



**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA - UniCEUB**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIA SOCIAIS APLICADAS – FATECS**  
**CURSO: ENGENHARIA CIVIL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CARLOS EDUARDO DINIZ VILANOVA**

**AVALIAÇÃO MECÂNICA DA MISTURA DO AGREGADO AÇOBRITA COM O  
SOLO LATERÍTICO DE BRASÍLIA APLICADA A ESTRUTURAS DE  
PAVIMENTOS**

**BRASÍLIA – DF**

**2017**

**CARLOS EDUARDO DINIZ VILANOVA**

**AVALIAÇÃO MECÂNICA DA MISTURA DO AGREGADO AÇOBRITA COM O  
SOLO LATERÍTICO DE BRASÍLIA APLICADA A ESTRUTURAS DE  
PAVIMENTOS**

Trabalho de Curso (TC) apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Civil do UniCEUB– Centro Universitário de Brasília

Orientação: Ivonne Alejandra M. G. Góngora,  
D.Sc.

**BRASÍLIA-DF**

**2017**

CARLOS EDUARDO DINIZ VILANOVA

**AVALIAÇÃO MECÂNICA DA MISTURA DO AGREGADO AÇOBRITA COM O  
SOLO LATERÍTICO DE BRASÍLIA APLICADA A ESTRUTURAS DE  
PAVIMENTOS**

Trabalho de Curso (TC) apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Civil do UniCEUB– Centro Universitário de Brasília

Orientação: Ivonne Alejandra M. G. Góngora

Brasília, 2017.

**Banca Examinadora**

---

Eng<sup>a</sup>.Civil: Ivonne Alejandra M. G. Góngora, D. Sc.  
Orientadora

---

Eng<sup>o</sup> Civil: Julian Asdrúbal Buritica, M.Sc.  
Examinador Interno

---

Eng<sup>o</sup> Civil: Nélon Padron Sanchez, M. Sc.  
Examinador externo

## RESUMO

Em todos os processos industriais siderúrgicos são gerados resíduos indesejáveis que acabam sendo descartados ou destinados a uma aplicação de reuso. No caso das aciarias, o mesmo ocorre com as escórias (subproduto de descarte produzidos durante as reduções do minério). Existem já algumas aplicações em obras rodoviárias, porém apresentam problemas devido a expansões excessivas do agregado implantado. Para fins de determinar uma alternativa ambiental viável nas estruturas de pavimentos e melhoramentos de solos, foi estudada a inserção do agregado açobrita granulometricamente estabilizado ao solo laterítico de Brasília em teores não muito grandes afim de amplificar nitidamente a resistência da mistura sem extrapolar os limites de expansões normatizados. Estudando a bibliografia, nota-se que aqueles que utilizaram um grãos mais grossos obtinham uma expansão elevada e/ou irregular. Com isto, o programa experimental baseou-se na utilização do material passante na peneira #10, adicionando-o em 5%, 10% e 15% a mistura solo-escória, sendo todo esse realizado nos laboratórios de mecânica dos solos dos campus Asa Norte e Taguatinga do Centro Universitário de Brasília (UniCEUB). A partir dos resultados comprovou-se que a adição do agregado apresenta resultados satisfatórios nos quesitos expansão e, principalmente, aumento de resistência, chegando até 639%, além de se encaixar nos parâmetros normatizados da NBR 16364 (ABNT, 2015), tornando as misturas aptas a serem executadas como sub base de pavimentos.

**Palavras chaves:** Escória de aciaria, açobrita, estrutura de pavimentos, rodovias, avaliação mecânica, melhoramento de solos.

## **ABSTRACT**

In all siderurgical processes, different kinds of wastes are generated then discarded or destined to a reuse application. In the case of the steel industry, the same happens with the steel slag (waste material produced during the mineral reduction). There are some applications on road works, but they all already have issues because of the excessive aggregate expansion. To determine a viable environmental alternative on the roads structure and soils improvements, it has been studied the insertion of the granulometrically-stabilized aggregate in the Brasilia's lateritic soil without big percentages, amplifying the mixture's resistance respecting the expansion standard's limits. By the bibliography, it's noticed that those who use thicker grains used to have higher or irregular expansions so, the whole experimental process were based on a thinner size of the grain (not holded material by the sieve #10), adding it in percentages of 5%, 10% and 15% of the whole mixture. All the procedures were accomplished on the soil mechanics laboratory at both campus of Centro Universitário de Brasília (UniCEUB). By the results, it has been proved that the aggregate addition improves the California Bearing Ratio in up to 639%, the expansion isn't affected and it fits as sub base, following the NBR 16364 (ABNT,2015) parameters.

**Key words:** Steel slag, pavement structure, roads, mechanical evaluation, soil improvement.

## SUMÁRIO

RESUMO	i
<i>ABSTRACT</i>	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS	ix
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>2</b>
2.1 Objetivo geral .....	2
2.2 Objetivos específicos .....	2
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>3</b>
3.1 Processo de produção do aço.....	3
3.1.1 Histórico e caracterização .....	3
3.1.2 Processos de aglomeração.....	3
3.1.3 Preparação do carvão.....	5
3.1.4 Redução em alto forno.....	6
3.1.5 Aciarias .....	7
3.2 Escórias de aciaria .....	9
3.3 Expansibilidade da escória de aciaria .....	10
3.4 Questões ambientais da escória .....	13
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>17</b>
4.1 Escória como material de reforço.....	17
4.2 Metodologia de ensaios do solo.....	17
4.2.1 Caracterização do solo .....	18
4.2.2 Análise granulométrica.....	19

4.2.3	Limites de Atterberg.....	20
4.2.4	Classificação de solos tropicais (MCT) .....	20
4.2.5	Compactação.....	21
4.2.6	Mistura solo escória .....	22
4.2.7	Índice de Suporte Califórnia.....	24
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>26</b>
5.1	Caracterização do solo.....	26
5.1.1	Ensaio de granulometria .....	26
5.1.2	Limites de Atterberg.....	27
5.1.3	Miniatura Compactação Tropical (MCT) .....	29
5.2	Caracterização da escória.....	30
5.2.1	Análise granulométrica.....	30
5.2.2	Absorção de água do açobrita .....	31
5.3	Compactação .....	31
5.3.1	Solo natural (SN) .....	31
5.3.2	Solo natural + 5% de escória (S+5%E).....	32
5.3.3	Solo natural + 10% de escória (S+10%E).....	33
5.3.4	Solo natural + 15% de escória (S+15%E).....	34
5.4	Avaliação do índice de suporte califórnia .....	35
5.5	Comparativo geral.....	37
<b>6</b>	<b>Considerações finais .....</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>Sugestões para pesquisas futuras .....</b>	<b>40</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>41</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sínter (Produto final do processo de sinterização) .....	4
Figura 2 – Produto final do processo de pelletização .....	4
Figura 3 – Baterias em fornos de coque.....	6
Figura 4 – Fluxograma da produção do aço .....	8
Figura 5 – Fluxograma simplificado da produção do aço .....	8
Figura 6 – Expansão causada pela escória de aciaria em um estacionamento de um hospital localizado em Vitória, ES (Raposo, 2005) .....	10
Figura 7 – Curva de compactação da escória de aciaria EAF (ROHDE, 2002).....	12
Figura 8 – Curva de compactação da escória de aciaria EAF (BRANCO, 2004). ....	13
Figura 9 – (a) Escória natural; (b) Britador; (c)Peneiramento e separação. ....	17
Figura 10 - Projeção 510, Noroeste, Brasília – DF. ....	18
Figura 11 – Solo sendo retirado por uma retroescavadeira.....	18
Figura 12 - Solo destorroado e preparado para amostragem.....	19
Figura 13 - Sequência do ensaio de granulometria: (a) solo passante na peneira nº4,8 mm; (b) destorroamento do solo; (c) peneiramento grosso; (d) sedimentação. ....	20
Figura 14 - Limites de Atterberg: (a) determinação limite de liquidez); (b) determinação limite de plasticidade). ....	20
Figura 15 - Ensaio MCT: (a) espalhamento da massa úmida; (b) medições das umidades e contrações da amostra; (c) medição da penetração com o penetrômetro. ....	21
Figura 16 – Compactador automático (UniCEUB - Campus Taguatinga). ....	22
Figura 17 – Amostra com 5% de escória.....	23
Figura 18 – Amostra com 10% de escória.....	23
Figura 19 – Compactação da mistura 15% escória e 85% solo. ....	24
Figura 20 - Corpos de provas submersos por 96 horas. ....	25
Figura 21 - Ensaio de penetração no corpo de prova.....	25
Figura 22 - Curvas granulométricas do solo puro com e sem defloculante. ....	26
Figura 23 – Resultado do ensaio de Limites de Attberg. ....	28
Figura 24 – Carta de plasticidade (SUCS) .....	28
Figura 25 – Curva granulométrica do agregado puro. ....	30
Figura 26 – Curva de compactação SN.....	32
Figura 27 – Curva de compactação S+5%E.....	33

Figura 28 – Curva de compactação S+10%E.....	34
Figura 29 – Curva de compactação S+15%E.....	35
Figura 30 – Comparativo das curvas de compactação.....	37
Figura 31 - Comparativo de ISC(%) vs. teor de escória na mistura (%) .....	38

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição do carvão vegetal .....	5
Tabela 2 – Comparativo de capacidade de produção .....	5
Tabela 3 - Composição da escória produzida pelo processo LD no Brasil (IBS, 1998) .....	9
Tabela 4 - Composições das escórias de aciaria elétrica (PEREIRA, 1994* apud MASUERO et al., 2000) .....	9
Tabela 5 – Influências da expansão da escória de aciaria (Machado, 2000) .....	11
Tabela 6 – Resumo dos elementos químicos encontrados (FCT, 2005).....	14
Tabela 7 – Resultados dos ensaios de lixiviação (FCT, 2005).....	15
Tabela 8 – Resultados dos ensaios de solubilização (FCT, 2005).....	15
Tabela 9 – Resultados do ensaio de limite de liquidez.....	27
Tabela 10 - Limites de Atteberg da amostra de solo.....	27
Tabela 11 – Classes de grupos MCT .....	29
Tabela 12 – Resultados da compactação do SN.....	32
Tabela 13 – Resultados da compactação do SN+5%E.....	33
Tabela 14 – Resultados da compactação do SN+10%E.....	34
Tabela 15 – Resultados da compactação do SN+15%E .....	35
Tabela 16 – Resultados do ensaio de ISC.....	36
Tabela 17 – Comparativo geral das misturas.....	38

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNT	- Confederação Nacional do Transporte
CL	- Argila de baixa plasticidade
Com defloc.	- Com defloculante
DNIT	- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNER	- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
ISC	- Índice de Suporte Califórnia
IP	- Índice de Plasticidade
LL	- Limite de Liquidez
LP	- Limite de Plasticidade
Mg	- Massa retida em cada peneira
Mh	- massa do material úmido submetido a sedimentação
MCT	- Miniatura Compactação Tropical
NBR	- Norma Brasileira Registrada
n°	- Número
Sem defloc.	- Sem defloculante
SUCS	- Sistema Unificado de Classificação de Solos
SN	- Solo Natural
SN+5%E	- Solo com 5% de escória
SN+10%E	- Solo com 10% de escória
SN+15%E	- Solo com 15% de escória
UniCEUB	- Centro Universitário de Brasília

## LISTA DE SÍMBOLOS

$D_{50}$	- Diâmetro correspondente a 50% que passa em peso
LA	- Areia laterítica
LA'	- Arenoso laterítico
LG	- Argiloso laterítico
mm	- Milímetros
mL	- Mililitro
min	- Minutos
MPA	- Mega Pascal
NA	- Areia não laterítica
NS'	- Siltoso não laterítico
NA'	- Arenoso não laterítico
NG'	- Argila não laterítica
$R^2$	- Porcentagem de acerto
$t_0$	- Tempo inicial
$t_1$	- Tempo final
$W_{ótima}$	- Umidade ótima
$w(\%)$	- Teor de umidade correspondente a 55 golpes
$Y_{dmáx}$	- Peso específico seco máximo

(°)	- Graus
°C	- Graus Celsius
*	- Fator de multiplicação
<	- Sinal de sentença (menor que)
>	- Sinal de sentença (maior que)
=	- Sinal de sentença (igual)
%solo	- Teor de solo da mistura
%escória	- Teor de escória da mistura
%mat pass.	- Porcentagem de materiais que passa
%mat ret.	- Porcentagem de materiais que fica retido

## 1 INTRODUÇÃO

O crescente aumento da economia brasileira atual está ligado diretamente com a demanda e eficiência da infraestrutura de transporte para que possa apresentar o escoamento de produção necessário. A partir disso, a manutenção e a expansão da malha rodoviária torna-se prioritário nas questões que se referem ao desenvolvimento do país.

