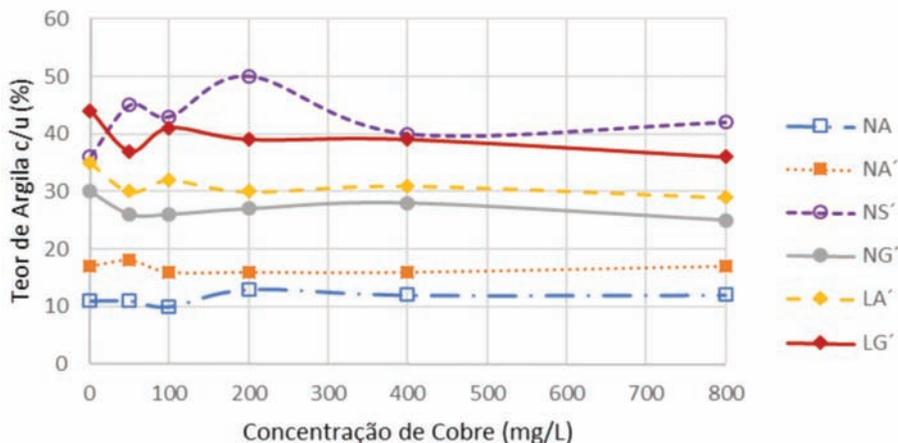


Fig. 6 – Teor de argila em função da concentração de cobre por granulômetro a laser com aplicação de ultrassom.

O efeito do zinco, com exceção do NS', foi o de diminuir os teores de argila medidos após a ação desagregadora do ultrassom, de onde se pode inferir que o zinco torna os agregados de solo mais resistentes à ação desagregadora do ultrassom. Os solos NA' e NA, apesar da pouca quantidade de argila, também apresentaram o mesmo comportamento. Para o solo LG', esse efeito só é notado para concentrações de zinco superiores a 200 mg/L. No caso do solo NS', a combinação de ultrassom e altas concentrações de zinco resultou em teores de argila da ordem de 46%, ligeiramente superiores aos obtidos sem ultrassom (40%).

O efeito do cobre para os solos LG', NG' e LA' foi o de diminuir os teores de argila medidos após a ação desagregadora do ultrassom. Os solos NA' e NA não apresentaram tendência de alteração no teor de argila em função da concentração de cobre; as pequenas variações observadas podem ser fruto de erros experimentais. No caso do solo NS', a combinação de ultrassom e ação do cobre resultou em aumento dos teores de argila passando de 36% para valores entre 42% e 50%.

Observe-se que o decréscimo do teor de argila em quase todos os solos (exceção do solo NS') é mais acentuado para o zinco do que para o cobre. O solo LG' apresentou o efeito de aumento da resistência dos agregados à ação mecânica do ultrassom para concentrações de zinco maiores do que 200 mg/L e para concentrações de cobre maiores ou iguais a 50 mg/L. Também é de se notar que o efeito de oferecer resistência à desagregação mecânica é maior para o zinco do que para o cobre.

4.4 – Desagregação química e mecânica

Foram calculados também os teores relativos de argila dos solos por meio da razão entre o teor de argila do solo contaminado obtido com aplicação de ultrassom em função do teor de argila do solo não contaminado determinado sem ultrassom. Somam-se, portanto, os efeitos da desagregação química causada pelos contaminantes e da desagregação mecânica induzida pelo ultrassom. Os teores relativos de argila em função da concentração de zinco e de cobre são apresentados, respectivamente, nas Figuras 7 e 8.

Pode-se verificar que os dois metais promovem um aumento da resistência dos agregados de argila a serem desfeitos pela ação mecânica do ultrassom para todos os solos com exceção do NS'. Nessas figuras se pode observar mais claramente que o efeito de aumento da resistência dos agregados à ação mecânica do ultrassom é maior para os solos contaminados com zinco do que com cobre.

No caso do zinco, a diminuição do teor de argila foi da ordem de 40% para os solos NA e NA', e de 20% para os solos NG' e LA'. Tal efeito agregador ocorreu para a menor concentração de zinco para os solos NA, NA', NG' e LA'. O solo LG' contaminado com zinco foi pouco alterado até a concentração de 200 mg/L, a partir da qual se observa uma diminuição do teor de argila da ordem de 15%.

