



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**



Paula Jessica da Cruz Santos

**ANÁLISE DA ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DE
UM SOLO ARENO-ARGILOSO DO MUNICÍPIO DE SÃO
CRISTÓVÃO/SE COM ESCÓRIA DE COBRE JATEADA.**

São Cristóvão - SE

2019

Paula Jessica da Cruz Santos

**ANÁLISE DA ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DE
UM SOLO ARENO-ARGILOSO DO MUNICÍPIO DE SÃO
CRISTÓVÃO/SE COM ESCÓRIA DE COBRE JATEADA.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Sergipe – UFS, para encerramento do
componente curricular e conclusão da
graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme
Bravo de Oliveira Almeida

São Cristóvão – SE

2019

É concedida à Universidade Federal de Sergipe permissão para reproduzir cópias desta monografia e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho acadêmico pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Assinatura

Santos, Paula Jessica da Cruz.

Análise da estabilização granulométrica de um solo areno-argiloso do município de São Cristóvão/SE com escória de cobre jateada / Paula Jessica da Cruz Santos; Orientador: Guilherme Bravo de Oliveira Almeida. São Cristóvão, 2019

44 p.: il.

Trabalho Acadêmico Orientado. Departamento de Engenharia Civil. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão.

1. Engenharia Civil – TCC. 2. Estabilização granulométrica do solo. 3. Escória de cobre jateada. 4. Pavimentação. I. Almeida, Guilherme Bravo de Oliveira. II. Universidade Federal de Sergipe. Departamento de Engenharia Civil.

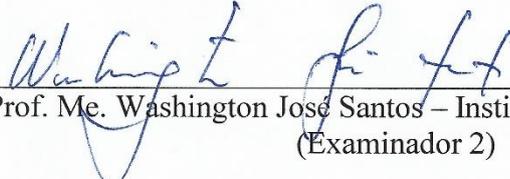
PAULA JESSICA DA CRUZ SANTOS

**ANÁLISE DA ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DE UM SOLO ARENO-
ARGILOSO DO MUNICÍPIO DE SÃO CRISTÓVÃO/SE COM ESCÓRIA DE
COBRE JATEADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe (UFS) como requisito para o título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 03 de maio de 2019

Banca Examinadora:

 Prof. Dr. Guilherme Bravo de Oliveira Almeida – Universidade Federal de Sergipe (Orientador)	8,0 Nota
 Prof. Dr. Erinaldo Hilário Cavalcante – Universidade Federal de Sergipe (Examinador 1)	8,0 Nota
 Prof. Me. Washington José Santos – Instituto Federal de Sergipe (Examinador 2)	8,0 Nota

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e por me proporcionar sabedoria, pois sem ele nada seríamos.

Agradeço a meus pais, Givaldo e Claudinete, por estarem sempre ao meu lado, me apoiando e me ensinando o caminho certo a seguir, por fazer o possível e o impossível para me ver bem e por colocar meus sonhos sempre à frente dos seus. Sem esquecer da minha irmã, Natalia, por toda compreensão e amor durante esses anos.

Agradeço a toda minha família, que sempre acreditou em meu potencial e com quem sempre compartilho bons momentos e alegria, em especial, a meus avós, tios (que são muitos) e primos.

Aos meus mestres, com quem tive a honra de aprender ao longo da vida, ampliando a minha visão do mundo e me ensinando a questionar coisas ao meu redor, manifesto aqui minha gratidão, especialmente ao meu orientador Guilherme Bravo e ao Técnico Willami e Washington, por me orientarem e por estarem presente nessa etapa final de curso, disponibilizando a sua atenção.

A todos os meus amigos que estiveram presentes durante esses longos anos de graduação, em especial a Rai, Itamires, Jacira, Andrey, Chicão, Gabriel, Jailson, Erika, Jessica, Wendel e a galerinha 10 ou do bolo, sem vocês o curso não teria sido o mesmo.

Obrigada a toda equipe do GEOPAV pela colaboração durante o decorrer do trabalho.

Muito obrigada a todos que torceram por mim e contribuíram de alguma forma para essa minha realização!

Resumo

A estabilização granulométrica consiste em alterar as propriedades do solo de forma a melhorar alguma das características, como resistência e permeabilidade. Essa alteração pode ser realizada adicionando ou retirando certas quantidades das frações constituintes. A escória de cobre jateada, proveniente do processo de jateamento de superfície metálica, assemelha-se a uma areia fina, sendo um resíduo que pode proporcionar alterações ao solo quando incorporado ao mesmo. Assim, o objetivo desta pesquisa restringiu-se a analisar o resíduo como estabilizante granulométrico de solo para aplicação em aterros e/ou pavimentação. O solo utilizado foi classificado como SC e A-2-6, densidade real dos grãos 2,69 e índice de plasticidade de 16%. A escória de cobre jateada foi classificada como SP-SM e A-2-4, densidade real 3,93 e caracterizada como um material não plástico. As misturas envolveram teores de 60% a 90% de escória, em relação à massa seca de solo, e foram submetidos aos ensaios de caracterização física (granulometria, massa específica dos grãos e limites de Atterberg), compactação (energia intermediária), índice de suporte Califórnia, resistência à compressão simples e permeabilidade à carga variável. As misturas foram classificadas como SM e A-2-4, com o caráter não plástico e crescentes massas específicas com o teor de escória. Os resultados obtidos quanto à granulometria das misturas enquadraram-se na faixa “F”, que podem ser utilizadas apenas em pavimentos para tráfegos leves. Dos ensaios de compactação, observou-se que o peso específico aparente seco máximo crescia e a umidade ótima diminuía, com o aumento do teor de escória; a resistência à compressão simples das misturas diminuiu, enquanto o índice de suporte Califórnia apresentou maior valor para 60% de escória. O coeficiente de permeabilidade das misturas variou segundo a ordem de grandeza 10^{-5} a 10^{-4} cm/s. Conclui-se que a adição da escória modificou a granulometria do solo aumentando a fração do tamanho de areia presente na mistura, fez reduzir a resistência à compressão para o maior teor de escória, proporcionou aumento no índice suporte Califórnia e uma redução na permeabilidade das misturas. Dos teores adicionados, 60% escória demonstrou ser o mais adequado para estabilização granulométrica do solo. Assim, a escória de cobre jateada pode ser uma alternativa de estabilização para o solo pesquisado, sendo indicado o uso do resíduo como camada de sub-base na pavimentação, de vias de baixo volume de tráfego.

Palavras-chave: Estabilização Granulométrica do Solo; Escória de Cobre Jateada; Pavimentação.

Abstract

The granulometric stabilization consists in changing soil properties in order to change some of its characteristics, such as resistance and permeability. This change can be made by adding or removing certain amounts of its constituent fractions. The blasted copper slag from the metal surface blasting process resembles a fine sand, which is a residue that can provide changes to the soil when incorporated into it. Thus, the goal of this research was analyzing the residue as a granulometric stabilizer for landfills or paving. The soil used was classified as clay-sand SC, A-2-6, real density of grains 2,69 and with a plasticity index of 16%, while the scattered copper slag is classified as sand-siloxane SM, A-2-4, density 3,93 and not plastic plasticity index. The mixtures involved 60% to 90% of slag and were submitted to the characterization tests (granulometry, grain specific mass and Atterberg limits), compaction (intermediate energy), California Bearing Ratio, simple compressive strength and permeability to variable load. The mixtures were classified as SM and A-2-4, with non-plastic and crescent character specific masses with the slag content. The results obtained for the granulometry of the mixtures were in the "F" range, which can only be used on light traffic pavement. From the compaction tests, it was observed that the maximum dry apparent specific weight increased and the optimum moisture decreased with increasing slag content; the simple compression strength of the blends decreased, while the California Bearing Ratio showed a higher value for 60% slag. The permeability coefficient of the mixtures varied according to the magnitude order of 10^{-5} a 10^{-4} cm/s. It was concluded that addition of the slag modified the soil granulometry by increasing the fraction of the sand size present in the mixture, reduced the compressive strength for the higher slag content, provided an increase in the California Bearing Ratio and a reduction in the permeability of the mixtures. Of the added contents, 60% slag proved to be the most adequate for soil size stabilization. Thus, blasted copper slag may be a stabilization alternative for the surveyed soil, being indicated the use of the residue as sub-base layer in the paving, of low volume traffic routes.

Keywords: Soil granulometric stabilization; blasting Copper slag; Paving.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Métodos de estabilização de solo.....	4
Figura 2: Escolha do agente estabilizador em função do tipo de solo.....	6
Figura 3: Deslocação da água devido à criação de um potencial elétrico.	8
Figura 4: Esquema típico do aquecimento de um solo.....	9
Figura 5: Esquema de um processo de congelação.	10
Figura 6: Resultados de Ensaios para diferentes solos Brasileiros.....	12
Figura 7: a) Solo bem graduado; b) Solo mal graduado.....	12
Figura 8: Escória de cobre - (a) Escória de cobre resfriada ao ar e (b) escória de cobre granulada.	15
Figura 9: MEV da amostra de escória de cobre jateada: (a) partículas angulosas e com lados afiados e (b) partículas arredondadas.....	20
Figura 10: Visão da jazida aningas em São Cristóvão/SE.	21
Figura 11: Vista externa do tanque em manutenção.....	22
Figura 12: Escória de cobre jateada utilizada nesta pesquisa.....	22
Figura 13: Preparação e armazenamento da mistura.....	23
Figura 14: Ensaio de compactação da escória de cobre jateada - (a)preparação, (b) moldagem, (c) amostragem para obtenção da umidade e (d) aparência da escória no último ponto.....	24
Figura 15: Ensaio de ISC - (a) preparação da pré - mistura; (b) corpos de prova pré - imersão (c) corpos de prova imersos e (d) rompimento do corpo de prova na prensa. ..	24
Figura 16: Ensaio de RCS - (a) preparação do corpo de prova; (b) corpos de prova na câmara úmida; (c) corpo de prova posicionado na prensa e (d) corpo de prova rompido.	25
Figura 17: Ensaio de Permeabilidade - (a) pré-mistura da amostra; (b) cilindro preparado para receber a amostra; (c) corpo de prova moldado, (d) saturação ascendente do corpo de prova e (e) esquema do permeâmetro de carga variável.....	27
Figura 18: Curva granulométrica do solo.....	28
Figura 19: Curva granulométrica da escória de cobre jateada.....	30
Figura 20: Curvas granulométricas dos materiais e misturas.....	32
Figura 21: Curvas de compactação das misturas.....	35
Figura 22: Gráfico de comparação dos ensaios de RSC.....	37
Figura 23: Gráfico de comparação dos ensaios de ISC.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Técnicas para correções granulométricas.	13
Tabela 2: Resultados do ensaio de lixiviação das amostras de escória de cobre jateada – comparação com a listagem apresentada no anexo F da NBR 10004/2004.	18
Tabela 3: Resultados do ensaio de solubilização das amostras de escória de cobre pós – comparação com a listagem apresentada no anexo G da NBR 10004/2004.	18
Tabela 4: Composição química das amostras de escória de cobre original.	19
Tabela 5: Composição química das amostras de escória de cobre jateada.	19
Tabela 6: Resultados da análise granulométrica do solo.	28
Tabela 7: Classificação do solo Natural.	29
Tabela 8: Resultados da análise granulométrica da escória de cobre jateada.	30
Tabela 9: Classificação da escória de cobre jateada.	31
Tabela 10: Resultado da análise granulométrica de misturas solo-escória de cobre jateada.	33
Tabela 11: Densidade real dos grãos da mistura solo e escória de cobre jateada.	33
Tabela 12: Classificação das misturas.	34
Tabela 13: Peso específico aparente seco máximo e umidade ótima das misturas solo e escória de cobre jateada.	35
Tabela 14: Resistência à compressão simples das misturas solo e escória de cobre jateada.	36
Tabela 15: Resultados dos ensaios de ISC.	37
Tabela 16: Resultados dos ensaios de permeabilidade.	38

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - American Society for Testing and Materials

CBR - California Bearing Ratio

DEC – Departamento de Engenharia Civil

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral

GEOPAV - Laboratório de Geotecnia e Pavimentação

IFS – Instituto Federal de Sergipe

IG - Índice de Grupo

IP - Índice de Plasticidade

ISC - Índice de Suporte Califórnia

LL - Limite de Liquidez

LP - Limite de Plasticidade

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

RCS - Resistência à Compressão Simples

TRB - Transportation Reserch Board

UFS - Universidade Federal de Sergipe

SUCS – Sistema Unificado de Classificação dos solos

LISTA DE SÍBOLOS

K - Coeficiente de permeabilidade

A - Área da bureta

L - Comprimento da amostra de solo

A - Área da amostra de solo

Δt - Variação de tempo entre as leituras

h_0 e h_f – Leitura de cargas no instante inicial e final, respectivamente

k_{20} – Coeficiente de permeabilidade referido à temperatura de 20 °C;

R_T – Relação entre a viscosidade da água na temperatura de ensaio e a viscosidade da água a 20°C.