O Brasil possui uma das maiores malhas rodoviárias do mundo (1.720.755,7 km de extensão), porém sua densidade pavimentada é muito pequena comparada a países com dimensões não muito diferentes. Com apenas 12,3% de sua extensão pavimentada, o Brasil assume a 111ª posição no quesito qualidade de infraestrutura rodoviária de acordo com o ranking de competitividade global do Fórum Econômico Mundial (Pesquisa CNT de Rodovias, 2016).

Na execução de rodovias, utiliza-se agregados minerais não renováveis os quais causam grande impacto ambiental, não mencionando o alto custo de mão de obra e matéria prima. Visando esse ponto, a solução apresentada neste trabalho consiste na utilização do material de descarte das aciarias, a escória, como material a ser misturado com o solo. Pesquisas recentes mostram a sua grande eficiência como material de base e sub base, apresentando índices de CBR muito acima do recomendado pela norma NBR 16364 (ABNT, 2015).

Segundo o relatório de estatísticas preliminares do Instituto Aço Brasil de janeiro de 2017, foram produzidas 2,8 milhões de toneladas de aço bruto, gerando, aproximadamente, 420 mil quilos de escória.

Visando a destinação mais adequada e sustentável de materiais que seriam de descarte como o em questão, a presente pesquisa experimental foca na aplicabilidade rodoviária de forma que sua expansibilidade também seja avaliada a fim de promover uma solução conveniente com mais resistência e menos custos as obras rodoviárias.

No caso desta pesquisa, obteve-se um resultado de possíveis aplicações desde base a subleitos.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Analisar o comportamento mecânico do solo compactado com diferentes porcentagens de escória a fim de definir qual seria a proporção mais adequada

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar o comportamento mecânico do solo com e sem a adição do agregado;
- Determinar o teor ótimo da fração de escória a misturada com o solo;
- Determinar os parâmetros mecânicos das misturas através da realização de ensaios laboratoriais como: compactação e Índice de Suporte de Califórnia (ISC);
- Avaliar os resultados para definir o tipo de mistura que possui melhor desempenho na melhoria de solos.
- Avaliar a possibilidade de aplicabilidade em subleitos, sub base e base.

### **3 REVISÃO BIBLIORÁFICA**

#### **3.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO AÇO**

##### **3.1.1 HISTÓRICO E CARACTERIZAÇÃO**

Com o início da Revolução Industrial e a invenção de diversas tecnologias siderúrgicas, grande parte do ferro passou a ser substituído pelo aço principalmente pelo seu notável custo menor, passando a ser o metal mais consumido mundialmente.

As matérias primas essenciais são encontradas com facilidade em toda a crosta terrestre, o minério de ferro em forma de óxido de ferro misturado com areia fina, o carvão que além de combustível serve como fornecedor de carbono e redutor do minério de ferro e o calcário, fundente reator das impurezas do minério e do carvão, diminuindo o seu ponto de fusão, gerando a escória.

Por ser um material composto por óxidos, sulfetos, carbonatos e silicatos, o ferro necessita adequar suas características físico-químicas por meio processos para ser utilizado em alto fornos, como peneiramento, britamento, dentre outros. Mas o principal processo em questão é o de aglomeração, este acelera os processos de redução, reduz o consumo de carvão, além de melhorar as propriedades mecânicas da carga e a permeabilidade desta no alto forno.

##### **3.1.2 PROCESSOS DE AGLOMERAÇÃO**

Os principais processos de aglomeração são sinterização e pelletização. No primeiro, o carvão e finos do minério são aquecidos a temperaturas que variam entre 1300°C e 1500°C, unindo as partículas e formando o sinter (Figura 1).

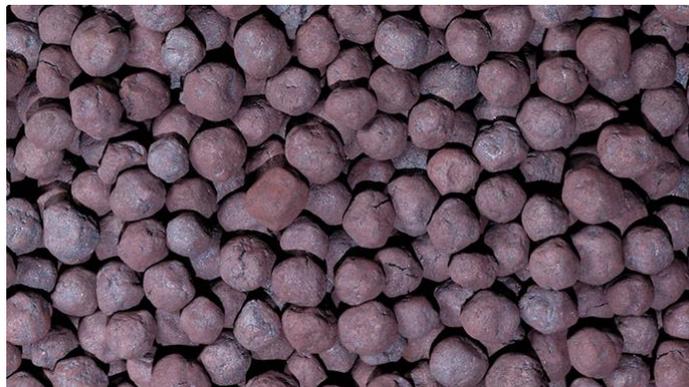
Figura 1 – Sínter (Produto final do processo de sinterização)



Fonte: <<http://www.dk-duisburg.de/en/prozess/sinteranlage.html>> Acesso em 14 fev 2017 – 19:00.

No segundo processo é utilizado água, aglomerante e finos do minério para criar as pelotas que, após formadas são aquecidas a 1350°C para atingir sua forma final (Figura 2). Neste caso, o formato é essencial pois o alto forno funciona com a circulação de ar e necessita ter resistência para que não seja esmagado e acabar entupindo o forno.

Figura 2 – Produto final do processo de pelotização



Fonte: <<http://www.vale.com/brasil/pt/business/mining/iron-ore-pellets/paginas/default.aspx>> Acesso em 14 fev 2017 – 21:00.

### 3.1.3 PREPARAÇÃO DO CARVÃO

Paralelamente a preparação do ferro, acontece a preparação do carvão, podendo ser de origem vegetal ou mineral. O vegetal é obtido através da pirólise da madeira, gerando um material de alta teor de carbono, teores apresentados na tabela 1, além de gases poluentes.

Tabela 1 – Composição do carvão vegetal (SILVA, J. J. S)

<b>Composição</b>	
Cinzas	5%
Substâncias voláteis	25%
Carbono fixo	70%

Já o mineral necessita de um processo chamado coqueificação. Sua matéria é composta basicamente por materiais vegetais decompostos e fossilizados, logo precisa que o carvão fique resistente, com menos impurezas e mais poroso.

O carvão vegetal ser apresentar maior concentração de carbono, porém os processos não o deixam tão resistente quanto o mineral, logo seu rendimento é significativamente menor, assim como apresentado na tabela a seguir:

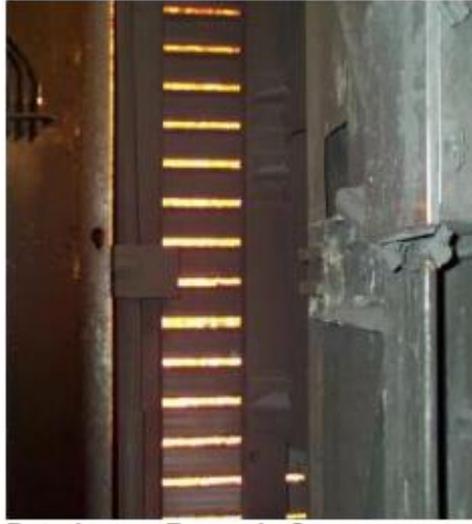
Tabela 2 – Comparativo de capacidade de produção (SILVA, J. J. S)

<b>Capacidade típica do alto-forno</b>	
À carvão vegetal	1.200 T / dia
À carvão mineral (coque)	10.000 T / dia

O processo de coqueificação consiste, basicamente, no aquecimento do carvão em baterias em fornos de coque hermeticamente fechados (Figura 3) com temperaturas que giram em torno de 1100°C a 1300°C, visando aumentar a porosidade e a resistência mecânica para que possa suportar o peso de todo o material depositado no alto forno e que aumente a região de contato com os monóxidos e dióxidos de carbono, aumentando a eficiência do processo. À medida

que a temperatura aumenta, a matéria volátil do carvão é liberada e uma matriz sólida e porosa de carbono é formada (Geerdes et al., 2004).

Figura 3 – Baterias em fornos de coque



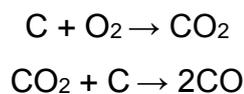
Fonte: <[http://www.infratemp.com.br/assets/uploads/aplicacao/infratemp-aplicacao-20151015105536-coqueificacao\\_port.pdf](http://www.infratemp.com.br/assets/uploads/aplicacao/infratemp-aplicacao-20151015105536-coqueificacao_port.pdf)> Acesso em 15 fev 2017.

### 3.1.4 REDUÇÃO EM ALTO FORNO

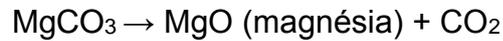
Depois do carvão estar em forma de coque e o minério de ferro preparado, seja em forma de sinter ou outro tipo de aglomerado, ambos são levados ao alto forno para o processo de redução.

Na parte inferior do alto forno, o oxigênio soprado juntamente com o coque e, juntos reagem fornecendo calor suficiente para gerar temperaturas de até 2000°C e gases com alto poder redutor fundindo a carga metálica (gusa e escória), depositando-a no cadinho. Com isto, acontecem as seguintes reações:

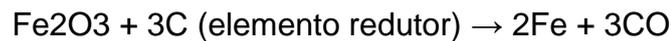
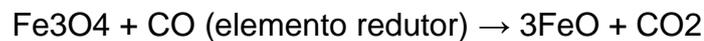
- **Formação de CO e CO<sub>2</sub>:** ocorre nas ventaneiras onde oxigênio é soprado, onde o elemento redutor (CO) é gerado.



- **Decomposição de carbonatos:** é nesta reação em que o óxido de cálcio, juntamente com magnésio são formados para depois entrar com os restos do minério e cinzas para formar a escória de alto forno.



- **Redução dos óxidos de ferro:** o monóxido de carbono CO formado age agora como elemento redutor, além do próprio carbono contido no carvão também exercer certa função.



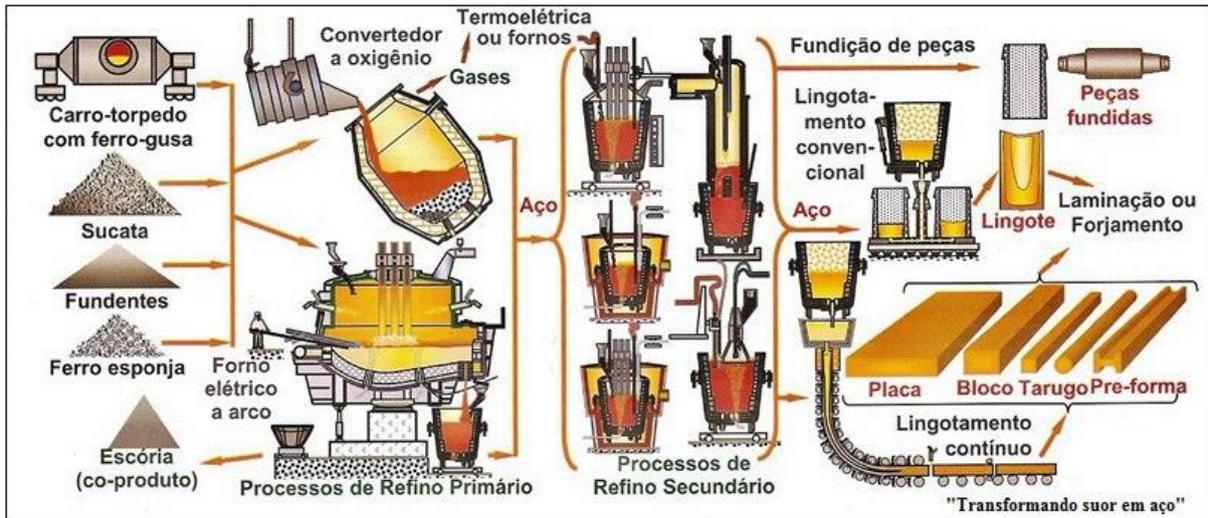
### 3.1.5 ACIARIAS

Seguido da redução, o material é depositado e transportado para as aciarias por meio de carros torpedos para o refino primário. Neste, o gusa é despejado juntamente com sucatas de aço em grandes recipientes chamados convertedores transformando-os em aço líquido pela injeção de oxigênio por lanças refrigeradas e, depois, a adição de fundentes.