O solo NS' contaminado tanto com zinco como com cobre apresenta um aumento da ordem de 20% no teor de argila para concentração até 100 mg/L, revelando que esses metais diminuem a

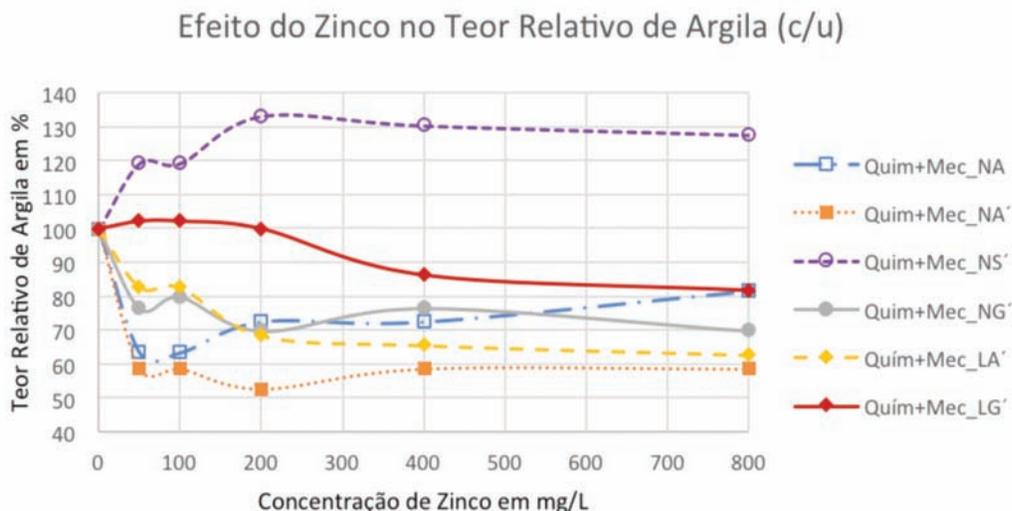


Fig. 7 – Teor de argila relativo (solo contaminado com aplicação de ultrassom em relação a solo não contaminado sem aplicação de ultrassom) em função da concentração de zinco.

resistência ao processo de desagregação mecânica promovido pelo ultrassom. Para concentrações maiores de zinco o aumento atinge a ordem de 30% e no caso do cobre ocorre inicialmente um aumento de 40% para concentração de 200mg/L que volta a diminuir para concentrações acima de 400mg/L para valores da ordem de 15%.

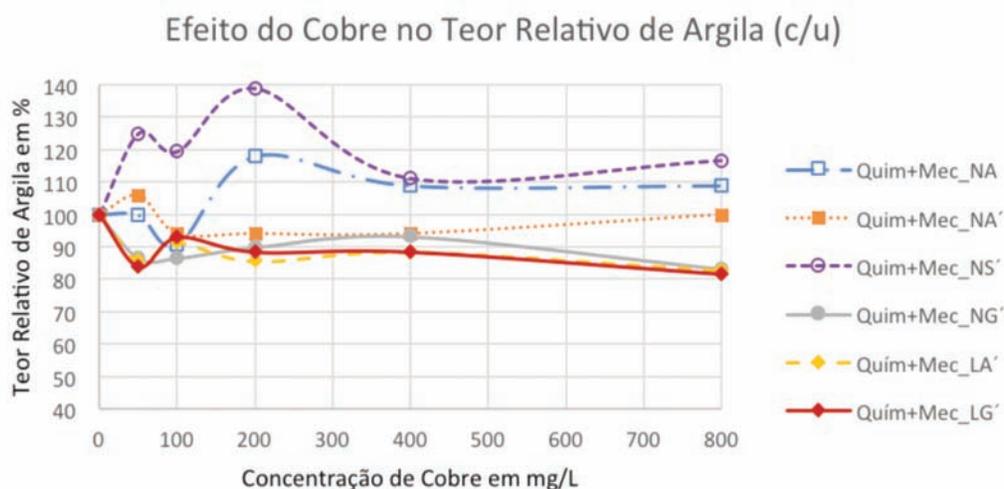


Fig. 8 – Teor de argila relativo (solo contaminado com aplicação de ultrassom em relação a solo não contaminado sem aplicação de ultrassom) em função da concentração de cobre.

