

## AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS OBTIDOS DE MISTURAS DE SOLO, ESCÓRIA DE COBRE JATEADA E CIMENTO PORTLAND

**Bruno Lima Mendonça**  
**Guilherme Bravo de Oliveira Almeida**  
**Erinaldo Hilário Cavalcante**  
Departamento de Engenharia Civil  
Universidade Federal de Sergipe  
**Michéle Dal Toé Casagrande**  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental  
Universidade de Brasília

### RESUMO

Esta pesquisa tem o objetivo de avaliar comparativamente parâmetros físicos, mecânicos e hidráulico de misturas de solo, cimento Portland e escória de cobre jateada. O programa experimental envolveu a caracterização física, compactação, resistência à compressão e permeabilidade de misturas variando o teor de escória entre 50 a 100% e cimento 3 e 5%. Os resultados demonstraram que a escória faz aumentar a fração areia e a densidade das misturas, e as tornam não plásticas. Os pesos específicos e as umidades ótimas foram inversamente proporcionais ao adicionar a escória, sem maiores variações ao adicionar o cimento. As resistências das misturas também foram inversamente proporcionais ao teor de escória, porém para 5% de cimento as resistências foram ligeiramente maiores. O coeficiente de permeabilidade diminuiu em 10x ao variar o teor de escória e o de cimento. A pesquisa mostrou a possibilidade de incorporação da escória ao solo aditivado com cimento.

### ABSTRACT

This research aims to comparatively evaluate the physical, mechanical and hydraulic parameters of mixtures of soil, Portland cement and blasted copper slag. The experimental program involved the physical characterization, compaction, compressive strength and permeability of mixtures containing contents between 50 to 100% slag and 3 to 5% cement. The results showed that the slag increases the sand fraction and the specific gravity of the mixtures, and makes them non-plastic. Dry unit weight and moisture content were inversely proportional when adding slag, without larger variations when adding cement. The strengths of the mixtures were also inversely proportional to the slag content, however for 5% of cement the strengths were slightly higher. The hydraulic conductivity decreases by 10x by varying the slag and cement content. The research has shown the possibility of incorporating slag into cement additive soil.

### 1. INTRODUÇÃO

A construção civil é tradicionalmente uma grande consumidora de recursos naturais, e a área de pavimentação responde por grande parte desse consumo. Sabe-se que a estrutura de um pavimento é composta por camadas de materiais que devem possuir características apropriadas à sua utilização. Muitas vezes, os materiais encontrados na natureza não atendem às especificações dessas obras. Assim, devem-se escolher alternativas que possam alterar as propriedades mecânicas dos materiais e a estabilidade das suas características, visando melhorar seu comportamento (Maragon, 1992). Entre os métodos empregados na melhoria do comportamento geotécnico dos solos, as estabilizações químicas e granulométricas são frequentemente utilizadas no meio técnico.

A estabilização baseada na técnica de reações químicas com cimento Portland é uma alternativa para melhorar a trabalhabilidade, sensibilidade, resistência e durabilidade do solo natural (e.g. Nelson e Miller, 1992; Puppala *et al.*, 2006; De Bel *et al.*, 2009; Pedarla *et al.*, 2011; Yi *et al.*, 2016). Chang e Woods (1992) estudaram a microestrutura de areias cimentadas e as análises indicaram que, para níveis baixos de cimentação, há uma união inicial entre as partículas do solo com o material cimentante, sendo este recoberto parcialmente a superfície das partículas do solo. Para solos com níveis intermediários de

cimentação, desenvolvem-se maiores pontos de contato entre as partículas. Quando os níveis de cimentação são elevados, o agente cimentante preenche os espaços vazios entre as partículas, e o efeito desse agente é mais nítido, dificultando a distinção das partículas de solo e dos produtos cimentantes.

No entanto, é importante avaliar o teor adequado para determinado tipo de solo, uma vez que o uso do cimento no solo poderá representar baixo ganho de resistência e acarretar custos elevados, inviabilizando o método de estabilização. Assim, estudos de durabilidade do tratamento químico muitas vezes são necessários para fornecer uma melhor compreensão do desempenho a longo prazo de tratamentos químicos nas condições de campo (Puppala *et al.*, 2013).

De acordo Ceratti (1991), solos arenosos de boa graduação e com plasticidade média a baixa são os mais indicados para serem estabilizados com cimento Portland, por exigirem baixos teores do aditivo. Nos estudos de Almeida *et al.* (2015) utilizando um solo típico encontrado no Estado de Sergipe misturado ao cimento Portland, os resultados mostraram que, a partir de 5% de cimento, a variação no crescimento da resistência à compressão simples foi maior. Os autores justificam o ganho de resistência corroborado aos conceitos estabelecidos por Herzog (1967) e sumarizado por Rodrigues (1992), segundo o modelo matriz-esqueleto de domínios de argilas rodeados pela cimentação. Ainda no estudo, os autores comentam a ação modificadora do aditivo, o qual proporciona uma diminuição na plasticidade do solo com pouca variação no ganho de resistência. Porém, se a ação nas partículas do solo for aglutinante, ocorre conseqüentemente um aumento na resistência do solo. Assim, tornar o solo mais pode favorecer a estabilização com o cimento.