G_s – Densidade real dos grãos

$\gamma_{d_{m\acute{a}x}}$ – Peso específico aparente seco máximo

$\omega_{\acute{o}t\acute{i}m\acute{a}}$ - Umidade ótima

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Considerações gerais	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo geral	2
1.2.2	Objetivos específicos.....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	Estabilização de solos.....	3
2.1.1	Estabilização química.....	4
2.1.2	Estabilização física	8
2.2	Estabilização Granulométrica.....	10
2.3	Resíduo industrial.....	13
2.3.1	Produção do cobre	14
2.3.2	Escória de cobre	14
2.3.3	Escória de cobre utilizada no jateamento abrasivo	15
2.3.4	Aplicações da escória de cobre jateada	17
3	MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1	Materiais.....	21
3.1.1	Solo.....	21
3.1.2	Escória de cobre jateada	21
3.2	Métodos de ensaio	22
3.2.1	Caracterização física.....	22
3.2.2	Ensaio Mecânicos	23
3.2.3	Ensaio Hidráulico	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1	Caracterização dos materiais	28
4.1.1	Caracterização física e mecânica do solo	28
4.1.2	Caracterização física e mecânica da escória de cobre jateada.....	30

4.2	Caracterização das misturas de solo e escória de cobre jateada.....	32
4.2.1	Caracterização física.....	32
4.2.2	Caracterização mecânica	35
4.2.2.1	Compactação	35
4.2.2.2	Resistência à Compressão Simples	36
4.2.2.3	Índice Suporte Califórnia	37
4.2.2.4	Permeabilidade	38
5	CONCLUSÃO.....	39
6	REFERÊNCIAS	40

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

As estradas desempenham um importante papel na configuração e na organização do espaço territorial brasileiro (SOUZA, 2016). O modal rodoviário, em relação aos demais, ainda é soberano, sendo possível antever que a permanência deste quadro não deverá sofrer mudanças significativas no decorrer dos anos (SOUZA JUNIOR, 2011). Nesse sentido, é necessário manter a qualidade do sistema rodoviário, com a execução de obras que viabilize uma melhor infraestrutura. Tais obras rodoviárias necessitam de diversos tipos de materiais, e, em sua grande parte, utilizam-se quantidades significativas de materiais terrosos. No entanto, a falta de solos com as características geotécnicas exigidas pelos órgãos rodoviários para a construção de estradas torna-se um dos grandes entraves para o setor de transportes no Brasil (MACHADO, PEREIRA E PIRES, 2003).

No entanto, para que se obtenham materiais que obedeçam às características geotécnicas necessárias para as funções que se destinam, devem-se escolher alternativas mais indicadas. Entre as opções, a estabilização do solo, visa estabilizar e aumentar as propriedades de resistência do solo, maximizando a adequação deste para um determinado uso. Dos métodos, a estabilização química e física é mais comum na construção de pavimentos.

Segundo Almeida (2016), a estabilização de solos para utilização em pavimentos, seja em sub-base ou base, tem se mostrado bastante eficiente à medida que as exigências da qualidade construtiva são crescentes, além das exigências no quesito durabilidade. De fato, se os solos naturais, que cumprem os requisitos necessários para determinada função a que se destinam, estão escassos e muitas vezes distantes dos pontos de utilização tornando-se economicamente inviáveis, a estabilização de solos surge como uma opção viável, principalmente, no que diz respeito aos aspectos econômico, técnico e ambiental.

De acordo com Anjos (2015), averiguando de forma particular a escória de cobre, tem-se que esse rejeito é largamente utilizado como abrasivo no processo de jateamento, aplicação que, por apenas reduzir a granulometria do material, sem reduzir a sua massa, não é uma destinação definitiva, apenas uma forma de reaproveitamento. Assim, após o jateamento, sobram resíduos que precisam ser gerenciados, nem sempre por um processo simples ou eficiente.

Dessa forma, percebeu-se a possibilidade de utilizar rejeitos dessa natureza como estabilizante granulométrico misturado a solos, visando obter características necessárias pelos órgãos rodoviários, como descreve a norma do DNIT 139/2010 – ES.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a incorporação de quatro percentagens de resíduo de escória de cobre jateada, como estabilizante granulométrico em um solo do município de São Cristóvão/SE para aplicação em aterros e camadas de pavimento.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar ensaios físicos e mecânico dos materiais utilizados e suas misturas;
- Analisar as modificações físicas, mecânicas e de permeabilidade que a escória de cobre jateada proporciona ao solo;
- Verificar as diferentes percentagens do resíduo de escória de cobre jateada, bem como a influência deste material quando adicionado ao solo;
- Avaliar o aproveitamento do resíduo de escória de cobre jateada como material de pavimentação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estabilização de solos

O solo é um dos principais materiais utilizado nas obras rodoviárias, é um material complexo e variável de acordo com a sua localização, tem grande disponibilidade e baixo custo. Porém, é normal que um solo de determinado local não atenda aos requisitos necessários para tal obra. Segundo Lambe e Whitman (1969), é possível adotar soluções para corrigir esses requisitos, como:

- i. Aceitar o material natural e adaptar o projeto às condições existente do local;
- ii. Remover o material natural e substituí-lo por outro de características adequadas;
- iii. Alterar as propriedades do solo, de modo a criar um novo material que melhor atenda aos padrões da engenharia.

A escolha da solução a ser adotada deve ser feita primeiramente em bases econômicas e práticas, pois é um aspecto determinante na qualidade e custo final da obra. Além disso, fatores como volume de corte e aterro, tipo de solo disponível no local, distância de transporte das jazidas, caixas de empréstimos e bota-foras, também devem ser considerados e ponderados, uma vez que influenciam diretamente nos custos da obra (BATISTA, 1976).

A solução de alterar as propriedades do solo para atender a requisitos específicos de engenharia, é conhecida como estabilização de solo. As propriedades de um solo podem ser alteradas de várias maneiras, entre as quais se incluem os meios mecânicos, granulométrico, químico, elétrico e térmico (e.g. LAMBE E WHITMAN, 1969; CRUZ E JALALI, 2010).

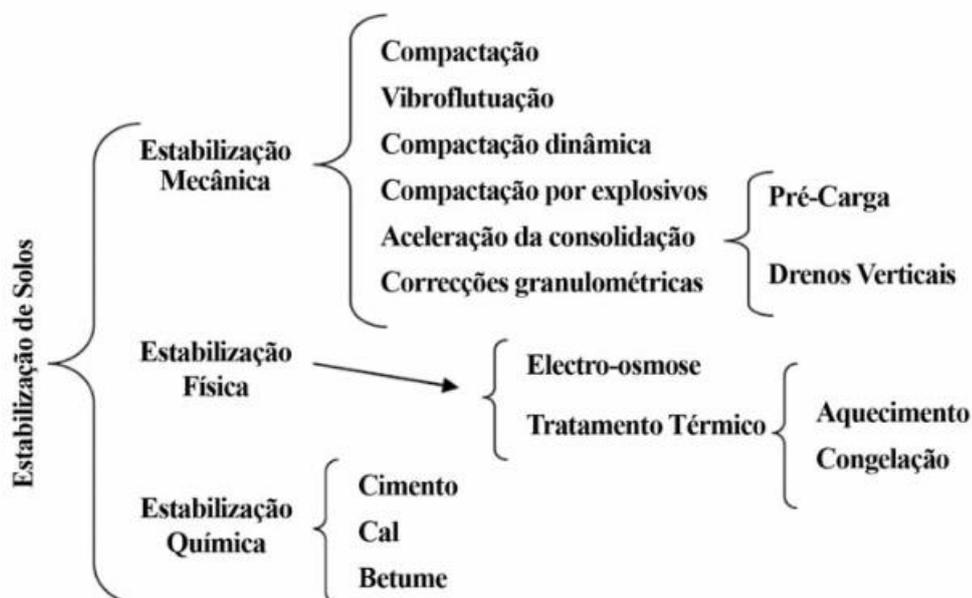
Segundo Lima et al. (1993 *apud*, MACHADO, 2012), a estabilização de solos representa uma modificação artificial, com a finalidade de torná-lo adaptável em qualquer obra de engenharia, adequando-o a qualquer requisito inerente à projetos de engenharia.

De acordo com Vargas (1977), estabilização do solo é o processo pelo qual se confere ao solo uma maior resistência estável às cargas, ao desgaste ou à erosão, por meio de compactação, correção da sua granulometria e da sua plasticidade ou de adição de substâncias que lhe confirmam uma coesão proveniente da cimentação ou aglutinação dos seus grãos. O caso mais comum do emprego da estabilização é quando não se dispõe de material com propriedades de engenharia adequadas para ser usado como base de pavimentos.

Segundo Castro et al. (2011 *apud*, ALMEIDA, 2016) ressaltam o papel da estabilização *in situ* dos solos para viabilizar, técnica e economicamente, o aproveitamento dos materiais resultantes do processo de terraplanagem, buscando melhorar a qualidade dos materiais disponíveis e evitar desperdícios desnecessários de recursos energéticos e ambientais para a exploração de jazidas e transporte de materiais. De fato, o aproveitamento do solo existente no próprio local de obra, independentemente de suas características, apresenta vantagens de evitar a substituição dos materiais existentes por outro de melhor qualidade, como também evitar a necessidade de local de estocagem dos materiais de bota fora e conseqüente criação de danos ao meio ambiente.

A Figura 1 mostra um esquema com os métodos existentes para estabilização de solos. Segundo Cruz e Jalali (2010), a estabilização mecânica procura melhorar as características dos solos através de uma melhor arrumação das suas partículas sólidas e/ou recorrendo a correções da sua composição granulométrica. Na estabilização física as propriedades dos solos são alteradas através do uso do calor ou da aplicação de um potencial eléctrico, enquanto que na estabilização química as características dos solos são modificadas através da mistura com outros materiais.

Figura 1: Métodos de estabilização de solo.



Fonte: Cruz e Jalali (2010)

2.1.1 Estabilização química

A estabilização química visa melhorar as características mecânicas e físicas do solo, alterando a estrutura do solo com o uso de aditivos. Segundo Puppala (2016), conforme

citado por Almeida (2016), a técnica da estabilização com aditivos químicos é amplamente usada na construção de estradas, aeroportos, aterros, revestimentos de canal, através da mistura de produtos químicos com o solo argiloso para melhorar as características da trabalhabilidade, resistência, rigidez, expansão e a capacidade de suporte. Nessa estabilização, as melhorias das propriedades do solo geralmente ocorrem por meio da formação química do gel e ligações entre as partículas do solo, juntamente com uma redução nas características de afinidade com a água.

Segundo Medina e Motta (2004), citado por Miceli Júnior (2006), quando se forma a mistura solo-estabilizador pode ocorrer que o estabilizador forme ou não uma matriz contínua com solo. Na matriz contínua o agente estabilizador preenche todos os poros e as partículas de solo ficam nela mergulhadas como se fosse um inerte de enchimento. Neste caso, as propriedades do sistema são essencialmente as da matriz e as propriedades mecânicas do estabilizador predominam. É o caso do solo estabilizado com cimento. Na matriz descontínua o estabilizador não preenche todos os poros e então podem ocorrer três modos de ação:

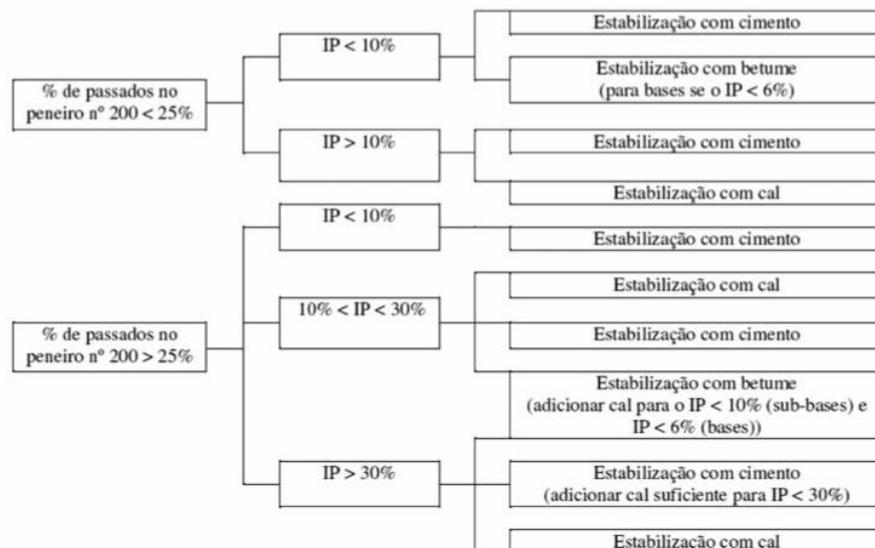
- modificação das características das superfícies das partículas (por exemplo: a cal);
- vedação inerte dos poros (por exemplo: o silicato de cálcio);
- interconexão das partículas de solo por pontos de contato (por exemplo: solo melhorado com cimento).

Algumas reações físicas resultantes da mistura do solo com o estabilizante são:

- hidratação: causado pelo cimento Portland;
- evaporação: Causado por emulsões asfálticas;
- absorção: causado por impermeabilizantes.

Os agentes estabilizadores podem ter maior ou menor eficiência a depender do tipo de solo. A Figura 2 mostra um esquema dos agentes estabilizadores indicados para cada solo, por meio de resultados dos ensaios de caracterização.

Figura 2: Escolha do agente estabilizador em função do tipo de solo.



Fonte: Little, (1995) *apud* Cruz e Jalali (2010)

Verifica-se que a estabilização química com cal ou betume tem um campo de aplicação mais limitado, enquanto que a estabilização de solos com cimento é adequada para a maioria dos solos. Assim, a estabilização de solos com cimento constitui uma das mais generalizadas para melhorar o comportamento dos solos, dada a sua elevada disponibilidade e adequabilidade a uma maior variabilidade de solos (CRUZ E JALALI, 2010).