5 – CONCLUSÕES

5.1 – Efeito da desagregação por ação química

Ambos os metais promovem uma desagregação dos solos estudados, com exceção dos solos NA e NA', que pouco são afetados por possuírem pequena quantidade de argila. O efeito da desagregação provocada por esses metais é mais notável no solo NS'.

O solo LG' é pouco desagregado (14%) pela contaminação com zinco até concentrações da ordem de 100 mg/L. Para maiores concentrações de zinco ocorre um aumento da desagregação, com um aumento do teor de argila de 60% para a concentração de 800 mg/L. No caso da contaminação com cobre, o efeito desagregador máximo sobre o solo LG' ocorre para a menor concentração testada (50 mg/L), com o aumento do teor de argila da ordem de 114%. Para a concentração de 800 mg/L, o aumento do teor de argila é de 100%.

Os solos LA' e NG' apresentam um aumento do teor de argila da ordem de 40% para concentração de zinco da ordem de 100 mg/L, e da ordem de 75% para a mesma concentração de cobre. Para maiores concentrações de zinco o solo NG' apresenta um aumento do teor de argila que varia entre 30 e 40%; porém o solo LA' não é mais desagregado pelo zinco para concentrações maiores que 200 mg/L.

Os solos predominantemente arenosos (NA e NA') pouco foram alterados, enquanto o solo NS' foi o que apresentou maior desagregação pela contaminação com os metais estudados.

O solo NS' é desagregado por ambos os metais, os quais também facilitam a desagregação desse solo pelo ultrassom.

Os solos NG' e LA' apresentaram valores de desagregação semelhantes, maiores para o cobre do que para o zinco.

O solo LG' foi o menos afetado pelo zinco entre os três de melhor qualidade para *liners* (LG', LA' e NG'). No entanto, o cobre promoveu uma alta desagregação inclusive para a menor concentração testada.

Os solos LG', LA' e NG' sofreram a ação desagregadora dos metais estudados, sendo que essa ação foi maior para o cobre do que para o zinco.

Pode-se dizer que o efeito desagregador do cobre é mais acentuado em todos os solos quando comparado ao do zinco.

5.2 – Efeito combinado da ação química dos metais com a ação mecânica do ultrassom

As soluções com os metais zinco e cobre promoveram um aumento da resistência à ação desagregadora do ultrassom nos solos estudados, à exceção do solo NS'. Esse aumento da resistência à ação mecânica do ultrassom foi maior para os solos contaminados com zinco.

Os solos LA' e NG', quando contaminados com zinco, apresentaram uma diminuição do teor de argila após aplicação do ultrassom da ordem de 20% para concentrações da ordem de 100 mg/L e de 30% para maiores concentrações. Quando contaminados com cobre, a diminuição do teor de argila foi da ordem de 10% após aplicação do ultrassom.

O solo LG' foi pouco alterado para concentrações de zinco de até 200 mg/L e apresentou um leve aumento da resistência à ação do ultrassom com o aumento da concentração de zinco. Quando contaminado com cobre, esse solo apresenta uma diminuição dos teores de argila após a ação do ultrassom da ordem de 10 a 15%. Porém o solo LG', ao contrário dos demais, tem melhor resposta ao cobre do que ao zinco no que diz respeito ao aumento da resistência à ação do ultrassom.

Os solos NA e NA' apresentaram pouca alteração nos valores de teores de argila para ambos os contaminantes. Apesar dos valores relativos serem elevados no caso da contaminação por zinco (30 a 40%), isso ocorre porque os valores de referência do solo não contaminado são muito baixos.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio dado pela Capes na forma de bolsa de doutorado, bem como a Universidade Federal de Roraima pela liberação para realização do doutorado da Eng.^a Cláudia Gurjão. Agradecem, ainda, à Universidade de Brasília e à Universidade de São Paulo pelo uso de equipamentos e infraestrutura sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 7181 (1984). Solo - *Análise granulométrica. Método de ensaio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 13p.