Este processo caracteriza-se por ser uma espécie de limpeza de impurezas, o qual oxida parcialmente o carbono, manganês, silício, fósforo, dentre outros. E depois o fundente retira-os em forma de escória.

Para utilização do mercado, grande parte do aço líquido passa por um refino secundário. Após isto, este passa pelo processo de lingotamento e laminação ou outro, dependendo de sua utilização final. Segue abaixo o fluxograma da produção do aço (Figura 4):

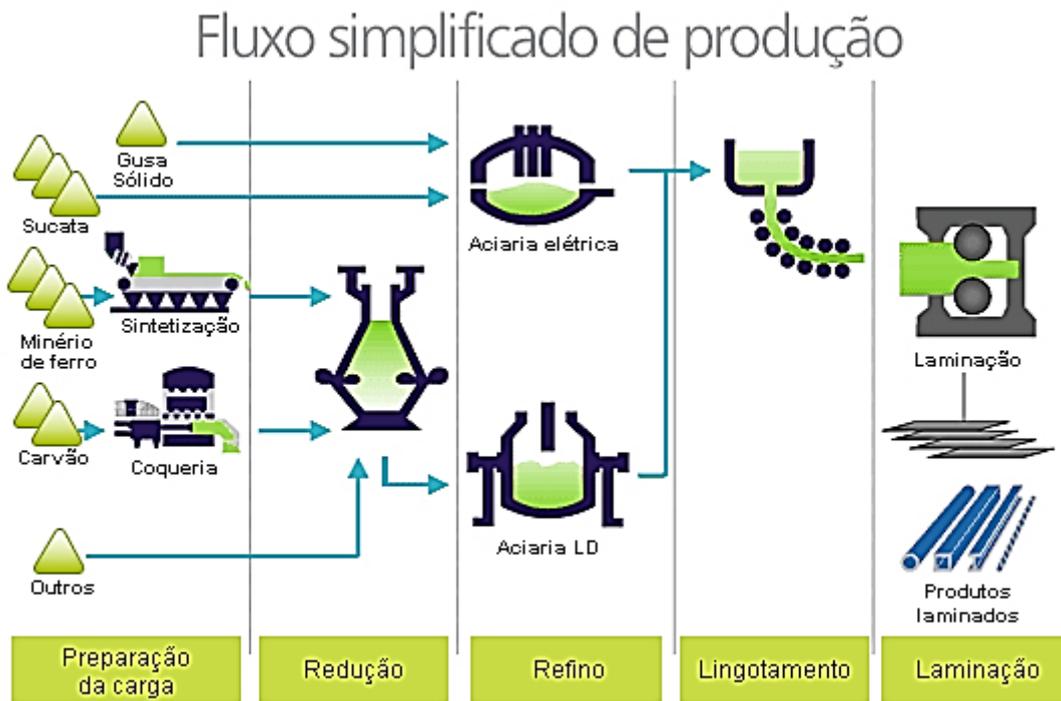
Figura 4 – Fluxograma da produção do aço



Fonte: <<http://www.ufrgs.br/lacor/AluminioCobreFerro.html>> Acesso em 01 mar 2017.

Atualmente todas as aciarias são classificadas em integradas e semi integradas (McGannon, 1971) em que elas se diferenciam, basicamente, em que uma realiza o processo de redução e outro não (Figura 5)

Figura 5 – Fluxograma simplificado da produção do aço



Fonte: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/processo-etapas.asp>> Acesso em 03 mar

2017.

### 3.2 ESCÓRIAS DE ACIARIA

Caracterizada pela seu grande grau de dureza, a escória de aciaria é um coproduto do processo de produção do aço o qual possui apenas elementos desprezíveis no processo siderúrgico. Estas escórias podem ser tanto oxidantes (produzida pela injeção de oxigênio no aço fundido para oxidar carbono, silício e enxofre) quanto redutoras (gerada após o vazamento da escória oxidada através da adição de óxido de cálcio - CaO e de fluorita- CaF<sub>2</sub>). Estes dois compostos são injetados no processo para dessulfurar o aço líquido e adicionar elementos de liga (MACHADO, 2000).

Os alto grau de CaO e MgO livres devem-se ao fato de que estes precipitam depois de que o fósforo e o silício são oxidados. Além disto, estão presentes na escória o silicato de cálcio (CaSiO<sub>3</sub>), óxido de silício (SiO<sub>2</sub>), ferrita cálcica (CaFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), óxido de magnésio (MgO), dentre outros elementos (JOHN, 2003).

Pode-se verificar a variação da composição das escórias de aciaria no mundo devido aos tipos de processos e composição dos materiais utilizados (tabelas 3 e 4)

Tabela 3 - Composição da escória produzida pelo processo LD no Brasil (IBS, 1998)

Composto	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO
Quantidade (%)	6 - 45	1 - 9	7 - 16	1 - 4	8 - 30	3 - 7

Tabela 4 - Composições das escórias de aciaria elétrica (PEREIRA, 1994\* apud MASUERO et al., 2000)

País	Geração kg/ton	CaO (%)	MgO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	FeO (%)	MnO (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	S (%)
Brasil	150	33	10	18	6	30	5	0,9	0,1
Japão	127	40	4	25	5	19	7	-	0,06
Suécia	100	46	5	11	5	28	4	0,7	-
EUA	160	41	10	17	8	18	4	0,6	0,2
Alemanha	120	32	10	15	4	31	4	1,4	0,1
Itália	120	41	8	14	7	20	6	0,9	0,1

### 3.3 EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA

O maior empecilho da utilização da escória, seja em qualquer tipo de aplicação que envolva estar submetido a umidade é a sua capacidade expansiva considerável. Esta pode chegar a níveis de expansibilidade da casa de 10% que, no caso de rodovias, pode chegar a estragar todo o asfalto (Figura 6)

Figura 6 – Expansão causada pela escória de aciaria em um estacionamento de um hospital localizado em Vitória, ES (Raposo, 2005)



A principal causa da expansão é a hidratação do óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO), os quais suas formas cristalinas aumentam seus volumes em até 120%. Além disso, Machado (2000) cita outras causas apresentadas na tabela 3.3.

Tabela 5 – Influências da expansão da escória de aciaria (Machado, 2000)

ESPÉCIES QUÍMICAS	PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA EXPANSÃO	MECANISMO
CaO e MgO	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Teor da espécie no estado livre</li> <li>➤ Umidade</li> <li>➤ Temperatura</li> <li>➤ Teor de CO<sub>2</sub></li> <li>➤ Tamanho dos grãos de escória</li> </ul>	Hidratação
FeO	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Teor de FeO</li> <li>➤ Umidade</li> <li>➤ Tempo de exposição ao ar</li> <li>➤ Teor de oxigênio no resfriamento</li> <li>➤ Tamanho dos grãos de escória</li> </ul>	Oxidação
C <sub>2</sub> S	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Velocidade de resfriamento</li> <li>➤ Impurezas iônicas</li> <li>➤ Temperatura de resfriamento</li> <li>➤ Basicidade das escórias</li> </ul>	Transformação alotrópica

Na equação 1 é apresentada a hidratação do CaO. Este principalmente está em sua forma livre e, na sua transformação, se expande desagregando-se do material e, conseqüentemente, aumentando drasticamente o seu volume em relação ao CaO.

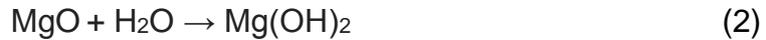


Quanto maior o aumento da porosidade, maior será sua superfície exposta e, conseqüentemente, mais rápida será a hidratação do CaO. Neste caso, o que pode variar a porosidade é como a escória é resfriada na sua formação. (WACHSMUTH et. al., 1981; PENA, 2004).

Focando na granulometria, a redução granulométrica implica em uma superfície de contato maior com a água, logo uma hidratação mais rápida. Também, amostras com diâmetros menos que 8 µm tendem a possuir um teor mais elevado de cálcio que, também justifica o aumento da expansão (GEYER, 2001; PENA, 2004).

O óxido de magnésio (MgO), como previamente mencionado, está presente na escória de aciaria LD pelo uso da dolomita durante o refino para minimizar desgastes do revestimento refratário. Esse pode chegar a possuir teores de 10% da composição da escória. O problema que causa a expansão é o MgO se apresentar, também, na forma livre, chamado de periclásio. O recomendado por pesquisadores é a redução do tamanho dos grãos de forma a facilitar a dissolução e a reação completa do óxido. (MACHADO, 200; ROHDE, 2002; PENA, 2004)

A seguir, a equação da hidratação do MgO (equação 2) em sua forma livre (periclásio) resulta no hidróxido de magnésio, chamado de brucita. Este apresenta uma variação volumétrica de 119,5% em relação ao MgO (MACHADO, 2002).

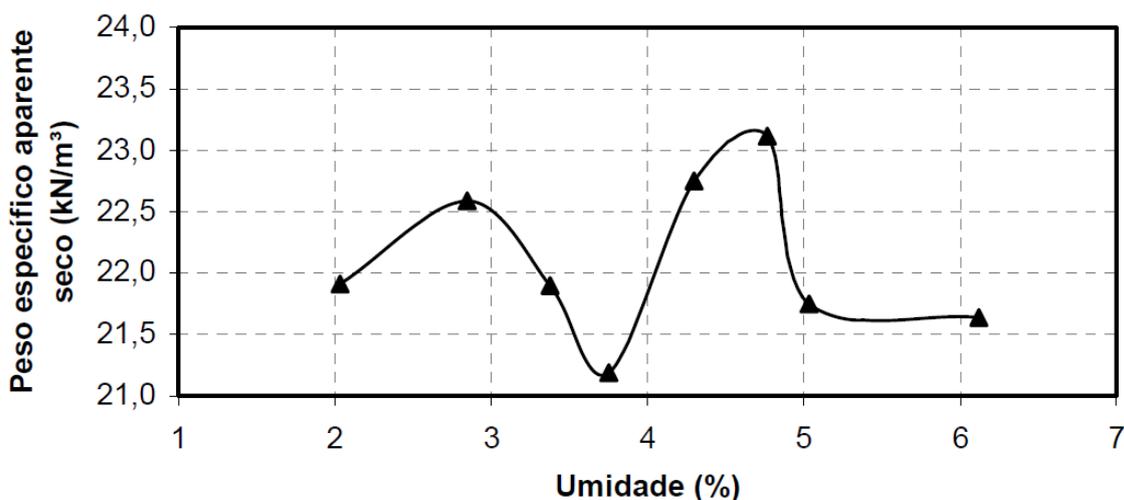


Neste trabalho foram tomados como referência os dados de expansão obtidos por Buitrago (2016), sendo a média de expansão de 0,92%.

Segundo a especificação do DNIT-EM 262/94, as escórias de aciarias devem estar livres de qualquer material orgânico, ter uma absorção de água limitada entre 1 e 2% em massa e o desgaste por abrasão Los Angeles de, no máximo, 25% para sub base e revestimento. Além disso, esta especificação do DNIT determina uma granulometria específica para utilização (1,27 cm a 5,08 cm de abertura nominal). Neste trabalho serão utilizados outros diâmetros mais finos de grãos a fim de obter resultados controlados e mais concisos, visto que o que a especificação impõe deixa o solo com muitos vazios, aumentando as variáveis aleatórias.