Por outro lado, a estabilização granulométrica é o método que consiste em um conjunto de operações mecânicas que modificam o arranjo estrutural das partículas do solo ou da sua granulometria por meio da subtração ou adição de algumas frações (Cristelo, 2001). Nesse método, explica Senço (2007), os vazios dos grãos maiores são preenchidos pelos grãos médios, e os vazios desses são preenchidos pelos grãos miúdos. Dessa forma, a estrutura densa representa um produto de massa específica aparente superior à dos componentes, o que lhe provê maior resistência e propriedade impermeabilizante. Análogo à estabilização química, por esse processo também é necessário avaliar o teor ideal do material utilizado para estabilizar um solo, visto que maiores quantidades de grãos podem alterar o contato entre eles e reduzir a resistência, resultando no aumento da permeabilidade da mistura.

Santos *et al.* (2018) avaliaram a influência no comportamento físico, mecânico e hidráulico de um solo areno-argiloso estabilizado granulometricamente com teores de escória de cobre proveniente de operações de jateamento. Segundo os autores, a adição do resíduo proporcionou um aumento da fração areia graças as maiores porcentagens dessa fração que estão presentes na escória. O estudo mostrou que entre 30% e 50% de escória de cobre jateada, em relação à massa de solo seco, não apresentou diferenças significativas de resistência à compressão simples. Entretanto, os valores de ISC obtidos para a mistura com 40% de escória atingiram a marca dos 90%. A permeabilidade, no entanto, foi menor para o teor de 20% de escória, atingindo uma ordem de grandeza de  $10^{-6}$  cm/s. Os autores concluíram afirmando que os ensaios mostraram a viabilidade em se incorporar a escória de cobre jateada em camada de sub-base, se constituindo numa matéria-prima alternativa para pavimentação.

Anualmente, grandes quantidades de rejeitos são produzidas por uma série de indústrias, surgindo à necessidade de se encontrar alternativas de destino para a enorme variedade de resíduos. A utilização como matéria-prima na pavimentação tem sido constante e pesquisas mostram a incorporação de resíduos no solo (e.g. Sotomayor e Casagrande, 2018; Reinert *et al.*, 2018; Menezes *et al.*, 2018; Bispo *et al.*, 2018). Essa utilização resulta em uma diminuição do consumo de recursos naturais, redução nos custos de exploração e emissão de gases poluentes com o transporte, redução dos grandes depósitos de descartes, evitando danos ambientais, além da redução no consumo energético para a extração dos recursos naturais. A reutilização e a reciclagem dos resíduos são alternativas que podem diminuir os volumes gerados e os impactos ao meio ambiente.

A escória de cobre é um subproduto do processo de fundição e refino do cobre (Biswas e Davenport, 2002) e apresenta uma forma comum de aproveitamento como material abrasivo no processo de jateamento para preparação de superfícies metálicas. No entanto, depois de exaurida a sua capacidade abrasiva após um determinado número de aplicações, o rejeito torna-se um resíduo inservível no ciclo de jateamento, sendo então descartado na natureza.

Diante do exposto, há intenção dos autores em contribuir na busca de soluções alternativas para o descarte de resíduos provenientes do processo de jateamento. Assim, pretende-se nesta pesquisa avaliar comparativamente parâmetros físicos, mecânicos e hidráulico de misturas de solo, cimento Portland e escória de cobre jateada. O presente estudo possibilita uma opção de destino da escória de cobre jateada, reutilizando-a em misturas com solo e cimento na própria unidade geradora em favor do descarte no meio ambiente.

## **2. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **2.1. Materiais**

O solo foi coletado em uma jazida localizada no povoado Aningas, no município de São Cristóvão (SE), onde amostras deformadas foram coletadas com o auxílio de pá e picareta.

A escória de cobre jateada foi proveniente do processo de jateamento de superfícies metálicas de tanques de armazenamento de petróleo, a qual não possuía mais a capacidade abrasiva, sendo considerado um rejeito. Vale destacar que amostras da mesma escória foram utilizadas em outras pesquisas, a exemplo de Almeida *et al.* (2017), que utilizaram até 40% de escória aditivado com 3% e 5% de cimento Portland, e Santos *et al.* (2018), que estabilizaram o solo com escória variando de 10% a 50%, cujas pesquisas foi verificado que esse resíduo se enquadra de uma classificação ambiental classe II-A – não-perigosa – não inerte, de acordo com a norma NBR 10004/2004.

O aditivo escolhido foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI) por ser um cimento com menores adições durante a sua fabricação.