O uso de cal no tratamento de solos para construção de estradas é uma das técnicas mais antigas de consolidação. Este processo já era utilizado há 2000 anos, contudo foram os Romanos que desenvolveram sua aplicação na geotecnia, nomeadamente na secagem de terrenos e na fixação das lajes de pedra de algumas das suas estradas às plataformas. Implementaram ainda, o uso de pozolanas para melhorar a ação da cimentação da cal (COELHO, TORRAL E JALALI, 2009).

Segundo Coelho, Torgal e Jalali (2009), ao adicionar cal em um solo úmido ocorrem várias reações químicas que provocam a aglutinação das suas partículas e modificação das suas características. As reações que ocorrem durante o processo de estabilização com cal são: troca iônica, floculação-aglomeração, compressão da dupla camada elétrica, absorção de cal e reações químicas. No entanto, essas reações não ocorrem simultaneamente, há a fase rápida com reações de troca iônica, floculação e aglomeração e a fase lenta, que é caracterizada pelas reações pozolânicas, que proporcionam um aumento da resistência, devido à formação de produtos cimentantes e a carbonatação, que é uma reação prejudicial (LOVATO, 2004).

Segundo Almeida (2016), a mistura da cal ao solo conduz alterações nas características de plasticidade e expansibilidade, granulometria, compactação, expansão, permeabilidade, resistência e durabilidade dessa mistura que, mediante as reações apresentadas, normalmente depende do tipo do solo (granulometria e mineralogia das partículas), tipo e teor de cal, teor de água e densidade, temperatura e tempo de cura. Para a realização de uma mistura solo-cal para modificação ou estabilização de solos, é necessário encontrar o teor em cal mais adequado para a situação em estudo e depois determinar as propriedades da mistura e a sua alteração ao longo do tempo (COELHO, TORRALBA E JALALI, 2009).

O cimento Portland pode ser usado quer para modificar e melhorar a qualidade do solo quer para transformar o solo numa massa cimentada com maior resistência e durabilidade. A quantidade desse estabilizante utilizado dependerá do fato de o solo ser modificado ou estabilizado (DEPARTMENTS OF THE ARMY, THE NAVY, AND THE AIR FORCE, 1994 *apud* ALMEIDA, 2016).

Rodrigues (1992) descreve o solo-cimento como uma combinação, compactação e cura de uma mistura de solo e agregado, cimento Portland e água. O objetivo é formar um material endurecido com propriedades específicas de engenharia. Na mistura de solo-cimento, as partículas do solo e agregado são unidas pela pasta de cimento diferentemente da ligação da massa de concreto, uma vez que a partícula individual não é completamente revestida por essa pasta.

Além das utilizações rodoviárias de solos estabilizados, estes também podem ser usados em escavações, para controle da erosão em aterros e para a edificação de construções. Exemplos de construções feitas com solos estabilizados são alguns templos antigos, fortificações, pirâmides, assim como grande parte do “Great Wall” da China (BUSH, 1984 *apud* CRUZ, 2004).

O tratamento superficial de estradas de terra através de materiais betuminosos constituiu uma das suas primeiras aplicações à estabilização de solos. Nesse tipo de tratamento, o material é adicionado ao solo sob a forma de óleo (“road oil”) ou de betume diluído (“cut back”), por penetração, em regas sucessivas de forma a melhorar a penetração e adesão às partículas. A utilização do betume como material estabilizante não se encontra tão divulgada como a cal ou cimento visto tratar-se de um material mais caro e mais exigente no que diz respeito à preparação da mistura (CRISTELO, 2001).

O uso de materiais betuminosos em conjunto com solos (e mistura solos agregados) tem duas finalidades principais (SANTOS, 2009):

- i. Fornecer coesão à mistura de solo estabilizado, como ocorre no caso das areias ou solos muito arenosos;
- ii. Tratando-se de solos finos, o propósito é a impermeabilização com o fim de reduzir os efeitos danosos que a água pode causar ao penetrar neste tipo de solo durante sua vida útil.

2.1.2 Estabilização física

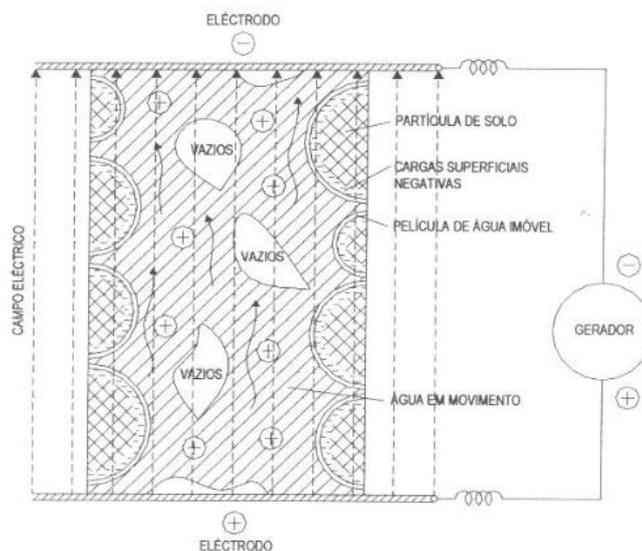
Estabilização física é utilizada quando alguma dificuldade impede o recurso a métodos menos dispendiosos. Podem ser divididos na estabilização por eletro-osmose e térmica, estando incluídos nesta última os métodos de aquecimento e congelação (CRUZ, 2004).

Como exemplo, os solos argilosos podem ser altamente compressíveis, o que podem afetar evidentemente os estratos subjacentes e as construções implantadas no maciço. Para acelerar a consolidação desse tipo de solo possui os métodos de pré-carga e de drenos verticais. Poder-se-ão utilizar métodos alternativos para proceder à sua estabilização como calor e eletricidade (CRUZ,2004).

- Eletro-osmose

É um método de custo elevado, que consiste na colocação de dois elétrodos no solo, fazendo percorrer uma corrente elétrica entre eles, no qual provoca a movimentação da água do polo positivo para o negativo, de onde é feita a retirada da água e conseqüentemente provocando a consolidação do solo. A Figura 3 mostra o deslocamento da água (CRUZ, 2004).

Figura 3: Deslocação da água devido à criação de um potencial elétrico.



Fonte: Hamzah,1983 *apud* Cruz (2004)

A máxima profundidade de solo possível de ser estabilizada com este método está compreendida entre os 10 e os 20 m (HAMZAH, 1983 *apud* CRUZ, 2004).

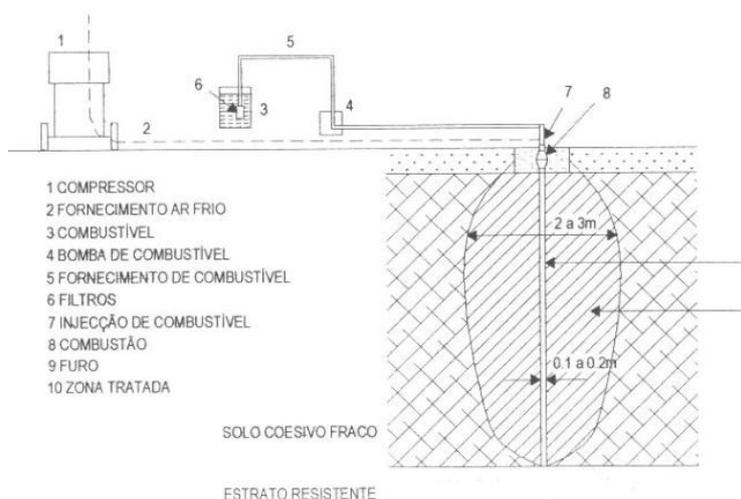
- Aquecimento

Segundo Folque (1986 *apud* CRUZ, 2004), a estabilização térmica por aquecimento pode ser conseguida por meios elétricos ou através da queima de um combustível, colocado num tubo perfurado, que aquece uma zona do solo e permite a evaporação da água, como mostrado na Figura 4.

A água evaporada consiste na água absorvida e livre presente no solo, o que provoca uma aproximação entre as partículas e consequentemente aumentando a resistência do solo.

É um método pouco aplicado devido à sua complexidade e grande consumo de combustível, que provocam evidentemente um elevado custo e que permite obter resultados até aos 15 m (CRUZ, 2004).

Figura 4: Esquema típico do aquecimento de um solo.



Fonte: Van Impe, 1989 *apud* Cruz (2004)

- Congelamento

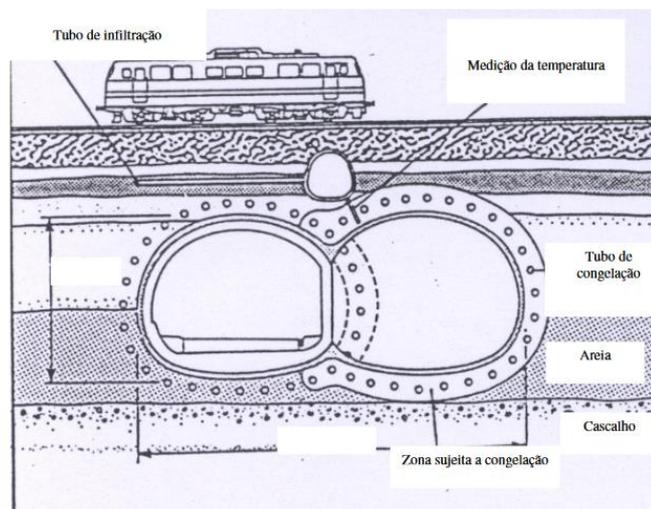
É um tipo de estabilização térmica de custos elevados utiliza um sistema que permite congelar a água existente nos vazios ou poros do solo, dando origem a um material rígido de maior resistência (HAMZAH, 1983 *apud* CRUZ, 2004).

Esse método é muito utilizado na construção de túneis, sendo uma estabilização temporária que dura enquanto mantiver o congelamento. Apresenta dificuldades para

solos com velocidades de percolação altas. Neste tipo de construção, o congelamento permite, além da estabilização do solo, a prevenção a possíveis inundações dos túneis por água (CRUZ, 2004).

A Figura 5 mostra o esquema do processo de congelamento, onde são instalados no solo saturado tubos com dado raio e afastados de certa distância, pelos quais circula o fluido que provoca a congelamento ao fim de certo tempo, da água presente no solo e possivelmente de outros líquidos (CRUZ, 2004).

Figura 5: Esquema de um processo de congelamento.



Fonte: Processos de Construção, UTAD *apud* Cruz (2004)

2.2 Estabilização Granulométrica

Segundo o DNIT (2006, p. 96), a estabilização granulométrica:

São as camadas constituídas por solos, britas de rochas, de escória de alto forno, ou ainda, pela mistura desses materiais. Estas camadas, puramente granulares, são sempre flexíveis e são estabilizadas granulometricamente pela compactação de um material ou de uma mistura de materiais que apresentem uma granulometria apropriada e índices geotécnicos específicos, fixados em especificações.

A estabilização granulométrica ou mecânica consiste na mistura e compactação de solos naturais, rochas alteradas naturais, misturas artificiais de solos, materiais de solos (areia, pedregulho) e materiais de pedra (pedra britada, pedrisco, pó de pedra) ou ainda por qualquer combinação desses materiais, em proporções adequadas, de modo que o produto final possua maior resistência às cargas, ao desgaste e à erosão, estando adequado

para aplicação em cada caso particular. A estabilização granulométrica deve conferir ao solo as características requeridas de atrito interno, de modo que não ocorram deformações excessivas ou ruptura por cisalhamento (SANTANNA, 1998).

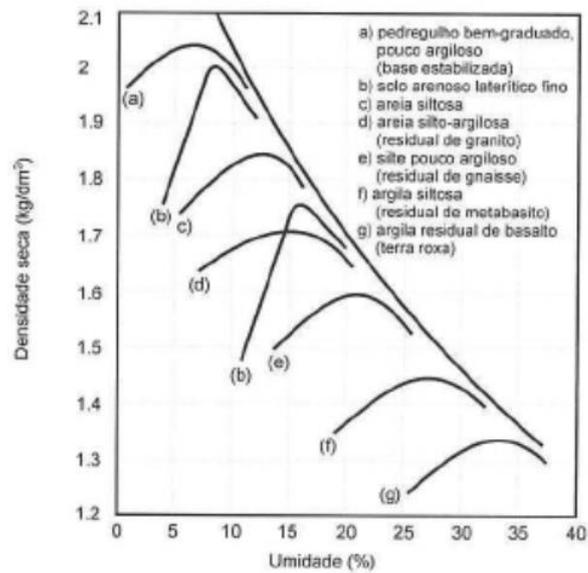
Esse método de estabilização engloba diversos processos com o mesmo objetivo: diminuição da quantidade de vazios existentes nos solos. Consequentemente, essa estabilização traz melhorias nas características do solo. As técnicas podem ser por compactação e por correção granulométrica (CRUZ, 2004).

A técnica por compactação é um processo em que devido à aplicação de cargas se reduz o índice de vazios de um solo à custa da diminuição da sua fase gasosa, sem variação significativa da quantidade de água. É um processo que visa obter a maior quantidade de partículas sólidas, consequentemente menores vazios, num dado volume, ou seja, a maior massa específica seca. Um solo mais compacto apresenta melhores características, nomeadamente, uma maior resistência ao corte, menor permeabilidade e compressibilidade (CRUZ, 2004).

Para um mesmo solo serão executados cinco pontos em um ensaio adicionando quantidades de água para cada um. Os resultados são apresentados em um gráfico com a massa específica seca *versus* teor de umidade. Para Cruz, (2004), o conhecimento da umidade ótima e da massa específica seca máxima é bastante importante para as construções em que o melhoramento dos solos é obtido através da compactação.