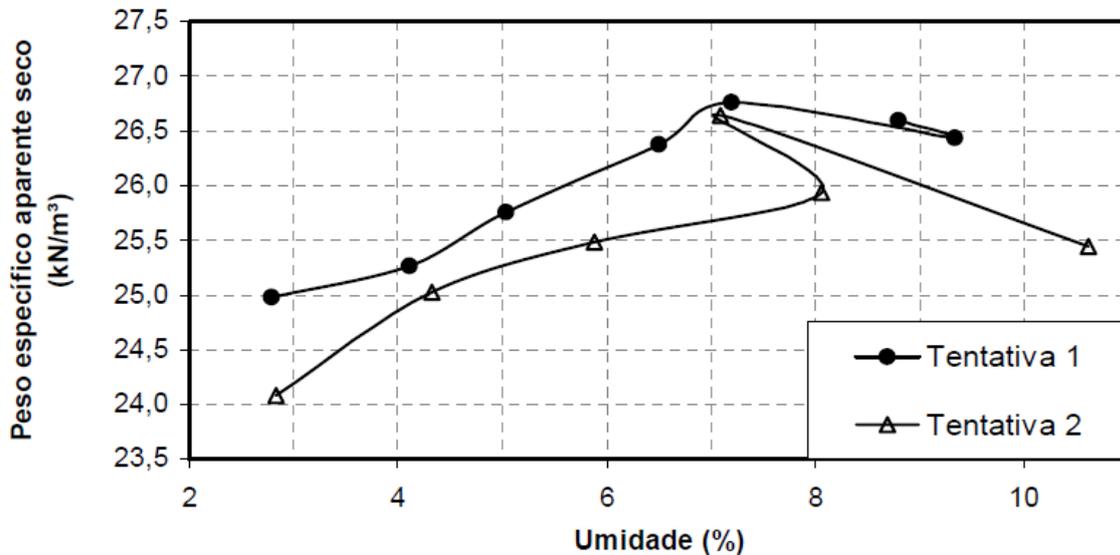
Rohde (2002) utilizou a escória de aciaria EAF proveniente de Porto Alegre a compactou com energia Proctor modificada, porém seus ensaios apresentaram resultados nada convencionais, a curva de compactação apresentou dois picos de máximo peso específico (Figura 7) e seus ensaios de ISC mostraram que os maiores valores não correspondiam, nem próximo, à umidade ótima (máximo peso específico).

Figura 7 – Curva de compactação da escória de aciaria EAF (ROHDE, 2002).



Branco (2004) também realizou a compactação com energia Proctor modificada em escórias de aciaria EAF e também obteve dados não compatíveis com os de solos coesos (Figura 8).

Figura 8 – Curva de compactação da escória de aciaria EAF (BRANCO, 2004).



### 3.4 QUESTÕES AMBIENTAIS DA ESCÓRIA

A constante produção de ferro e aço em todo o mundo vem gerando um crescente aumento na quantidade de subprodutos descartados, sendo o principal a escória de aciaria e alto-forno. Estas, por serem resultado da redução, ou seja, a limpeza do minério, possuem uma composição completamente heterogênea a qual pode vir a causar, não só um grande impacto ambiental, como ser nocivo à saúde humana.

Na resolução 313 de 2002 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) foram inventariados e classificados os resíduos sólidos visando o controle e destinação, além da criação de programas estaduais e um plano nacional para gerenciamento desses.

A partir desta, foram publicadas as normas NBR 10004, NBR 10005 e NBR 10006. A primeira tem como função classificar os resíduos de acordo com a sua periculosidade, sendo os de classe I perigosos e de classe II não perigosos, podendo ramificar esta ainda como classe II A – Não inertes e classe II B – inertes. Os considerados perigosos são os que apresentam inflamabilidade, reatividade,

toxicidade e patogenicidade. Já os de classe II A são biodegradáveis, solúveis em água. Na classe II B, a amostra deve ser amostrada de acordo com as NBR 10006 e NBR 10007 e não apresentar nenhum dos seus constituintes solubilizados.

Para o entendimento e dimensionamento do impacto que o agregado pode causar é necessário conhecer as características do material quando lixiviado e solubilizado para, assim, ver quais elementos serão liberados os quais afetarão, como por exemplo, um lençol freático.

Com isso, a Fundação Centro Tecnológico de Juiz de Fora (FCT) caracterizou e classificou, segundo a NBR 10004, 7 amostras de escória de diferentes localidades brasileiras por ensaios de lixiviação e solubilização. Na tabela 6 são apresentados os elementos químicos encontrados nos agregados de cada localidade.

Tabela 6 – Resumo dos elementos químicos encontrados (FCT, 2005).

<b>Extrato</b>	<b>Aços Villares</b>	<b>Usiminas 1<sup>ª</sup> a 2<sup>ª</sup></b>	<b>Gerdau Guaira</b>	<b>Usiminas 1,5<sup>ª</sup> a 3<sup>ª</sup></b>	<b>CST</b>	<b>Gerdau Açominas</b>	<b>CSN</b>
Lixiviado	-	-	-	-	-	-	-
Solubilizado	-	Alumínio	Alumínio, fluoreto	Alumínio	Alumínio	Alumínio, fenóis totais	Alumínio, fenóis totais

Na tabela 7 são apresentados os dados dos ensaios de lixiviação com cada amostra. Não houveram excedentes em nenhum dos limites de concentração obtidos.

Tabela 7 – Resultados dos ensaios de lixiviação (FCT, 2005).

LIXIVIAÇÃO										
Parâmetro	un.	V.M.P.	L.D.	Aços Villares	Usiminas 1" a 2"	Gerdau Guaira	Usiminas 1,5" a 3"	CST	Gerdau Açominas	CSN
Arsênio	mg/L	1	0,1	<	<	<	<	<	<	<
Bário	mg/L	70	0,1	9	<	1,2	<	<	<	<
Cádmio	mg/L	0,5	0,05	<	<	<	<	<	<	<
Chumbo	mg/L	1	0,05	<	<	<	0,3	<	<	<
Cromo Total	mg/L	5	0,05	<	<	<	<	<	<	<
Mercurio	mg/L	0,1	0,001	<	<	<	<	<	<	<
Prata	mg/L	5	0,01	<	<	<	<	<	<	<
Selênio	mg/L	1	0,02	<	<	<	<	<	<	<
Fluoreto	mg/L	150	0,1	0,5	0,3	1	1,1	0,9	0,5	0,2
pH final	-	-	-	6,21	11,41	9,17	12,16	11,96	12,21	11,95

V.M.P. = valor máximo permitido.

L.D. = limite de detecção.

No ensaio de solubilização são encontrados excedentes de alumínio em quase todas as localidades, além do de fluoreto na Gerdau Guarira e de fenóis totais na Gerdau Açominas e CSN. Todos os dados deste ensaio são apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Resultados dos ensaios de solubilização (FCT, 2005)

SOLUBILIZAÇÃO										
Parâmetro	un.	V.M.P.	L.D.	Aços Villares	Usiminas 1" a 2"	Gerdau Guaira	Usiminas 1,5" a 3"	CST	Gerdau Açominas	CSN
Alumínio	mg/L	0,2	0,1	<	2,5	44	0,3	0,6	1	1,5
Arsênio	mg/L	0,01	0,01	<	<	<	<	<	<	<
Bário	mg/L	0,7	0,1	<	<	<	<	<	<	<
Cádmio	mg/L	0,005	0,05	<	<	<	<	<	<	<
Chumbo	mg/L	0,01	0,01	<	<	<	<	<	<	<
Cianeto	mg/L	0,07	0,01	<	<	<	<	<	<	<
Cloreto	mg/L	250	10	<	<	<	<	<	<	<
Cobre	mg/L	2	0,05	<	<	<	<	<	<	<
Cromo Total	mg/L	0,05	0,05	<	<	<	<	<	<	<
Fenóis Totais	mg/L	0,01	0,001	<	<	<	<	<	0,042	0,032
Ferro	mg/L	0,3	0,1	<	<	<	<	<	<	<
Fluoreto	mg/L	1,5	0,1	0,3	<	2,4	0,5	0,4	0,2	<
Manganês	mg/L	0,1	0,05	<	<	<	<	<	<	<
Mercurio	mg/L	0,001	0,001	<	<	<	<	<	<	<
Nitrato (Expresso em N)	mg/L	10	0,1	0,3	0,5	1,1	0,5	0,3	0,8	1,3
Prata	mg/L	0,5	0,01	<	<	<	<	<	<	<
Selênio	mg/L	0,01	0,02	<	<	<	<	<	<	<
Sódio	mg/L	200	0,1	1,5	1,5	1	1,4	1,4	2,7	2,2
Sulfato	mg/L	250	10	<	<	<	<	<	<	<
Surfactantes	mg/L	0,5	0,1	0,02	0,02	0,02	0,02	<	0,03	0,02
Zinco	mg/L	5	0,05	<	<	<	<	<	<	<
pH final da solubilização	-	-	-	11,07	12,33	11,70	12,49	12,50	12,24	12,41

V.M.P. = valor máximo permitido.

L.D. = limite de detecção.

A partir destes dados, foi possível concluir que apenas a amostra de Aços Villares foi classificada como resíduo de classe II B (não perigoso e inerte) e todas as outras como de classe II A (não perigoso e não inerte).

Mancio (2001) submeteu sua amostra sob os ensaios de lixiviação e solubilização e observou que, no primeiro, nenhum elemento esteve presente em sua composição química. Já no segundo ensaio, o teor de fluoreto (F) esteve além dos padrões de potabilidade da água segundo a NBR 10004. Logo, o material foi classificado como de classe II – não inerte.

Nos dois ensaios de lixiviação e solubilização de Raposo (2005), também seguindo a normativa NBR 10004, não apresentou nenhum teor acima do padrão, classificando a sua amostra de aciaria LD como de classe II.

Barbosa (2013) caracterizou as escórias de cinco localidades diferentes (Rio de Janeiro, Sapucaia do Sul, Simões Filho, Barão de Cocais e Pindamonhangaba) realizando os dois ensaios de lixiviação e solubilização. Concluiu-se que o material é de classe II A e que os elementos prejudiciais ao meio ambiente que estão aquém dos limites impostos pela NBR 10004 encontram-se em solos comuns de diversos estados brasileiros.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 ESCÓRIA COMO MATERIAL DE REFORÇO

O material utilizado na pesquisa encontra-se britado e com diâmetro médio de 5 cm (Figura 9a). Cerca de 60 quilos foram levados ao britador do laboratório de geotecnia da Universidade Católica de Brasília (UCB) para ser peneirado e conseguir amostra suficiente passante na peneira #10 para realizar os ensaios do solo-escória. A sequência pode ser observada da Figura 9.

Figura 9 – (a) Escória natural; (b) Britador; (c) Peneiramento e separação.



(a)

(b)

(c)

Após a seleção e separação do material, foi realizado o ensaio de granulometria da escória segundo a NBR 7181. Para obter uma estimativa da absorção de água do material foi feito o teste seguindo a norma NBR 6458 no qual ficou submersa por 5 dias depois colocada em estufa, determinando a quantidade de água absorvida

### 4.2 METODOLOGIA DE ENSAIOS DO SOLO

#### 4.2.1 Caracterização do solo

O solo coletado para utilização experimental foi retirado do Residencial Projeção 510, localizado na CNRW 510, Lotes 02 e 03, Brasília – DF (Figura 10) de uma profundidade de 4,5 metros em relação a cota do terreno por uma retroescavadeira (Figura 11). O material foi depositado em local apropriado a céu aberto que, em seguida, foram referenciados, secados e devidamente ensacados 100 quilos deste em estufa para realização dos ensaios no laboratório de geotecnia do UniCEUB, campus asa norte, bloco 11.

Figura 10 - Projeção 510, Noroeste, Brasília – DF.



Figura 11 – Solo sendo retirado por uma retroescavadeira.



Baseando-se na norma NBR 6457, foram preparadas as amostras para os ensaios de compactação e de caracterização física do solo (Figura 12). Logo em seguida, são realizados os ensaios de: granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, massa específica dos sólidos, massa unitária solta, classificação de solos tropicais MCT e Índice de Suporte Califórnia, de acordo com as normas NBR

7181, NBR 6459, NBR 7180, NBR 7251, NBR 14545, ASTM D 3080/98 e NBR 9895, observando que a metodologia de classificação MCT não possui norma técnica.

Figura 12 - Solo destorroado e preparado para amostragem.