Os materiais e os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (GeoPav) da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

As misturas de escória e de cimento Portland variaram de acordo com a massa de solo seco. Para a escória as porcentagens foram de 50% a 100% e as de cimento, de 3% e 5%. Como

demonstração, os cálculos a seguir indicam as massas dos materiais utilizadas no ensaio de compactação para a amostra de solo, 100% de escória e 5 % de cimento:

$$m_s + m_{esc} + m_{cim} = 7000 \quad (1)$$

$$m_{esc} = (100/100).m_s \quad (2)$$

$$m_{cim} = (5/100).m_s \quad (3)$$

$$m_s + m_s + 0,05m_s = 7000 \quad (4)$$

$m_s = 3.414,6$  g;  $m_{esc} = 3.414,6$  g e  $m_{cim} = 170,7$  g

em que  $m_s$ : massa de solos seco [g];

$m_{esc}$ : massa de escória de cobre jateada [g];

$m_{cim}$ : massa de cimento Portland [g]

## 2.2. Métodos de ensaios

### 2.2.1. Preparação e caracterização dos materiais

O solo e a escória de cobre jateada foram previamente secos ao ar, destorroados, quarteados e preparados segundo a norma DNER-ME 041/94. Para a caracterização e classificação os seguintes ensaios foram executados: densidade real (DNER-ME 093/94), análise granulométrica (DNER-ME 051/94), limites de liquidez (DNER-ME 082/94) e limite de plasticidade (DNER-ME 122/94).

Na etapa da sedimentação, os materiais foram deixados em repouso na solução de hexametáfosfato de sódio (defloculante), conforme descreve a norma de análise granulométrica.

### 2.2.2. Compactação dos materiais

A determinação dos parâmetros de compactação seguiu a norma DNER-ME 162/94, com energia de compactação intermediária de 26 golpes por camada. Nas misturas de solo, escória e cimento seguiu a norma DNER-ME 216/94.

### 2.2.3. Moldagem e cura dos corpos de prova

Na moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos foi seguida a norma DNER-ME 202/94, realizada na energia intermediária, a partir dos parâmetros obtidos da compactação. Os corpos de provas foram moldados na dimensão 100 mm x 200 mm com período de cura de sete dias em câmara úmida a uma temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

### 2.2.4. Resistência à compressão simples (RCS)

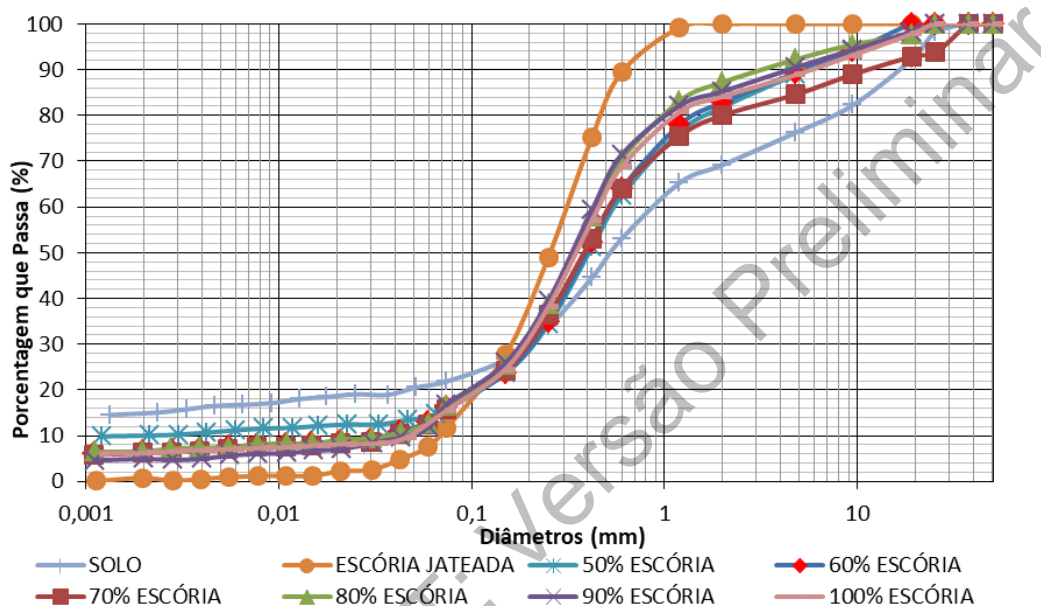
Como parâmetro normativo para o ensaio foi utilizada a norma DNER-ME 201/94. Os corpos de prova, após o período de cura de sete dias, foram submetidos à imersão em água por 4 horas.

### 2.2.5. Permeabilidade a carga variável

O coeficiente de permeabilidade foi determinado pelo método da carga variável seguindo as recomendações da norma NBR 14545/2000. A moldagem dos corpos de prova foi realizada utilizando os parâmetros de compactação de cada mistura na energia intermediária.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As curvas granulométricas do solo, da escória de cobre jateada e das misturas são apresentadas na Figura 1. Da figura percebe-se que as curvas apresentam uma alteração principalmente na faixa de diâmetro entre 10,0 mm e 0,2 mm e a partir de 0,074 mm. Observa-se ainda uma convergência das curvas em uma faixa entre 0,1 mm e 0,25 mm. Tais alterações estão relacionadas à maior porcentagem da fração areia, notadamente à fração média a fina, da escória de cobre presente nas misturas.



**Figura 1:** Curvas granulométricas do solo, da escória jateada e das misturas

Os dados parciais da granulometria que mostram o comportamento das curvas estão reunidos na Tabela 1, na qual ainda são apresentados os limites de liquidez, índice de plasticidade e a classificação geotécnica. Comparando as granulometrias do solo e das misturas, observa-se que houve maiores variações na fração areia, seguida da fração de pedregulho. A fração areia presente na escória (88,31%) contribuiu com uma maior porcentagem, principalmente as porções média e fina, que corresponde a cerca de 70% destas porções. Em relação à fração de fino nas misturas, observa-se uma baixa variação e estão relacionadas à redução da massa de solo em favor das porcentagens de escória adicionada, uma vez que tais frações no resíduo são menores (11,69%).