Com o resultado verifica-se que o aumento da umidade até a umidade ótima facilita o rearranjo das partículas do solo numa configuração densa, devido à energia de compactação transmitida pelo soquete, que conduz à expulsão de ar. A Figura 6 apresenta resultados de diversos solos. Estes valores são meramente indicativos da ordem de grandeza, pois há muita diferença de resultados de amostras de mesma procedência. Deve ser salientado que os solos lateríticos apresentam o ramo ascendente da curva nitidamente mais íngreme do que os solos residuais e os solos transportados não laterizados. Tal peculiaridade, inclusive, é empregada na identificação dos solos lateríticos (PINTO, 2006).

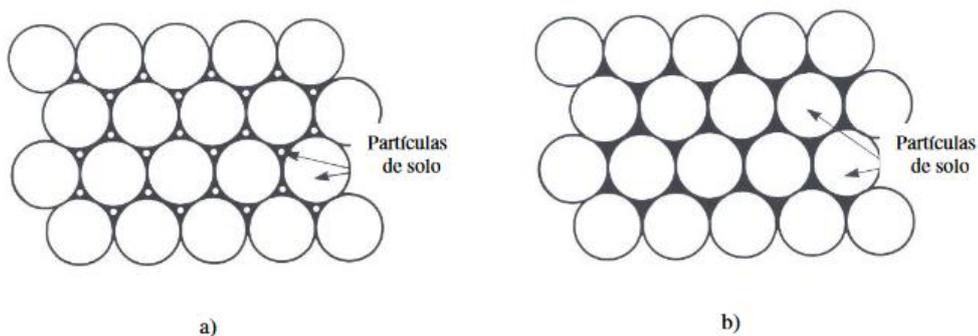
Figura 6: Resultados de Ensaio para diferentes solos Brasileiros.



Fonte: Pinto (2006)

A estabilização por correção granulométrica pode ser obtida pela adequada distribuição das diversas porções de diâmetro dos grãos. Senço (2001), explica que os vazios dos grãos maiores são preenchidos pelos grãos médios, e os vazios desses, pelos miúdos. Assim, a estrutura densa representa um produto de massa específica aparente superior à dos componentes, o que lhe dá maior resistência e impermeabilidade. A Figura 7 ilustra o que explica o autor citado.

Figura 7: a) Solo bem graduado; b) Solo mal graduado.



Fonte: Cruz (2004)

Esse tipo de correção implica apenas em adicionar, retirar ou misturar outros materiais não oferecendo grandes dificuldades. A maior dificuldade está na escolha da maneira de efetuar a correção de tal modo que o seu custo seja aceitável em face de outras

possíveis soluções do problema. A Tabela 1 mostra de forma simplificada como essa escolha pode ser feita.

Tabela 1: Técnicas para correções granulométricas.

Subtração de uma fração granulométrica	Pedras e cascalho (> 60mm)	Peneiramento mecânico ou manual, seguida ou não de britagem mecânica ou manual
	Seixos e areias	Peneiramento mecânico ou manual
	Areia fina, silte e argila	Por via seca mediante secagem, desagregação e peneiramento; ou por via úmida mediante lavagem e peneiramento
Adição de uma fração granulométrica	Seixos e areias	Desagregação do terreno e mistura do material para correção
	Areia fina, silte e argila	Desagregação do terreno e do material para correção e respectiva mistura

Fonte: Adaptado de Cruz (2004)

2.3 Resíduo industrial

Os resíduos industriais são atualmente considerados uma problemática ambiental, devido ao grande volume gerado, a presença de materiais perigosos ao meio ambiente, à saúde pública e à dificuldade crescente de se conseguir áreas para a sua disposição. Assim, torna-se importante para a indústria conhecer a caracterização dos resíduos por ela gerados, principalmente quanto a sua periculosidade, as formas adequadas de armazenamento, transporte e disposição (SOUZA et. al, 2013).

As indústrias de fundição contribuem muito para a limpeza do ambiente ao consumir as mais diversas sucatas metálicas, mas por outro lado gera apreciáveis volumes de resíduos sólidos não metálicos, além de efluentes gasosos e líquidos, resultante da degradação de materiais auxiliares empregados. Os resíduos sólidos gerados pelas fundições são compostos principalmente por escórias, restos refratários, poeiras diversas e areia descartada (RESCHKE, 2003).

Quanto à indústria siderúrgica, as escórias de alto – forno e aciaria correspondem a cerca de 75% do total dos resíduos de uma usina. São principalmente elas as responsáveis pela tipificação dos resíduos de usinas siderúrgicas como volumosos e de baixa toxidez (KRUGER, 1995 *apud* RESCHKE, 2003).

A participação brasileira na produção de fundidos, a nível mundial, tem crescido. A tendência internacional é transferir a produção de fundidos para os países em desenvolvimento, devido ao baixo custo da mão-de-obra e às regras menos severas de controle ambiental vigentes nestes países. Com isto, o produtor brasileiro tem investido na exportação, o que representa um incentivo à melhoria da qualidade de processos e produtos (SOARES, 2000).

2.3.1 Produção do cobre

Segundo o sumário Mineral (2016), as reservas mundiais de minério de cobre registraram em 2015 um total de 720 milhões de toneladas em metal contido, quantidade 2,4% superior à de 2014. As reservas brasileiras de cobre lavráveis no ano de 2015 somaram 11,83 milhões de toneladas de cobre contido, apresentando crescimento de 9,1 % frente às do ano anterior, com destaques para os estados do Pará, com 84% desse total, Goiás e Bahia.

A produção mundial de concentrado de cobre, em metal contido, alcançou no ano de 2015 uma quantidade de 19,13 milhões de toneladas, registrando um acréscimo de 3,8 % em relação a 2014. Quanto ao metal, em 2015 a produção mundial de cobre refinado (primário e secundário) atingiu 22,87 milhões de toneladas, apresentando um crescimento de 1,7 % frente ao ano de 2014. A China (33,2 %), o Chile (12,0%), o Japão (6,0%) e os EUA (5,0%) foram os principais produtores do metal. A produção brasileira de cobre primário e secundário registrou em 2015 uma quantidade de 265.469 toneladas, correspondendo a 1,4 % da produção mundial de refinado. Segundo o International Cooper Study Group (ICSG), o mercado mundial do cobre apresentou em 2015 um déficit de produção frente ao de consumo da ordem de 163 mil toneladas, devendo esse nível ser mantido para o próximo triênio (DNPM, 2016).

Segundo o DNPM (2016), a produção brasileira de concentrado de cobre alcançou em 2015 um total de 350.940 t em metal contido, apresentando um aumento de 16,5% frente à de 2014, distribuída na maior parte entre os estados do Pará, com 74 % do total, Goiás, com 16,9%, e Bahia, com 7,7%, tendo como principais produtoras as empresas Vale (Sossego e Salobo Metais), Mineração Maracá e Mineração Caraíba, e, como menores, a Votorantim Metais Níquel e a Serabi.

2.3.2 Escória de cobre

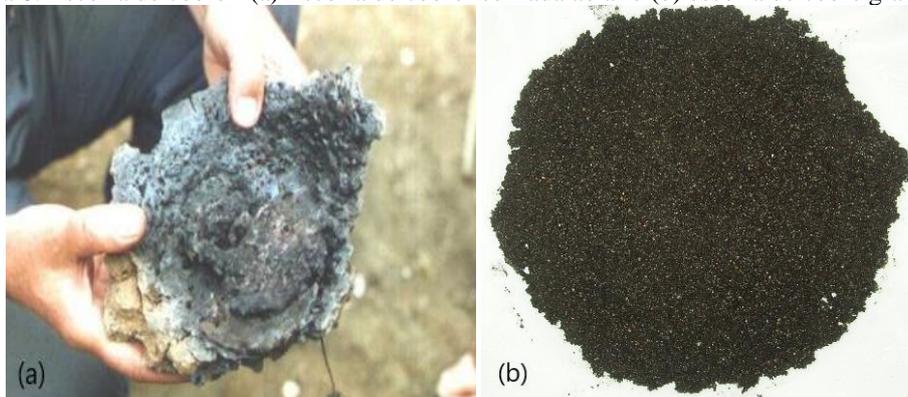
Os minérios de cobre aparecem misturados com diversos tipos de materiais rochosos sem valor comercial, a ganga, da qual devem ser separados. Embora existente em numerosos minérios sob a forma de sulfuretos (pirita e calcopirita), de óxidos (cuprita e melaconita) e de carbonatos (malaquite), é a partir da calcopirita (CuFeS_2) que o cobre é extraído. Para isso, o minério é inicialmente submetido a um processo de moagem e pulverização. Em seguida, de acordo com o tipo de minério, aplicam-se diferentes

processos de tratamento do material. As operações de refino, seja térmica ou eletrolítica, permitem atingir uma pureza superior a 99% (RESENDE, 2009).

Durante a fusão, quando a sílica é adicionada, combina com os óxidos para formar silicatos que se agrupam para formar a escória. Certa quantidade de alumina e cal é adicionada para estabilizar a estrutura da escória (GORAI et al. 2003).

A escória fundida é descarregada do forno a temperaturas entre os 1000 e 1300 °C. Quando a escória líquida é resfriada lentamente ao ar, vai formando um produto cristalino, denso e duro. Quando a mesma escória derretida é resfriada bruscamente vertendo-se o líquido em água, resulta numa escória granulada amorfa como mostra a Figura 8 (GORAI et al. 2003).

Figura 8: Escória de cobre - (a) Escória de cobre resfriada ao ar e (b) escória de cobre granulada.



Fonte: Resende (2009)

2.3.3 Escória de cobre utilizada no jateamento abrasivo

Segundo a NBR 7348 (ABNT, 2010b), jateamento abrasivo é o método de preparação de superfícies de aço para pintura, pelo emprego de granalha de aço, escória de cobre, óxido de alumínio sinterizado ou outros abrasivos, que são impelidos contra o substrato a ser preparado por meio de ar comprimido, ou através de força centrífuga.

Segundo Kambham et al. (2006), citado por Anjos (2015), a preparação de superfícies metálicas para pintura envolve, não só a remoção da pintura velha, da oxidação e de outros contaminantes da superfície a ser tratada, mas também a formação de um perfil rugoso que favoreça a adesão da nova película de tinta. Comercialmente, há vários métodos de preparação da superfície: o jateamento a seco, o jateamento úmido, o hidrojateamento e a limpeza química. No entanto, o jateamento a seco é um dos mais efetivos e, por conseguinte, um dos mais utilizados na indústria do petróleo, nos estaleiros, na indústria automobilística etc.

De acordo com a NBR 7348 (ABNT, 2010b), possui quatro diferentes graus de limpeza por jateamento abrasivo, que são: Grau Sa 1 - jateamento abrasivo ligeiro, Grau Sa 2 - jateamento abrasivo comercial, Grau Sa 2 ½ - jateamento abrasivo ao metal quase branco, Grau Sa 3 - jateamento ao metal branco.

Segundo Gentil (2003), os abrasivos utilizados para jateamento podem ser de vários tipos, mas devem obrigatoriamente possuir características como elevado grau de dureza, granulometria uniforme e isenção de materiais estranhos que possam contaminar a região a ser jateada. Dentre os mais utilizados estão a:

- granalha de cobre: resíduo do beneficiamento do cobre, amplamente utilizada em estaleiros de reparo e construção de navios, é um material inerte na presença de umidade e é principalmente constituída de óxidos de ferro e de sílica;
- granalha de aço: subproduto do beneficiamento do aço e, quando utilizado como abrasivo, tem uso limitado por ser um material sensível à umidade, o que restringe o seu manuseio a ambientes confinados como cabine de jato, instalação automática de jateamento e interior de tanques. Uma vez molhada, torna-se inutilizável como abrasivo;
- bauxita sinterizada: abrasivo constituído, principalmente, por óxido de alumínio. Apresenta elevada dureza e peso específico relativamente baixo, se comparado com o da granalha de aço. Também são inertes à umidade e, devido à dureza, possuem elevada vida útil.

A escória utilizada no trabalho foi proveniente de um jateamento a seco, havendo a possibilidade de utilizá-la em jateamento úmido.

Em muitos países o uso do jateamento com abrasivo seco é proibido, sendo assim é utilizado o jateamento com abrasivo úmido que é utilizado em situações mais específicas, como, por exemplo, em ambientes confinados quando se faz necessário reduzir ao máximo a produção de poeira. A água pode ser inserida antes ou após o bico de jato, ou ainda na própria máquina de jato. Nesse processo, a superfície jateada pode formar rapidamente uma película de óxidos de ferro, prejudicando a aderência da película de tinta. Assim, deve-se efetuar a pintura o mais rápido possível, ou adicionar inibidor de corrosão na água do jateamento (GENTIL, 2003).

A granalha de cobre é um resíduo do processo de produção de cobre, que após ser utilizada no jateamento perde seu potencial abrasivo e, normalmente, é direcionado aos aterros controlados (ANJOS, 2015).

Segundo Gorai et al. (2003), as escórias de cobre possuem características químicas, físicas e mecânicas com potencialidade para a produção de vários produtos tais como materiais de enchimento, lastro, abrasivos, ferramentas de corte, vidro e tijoleiras cerâmicas.

É de grande importância o conhecimento da composição química da escória para melhor entender as reações que ocorrerão juntamente com a sua utilização. Segundo Shi et al. (2008 *apud* ALMEIDA, 2016) a composição química da escória varia de acordo com a origem do minério, processo metalúrgico empregado e o tipo de forno. Que com a modernidade dos fornos, produz uma pequena variabilidade na composição.