ABNT NBR 13 602 (1996). Solo - *Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos – ensaio sedimentométrico comparativo*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 5p.

Alkan, M.; Demirbaş, Ö; Doğan, M. (2005). *Electrokinetic properties of sepiolite suspensions in different electrolyte media*. Journal of Colloid and Interface Science, 281, No. 1, pp. 240-248.

ASTM D 422 (1998). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. American Society for Testing and Materials, 8 p.

ASTM D 2487 (2006). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. American Society for Testing and Materials, 12p.

- Boscov, M.E.G.; Soares, V.; Vasconcelos, F.D.; Ferrari, A.A.P. (2009). *Geotechnical properties of a silt-bentonite mixture for liner construction*. Proceedings of 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 1, pp. 217-220, Alexandria, Egito.
- Braga, R.M.Q.L. (2010). *A utilização de uma camada de solo compactado como revestimento impermeabilizante de fundo de bacias de disposição de lama vermelha produzida em Barcarena-PA*. Tese de doutorado. Universidade Federal do Pará, Belém.
- DNER-ME254 (1997). *Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-CBR e expansão*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasil, 14p.
- DNER-ME256 (1994a). *Solos compactados com equipamento miniatura - determinação da perda de massa por imersão*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasil, 6p.
- DNER-ME258 (1994b). *Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-MCV*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasil, 14p.
- EMBRAPA (2011). *Manual de métodos de análise de solo*. Autoria: Donagema, G.K.; Campos, D.V.B.; Calderano, S.B.; Teixeira, W.G.; Viana, J.H.M. Embrapa Edição Revista 2011.
- Freitas-Silva, F.H; Campos, J.E.G. (1998). *Geologia do Distrito Federal. Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal*. Formato digital. Governo do Distrito Federal, Brasília.
- Frempong, E.M.; Yanful, E.K. (2007). *Tropical soils-acid mine drainage interactions: Breakthrough curves and some transport parameters*. Journal of Environmental Engineering, 133, No.7, pp. 733-741.
- Frempong, E.M.; Yanful, E.K. (2008). *Interactions between three tropical soils and municipal solid waste landfill leachate*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 134, No.4, pp. 379-396.
- Godoy, H.; Bernucci, L.B.; Suzuki, C.Y. (2002). *Metodologia de investigação geotécnica preliminar para obras viárias: o caso da duplicação da rodovia Raposo Tavares de Cotia a São Roque - Estado de São Paulo*. 10^o Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Anais, 1:107-115, Ouro Preto.
- Gurjão, C.M.C. (2005). *Estimativa de propriedades geoambientais de camadas impermeabilizantes de solos tropicais*. Tese de doutorado. Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Brasília, 257p.
- Head, K.H. (1992). *Manual of Soil Laboratory Testing*. Vol. I, Soil Classification and Compaction Tests, Pentech Press, London.
- Lee, J.M.; Shackelford, C.D.; Benson, C.H.; Jo, H.; Edil, T. (2005). *Correlating Index Properties and Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131, No.11, pp. 1319-1329.
- Nogami, J.S.; Villibor, D.F. (1995). *Pavimentação de baixo custo usando solos lateríticos*. Ed. Villibor, São Paulo.
- Quigley, R.M.; Fernandez, F.; Rowe, R.K. (1988). *Clayey barrier assessment for impoundment of domestic waste leachate (Southern Ontario) including clay-leachate compatibility by hydraulic conductivity testing*. Canadian Geotechnical Journal, 25, No.3, pp. 574-581.

- Shackelford, C.D. (1994). *Waste-soil interactions that alter hydraulic conductivity*. In: Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soil. ASTM, Special Technical Publication, 1142, pp. 111-168.
- Shackelford, C.D.; Benson, C.H.; Katsumi, T.; Edil, T.B.; Lin, L. (2000). *Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids*. Geotextiles and Geomembranes, 18(2-4), pp. 133-161.
- Souto, G.D.A.B. (2009). *Lixiviado de aterros sanitários brasileiros - estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar ("stripping")*. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 371 p.