**Tabela 1:** Dados de parte da granulometria, limites de Atterberg e classificação

Amostra	Composição granulométrica				L <sub>L</sub> (%)	I <sub>P</sub> (%)	IG	Classificação TRB
	% que passam nas peneiras							
	# 4	# 10	# 40	# 200				
Solo	76,29	69,19	44,51	21,86	34	16	0	A-2-6
Solo + 50% Escória	88,68	81,63	51,29	16,79	NP	NP	0	A-2-4
Solo + 60% Escória	90,91	84,81	55,61	16,60	NP	NP	0	A-2-4
Solo + 70% Escória	84,60	80,03	53,11	15,89	NP	NP	0	A-2-4
Solo + 80% Escória	92,25	87,25	57,98	16,58	NP	NP	0	A-2-4
Solo + 90% Escória	90,49	85,24	59,31	16,75	NP	NP	0	A-2-4
Solo + 100% Escória	88,90	84,13	56,99	15,49	NP	NP	0	A-2-4
Escória de cobre jateada	100,00	100,00	75,17	11,69	NP	NP	0	A-2-4



Em relação aos limites de Atterberg, observa-se que a adição da escória tornou a mistura não plástica. Isto foi ocasionado pelo carácter não plástico da escória, uma vez que esse resíduo se assemelha a uma areia. De acordo com resultados de ensaios de microscopia eletrônica de varredura apresentados por Almeida et al. (2017), a morfologia angulosa da escória pode contribuir com essa redução por criar um “travamento” nas partículas do solo, o que impede o deslizamento entre os grãos. É válido ressaltar que o solo puro não se enquadra nas especificações rodoviárias tradicionais como material de base e sub-base de pavimentos, uma vez que seus valores de LL e IP estão muito acima dos limites máximos exigidos, que são 25% e 6%, respectivamente.

Quanto à classificação geotécnica, a alteração para o grupo A-2-4 das misturas em relação ao solo, está associada aos limites de Atterberg. Para compor tal grupo, o solo deve apresentar um índice de plasticidade máximo da ordem de 10%, o que está de acordo com o carácter não plástico das misturas. Vale destacar que, na classificação da escória de cobre jateada, Santos et al. (2018) obtiveram uma amostra A-3. Essa alteração está relacionada ao material passante nas peneiras #40 e #200 que é 51% no mínimo e 10% no máximo, respectivamente. Como a escória é proveniente de um processo de jateamento, esta sofre alterações na sua granulometria, pois ao se chocar com a superfície metálica sob elevada pressão faz quebrar os grãos tornando a granulometria mais fina. Uma amostragem no lote da escória levou à coleta de um material mais fino, causando uma diferenciação na porcentagem que passa na peneira #200, provocando essa mudança na classificação.

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos da densidade real dos grãos. Esse parâmetro é uma característica associada à natureza mineralógica das partículas, pois depende dos minerais componentes e sua quantidade na amostra. Observa-se que a densidade aumenta, porém esse aumento não é constante, e está condicionada ao aumento dos teores de escória na mistura. A alta densidade da escória pode ter relação com o processo de jateamento que carrega partes oxidadas da superfície metálica rica em óxido de ferro que apresenta maiores densidades.

**Tabela 2:** Densidade real dos grãos

Amostra	Densidade real ( $G_s$ )
Solo	2,684
Solo + 50 % Escória	3,080
Solo + 60% Escória	3,143
Solo + 70% Escória	3,217
Solo + 80% Escória	3,250
Solo + 90% Escória	3,291
Solo + 100% Escória	3,321
Escória de cobre jateada	3,929

A Tabela 3 apresenta os resultados do ensaio de compactação do solo e das misturas. Observa-se que praticamente não houve variações nos pesos específicos entre os mesmos teores de escória. Porém, uma variação de 0,5% na umidade ótima ocorreu para o teor de 60% de escória. Tal variação pode estar condicionada a massa de material passante nas peneiras de 19 mm e 4,8 mm que, por amostragem, pode ter sido maior. São notáveis ainda, uma tendência de a umidade ótima diminuir e o peso específico aumentar com o aumento nos teores de escória em relação ao solo. Essa diminuição e aumento são relacionados à baixa absorção que a escória de cobre apresenta, bem como à sua elevada densidade, respectivamente.

Em trabalhos realizados com a escória de cobre jateada proveniente do mesmo processo de

jateamento, Anjos *et al.* (2017) obtiveram o valor de 0,33% de absorção, valor considerado baixo. Apesar de não ser jateada, mas Gorai *et al.* (2003) caracterizam a escória de cobre com absorção de 0,13%. A diferença de absorção está condicionada ao processo de jateamento. No entanto, em ambos os casos a capacidade de absorção ainda continua baixa.