2.3.4 Aplicações da escória de cobre jateada

Almeida (2016), cita várias aplicações da escória entre elas estão, ferramentas de corte, produtos cerâmicos e vidros, abrasivos, camadas de pavimentos, concreto e entre outras.

Nos estudos de Almeida (2016), utilizando a escória de cobre jateada incorporada a solo -cimento, realizou ensaios químicos de lixiviação e solubilização. Os resultados estão presentes nas tabelas 2 e 3. De acordo com as características de toxicidade, apesar de o resíduo apresentar componentes do Anexo F da norma NBR 10004, os resultados encontram-se abaixo dos limites máximos descritos nesse Anexo. Dessa forma, classifica a escória de cobre jateada como resíduo classe II – não perigoso.

Ainda de acordo com a classificação da referida norma, o resíduo pode ser classe II – A ou classe II – B. Como os resultados apresentaram teores de mercúrio e fenóis totais acima dos limites descritos no Anexo G da norma 10004, a escória utilizada nessa pesquisa enquadra-se na classe de resíduos classe II – A – não perigoso – não inerte (Almeida, 2016).

Tabela 2: Resultados do ensaio de lixiviação das amostras de escória de cobre jateada – comparação com a listagem apresentada no anexo F da NBR 10004/2004.

Parâmetro	Limite de quantificação (mg/L)	Resultado (mg/L)	Limite máximo no lixiviado (mg/L) - Anexo F
Arsênio	0,011	< 0,011	1
Cádmio total	0,005	< 0,005	0,5
Chumbo total	0,01	0,04	1
Cromo total	0,028	< 0,028	5
Fluoretos total	0,05	0,01	150
Mercúrio	0,001	< 0,001	0,1
Prata total	0,03	< 0,03	5
Selênio	0,005	< 0,005	1
Fenóis totais	0,002	< 0,002	-
Cloretos	2,42	3,16	-

Fonte: Almeida (2016)

Tabela 3: Resultados do ensaio de solubilização das amostras de escória de cobre pós – comparação com a listagem apresentada no anexo G da NBR 10004/2004.

Parâmetro	Limite de quantificação (mg/L)	Resultado (mg/L)	Limite máximo no lixiviado (mg/L) - Anexo G
Arsênio	0,011	< 0,011	0,01
Cádmio total	0,005	<0,0014	0,005
Chumbo total	0,01	<0,007	0,01
Cromo total	0,028	< 0,028	0,05
Fluoretos total	0,05	0,09	1,5
Mercúrio	0,001	0,002	0,001
Prata total	0,03	< 0,0072	0,05
Selênio	-	ND	0,01
Fenóis totais	0,002	0,04	0,01
Cloretos	0,05	2,11	250

Fonte: Almeida (2016)

A Tabela 4 apresenta resultados da composição química da escória de cobre, obtida por Almeida (2016), submetida à análise de fluorescência de raios X antes de passar pelo processo de jateamento. Observa-se que as maiores quantidades são óxido de ferro e de silício. Já a Tabela 5 apresenta resultados da composição química da escória após o jateamento, obtida pelo mesmo autor citado, observando um aumento de 281% no teor de óxido de ferro; redução de 81% no óxido de silício e a detecção de outros componentes, indicando que, no processo abrasivo sobre a superfície metálica, partículas de ferro são arrancadas dessa superfície, além dos componentes provenientes da pintura. Esse aumento no teor de ferro favorece a elevada densidade da escória.

Tabela 4: Composição química das amostras de escória de cobre original.

Componente	Porcetagem (%)
Fe ₂ O ₃ (óxido de ferro)	20,84
SiO ₂ (óxido de silício)	60,32
ZnO (óxido de zinco)	1,51
CuO (óxido de cobre)	4,65
Al ₂ O ₃ (óxido de alumínio)	5,78
CaO (óxido de cálcio)	4,83
MgO (óxido de magnésio)	2,07

Fonte: Almeida (2016)

Tabela 5: Composição química das amostras de escória de cobre jateada.

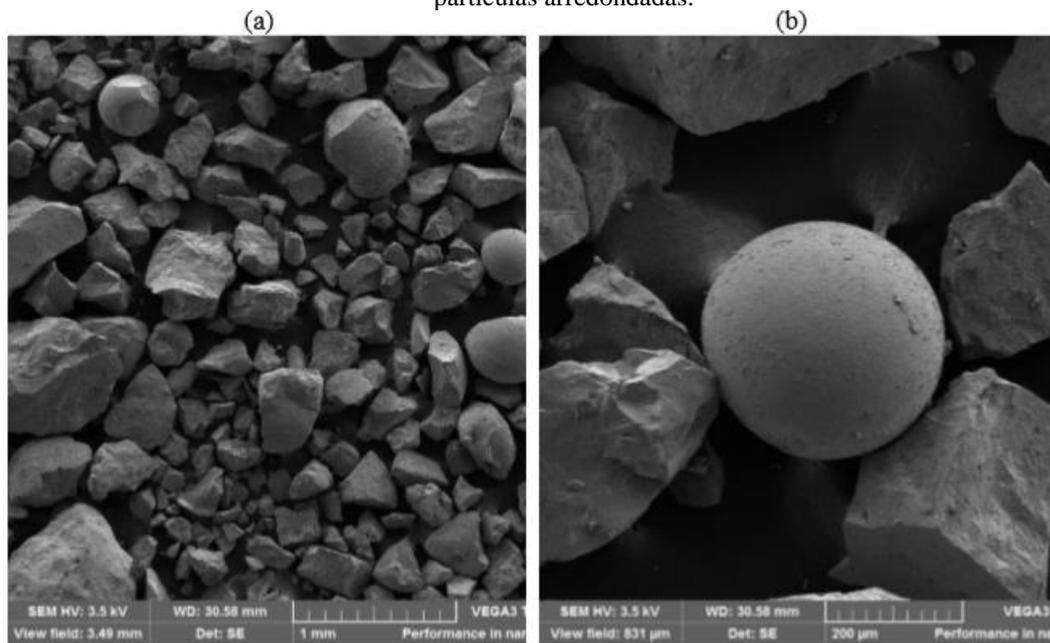
Componente	Porcetagem (%)
Fe ₂ O ₃ (óxido de ferro)	79,50
SiO ₂ (óxido de silício)	11,20
ZnO (óxido de zinco)	2,06
CuO (óxido de cobre)	2,00
MoO ₃ (óxido de molibdênio)	1,23
Al ₂ O ₃ (óxido de alumínio)	1,08
CaO (óxido de cálcio)	0,67
SO ₃ (trióxido de enxofre)	0,67
PbO (óxido de chumbo)	0,46
MgO (óxido de magnésio)	0,41
K ₂ O (óxido de potássio)	0,31
TiO ₂ (óxido de titânio)	0,31
Cr ₂ O ₃ (óxido de cromo III)	0,10

Fonte: Almeida (2016)

Segundo Anjos (2015), utilizando a mesma escória dessa pesquisa, foi detectado que o resíduo não apresenta atividade pozolânica para uma substituição de 40% em massa de escória, isto é, a escória não poderia substituir o aglomerante em misturas cimentícias.

A Figura 9, obtida da microscopia eletrônica de varredura (MEV), mostra que a escória possui uma morfologia irregular dos grãos em sua maioria angulosos, com lados afiados e ainda alguns arredondados (ALMEIDA, 2016).

Figura 9: MEV da amostra de escória de cobre jateada: (a) partículas angulosas e com lados afiados e (b) partículas arredondadas.



Fonte: Almeida (2016)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão detalhados os materiais, solo e escória de cobre jateada, utilizados e os métodos de ensaios físicos, mecânicos e hidráulicos realizados para atingir os objetivos deste trabalho experimental.

3.1 Materiais

3.1.1 Solo

O solo utilizado nesta pesquisa foi proveniente da jazida aningas localiza-se no povoado de mesmo nome, situado no município de São Cristóvão/SE, cerca de 30 km da entrada do município de Aracaju. Essa jazida está às margens da BR-101, próxima ao posto da Polícia Rodoviária Federal, sendo o seu acesso praticamente feito por estrada pavimentada. A Figura 10 uma visão da jazida aningas.

A coleta do material já foi realizada por Almeida (2016) para pesquisas anteriores, com sequência continuada por meio do presente trabalho. Com o auxílio de pá e picareta fez-se a coleta de amostras sendo transportada para o Laboratório de Geotecnia e pavimentação (GeoPav) da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

Figura 10: Visão da jazida aningas em São Cristóvão/SE.



Fonte: Almeida (2016)

3.1.2 Escória de cobre jateada

A escória utilizada para a pesquisa foi obtida do processo abrasivo de serviços de jateamento a seco em tanque de armazenamento de hidrocarboneto, como mostrado na Figura 11, na etapa de preparação da superfície metálica para receber uma nova pintura.

Figura 11: Vista externa do tanque em manutenção.



Fonte: Anjos (2015)

As misturas foram realizadas nos teores de 60%, 70%, 80% e 90% de escória de cobre jateada em relação à massa de solo seco. Na Figura 12 é apresentada a escória utilizada na pesquisa.

Figura 12: Escória de cobre jateada utilizada nesta pesquisa.



Fonte: Autora (2018).

3.2 Métodos de ensaio

Com os materiais coletados e encaminhados ao GeoPav, foram preparadas as misturas separadamente de solo + escória de cobre jateada de acordo com os teores a serem trabalhados.

3.2.1 Caracterização física

Inicialmente foi utilizada a norma DNER – ME 041/94 Solos- Preparação de amostras para ensaios de caracterização. Os materiais foram repartidos, misturados e ensacados em amostras com os respectivos teores de escória. A Figura 13 mostra a preparação da mistura e o armazenamento em sacos plásticos.

As normas listadas abaixo foram utilizadas para caracterizar os materiais e as misturas:

- DNER – ME 051/94 Solos – Análise granulométrica;
- DNER – ME 093/94 Solos – Determinação da densidade real;
- DNER – ME 122/94 Solos – Determinação do limite de liquidez;
- DNER – ME 082/94 Solos – Determinação do limite de plasticidade.

Figura 13: Preparação e armazenamento da mistura.



Fonte: Autora (2018)

3.2.2 Ensaios Mecânicos

Os ensaios para caracterização mecânica seguiram os procedimentos normativos listados abaixo:

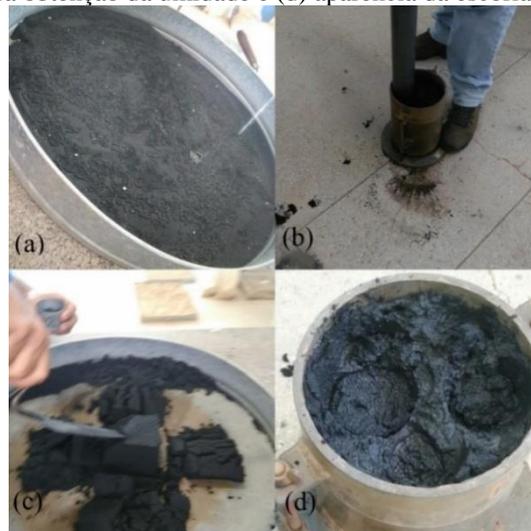
- DNER – ME 129/94 Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas;
- DNER – ME 049/94 Solos – Determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas;
- DNER – ME 201/94 Solo-cimento – Compressão axial de corpos de prova cilíndricos
- DNER – ME 202/94 Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos

Apesar deste trabalho experimental não envolver cimento Portland nas misturas com solo, mas as normas citadas acima foram utilizadas como referência, haja vista não haver normas específicas para ensaios de resistência à compressão, moldagem e cura para corpos de prova estabilizados granulometricamente.

- Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados através do método B, isto é, na energia intermediária, equivalente a 26 golpes por camada em cilindro grande. A Figura 14 mostra algumas etapas do ensaio de compactação.

Figura 14: Ensaio de compactação da escória de cobre jateada - (a)preparação, (b) moldagem, (c) amostragem para obtenção da umidade e (d) aparência da escória no último ponto.



Fonte: Autora (2018)

- Índice Suporte Califórnia – ISC

A partir dos parâmetros (umidade ótima e massa específica aparente seca máxima) obtidos nos ensaios de compactação, foram moldados corpos de provas para determinação da capacidade de suporte das misturas bem como do solo e da escória de cobre jateada. No mesmo ensaio também foi possível determinar a expansão dos materiais envolvidos. A Figura 15 mostra toda preparação e execução do ensaio.

A prensa utilizada foi o modelo I-2001-A Prensa Marshall Elétrica com anel dinamométrico com capacidade de 5.000 Kgf e extensômetro de resolução 0,001 mm da marca da CONTENCO Ind. e Com. LTDA.

Figura 15: Ensaio de ISC - (a) preparação da pré - mistura; (b) corpos de prova pré - imersão (c) corpos de prova na prensa e (d) rompimento do corpo de prova na prensa.



Fonte: Autora (2018).

-Resistência à Compressão Simples - RCS

A partir dos parâmetros obtidos do ensaio de compactação (umidade ótima e massa específica aparente seca máxima), corpos de prova foram moldados nas dimensões 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, aproximadamente, na energia intermediária. Em seguida foram levados à câmara úmida a uma temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, onde foram curados por 7 dias. Após esse período de tempo, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de resistência, como mostrado na Figura 16.

Vale destacar que, apesar de a norma de solo-cimento determinar a imersão do corpo de prova em água por um período de 4 h, este procedimento não foi executado, porque os corpos de provas com solo e escória se desfaziam o que inviabilizaria o ensaio. Portanto, após o período de cura, os corpos de prova foram diretamente para a prensa.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção do DEC/UFS. A prensa utilizada nos ensaios foi uma produzida pela EMIC Equipamentos e Sistemas de Ensaio modelo Máquina Universal de Ensaios, eletrodinâmica e microprocessada DL 20000, acompanhada da licença de uso do software TESC programa para automação de ensaios.