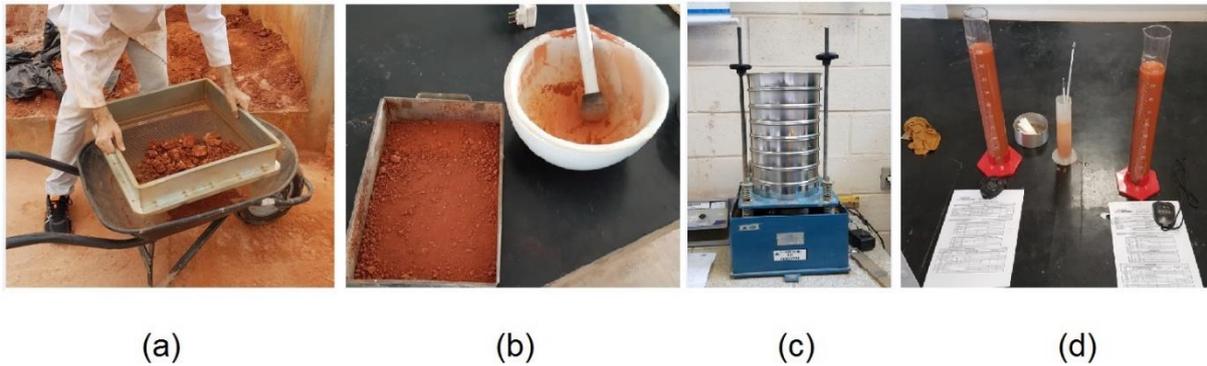


#### **4.2.2 Análise granulométrica**

Prévio à realização dos ensaios de laboratório, foram preparadas amostras representativas conforme a norma NBR 6457. A norma prescreve o método para a preparação do material para alguns ensaios como: a granulometria, determinação dos limites de Atteberg, a massa específica dos grãos (passante na peneira 4,8 mm), entre outros.

A preparação da amostra de solo foi realizada através da secagem em estufa. Em seguida, foi peneirado na peneira 4,8 mm como é apresentado na (Figura 13 a). Realizando posteriormente a avaliação granulometria do material por peneiramento (Figura 13 b) para a fração grossa, e por sedimentação para a fração fina (Figura 13 c).

Figura 13 - Sequência do ensaio de granulometria: (a) solo passante na peneira nº4,8 mm; (b) destorroamento do solo; (c) peneiramento grosso; (d) sedimentação.



#### 4.2.3 Limites de Atterberg

Os ensaios foram realizados conforme as normas NBR 6459 e NBR 7180. Onde a primeira norma tem como objetivo determinar o teor de umidade do solo argiloso, correspondente ao estado limite entre os estados sólido e semi-sólido (Limite de liquidez) (Figura 14 a). A segunda norma determina o teor de umidade do solo argiloso, correspondente ao estado limite entre os estados plástico e semi-plástico (Limite de Plasticidade) (Figura 14 b).

Figura 14 - Limites de Atterberg: (a) determinação limite de liquidez); (b) determinação limite de plasticidade).



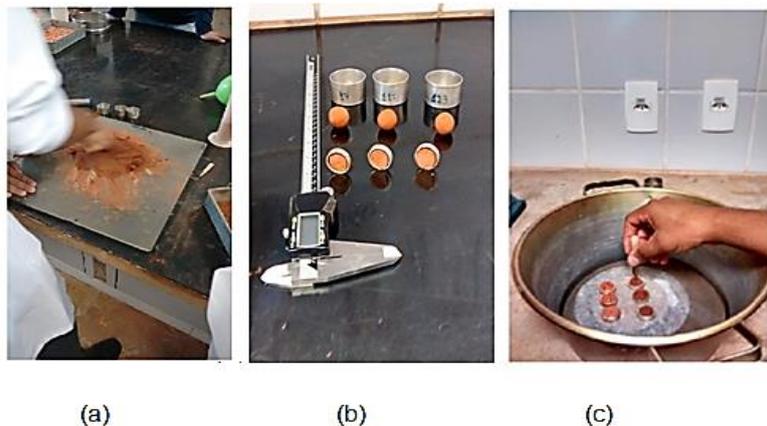
#### 4.2.4 Classificação de solos tropicais (MCT)

Miniatura Compactada Tropical é uma metodologia de ensaio rápido, realizada in loco ou em laboratório, de solos com origem lateríticos. O ensaio procura obter como resultados as propriedades relacionadas à consistência dos solos, a resistência

no estado seco, e se existe ou não expansão ou contração. O ensaio MCT não tem até o momento uma norma que permita obter resultados com a acurácia que as pesquisas precisam (Nogami & Villibor, 1996).

As determinações realizadas incluíram umidade natural, granulometria, contração, penetração, absorção, plasticidade e resistência ao esmagamento do solo. Na (Figura 15) é apresentada a metodologia utilizada durante a realização dos ensaios.

Figura 15 - Ensaio MCT: (a) espalhamento da massa úmida; (b) medições das umidades e contrações da amostra; (c) medição da penetração com o penetrômetro.



#### 4.2.5 Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados segundo as normas NBR 6457 e NBR 7182, com o objetivo de determinar a relação entre a umidade ótima e a massa específica aparente seca dos solos. No caso deste trabalho, foi utilizada a energia Proctor modificada pelo motivo da escória LD apresentar menores valores de expansão nesta energia comparada a normal pelo método PTM 130 (PTM, 1978), segundo Raposo (2005).

Antes de iniciar os ensaios, foi feito o peneiramento na peneira #4 de 125 quilos para a realização de 1 curva com solo natural e 3 com as misturas de escória. Para cada ensaio na energia Proctor modificada são utilizados 25 quilos de solo, conseqüentemente são utilizados 100 quilos no total. Os 25 restantes são para os pontos os quais são incoerentes e deve ser refeitos.

Para o solo natural foram compactados 5 corpos de prova com umidades variadas entre 10% e 20%. Visto que houveram alguns erros apresentados quando a

curva de compactação foi plotada, além da umidade de 20% ter deixado o solo muito saturado, foram repetidos os pontos 10%, 14% e 18%, eliminando o 20% pois apresentava estar muito distante da umidade ótima.

Posteriormente, são realizados os ensaios com a adição do agregado açobrita.

#### **4.2.6 Mistura solo escória**

Após a determinação da umidade ótima do solo natural, foram definidas porcentagens de adição de escória passante na peneira #10 (15%, 10% e 5%), enfatizando que estes valores referem-se ao total do composto.

Para estes ensaios foi utilizado o compactador automático do laboratório de solos do UniCEUB – Campus Taguatinga (Figura 16)

Figura 16 – Compactador automático (UniCEUB - Campus Taguatinga).



Na primeira tentativa de utilizar a adição do agregado foi utilizada a porcentagem de 5% de escória e 95% de solo (Figura 17), também na energia Proctor modificada. Seu comportamento durante o ensaio não apresentou modificações significativas, apenas estar levemente mais resistente em relação ao solo puro, pois o barulho do impacto do soquete foi mais intenso. O solo não apresentou diferenças em sua coesão.

Figura 17 – Amostra com 5% de escória.



Na segunda tentativa, foram utilizados 10% de escória e 90% de solo. Assim como já mencionado sobre o barulho do soquete no impacto com o solo, este ficou mais forte, parecendo estar batendo contra uma rocha. Também não houveram diferenças visíveis na coesão.

Figura 18 – Amostra com 10% de escória.



Seguindo a tendência, na compactação da terceira porcentagem de mistura (15% de escória) demonstrou ser visualmente mais resistente e o barulho do impacto do soquete com o solo remetia ao de ferro com ferro.

Figura 19 – Compactação da mistura 15% escória e 85% solo.



#### **4.2.7 Índice de Suporte Califórnia**

Realizado de acordo com a norma NBR 9895, o ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) é o método mais utilizado para determinar a resistência à penetração comparada a com brita padronizada e, principalmente, expansibilidade do solo. Os resultados são utilizados como dados base para o dimensionamento de pavimentos flexíveis.

#### **Expansão**

Após a compactação, todas os corpos de prova vão a um tanque os quais ficam submersos por 4 dias (Figura 20). Na parte superior, um extensômetro medirá precisamente a expansão do material. Esta deve ser registrada a cada 24 horas.

Figura 20 - Corpos de provas submersos por 96 horas.



## Penetração

Após deixar os corpos saturando por 96 horas, os corpos de prova foram retirados do tanque de saturação e deixando-os escorrer por 15 min, levando as amostras para a prensa onde foram efetuados os ensaios de penetração (Figura 21). Durante a realização dos ensaios foram realizadas leituras de carga sob diferentes deformações. Para finalizar foram realizados os cálculos conforme a norma NBR 9895.

Figura 21 - Ensaio de penetração no corpo de prova.



## 5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

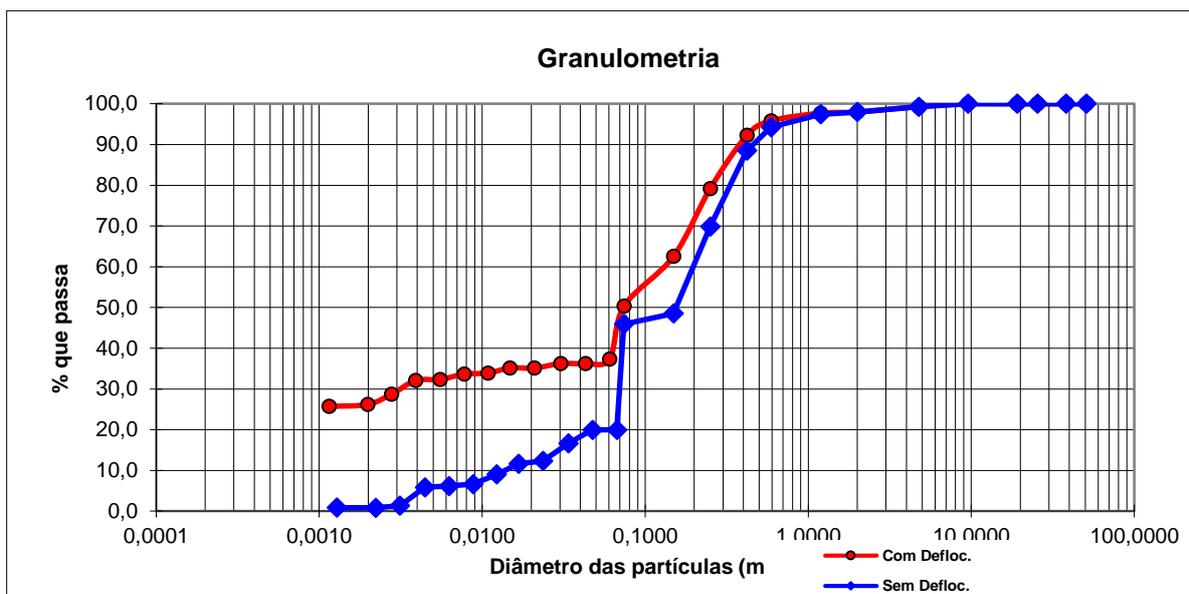
No presente capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física do solo, e os resultados que avaliaram as mudanças da resistência mecânica dos corpos de prova com e sem adição de escória.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

#### 5.1.1 Ensaio de granulometria

A análise do ensaio de granulometria, conforme a (Figura 22), foi feita por peneiramento e sedimentação, de acordo a norma NBR 7181.

Figura 22 - Curvas granulométricas do solo puro com e sem defloculante.



Ao analisar os resultados adquiridos para o solo com e sem adição de defloculante, foi possível verificar que: existe uma influência da solução defloculante na dispersão dos grãos. A solução defloculante age sobre as partículas ajudando na desagregação dos grãos, quando ocorreu a sedimentação.

Portanto, a granulometria sem defloculante, apresentam os grãos agrupados, como ocorre naturalmente na natureza, a sedimentação acontece mais rápido,

sinalizando diâmetros maiores, que em muitas vezes, não são os das partículas, mas das agregações.

### 5.1.2 Limites de Atterberg

Na tabela 9 são apresentados os dados referentes a obtenção do limite de liquidez em que foi utilizado o equipamento de Casagrande. A umidade referente a 25 golpes corresponde ao próprio limite de liquidez que, neste caso, é de 26,29%, ou seja, é um solo que não apresenta muita variação de volume quando em contato com a água e/ou saturado.

Tabela 9 – Resultados do ensaio de limite de liquidez.