**Tabela 3:** Peso específico aparente seco máximo e umidade ótima

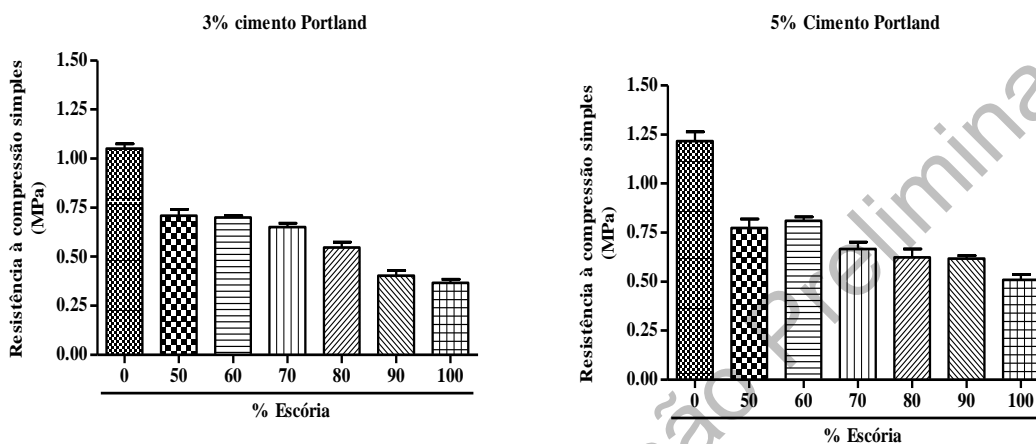
Escória (%)	Cimento Portland (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega_{\acute{o}tima}$ (%)
0	3	21,12	8,9
	5	21,46	8,8
50	3	23,81	7,3
	5	23,94	7,2
60	3	23,84	7,6
	5	23,84	7,1
70	3	24,15	7,4
	5	24,05	7,2
80	3	24,33	7,5
	5	24,46	7,1
90	3	24,78	7,2
	5	24,85	7,2
100	3	24,92	7,2
	5	24,78	7,4

A Tabela 4 apresenta os valores obtidos de RCS. Em geral, observa-se uma redução da resistência ao aumentar os teores de escória nas misturas. Ao adicionar escória de cobre jateada, que apresenta granulometria de fração areia em sua maior parte, torna o solo mais granular, provocando menor resistência coesiva. Para obter maiores resistências é necessário adicionar mais aditivo, o que pode tornar a reutilização do resíduo inviável.

**Tabela 4:** Resistência à compressão simples

Escória (%)	Cimento (%)	RCS (MPa)			Média	Desvio Padrão	Umidade de Moldagem (%)			Umidade Ótima (%)
		CP1	CP2	CP3			CP1	CP2	CP3	
0	3	1,07	1,08	1,00	1,05	± 0,03	8,5	8,6	8,6	8,9
	5	1,31	1,19	1,15	1,22	± 0,05	8,4	8,4	8,5	8,8
50	3	0,74	0,65	0,74	0,71	± 0,05	7,6	7,2	7,8	7,3
	5	0,69	0,85	0,78	0,77	± 0,08	7,4	7,5	7,5	7,2
60	3	0,69	0,69	0,72	0,70	± 0,02	7,9	7,8	7,6	7,6
	5	0,78	0,80	0,85	0,81	± 0,04	7,2	7,1	7,3	7,1
70	3	0,61	0,68	0,66	0,65	± 0,04	7,6	7,4	7,7	7,4
	5	0,60	0,68	0,72	0,67	± 0,06	7,6	7,1	7,1	7,2
80	3	0,60	0,53	0,51	0,55	± 0,05	7,9	7,9	7,9	7,5
	5	0,71	0,57	0,59	0,66	± 0,06	6,9	7,5	7,5	7,1
90	3	0,36	0,45	0,40	0,40	± 0,05	7,5	7,4	7,0	7,2
	5	0,65	0,60	0,60	0,62	± 0,03	7,1	7,1	6,9	7,2
100	3	0,33	0,38	0,39	0,37	± 0,03	7,5	7,2	7,2	7,2
	5	0,46	0,52	0,55	0,51	± 0,05	7,2	7,3	7,1	7,4

O tratamento estatístico mostrou que houve diferenças estatísticas ( $p < 0,05$ ) entre os teores com e sem escória para as duas porcentagens de cimento. Para 3% de cimento, a diferença ocorreu entre os teores de escória: 50% com 80%, 90% e 100%; 60% com 80%, 90% e 100%; 70% com 90% e 100%; 80% com 90% e 100%. Já para o teor de 5% de cimento, a diferença significativa ocorreu entre 50% com 100%; 60% com 80%, 90% e 100% de escória. A Figura 2 mostra graficamente a variação da resistência em relação ao teor de escória para cada teor de cimento.



**Figura 2:** Teor de escória versus RCS para 3 e 5% de cimento Portland

Nos teores de 5% de cimento Portland, a resistência obtida com o teor de 60% de escória é mais elevada do que o de 50% de escória, e logo em seguida a RCS começa a diminuir. Esse ganho de resistência pode estar relacionado à correção granulométrica que a escória proporciona somada à cimentação que o cimento Portland provoca. O mecanismo de aumento da resistência mecânica é devido à ação aglutinante do cimento, notadamente para maiores teores do aditivo, em que forma núcleos interligados distribuídos pela massa de solo. Para menores teores de cimento, verifica-se uma ação modificadora da fração argilosa com expressiva redução na plasticidade, podendo ser ou não acompanhada de aumento da resistência, pois o cimento promove a floculação das partículas de argila (Cruz e Jalali, 2010).