Figura 16: Ensaio de RCS - (a) preparação do corpo de prova; (b) corpos de prova na câmara úmida; (c) corpo de prova posicionado na prensa e (d) corpo de prova rompido.



Fonte: Autora (2018)

3.2.3 Ensaio Hidráulico

- Ensaio de Permeabilidade

Para a pesquisa foi utilizado o ensaio de carga variável que tem a finalidade de determinar o coeficiente de permeabilidade. O ensaio foi executado de acordo com a NBR 14545/2000– Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável.

Este método consiste em saturar a amostra naturalmente utilizando água potável, que após essa etapa, ao permeâmetro é conectado ao tubo manométrico, o qual é preenchido com água e o ensaio tem início quando o nível d'água atinge um determinado referencial. A partir daí são efetuadas medidas do tempo e da altura da coluna de água. A Equação 1 foi utilizada para determinação do coeficiente de permeabilidade. A Figura 17 mostra respectivamente todo o processo de montagem e esquema do ensaio.

$$k = 2,3 \cdot \frac{a \cdot L}{A \cdot (\Delta t)} \cdot \log \frac{h_0}{h_f} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

k – Coeficiente de permeabilidade;

a – Área transversal da bureta;

A – Área do corpo de prova;

L – Comprimento da amostra de solo;

h_0 e h_f – Leitura de cargas no instante inicial e final, respectivamente;

Δt – Variação do tempo entre às leituras.

De acordo com o item 7.4.2 da NBR 14545, para referir os coeficientes de permeabilidade calculados através da Eq. 1 correspondente à temperatura de 20°C, utilizou-se a Equação 2:

$$k_{20} = R_T \cdot k \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

k_{20} – Coeficiente de permeabilidade referido à temperatura de 20 °C;

R_T – Relação entre a viscosidade da água na temperatura de ensaio e a viscosidade da água a 20°C.

Figura 17: Ensaio de Permeabilidade - (a) pré-mistura da amostra; (b) cilindro preparado para receber a amostra; (c) corpo de prova moldado, (d) saturação ascendente do corpo de prova e (e) esquema do permeâmetro de carga variável.



Fonte: Autora (2018)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

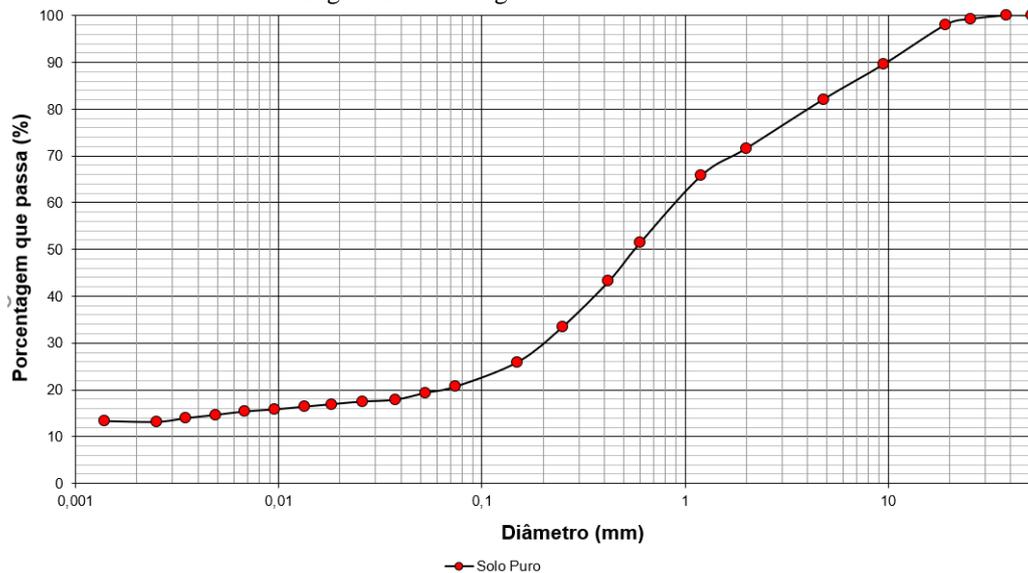
Neste Capítulo serão apresentados os resultados de ensaios de caracterização físicas, mecânica e hidráulica das misturas de solo e escória de cobre jateada.

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Caracterização física e mecânica do solo

A Figura 18 mostra a curva granulométrica do solo e a Tabela 6 apresenta as porcentagens que passam nas peneiras.

Figura 18: Curva granulométrica do solo.



Fonte: Almeida (2016)

Tabela 6: Resultados da análise granulométrica do solo.

	Peneira	Média
% que passa da amostra total	2"	100,00
	1 ½"	100,00
	1"	99,25
	¾"	98,02
	⅝"	89,61
	n° 4	82,12
	n° 10	71,62
	n° 16	65,81
	n° 30	51,43
	n° 40	43,2
	n° 60	33,54
	n° 100	25,95
	n° 200	21,78

Fonte: Almeida (2016)

A granulometria média, segundo a AASHTO, mostrou que o solo puro é constituído pelas seguintes frações: 28,37% de pedregulho, 49,85% de areia, 7,12% de silte e 14,66% de argila, o que permite caracterizá-lo como um solo areno-argiloso.

A densidade real dos grãos do solo foi de 2,69. Observa-se que esse parâmetro é uma característica associada à natureza mineralógica das partículas dos solos. Os limites de Atterberg foram 34% para o limite de liquidez, 18% para o limite de plasticidade, obtendo um índice de plasticidade de 16%. A Tabela 7 mostra um resumo da classificação do solo junto aos sistemas AASHTO/TRB e SUCS.

Tabela 7: Classificação do solo Natural.

Composição granulométrica					IP (%)	IG	Classificação da amostra		
% que passam nas peneiras							DNIT-141/10-ES	TRB	SUCS
Amostra	# 4	# 10	# 40	# 200					
Solo Puro	82,12	71,62	43,20	21,78	16	0	Faixa F	A-2-6	SC

Fonte: Autora (2019)

Com os resultados obtidos o solo foi classificado como SC – areia argilosa com pedregulho, segundo a SUCS e A-2-6 (0), segundo a AASHTO/TRB. De acordo com o manual do DNIT (2006), os solos SC são caracterizados como arenosos com finos argilosos cuja plasticidade pode ser baixa ou alta. O IP e o LL devem identificar pontos acima da linha “A” no gráfico de plasticidade. A plasticidade da fração aglomerante influi mais no comportamento de solo do que na composição granulométrica.

O ensaio de compactação (Proctor intermediário) do solo resultou em valores de 21,07 kN/m³ para o peso específico aparente seco máximo e 8,9% para a umidade ótima. Segundo Almeida (2006), os valores podem ser afetados tanto pelo tipo do solo, ou seja, distribuição granulométrica, forma dos grãos, densidade dos grãos, quantidade e tipo de argilominerais, quanto pelo efeito da energia de compactação.

A capacidade de suporte do solo foi obtida com base no valor de ISC de 46%, com expansão de 0,1%, as amostras moldadas sob energia de compactação do Proctor intermediário. Conforme a norma do DNIT 139/2010 – ES, o solo ensaiado possui as condições específicas para sub-base estabilizada granulometricamente apresentando índice de grupo zero (IG = 0), ISC ≥ 20% e expansão ≤ 1% e o ensaio de compactação ser realizado na energia intermediária.

A densidade real da escória foi de 3,93, considerado um valor alto. Tal valor deve-se a elevada quantidade de óxido de ferro presente, além da quantidade que desprende da superfície metálica durante o processo de jateamento.

Para a amostra de escória jateada utilizada nos estudos de Anjos (2015) e Almeida (2016) foram obtidos valores de densidades de 3,85 e 3,73 respectivamente. Vale destacar que a escória utilizada na presente pesquisa foi proveniente do mesmo processo abrasivo, porém de lotes separados, o que pode justificar uma diferença de densidade; por exemplo, uma reutilização da escória no ciclo de jateamento.

Devido à alta porcentagem de areia (88,31%), não foi possível determinar os limites de Atterberg, sendo a escória classificada como um material não-plástico.

A Tabela 9 mostra um resumo da classificação da escória de cobre jateada junto aos sistemas AASHTO/TRB e SUCS.

Tabela 9: Classificação da escória de cobre jateada.

Composição granulométrica					IP (%)	IG	Classificação da amostra		
% que passam nas peneiras							DNIT-141/10-ES	TRB	SUCS
Amostra	# 4	# 10	# 40	# 200					
Escória	100,00	100,00	75,17	11,69	NP	0	F.F.	A-2-4	SP - SM

Fonte: Autora (2019)

Com os resultados obtidos a escória foi classificada como SP-SM – areia mal graduada com silte, segundo a SUCS e A-2-4 (0), segundo a AASHTO/TRB. O índice de grupo foi 0 (zero), pois não foi possível determinar o limite de liquidez, conforme preconiza a ASTM D-3282 (2009). A escória não foi classificada dentro das faixas de projeto (A à F), segundo especifica a norma DNIT 141- ES (2010), pois a fração que passa pela peneira #40 foi maior do que o limite 30–70 (± 2).

Para o DNIT (2006), os materiais do subgrupo A-2-4 inclui solo contendo 35% ou menos passando na peneira n° 200, com uma porção menor retida na peneira n° 40, possuindo as características dos grupos A-4 ou A-5. Estes grupos abrangem os materiais tais como pedregulho e areia grossa, em que o teor de silte e o índice de plasticidade ultrapassam os limites estabelecidos para o grupo A-1, e ainda areia fina com silte não plástico excedendo os limites do grupo A-3.

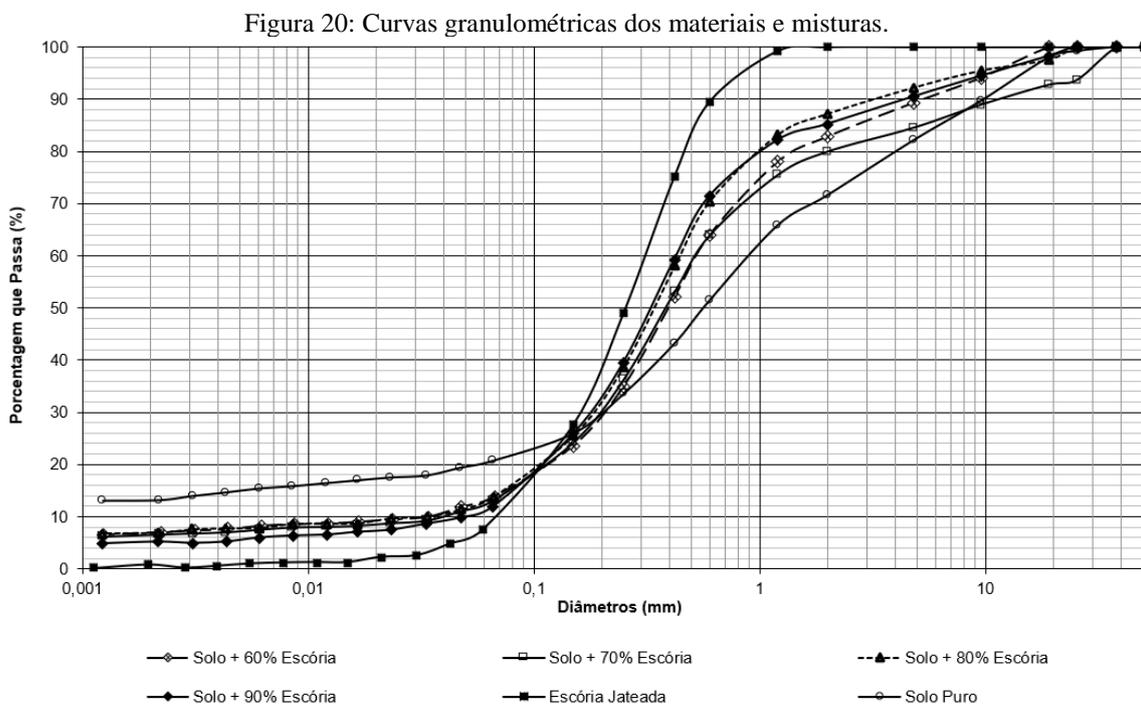
4.2 Caracterização das misturas de solo e escória de cobre jateada

4.2.1 Caracterização física

A Figura 20 mostra as curvas granulométricas dos ensaios realizados com as misturas de solo com as porcentagens de 60, 70, 80 e 90% de escória de cobre jateada. Enquanto a Tabela 10 apresenta as porcentagens dessa mistura que passa nas peneiras.

A densidade real das misturas está apresentada na Tabela 11. Observa-se que à medida que aumenta o teor de escória os valores de densidade aumentam isso acontece devido a sua elevada densidade da escória.

Devido à escória possuir característica semelhante a uma areia e as misturas serem feitas com teores acima de 50% não foi possível determinar os limites de Atterberg, sendo as misturas classificadas como não plásticas.



Fonte: Autora (2019)

Tabela 10: Resultado da análise granulométrica de misturas solo-escória de cobre jateada.