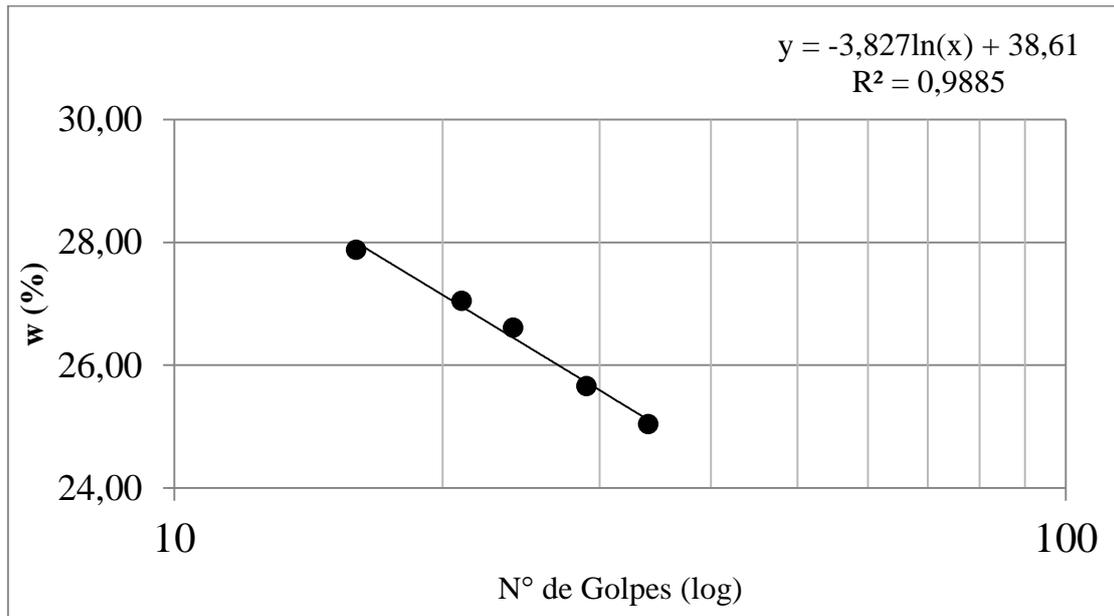
LIMITE DE LIQUIDEZ					
Nº da capsula	44	35	32	19	3
Nº de golpes	34	29	24	21	16

Seguindo o ensaio, foi obtido o valor de 16,04% para o limite de plasticidade e, conseqüentemente, o índice de plasticidade. A seguir, na tabela 10 e Figura 23, estão apresentados os dados resumidos do ensaio de Limites de Atterberg.

Tabela 10 - Limites de Atteberg da amostra de solo.

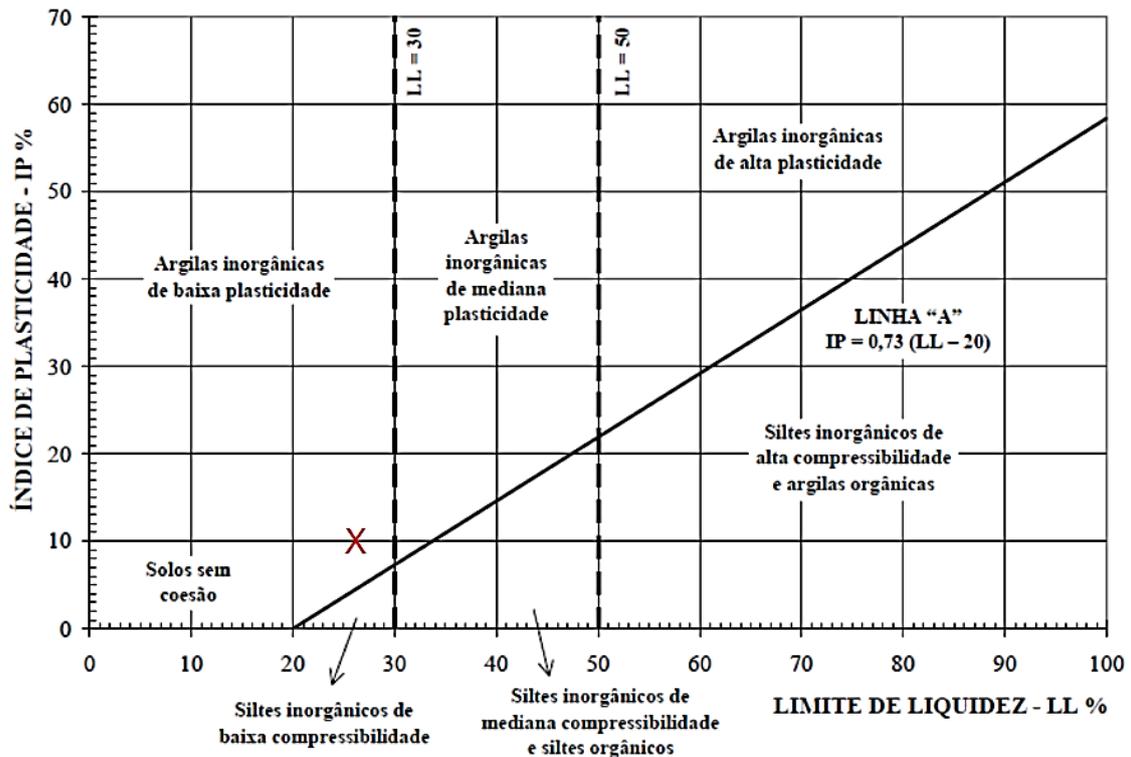
Propriedades	Amostra
Limite de Liquidez (%)	26,29
Limite de Plasticidade (%)	16,04
Índice de Plasticidade (%)	10,25

Figura 23 – Resultado do ensaio de Limites de Atterberg.



No Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) é apresentada uma carta de plasticidade de Casagrande (Figura 24) na qual é possível determinar qual tipo de solo a mostra se enquadra. Neste caso, o solo pertence ao grupo de argilas de baixa plasticidade (CL), apontado com um “x” vermelho na carta.

Figura 24 – Carta de plasticidade (SUCS)



### 5.1.3 Miniatura Compactação Tropical (MCT)

Neste ensaio não normatizado observou-se que:

- Obeve-se facilmente rolinhos com diâmetro de 3mm os quais rompem facilmente a serem dobrados (indicador de média plasticidade);
- Umidade de moldagem dos anéis de 12,84%;
- Contração média de 0,95mm;
- Resistência muito alta ao esmagamento no teste com a bola seca.

Utilizando a equação de contração\*, calculou-se o valor de  $c'$ , obtendo 1,355. Tendo como referência este valor, o solo é classificado como argila arenosa laterítica (Tabela 11).

Tabela 11 – Classes de grupos MCT

Determinação do Grupo MCT		
$c'$	penetração (mm)	Grupo MCT
< 0,5	< 3,0	LA
	3,1 a 3,9	NA
	$\geq 4,0$	NA / NS'
0,51 a 0,9	< 2,0	LA - LA'
	2,1 a 3,9	NA' - NS'
	$\geq 4,0$	NS' - NA'
0,91 a 1,3	< 2,0	LA'
	2,1 a 3,9	NA'
	$\geq 4,0$	NS'
1,31 a 1,7	< 2,0	LA' - LG'
	2,1 a 3,9	NA' / NG' - NS'
	$\geq 4,0$	NS' - NG'
$\geq 1,7$	< 2,0	LG'
	2,1 a 3,9	NG'
	$\geq 4,0$	NG'
Significado de - e /		
- separa	opção	equivalente
/ separa	opção	decrecente

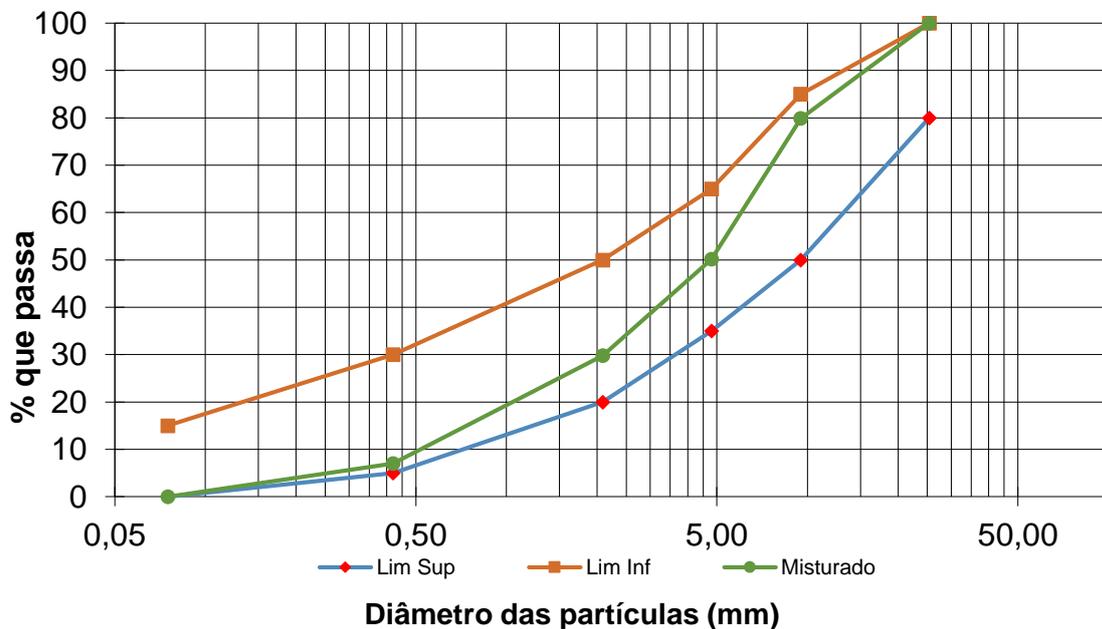
\* Equação de contração com  $ct'$  de 0,1 a 0,6 mm -  $c' = (\log_{10} ct' + 1) / 0,904$ .

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA

### 5.2.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Realizada de acordo com a NBR 7181, foram obtidas as granulometrias da amostra pura do agregado e das misturas com suas devidas porcentagens. Na NBR 16364 (ABNT,2015) são definidos os limites superior e inferior em que deve ser estabilizada a granulometria do material.

Figura 25 – Curva granulométrica do agregado puro.



A partir da análise da Figura 25, o material demonstra estar dentro dos conformes granulométricos estabelecidos pela NBR 16364 (ABNT, 2015), podendo sim ser aplicado em uma mistura com solo. Neste caso não estão sendo analisadas as granulometrias das misturas, visto que estas não atendem os requisitos para aplicação em bases de pavimentos, apenas em sub bases.

A presente pesquisa tem como foco a utilização de um material mais fino, já que a utilização de grãos maiores acarretam no aumento das possibilidades de expansões. Logo, o material utilizado foi apenas o passante na peneira #10 e todo o material retido foi estocado para futuras pesquisas.

## **5.2.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA DO AÇOBRITA**

Para o ensaio foram seguidos os procedimentos da norma NBR NM 53 (ABNT, 2009), obtendo o teor de absorção de água de 0,91%. Segundo a especificação EM 262 (DNER, 1994), a absorção máxima deve estar entre 1% e 2%.

Buitrago (2016) apresentou 1,93% de absorção em peso, Raposo (2005) obteve 2,5% para amostras tratadas e 2,6% para amostras não tratadas. Já, Souza (2007) obteve valores que variam de 0,23% a 1,96%. O que pode acarretar a variação entre as bibliografais é de onde o material veio, o processo de redução e a heterogeneidade da amostra.

## **5.3 COMPACTAÇÃO**

Foi realizada uma curva de compactação para o solo natural e uma para cada porcentagem de mistura a ser avaliado em questão. No natural foi utilizada a compactação manual e houveram muitos erros, já que o solo, quando saturado, apresentava uma forte sucção no soquete, dificultando a compactação correta das camadas de solo no cilindro. Com isso, toda a execução foi transferida para o laboratório de geotecnia do UniCEUB – Campus Taguatinga para utilizar o compactador automático, visando a redução de erros aleatórios, já que o compactador solta o soquete sempre a mesma altura independente de sucção e fricção entre o soquete e a sua capa de proteção, a qual não existe na máquina.