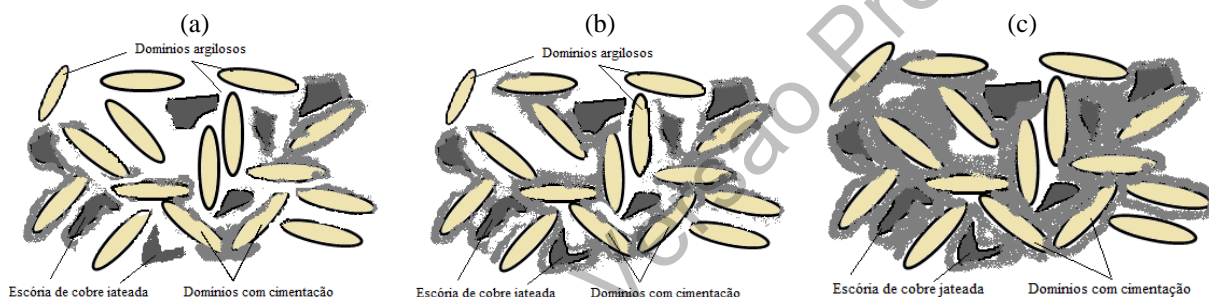
Nos estudos de Almeida *et al.* (2017), para menores teores de escória jateada e os mesmos teores de cimento foram obtidos maiores valores de resistência. Rodrigues (1992) descreve um modelo estrutural proposto por Herzog (1967) de matriz esqueleto no qual o cimento endurecido é rodeado por uma zona de domínios argilosos. Se o conteúdo de cimento for muito baixo, tais unidades de esqueleto se comportam como partículas bem granulares e separadas, flutuando na matriz argilosa. Aumentando-se um pouco a quantidade de cimento, as unidades do esqueleto ficam menos espaçadas, porém, não interconectadas. Já com maior conteúdo de cimento, o espaço entre as unidades é menor e as ramificações tornam-se interligadas, aumentando a resistência da matriz argilosa. Para quantidades de cimento ainda maiores não há produção de matriz, sugerindo a formação de um esqueleto rígido, completamente interconectada, tornando-se maior fonte de resistência do sistema.

Em semelhança ao concreto, Belincanta *et al.* (2006) descrevem que nesse material a pasta de cimento envolve completamente os sólidos inertes, solidarizando-os através de ligações fortes e resistentes. Já no solo, mesmo aqueles granulares, o cimento geralmente não envolve



totalmente os sólidos, sendo os mesmos somente solidarizados em seus pontos de contato.

A Figura 3 ilustra um modelo de estrutura proposto para as misturas em estudo e que corrobora com Herzog (1967): na mistura solo-escória-cimento, cuja estrutura constituída de domínios de variados tamanhos, existem vazios interconectados. Devido às reações de hidratação e reações secundárias há o endurecimento do cimento rodeado pelos domínios argilosos e pelos grãos de escória de cobre jateada. Canais são formados pelos macroporos interconectados dentro da massa argilosa e os domínios e as partículas de escória podem ficar revestidos de cimento e se apresentam como ramificações relativamente fortes e reforçadas. Para baixos teores de cimento e variando o teor de escória, a estrutura formada pelos domínios e alguns grãos de escória se comportam como partículas granulares, mergulhadas na matriz argilosa e de escória (Figura 3a). Elevando-se um pouco quantidade de cimento, tais domínios e grãos se unem, porém não se apresentando interconectados (Figura 3b). Ao aumentar o teor de cimento, o espaço entre os domínios e os grãos de escória é reduzido e as ramificações tornam-se interligadas (Figura 3c).



**Figura 3:** Modelo da estrutura solo-cimento-escória

Os resultados dos coeficientes de permeabilidade são apresentados na Tabela 5. De acordo com Vargas (1977), solos com permeabilidade entre  $10^{-3}$  a  $10^{-5}$  cm/s apresentam um grau de permeabilidade baixa. Para solos com  $10^{-5}$  a  $10^{-7}$  cm/s, esse grau passa para muita baixa permeabilidade. Observa-se que a adição da escória de cobre jateada e do cimento Portland reduziu a permeabilidade das misturas, em comparação ao valor de referência, aquele obtido para o solo natural, cujo valor é igual a  $10^{-4}$  cm/s. Em relação ao teor de 3% de cimento, a permeabilidade foi reduzida em 10x para o teor de 100% de escória. Para 5% do aditivo, essa redução já ocorreu para 70% do resíduo.

**Tabela 5:** Coeficiente de permeabilidade, em termos de ordem de grandeza (cm/s)

Cimento (%)	Escória (%)					
	50	60	70	80	90	100
3	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$
5	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$

Sabe-se que a escória e o cimento estabilizam granulométrica e quimicamente o solo, causando uma alteração em seus vazios. Maiores teores de escória tornam a mistura mais granular, aumentando a permeabilidade. Por outro lado, era de se esperar que um maior teor de cimento tornasse a mistura menos permeável. Porém, os resultados para 5% do aditivo não se confirmaram.