Solo puro + 60% de Escória de cobre			Solo puro + 70% de Escória de cobre		
	Peneira	E. 1		Peneira	E. 1
% que passa da amostra total	2"	100,00	% que passa da amostra total	2"	100,00
	1 ½ "	100,00		1 ½ "	100,00
	1"	100,00		1"	93,73
	¾ "	100,00		¾ "	92,85
	⅜ "	94,10		⅜ "	88,99
	n° 4	89,35		n° 4	84,60
	n° 10	82,88		n° 10	80,03
	n° 16	78,00		n° 16	75,52
	n° 30	63,98		n° 30	63,96
	n° 40	52,14		n° 40	53,11
	n° 60	34,97		n° 60	36,34
	n° 100	23,61		n° 100	24,30
n° 200	16,26	n° 200	15,89		

Solo puro + 80% de Escória de cobre			Solo puro + 90% de Escória de cobre		
	Peneira	E. 1		Peneira	E. 1
% que passa da amostra total	2"	100,00	% que passa da amostra total	2"	100,00
	1 ½ "	100,00		1 ½ "	100,00
	1"	100,00		1"	100,00
	¾ "	97,62		¾ "	98,29
	⅜ "	95,50		⅜ "	94,41
	n° 4	92,25		n° 4	90,49
	n° 10	87,25		n° 10	85,24
	n° 16	83,18		n° 16	82,15
	n° 30	70,42		n° 30	71,43
	n° 40	57,98		n° 40	59,31
	n° 60	38,73		n° 60	39,57
	n° 100	25,55		n° 100	25,90
n° 200	16,58	n° 200	16,75		

Fonte: Autora (2019)

Tabela 11: Densidade real dos grãos da mistura solo e escória de cobre jateada.

Amostra	Densidade (G_s)
*Solo puro	2,69
Solo + 60% Escória	3,14
Solo + 70% Escória	3,22
Solo + 80% Escória	3,25
Solo + 90% Escória	3,29
Escória	3,93

Fonte: Autora (2019), *dados de Almeida (2016)

A Tabela 12 mostra um resumo da classificação das misturas junto aos sistemas AASHTO/TRB e SUCS, onde apresenta as porcentagens de material passando nas peneiras N° 4 (#4,8 mm), N° 10 (#2,0 mm), N° 40 (0,42 mm) e N° 200 (0,074 mm).

Tabela 12: Classificação das misturas.

Composição granulométrica					IP (%)	IG	Classificação da amostra		
% que passam nas peneiras							DNIT-141/10-ES	TRB	SUCS
Amostra	# 4	# 10	# 40	# 200					
*Solo puro	82,12	71,62	43,20	21,78	16	0	Faixa F	A-2-6	SC
Solo + 60% Escória	90,91	84,81	55,61	16,60	NP	0	Faixa F	A-2-4	SM
Solo + 70% Escória	84,60	80,03	53,11	15,89	NP	0	Faixa F	A-2-4	SM
Solo + 80% Escória	92,25	87,25	57,98	16,58	NP	0	Faixa F	A-2-4	SM
Solo + 90% Escória	90,49	85,24	59,31	16,75	NP	0	Faixa F	A-2-4	SM
Escória	100,00	100,00	75,17	11,69	NP	0	F.F.	A-2-4	SP-SM

Fonte: Autora (2019), *dados de Almeida (2016)

Com os resultados obtidos observou-se que à medida que adiciona escória o teor da fração areia aumenta, isso é proporcionado pelo alto teor de fração areia presente na escória (88,31%). A plasticidade das misturas apresentou um caráter não plástico, isso ficou evidente devido às características da escória serem semelhantes a areia. Além de confirmar, através do contato tátil da escória, a aspereza.

As misturas apresentaram classificações SUCS (SM) e TRB (A-2-4) iguais, essa atribuição ocorreu devido ao $IP < 4$ e apresentar mais de 12% de finos, fração esta proveniente do solo (21,78%). Além das misturas apresentarem um máximo de 35% de material passante na peneira #200, limite de liquidez de 40% e índice de plasticidade 10%.

Para o DNIT (2006), os materiais do grupo SM, compreendem areias com maior quantidade de finos (mais de 12% passando na peneira 200). Os solos contendo entre 5% e 12% de finos passando na peneira 200 são considerados limítrofes. O IP e o LL da fração desses solos que passa na peneira nº40 devem identificar, no gráfico de plasticidade um ponto abaixo da linha “A”. A resistência desses materiais secos decorre de pequena quantidade de solo aglutinante, de cimentação de material calcário ou de óxido de ferro. Em outros materiais desse grupo, a fração fina pode ser silte ou pó-de-pedra quase sem plasticidade e a mistura seca não tem resistência.

De acordo com a classificação de faixa da norma do DNIT 141- ES (2010), as misturas enquadraram-se na Faixa “F”, que permite ser utilizada em camadas de sub-base de pavimentos para baixo volume de tráfego.

4.2.2 Caracterização mecânica

4.2.2.1 Compactação

A Figura 21 mostra o comportamento das curvas de compactação das misturas. A Tabela 13 apresenta os valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima da escória e das misturas de solo e escória de cobre jateada para seus diferentes teores obtidos nos ensaios de compactação.

Figura 21: Curvas de compactação das misturas.

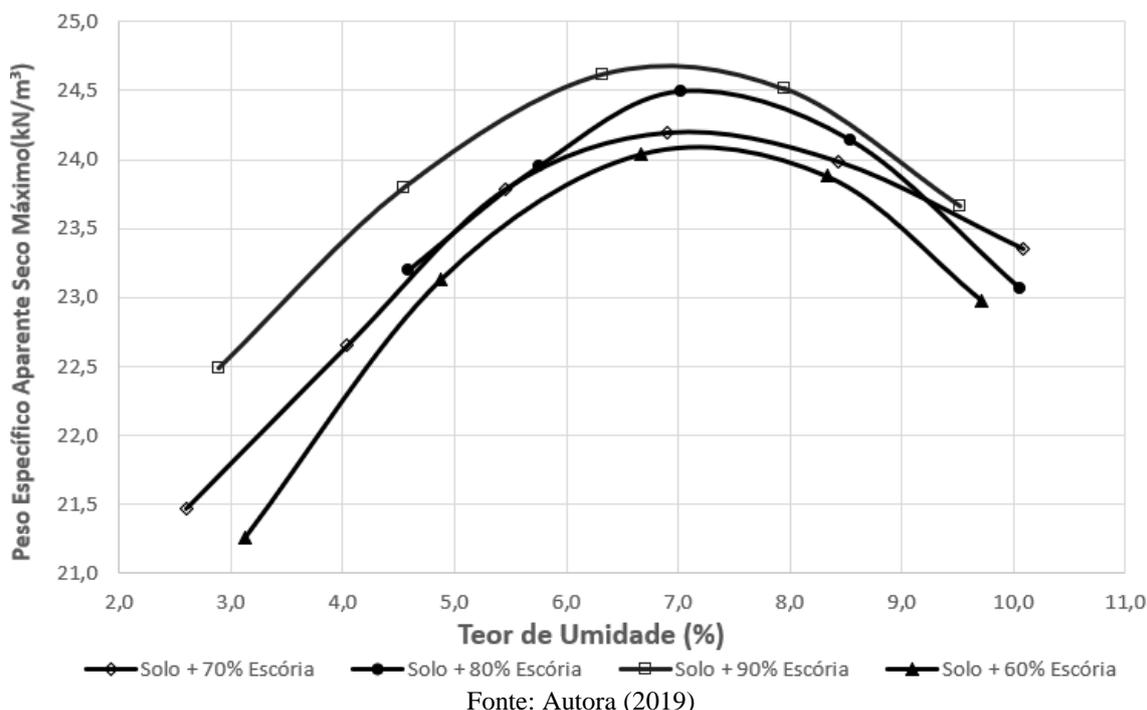


Tabela 13: Peso específico aparente seco máximo e umidade ótima das misturas solo e escória de cobre jateada.

Amostra	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	$\omega_{\acute{o}tima}$ (%)
*Solo puro	21,07	8,9
Solo + 60% Escória	24,08	7,2
Solo + 70% Escória	24,20	7,1
Solo + 80% Escória	24,51	7,1
Solo + 90% Escória	24,65	6,8
Escória	24,98	6,4

Fonte: Autora (2019), *dados de Almeida (2016)

Analisando-se os resultados das compactações observaram-se um aumento no peso específico máximo e uma redução na umidade ótima à medida que o teor de escória cresce. Isso acontece pelo motivo da escória possuir densidade dos grãos maior que a do solo, o que contribui para o aumento do peso específico. Em relação à umidade, aumentando o teor da escória diminui a quantidade de partículas de solo que absorveria a

água, além da baixa absorção da escória, que, segundo Anjos (2015), foi de 0,33%, sendo considerado um valor baixo em comparação aos agregados convencionais.

4.2.2.2 Resistência à Compressão Simples

A Tabela 14 apresenta os resultados dos ensaios à compressão simples (RCS), suas resistências, umidade de moldagem e ótima.

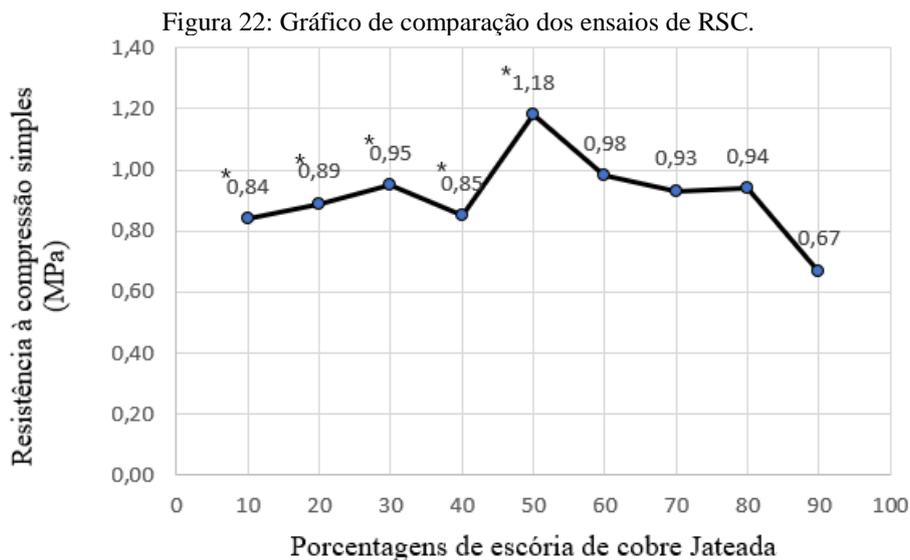
Os resultados de resistência apresentaram valores próximos, principalmente entre 70 e 80% de escória, observando-se que à medida que o teor de escória aumenta a resistência diminui. As possíveis explicações para tal comportamento foram observadas por Almeida, Casagrande e Cavalcante (2015), que é a quantidade de material de granulometria mais grossa que se acumula em uma região do corpo de prova. Outra explicação é o aumento da fração areia, devido o acréscimo de escória, com consequente redução do solo, que faz diminuir a porção coesiva da mistura. Ainda, pode-se citar a quantidade de pedregulho presente na amostra repartida para confecção dos corpos de prova ser maior do que em outras amostras. Das misturas estudadas, o melhor teor obtido foi para a mistura com 60% de escória, para a qual a RCS média foi de 0,98 MPa, indicando uma melhor estabilização granulométrica.

Tabela 14: Resistência à compressão simples das misturas solo e escória de cobre jateada.

Amostra	RCS (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Umidade de moldagem (%)	Umidade ótima (%)
*Solo puro	0,72 0,90 0,90	0,84	0,06	9,0 8,2 8,6	8,9
Solo + 60% Escória	0,93 0,99 1,00	0,98	0,04	6,7 6,9 6,8	7,2
Solo + 70% Escória	0,80 1,07 0,93	0,93	0,13	6,8 7,0 6,8	7,1
Solo + 80% Escória	0,99 0,97 0,88	0,94	0,06	6,9 6,9 6,9	7,1
Solo + 90% Escória	0,54 0,77 0,70	0,67	0,12	6,5 6,7 6,8	6,8

Fonte: Autora (2019)

Comparando esses resultados com os obtidos na pesquisa feita por Santos et al. (2018), observa-se que a resistência aumenta até o teor de 50% de escória e depois ela começa a decrescer. A Figura 22 demonstra esse comportamento.



Fonte: Autora (2019), *dados de Santos et al. (2018)

4.2.2.3 Índice Suporte Califórnia

A Tabela 15 apresenta os resultados dos ensaios de Índice Suporte Califórnia. Observa-se que a capacidade de suporte do solo diminui com o aumento do teor de escória.

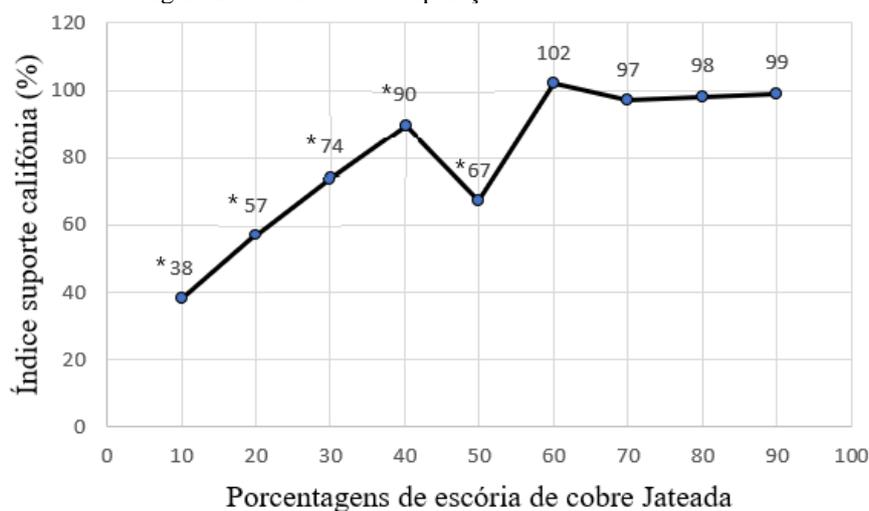
Tabela 15: Resultados dos ensaios de ISC.