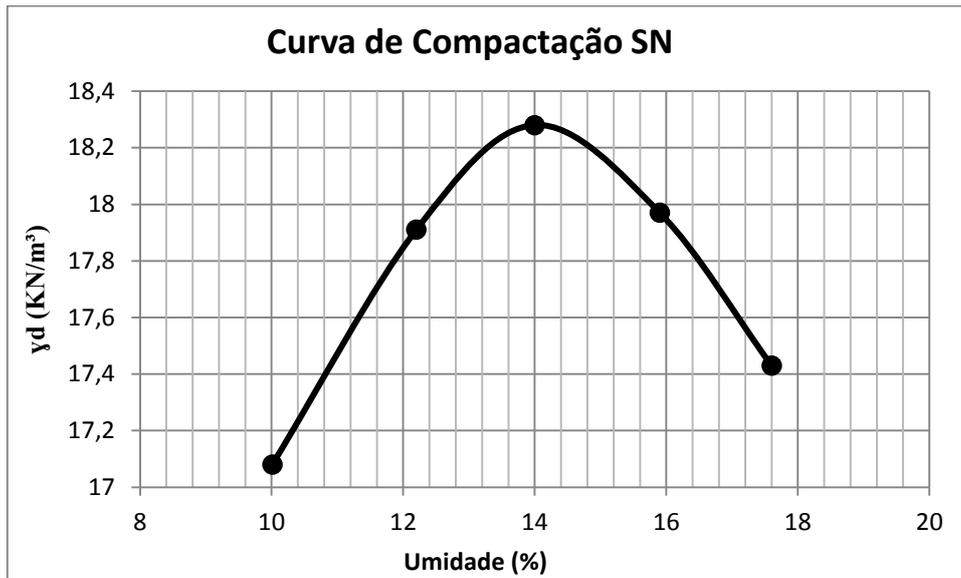
Todas as curvas tiveram sua metodologia definida para comparação e definição das propriedades, seja em seu estado natural do solo ou com a adição do agregado e em nenhum dos casos foi utilizado reuso de material.

Durante o procedimento de compactação manual do solo natural houveram variações nos resultados devido a sucção que ocorria no soquete quando compactado em ramo úmido e outros erros aleatórios. Com isso, todo o ensaio foi reiniciado no compactador automático para não haver mais problemas.

### **5.3.1 SOLO NATURAL (SN)**

A curva de compactação do SN apresentou o comportamento característico de um solo coesivo, com seu teor de umidade ótima e peso específico máximo bem definidos. Estão apresentados, a seguir, na figura 26 a curva referente.

Figura 26 – Curva de compactação SN.



Na tabela 12 é possível obter dados mais precisos.

Tabela 12 – Resultados da compactação do SN

Umidade w(%)	Peso específico máximo (kN/m³)
10,01	17,08
12,2	17,91
14	18,28
15,9	17,97
17,6	17,43

### 5.3.2 SOLO NATURAL + 5% DE ESCÓRIA (S+5%E)

Ao adicionar 5% do agregado à mistura, não foi percebido nenhuma diferença significativa da variação de umidade do ponto ótimo comparada ao SN. Porém o barulho do impacto do soquete intensificou, demonstrando, ter aumentado a resistência da mistura.

Na figura 27 e na tabela 13 estão os resultados os quais apresentam o aumento do peso específico máximo em 4,21%.

Figura 27 – Curva de compactação S+5%E

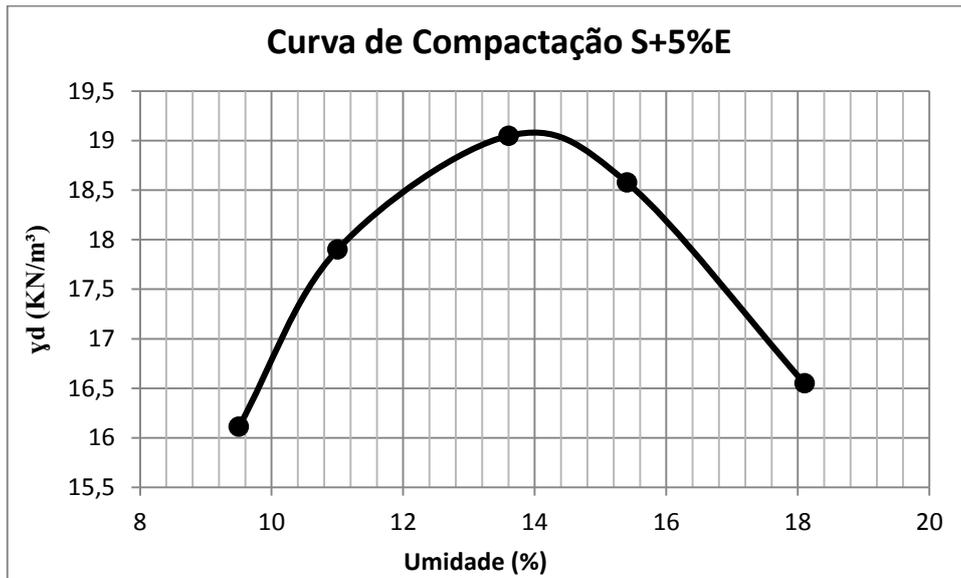


Tabela 13 – Resultados da compactação do SN+5%E.

Umidade w(%)	Peso específico máximo (kN/m³)
9,5	16,11
11	17,9
13,6	19,05
15,4	18,58
18,1	16,55

### 5.3.3 SOLO NATURAL + 10% DE ESCÓRIA (S+10%E)

Apesar da quantidade de agregado não ser grande comparada a outras bibliografias, ter dobrado para 10% não acarretou em diferenças significativas, tanto na umidade ótima, quanto na alteração do seu peso específico. O comportamento continua sendo de um solo coeso, porém o maior decréscimo ocorre em seu ramo seco. (Figura 28).

Figura 28 – Curva de compactação S+10%E.

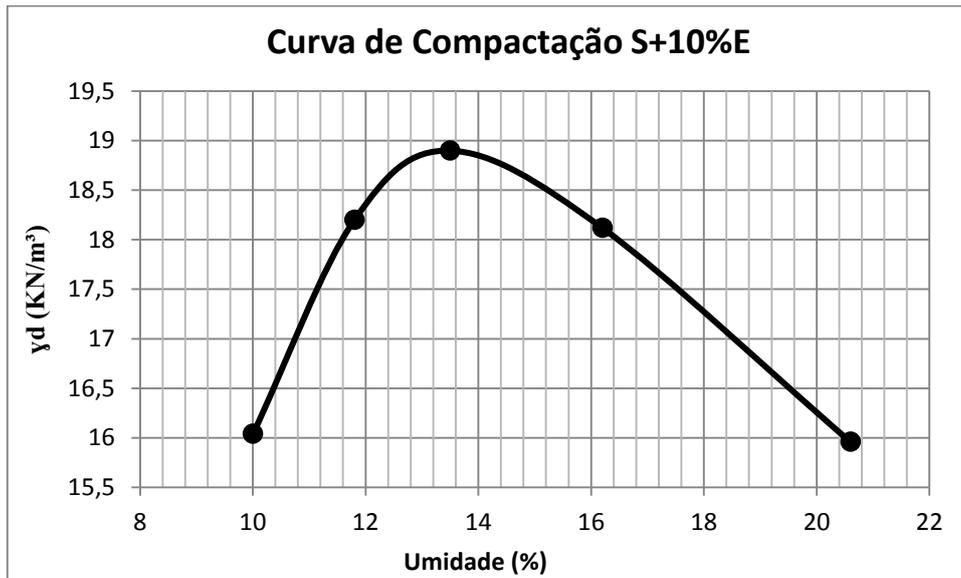


Tabela 14 – Resultados da compactação do SN+10%E.

Umidade w(%)	Peso específico máximo (kN/m³)
10	16,04
11,8	18,23
13,5	18,91
16,2	18,12
20,6	15,96

### 5.3.4 SOLO NATURAL + 15% DE ESCÓRIA (S+15%E)

Ao adicionar 15% observa-se que o peso específico máximo começa a decrescer sem a alteração significativa da sua porcentagem de umidade ótima.

Por ser a maior porcentagem a ser analisada deste trabalho, era esperado que o aumento do peso específico máximo seguisse uma progressão, o que não foi o caso na utilização de 15%. Houve uma diminuição de 0,31% em sua umidade ótima.

Figura 29 – Curva de compactação S+15%E

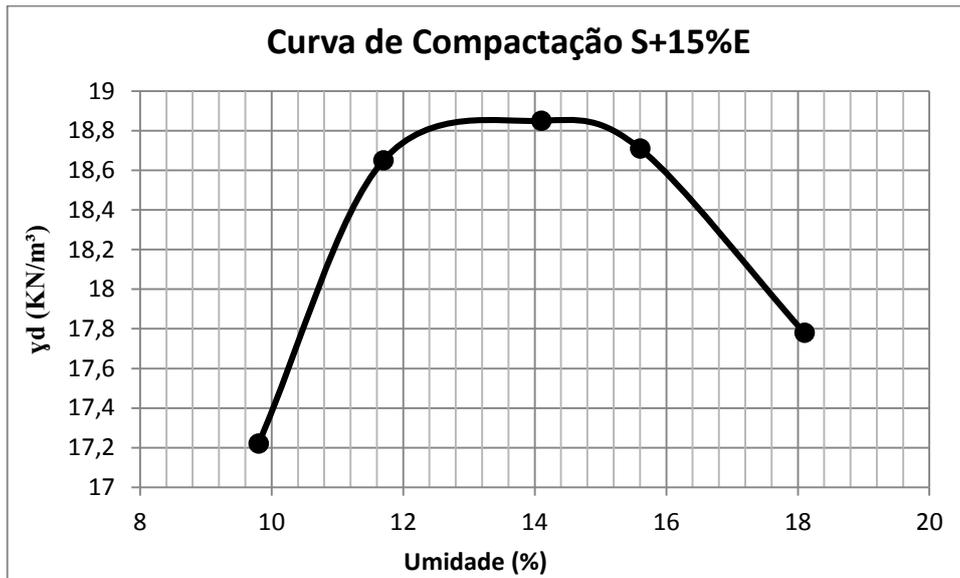


Tabela 15 – Resultados da compactação do SN+15%E

Umidade w(%)	Peso específico máximo (kN/m³)
9,8	17,22
11,7	18,65
14,1	18,85
15,6	18,71
18,1	17,78

#### 5.4 AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

Após compactados e imergidos em água durante quatro dias, todos os corpos de prova foram submetidos ao mesmo procedimento de rompimento, evitando erros aleatórios e variantes entre máquinas.

A tabela 16 apresenta o resumo de todos os resultados, tanto para o solo natural como para as três misturas. Um dado interessante é o da expansão, nenhum apresentou ser significativo a ponto de afetar qualquer tipo de estrutura. Isto ocorre pelos tamanhos dos grãos de escória serem menores e estarem mais espalhados pelo solo. Como sua granulometria é menor, o material reduz sua porosidade, convergindo para a menor absorção de água e menor expansão.

Em questões de expansão, todas as misturas estão abaixo do valor limitado de 1% em relação ao seu volume inicial, segundo a NBR 16364 (ABNT, 2015)

O maior valor do índice de suporte Califórnia foi registrado na porcentagem de 10%, atingindo 82,24%, um aumento evidente de 639% em relação ao solo sem a adição do agregado. Isto pode ter ocorrido devido a acomodação e/ou quebra das partículas.

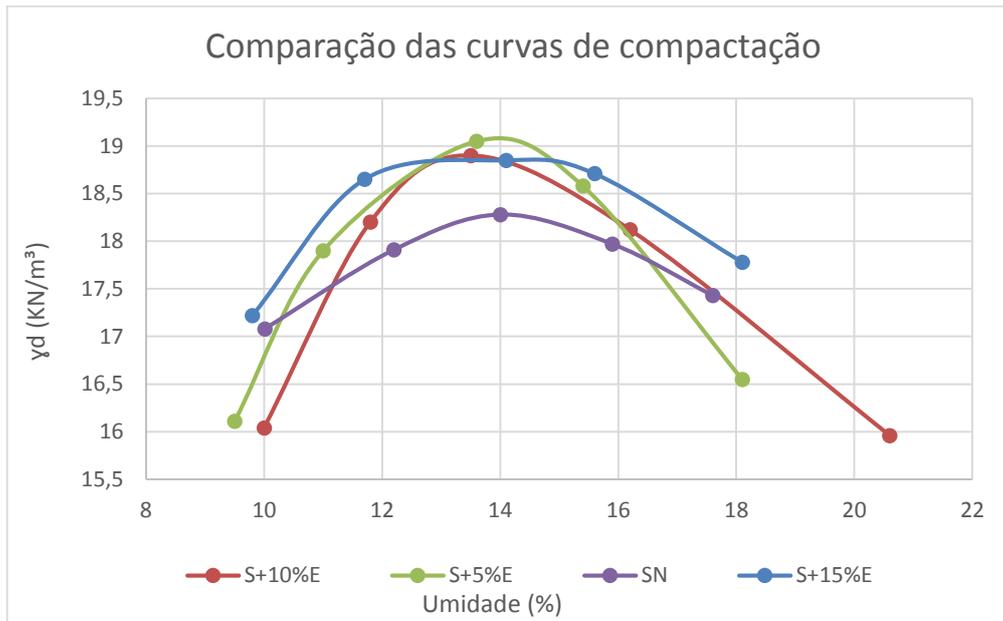
Tabela 16 – Resultados do ensaio de ISC.