Tal razão pode ser entendida com base na descrição de Herzog (1967) e Rodrigues (1992): para teores de cimento muito baixos, as unidades de esqueleto se comportam como partículas bem granulares e separadas, flutuando na matriz argilosa, como mostrado na Figura 3. O teor de 5% de cimento proporcionou a formação de partículas granulares que envolveram partes dos grãos de escória e do solo, criando macroporos interligados por onde a água fluía. Para o teor de 3% de cimento, as partículas formadas podem ter sido de menor tamanho, porém inseridas em uma matriz composta de escória e argila com menores tamanhos de poros por onde a água percolava. Assim, os teores de cimento Portland analisados nesta pesquisa, não foram suficientes para tornar uma mistura interligada fazendo reduzir a permeabilidade.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As avaliações dos resultados obtidos podem ser consideradas satisfatórias, visto que foi possível verificar o comportamento físico, mecânico e hidráulico das misturas analisadas. Pôde-se concluir que a fração areia presente na escória foi responsável pelas alterações nas misturas. Como consequência, essa fração tornou a mistura não plástica e elevou a densidade, uma vez que a escória possui elevada massa específica.

Por atribuições dessa massa, o aumento do percentual de escória fez elevar o peso específico e por sua baixa absorção, fez diminuir a umidade ótima das misturas. As porcentagens de cimento Portland utilizadas nesta pesquisa parecem não influenciar nessa umidade.

Quanto à resistência à compressão simples, em geral, ocorreu a sua diminuição com o aumento dos teores de escória. O cimento endurecido rodeado pelos domínios argilosos e o crescente teor de escória não foram suficientes para formar uma estrutura rígida que garantisse aumento na resistência. Também como consequência da estrutura formada, os vazios interconectados permitiram uma diminuição na permeabilidade, porém variando o grau de permeabilidade entre baixa e muito baixa.

Os resultados obtidos indicam que a escória de cobre jateada, em misturas de solo e cimento Portland, pode ser uma alternativa de reutilização seja em aterros ou camadas de pavimento, seja em pequenos trechos sem necessidade de elevadas capacidades de suporte e áreas de estocagem de menores cargas, evitando-se o seu descarte no meio ambiente.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Pesquisa (COPEs) por fomentar o Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2004) *NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2000) *NBR 14545: Solo - Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos a Carga Variável*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Almeida, G. B. O.; E. H. Cavalcante e M. D. T. Casagrande (2017) Aplicabilidade da Inserção de Escória de Cobre Jateada em Misturas de Solo-Cimento para Camadas de Base de Pavimentos. *Revista Pavimentação*, ano XII, n. 46, p. 36-52. Out – dez 2017. ISSN 1809 – 1865.
- Anjos, M. A. G.; A. T. C. Sales e N. Andrade (2017) Blasted Copper Slag as Fine Aggregate in Portland Cement Concrete. *Journal of Environmental Management*, v. 196, p. 607–613.
- Belincanta, A.; J. H. C. Reis; M. T. Nóbrega e J. A. Lukiantchuki (2006) Estudo Experimental de Solos Lateríticos do Noroeste do Paraná, Aditivados com Cimento Portland. *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos*, COBRAMSEG, Curitiba.
- Bispo, M. E. G.; F. Abecê; H. C. Alves; R. Gonçalves; N. A. Souza; S. Mendonça; L. M. Araújo; E. A. Sá; R. Q. Hilário (2018) Análise Laboratorial de Misturas Asfálticas com Rejeito de Ardósia Proveniente da Cidade de Papagaios, Minas Gerais. *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos Engenharia Geotécnica*, COBRAMSEG, Salvador.
- Biswas, A. K. e W. G. Davenport (2002) *Extractive Metallurgy of Copper*. Pergamon Press, p. 518.