Amostra	ISC (%)	Grau de compactação (%)	Expansão (4 dias)
*Solo puro	46	100	0,10
Solo + 60% Escória	112	100	0,00
Solo + 70% Escória	97	100	0,00
Solo + 80% Escória	98	99	0,00
Solo + 90% Escória	103	100	0,01
Escória	37	99	0,00

Fonte: Autora (2019), *dados de Almeida (2016)

Comparando com os resultados obtidos por Santos et al. (2018), é visto que os resultados de ISC não crescem proporcionalmente, tendo diminuições em alguns teores como apresentado na Figura 23. Para o teor de 50% de escória foi observado uma queda de resistência. Vale destacar que esse ensaio é questionado, pois uma má distribuição de pedregulhos no corpo de prova, principalmente na direção do pistão da prensa, pode levar a valores de ISC diferentes para uma mesma amostra.

Figura 23: Gráfico de comparação dos ensaios de ISC.



Fonte: Autora (2019), *dados de Santos et al. (2018)

4.2.2.4 Permeabilidade

A Tabela 16 mostra os valores dos coeficientes de permeabilidade obtidos nos ensaios, na qual se observa que a adição de escória fez aumentar a permeabilidade. A ordem de grandeza dos coeficientes obtidos nesta pesquisa foi de 10^{-5} a 10^{-4} cm/s, que de acordo com Vargas (1977), solos com coeficientes entre 10^{-3} a 10^{-5} são classificados como siltes e argilas de baixa permeabilidade. Já para Das e Sobhan (2017), solos com coeficientes entre 10^{-3} a 10^{-5} são classificados como argila com silte.

Tabela 16: Resultados dos ensaios de permeabilidade.

Amostra	k (cm/s)
*Solo puro	$1,4 \times 10^{-4}$
Solo + 60% Escória	$5,9 \times 10^{-5}$
Solo + 70% Escória	$2,8 \times 10^{-5}$
Solo + 80% Escória	$7,8 \times 10^{-5}$
Solo + 90% Escória	$1,1 \times 10^{-4}$

Fonte: Autora (2019), *dados de Almeida (2016)

Comparando os resultados desta pesquisa com os obtidos por Santos et al. (2018), observou-se que ao se adicionar a escória houve uma diminuição na permeabilidade em relação ao solo puro, o qual apresentou um coeficiente de permeabilidade de $1,40 \times 10^{-4}$ cm/s. Isso demonstra que a escória, preenche os espaços deixados pelos grãos do solo, melhorando o entrosamento entre as partículas e consequentemente diminui os espaços vazios por onde a água percola. Foi observado que para o teor de 90 % de escória a permeabilidade aumentou, isso pode ser atribuída a adição de escória que, como uma areia mal graduada, tende a diminuir o poder estabilizante da mistura.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nesta pesquisa permitiram analisar o melhoramento físico, mecânico e hidráulico de uma areia argilosa com pedregulho através da estabilização granulométrica com a escória de cobre jateada. A adição do resíduo possibilitou tirar as seguintes conclusões:

- A adição da escória resultou em maiores percentuais da fração do tamanho areia no solo;
- As misturas não apresentaram alteração na classificação, pois não houve variações nas porcentagens granulométricas fora dos limites impostos pelas normas;
- O caráter não plástico das misturas é atribuído a escória de cobre jateada;
- A densidade real dos grãos cresceu com o aumento dos teores de escória;
- O aumento no peso específico e a redução na umidade ótima são atribuições da elevada densidade e baixa absorção da escória;
- A maior resistência foi para a mistura com 60% de escória, o que indica uma melhor estabilização granulométrica;
- No ensaio de ISC a mistura com 60% de escória apresentou o maior valor de capacidade de suporte;
- A permeabilidade permaneceu praticamente constante com a mesma ordem de grandeza, com exceção da mistura com 90%. Porém, todas estão na faixa correspondente ao grau baixo de permeabilidade.

Logo, os resultados obtidos mostraram a possibilidade da escória de cobre jateada ser utilizada como um estabilizante granulométrico, em específico em obras rodoviárias, uma vez que a sua adição proporcionou um ganho de resistência e redução na permeabilidade.

Recomendações para trabalhos seguintes:

- Verificar os efeitos que a escória provocará em um solo expansivo;
- Analisar a incorporação de aditivos químicos à mistura solo e escória;
- Análise química das misturas solo - escória.

6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, G. B. O. **Incorporação de escória de cobre pós-jateada a um solo areno-argiloso de Sergipe para aplicação em base de pavimentos**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

ALMEIDA, G.B.O; CASAGRANDE, M. D.T.; CAVALCANTE, E.H.. **Estudo experimental da mistura solo – escória de cobre – cimento Portland para aplicação em camadas de pavimentos**. In: 44ª Reunião anual de pavimentação e 18º Encontro nacional de conservação rodoviária, 2015. Foz do Iguaçu, Paraná.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D-3282: **standard practice for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes**. Philadelphia, 2009.

ANJOS, M. A. G. **Aplicação da granalha batida de cobre como substituta parcial do agregado miúdo em concreto de cimento Portland**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7348**: Pintura industrial – Preparação de superfície de aço com jato abrasivo e hidrojateamento. Rio de Janeiro, 2010b.

_____. **NBR 14.545**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR 10.004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

BATISTA, C.F.N. **Ensaio Fundamentais para a Pavimentação e Dimensionamentos dos Pavimentos Flexíveis**. Vol. 1, 2ª Edição, Editora Globo, Porto Alegre, RS, 1976.

Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral. **36ª Edição do Sumário Mineral - 2016(ano-base 2015)** / Coordenadores Thiers Muniz Lima, Carlos Augusto Ramos Neves Brasília: DNPM, 2018. 131 p.: il.; 29 cm. ISSN 0101 2053.

Bush, Alfred, 1984, “**Understanding Stabilized Earth Construction**”, Technical Paper, Published by Volunteers in Technical Assistance.

CANEPPELE, Jeferson William. **Estabilização de um solo residual com adição de cimento Portland**. 2016. Trabalho de conclusão de curso – Centro Universitário Univates, Lajeado, 2016.

- CASTRO, G.R.; RABAÇA, S.R.; LUIS, A.D.; FERRI, S.; SANTOS, C.R.G.; LOPES, F.M.; SUZUKI, C.Y. **Estabilização de solos in situ com uso de cimento Portland para composição das camadas de infraestrutura do pavimento do Rodoanel trecho Sul/SP**. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 17., 2011, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre, 2011.
- COELHO, A.Z.G.; TORGAL, F.P.; JALALI, S. **A cal na construção**. Universidade do Minho, Portugal: Publidisa, 2009.
- CRISTELO, N.M.C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade do Minho, Braga, 2001.
- CRUZ, Maria de Lurdes Santos. **Novas tecnologias da aplicação de solo-cimento**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2004.
- CRUZ, M.L.; JALALI, S. **Melhoramento do desempenho de misturas de solo-cimento com recursos ativadores de baixo custo**. Revista Luso-Brasileira de Geotecnia, Portugal, n. 120, p. 49-64, nov.2010.
- DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. Tradução da 8. Ed. Norte-americana. São Paulo. Cengage Learning, 2017.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA DE RODAGEM. DNER-ME 041: solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1994
- _____. **DNER-ME 049**: solos – determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. **DNER-ME 051**: solos – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. **DNER-ME082**: solos – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. **DNER-ME 093**: solos – determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. **DNER-ME 122**: solos-determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. **DNER-ME 129**: solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. **DNER-ME 201**: solo-cimento – compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. **DNER-ME 202**: solo-cimento – moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Manual de Pavimentação. Publicação IPR – 719.** 3ª ed. Rio de Janeiro, 2006. 274p.
- _____. **DNIT-ES 141:** pavimentação – base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.
- _____. **DNIT-ES 139:** pavimentação – sub-base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.
- Folque, José. 1986. “**Melhoria de Solos**”, Memória nº 673, LNEC, 1986.
- GENTIL, Vicente. **Revestimentos: Limpeza e Preparo de superfícies.** In: _____. **CORROSÃO.** 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. Cap. 21.
- GORAI, B.; JANA, R.K.; PREMCHAND. Characteristics and **utilization** of copper slag - a review. Resources, Conservation and Recycling, v.39, p. 299-313, 2003.
- Hamzah**, Meor Othman, 1983. “Conventional Methods for Highway Soil Stabilization”, Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master Science in Civil Engineering of the University of Strathclyde. Glasgow, 1983.
- KAMBHAM, K. et al. **Copper slag: optimization of productivity and consumption for cleaner production in dry abrasive blasting.** Journal of Cleaner Production, v. 15, p. 465 - 476, 2006.
- KRUGER, P. VON. **Panorama mundial do aproveitamento de resíduos na siderurgia.** In: CIÊNCIA & TECNOLOGIA METALURGIA & MATERIAIS. V. 51, Nº 438, pg. 116-119. Brasil. 1995.
- LAMBE, W; WHITMAN, R.V. **Soil Mechanics.** New York: John Wiley & Sons, 1969.
- LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; SILVA, C. H. C. **Estabilização dos Solos II: Técnicas e aplicações a solos da microrregião de Viçosa.** Viçosa: Imprensa Universitária - Universidade Federal de Viçosa, 1993.
- Little, D. N. **Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime.** National Lime Association, Kendall/Hunt Publishing Company. 1995.
- LOVATO, Rodrigo Silveira. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal aplicado à pavimentação.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2004.
- MACHADO, C. C.; PEREIRA, R. S.; PIRES, J. M. M. **Influência do tratamento térmico do resíduo sólido industrial (Grits) na resistência mecânica de um latossolo para pavimentos de estradas florestais.** Revista Árvore. Viçosa-MG, V.27, n.4, 2003.

Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/%0D/rarv/v27n4/a15v27n4.pdf>. Acesso em: 16 de abril de 2019.

MACHADO, W. R. **Estudo experimental referente ao tratamento solo-cal com vistas à pavimentação em Sinop/MT**. 2012. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado de Mato Grosso, Sinop, 2012.

MARANGON, M. **Utilização de solo-cimento em uma solução alternativa de estrutura de arrimo**. Rio de Janeiro: PUC, 1992. (Dissertação de Mestrado).

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G. **Apostila de estabilização de solos**. Escola de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

MICELI JUNIOR, Giuseppe. **Comportamento de solos do Estado do Rio de Janeiro estabilizados com emulsão asfáltica**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.

MOURA, W. A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. 3ª ed. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

PORTELINHA, F.H.M et al. **Influência dos mecanismos de reação nas propriedades físicas e químicas de dois solos tropicais melhorados com cimento e cal**. In: Revista Luso-Brasileira de Geotecnia, Portugal, n. 124, p. 5-30, Mar.2012.

PUPPALA, A.J. **Advances in ground modification with chemical additives: from theory to practice**. Transportation Geotechnics, v. 9, p. 123-138, 2016.

RESCHKE, J. S. **Escória granulada de fundição utilizada como substituição ao cimento em concretos: Avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

RESENDE, C. M. A. **Estudo da Viabilidade de incorporação de escória de cobre como agregado fino em produtos de construção**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2009.

RODRIGUES, M.G.M. **Contribuição ao estudo do método físico-químico de dosagem do solo-cimento**. 1992. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1992.

SANTANNA, J. A. **Estudo do comportamento de solos artificiais em função da variação das características de sua fração grossa**. 1998. Dissertação (Mestrado em

engenharia civil) – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

SANTOS, José Washington. **Avaliação do uso de emulsão asfáltica na estabilização química de três solos de Sergipe**. 2009. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2009.

SANTOS, V.R.A.; ALMEIDA, G.B.O.; CASAGRANDE, M. D.T.; CAVALCANTE, E.H.. **Influência da escória de cobre jateada na resistência mecânica e na permeabilidade de um solo areno-argiloso**. In: 15º Congresso nacional de geotecnia. 2018. Ponta Delgada, Portugal.

SENÇO, W. **Manual de técnica de pavimentação**. 1.ed. Volume 2. São Paulo: Pini, 2001. 671 p.

SOARES, G.A., 2000, **Fundição: mercado, processos e metalurgia**. Rio de Janeiro, COPPE-UFRJ.

SOUZA, Altair Carrasco de. **Caracterização geotécnica e ambiental de jazidas de empréstimo de materiais granulares para fins rodoviários**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2016.

SOUZA JUNIOR, Tadeu Antônio Torquato. **Respostas estruturais em pavimentos flexíveis via utilização de equações de módulos de resiliência de solos de subleito e da camada de reforço**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2011.

SOUZA, A.B.B., CAVALCANTI, M.R., SILVA, D.G.L.F., SILVA, N.M.. **Reaproveitamento de resíduos industriais- uma viabilidade econômica e ambiental: Estudo de caso em uma empresa calçadista de João Pessoa-PB**. 2013. XXXIII Encontro nacional de engenharia de produção- elegeu, Salvador, 2013.

VAN IMPE, W. F., 1989. **“Soil Improvement Techniques and their Evolution”**, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1989.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, Ed. da Universidade de São Paulo, 1977. 509 p.

ZAIN, M. F. M. et al. **Cement – based solidification for the safe disposal of blasted copper slag**. Cement & Concrete Composites, v. 26, p. 845 – 851, 2004.