- Casagrande, M. T. D., E. H. Cavalcante e G.B.O. Almeida (2015) Estudos Experimentais de um Solo Aditivado com Cimento Portland para Aplicação em Camadas de Pavimentos. *Anais do XV Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Buenos Aires.
- Ceratti, J. A. P. (1991) *Estudo do Comportamento a Fadiga de Solos Estabilizados com Cimento para Utilização em Pavimento*. UFRJ, Rio de Janeiro (Tese de Doutorado).
- Chang, T-S. e R. D. Woods (1992) Effect of Particle Contact Bond on Shear Modulus. *Journal of Geotechnical Engineering*. v. 118, n. 8, p. 1216-1233.
- Cristelo, N. M. C. (2001) *Estabilização de Solos Residuais Graníticos Através da Adição de Cal*. Universidade do Minho, Braga (Dissertação de Mestrado).
- Cruz, M. L. S. e S. Jalali (2010) Melhoramento do Desempenho de Misturas de Solo-Cimento. *Revista Luso-Brasileira de Geotecnia*, n. 120, p. 49-64.
- De Bel, R.; A. G. Correia; G. C. Antonio e J. C. Verbrugge (2009) Contribution of Loamy Soil Treatment to Improve Embankments Performance. *Geotech Spec Publ*, v.189, p. 186-91.
- DNER (1994) DNER-ME 041: *Solos – Preparação de Amostras para Ensaio de Caracterização*. Departamento Nacional de Estrada de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1994) DNER-ME 051: *Solos - Análise Granulométrica*. Departamento Nacional de Estrada de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1994) DNER-ME 082: *Solos - Determinação do Limite de Liquidez*. Departamento Nacional de Estrada de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1994) DNER-ME 093: *Solos - Determinação da Densidade Real*. Departamento Nacional de Estrada de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1994) DNER-ME 122: *Solos - Determinação do Limite de Plasticidade*. Departamento Nacional de Estrada de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1994) DNER-ME 162: *Solos - Compactação Utilizando Amostras Trabalhadas*. Departamento Nacional de Estrada de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1994) DNER-ME 201: *Solos - Cimento – Compressão Axial de Corpos-de-Prova Cilíndricos*. Departamento Nacional de Estrada de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1994) DNER-ME 202: *Solo - Cimento – Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova Cilíndricos*. Departamento Nacional de Estrada de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1994) DNER-ME 216: *Solo-Cimento – Determinação da Relação Entre o Teor de Umidade e a Massa Específica Aparente*. Departamento Nacional de Estrada de Rodagem, Rio de Janeiro.
- Gorai, B.; R. K. Jana e Premchand (2003) Characteristics and Utilisation of Copper Slag – A Review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 39, p. 299-313.
- Herzog, A. (1967) Evidence for a Skeleton-Matrix Structure in Clays Stabilized with Portland Cement. (5ª ed.) Australia - New Zealand Conference on SMFE.
- Marangon, M. (1992) *Utilização de Solo-Cimento em uma Solução Alternativa de Estrutura de Arrimo*. PUC-Rio, Rio de Janeiro (Dissertação de Mestrado).
- Menezes, J. H. F.; E. H. Cavalcante e G. B. O. Almeida (2018) Tentativa de Estabilização de um Solo Expansivo com o Emprego de Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição. *Anais da XIX do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos Engenharia Geotécnica*, COBRAMSEG, Salvador.
- Nelson, J. D. e J. D. Miller (1992) *Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*. Wiley, New York: Colorado State University.
- Pedarla A.; S. Chittoori e A. J. Puppala (2011) Influence of Mineralogy and Plasticity Index on the Stabilization Effectiveness of Expansive Clays. *J. Transp Res Board, Nat Acad Sci, Transp Res Board*, v. 2212, p. 91-9.
- Puppala A. J.; B. C. S. Chittoori; N. Talluri; M. Le; T. Bheemasetti e J. Thomey (2013) Stabilizer Selection for Arresting Surficial Slope Failures: A Sustainability Perspective. *ASCE GeoCongress*, San Diego, California. p. 1465-74.
- Puppala A. J.; R. Kadam; R. Madhyannapu e L. R. Hoyos (2006) Small Strain Shear Moduli of Chemically Stabilized Sulfate-Bearing Cohesive Soils. *J Geotech Geoenviron Eng*, v. 132, p. 322-36.
- Reinert, J.; L. G. M. Gonzaga; F. C. P. Diniz; A. C. Q. Gonçalves; M. S. Rodrigues; V. H. C. N. R. Peixoto (2018) Utilização de Resíduos da Mineração de Quartzo de Gouveira – MG Para Reforço de Subleito de Rodovias. *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos Engenharia Geotécnica*, COBRAMSEG, Salvador.
- Rodrigues, M. G. M. (1992) *Contribuição ao Estudo do Método Físico-Químico de Dosagem do Solo-Cimento*. UFRJ, Rio de Janeiro (Dissertação de Mestrado).
- Santos, V. R.; G. B. O. Almeida; M. D. T. Casagrande e E. H. Cavalcante (2018) Influência da Escória de Cobre Jateada na Resistência Mecânica e na Permeabilidade de um Solo Areno-Argiloso. *Anais do XVI*

*Congresso Nacional de Geotecnia, CNG, Ponta Delgada.*

Senço, W. (2001) *Manual de Técnicas de Pavimentação*, (1ª ed.) Pini, São Paulo, p. 671.

Sotomayor, J. M. G. e M. D. T. Casagrande (2018) Comparação Entre Envoltórias de Resistência de Pico e Residual de um Rejeito de Minério de Ouro Reforçado com Fibras de Polipropileno Distribuídas Aleatoriamente. *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos Engenharia Geotécnica*, COBRAMSEG, Salvador.

Vargas, M. (1977) *Introdução à mecânica dos solos*, McGraw-Hill do Brasil, Ed. da Universidade de São Paulo.

Yi Y.; S. Liu e A. J. Puppala (2016) Laboratory Modelling of T-Shaped Soil-Cement Column for Soft Ground Treatment Under Embankment. *Géotechnique*; v. 66 (1):85–9 ICE Publishers.

---

Bruno Lima Mendonça (brunnoluma@gmail.com)

Guilherme Bravo de Oliveira Almeida (gbravo1982@gmail.com)

Erinaldo Hilário Cavalcante (erinaldo@ufs.br)

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe

Av. Marechal Rondon, s/n, Jardim Rosa Elze - São Cristóvão/SE

Michéle Dal Toé Casagrande (mdtcasagrande@unb.br)

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília

Asa Norte – Brasília, DF

Anais 33º ANPET: Versão Preliminar