Tipo de Mistura	Ponto	Umidade (%)	ISC(%)	Expansão (%)
SN	1	10,01	1,62	0
	2	12,2	10,44	0
	3	14	12,87	0,1
	4	15,9	4,56	0,1
	5	17,6	1,37	0,9
SN+5%E	1	9,8	1,62	0
	2	11	24,47	0,09
	3	13,6	63,18	0,01
	4	15,4	22,31	0,03
	5	20,7	2,89	0
SN+10%E	1	10,0	2,5	0,02
	2	11,8	82,24	0,05
	3	13,5	56,88	0,07
	4	16,2	11,13	0,07
	5	20,6	2,45	0,02
SN+15%E	1	9,8	13,63	0,09
	2	11,7	66,86	0,08
	3	14,5	71,72	0,07
	4	15,6	18,00	0,09
	5	18,1	7,65	0,09

## 5.5 COMPARATIVO GERAL

Na figura 30 é apresentada a comparação de todas as curvas de compactação e observa um comportamento não esperado do pico de maior peso específico estar na mistura S+5%E e não nas de maior porcentagens.

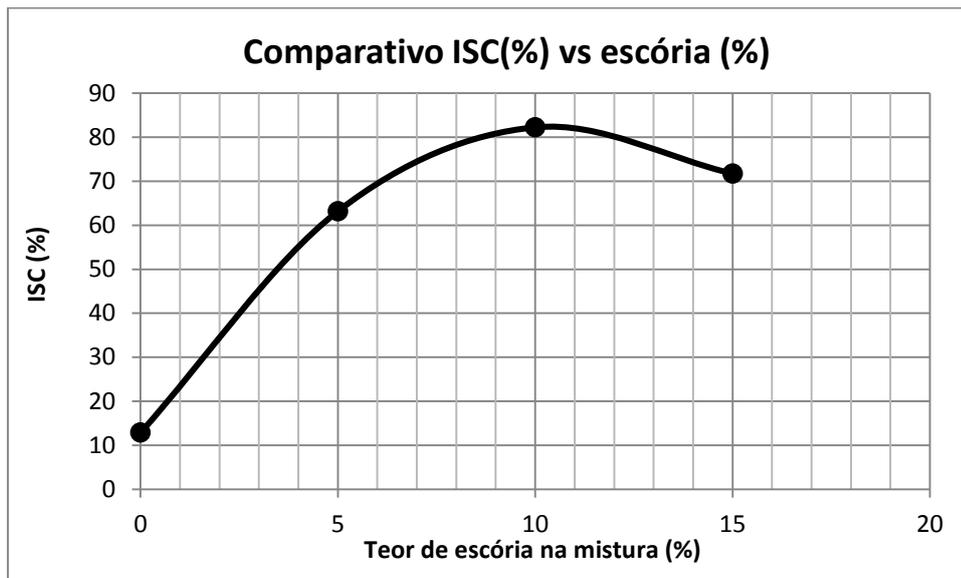
Figura 30 – Comparativo das curvas de compactação.



Pelo fato da escória ser um material com forte potencial a expansão, era esperado que os valores das umidades ótimas variassem claramente com o aumento da porcentagem de utilização, que não foi o ocorrido.

Na Figura 31 é apresentada a curva referente a variação do Índice de Suporte Califórnia na qual, como já mencionado, a tendência não foi totalmente obedecida, já que houve uma queda da resistência depois da mistura S+10%E. Com isso, pode-se determinar, para o tipo de agregado e granulometria utilizados na pesquisa, que o teor de agregado que apresenta melhor eficiência é o de 10%.

Figura 31 - Comparativo de ISC(%) vs. teor de escória na mistura (%)



Na tabela 17 é apresentado um resumo dos principais valores obtidos nos ensaios de compactação e ISC.

Tabela 17 – Comparativo geral das misturas.

Tipo da amostra	Umidade ótima (%)	Peso específico aparente seco (kN/m <sup>3</sup> )	ISC (%)	expansão (%)
SN	14	18,28	12,87	0,1
SN+5%E	13,6	19,05	63,18	0,1
SN+10%E	13,5	18,91	82,24	0,07
SN+15%E	14,5	18,85	71,72	0,07

A norma NBR 16364 (ABNT, 2015) os parâmetros os quais a mistura açobrita e solo devem atender para determinada aplicação:

- Sub base: ISC superior a 20% e expansão menor ou igual a 1%;
- Base com  $N < 5 \times 10^6$ : ISC superior a 60% e expansão menor ou igual a 0,5%;
- Base com  $N > 5 \times 10^6$ : ISC superior a 80% e expansão menor ou igual a 0,5%.

Tendo em vista as exigências da norma, todas as misturas podem ser utilizadas como sub base e base com  $N < 5 \times 10^6$  e, apenas a mistura SN+10%E poderia ser utilizada como base para  $N > 5 \times 10^6$ .

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos resultados obtidos na presente pesquisa é possível concluir que:

- O maior problema previsto para o trabalho seria a expansão, a qual demonstrou não ser significativa, visto que as bibliografias estudadas apresentam variações grandes.
- Quanto a granulometria, o agregado britado atende as condições da NBR 16364 (ANBT, 2015) para ser utilizado como material de mistura a ser utilizado com solos lateríticos.
- Com os limites de Attberg, o solo foi definido como argila laterítica de baixa plasticidade.
- Todos as curvas de compactação apresentaram pontos de peso específico máximo bem definidos e aumento das inclinações dos ramos seco e úmido.
- Com o aumento da porcentagem do teor de agregado a mistura, não foram registradas variações significativas quanto a umidade dos pontos ótimos de compactação.
- Não ocorreu a tendência progressiva esperada do aumento do peso específico máximo junto com a adição de maiores porcentagens de açobrita, na mistura S+15%E houve um decréscimo deste.
- Tendo em vista a aplicação rodoviária, todas as misturas se enquadram nos padrões da norma NBR 16364 (ABNT, 2015) para utilização da mistura solo e açobrita como sub base e base, tendo em vista a limitação do N em que apenas a mistura SN+10%E pode ser utilizada para valores  $N > 5 \times 10^6$ .
- É possível utilizar a escória como material de melhoramento de solos, os resultados apresentaram aumentos de ISC de até 639% devido a interação adequada dos grãos e do solo. Para obter resultados mais concisos para a aplicações geotécnica como aterros é necessário a realização do ensaio de cisalhamento.
- Pode ser aplicado, também, em reforço de subleitos.
- Por ser um produto de descarte de grandes proporções, é uma alternativa completamente viável para substituir os agregados minerais já utilizados usualmente.

## 7 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Este trabalho compõe-se de um estudo breve da aplicabilidade do agregado açobrita o qual, por virtude de não dispor de um tempo maior para aprimoramento dos resultados, são sugeridos os seguintes tópicos para pesquisas futuras:

- Realizar os ensaios de expansão de acordo com os métodos DMA-1 (DER-MG, 1982) atualizado na norma ME 113 (DNIT, 2009), também o japonês o normatizado pela A 505 (JIS, 1992) e o D 4792 – Potencial Expansion of Aggregates from Hydration Reactions (ASTM, 2000).
- Realizar misturas com teores acima de 15% de agregado.
- Realizar ensaios com granulometria estabilizada passante em peneiras mais finas que a #10 (abertura 2,00mm).
- Estudar a influência da escória em solos de baixa resistência.
- Realizar o estudo comparativo das diferentes energias de compactação e o que isso influencia na expansão do material.
- Analisar a composição química de diferentes amostras afim de estudar a heterogeneidade com foco em possibilidades de expansões maiores.

## 8 REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

\_NBR 6457: **Amostra de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

\_ NBR 6458: **Grãos e pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.** Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

\_NBR 6459: **Solo – Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 2017.

\_NBR 7180: **Solo – Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 2016.

\_NBR 7181: **Solo - Análise Granulométrica.** Rio de Janeiro, 2016.

\_NBR 7182: **Solo - Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 2016.

\_NBR 9895: **Solo - Índice de Suporte Califórnia.** Rio de Janeiro, 2016.

\_NBR 10004: **Resíduos sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro, 2004.

\_NBR 10005: **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos,** Rio de Janeiro, 2004.

\_NBR 10006: **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos,** Rio de Janeiro, 2004.

\_NBR 10007: **Amostragem de resíduos de solos,** Rio de Janeiro, 2004.

\_NBR 16364: **Execução de sub-base e base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2015.

\_NBR NM 53: **Agregado graúdo – Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009.

ASTMD 4792: **Potencial Expansion of Aggregates from Hydration Reactions.** 2000.

BARBOSA, M. **Caracterização geoambiental da escória de aciaria de cinco estados brasileiros**. Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Ouro Preto, 2013.

BRANCO, B. T. F. C. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado**. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2004.

BUITRAGO, N. D. T. **Aplicabilidade do agregado siderúrgico açobrita misturado com solo em camadas de pavimentos rodoviários**. Universidade de Brasília – UnB, 2016.

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente: **resolução 313 de 2002**.

CNT - **Pesquisa CNT de rodovias**, Brasília, DF, Brasil, 2016.

DNIT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ME 262, **Escória de Aciaria para Pavimento Rodoviário – Especificação de material**.1994.

DNIT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ME 113, **Pavimentação Rodoviária – Agregado Artificial – Avaliação do Potencial de Expansão de Escória de Aciaria – Método de ensaio**. 2013.

FCT – Fundação Centro Tecnológico de Juiz de Fora. Projeto IBS, 2º Relatório Técnico de Acompanhamento: **Apresentação ensaios de caracterização do agregado siderúrgico**. Juiz de Fora, 2005.

GEERDES, M.; VILET, C.; TOXOPEUS, H.; MEDEIROS, F.T.P. Coque. In: **O Processo de Redução em Alto-Forno**, IJmuiden, Holanda, 2004. 176p.

GEYER, R. T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição de concreto**. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2001.

IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia. **Escórias Siderúrgicas Novas Tendências, 9ª Reunião de Pavimentação Urbana**. 1998.

IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia. **Perfil da Siderurgia Brasileira**. 2001.

IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia. **Anuário Estatístico – Brasil Steel Databook**. 2002.

JAPAN INSTITUTE STANDARD – JIS A 5015: **Escória siderúrgica para construção das estradas** - Tradução em português. 1992.

JOHN, L. [www.uerj.br/~ambiente/emrevista/clipping/agosto/csn.htm](http://www.uerj.br/~ambiente/emrevista/clipping/agosto/csn.htm) - 11/06/2003.

MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. Universidade de São Paulo – POLI/USP. São Paulo, 2000.

MANCIO, M. **Contribuição ao estudo do fenômeno de instabilidade volumétrica das escórias de aciaria elétrica**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2001.

MASUERO, A. B.; VILELA, A. C.; DAL MOLIN, D. **Emprego de escória de aciaria elétrica como adição a concretos**. Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais. São Paulo, 2000.

MCGANNON, H. E. (1971). **The making, Shaping and Treating of Steel**. Pittsburgh, Pennsylvania: United States Steel Corporation. Ninth Edition.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. Ed. Villibor, São Paulo.

PENA, D. C. **Avaliação da expansibilidade da escória de aciaria LD curada a vapor para utilização em peças de concreto para pavimentação**. Universidade Federal do Espírito Santo – UFES. Vitória, 2004.

PENNSYLVANIA TESTING METHOD – PTM 130: **Evaluation of Potencial Expansio of Steel Slags**. 1978.

RAPOSO, C. O. L. **Estudo experimental de compactação e expansão de uma escória de aciaria LD para uso em pavimentação**. Universidade Federal do Espírito Santo – UFES. Vitória, 2005.

RHODE, L. **Escória de aciaria elétrica e mcamadas granulares de pavimentos – estudo laboratorial**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2002.

SILVA, A. M. B. **Estudo da degradação mecânica de pequenas quantidades de coque em testes de tamboreamento.** Universidade Federal de Ouro Preto e Universidade Estadual de Minas Gerais – UFOP, UEMG. Ouro Preto, 2016.

SILVA, J. J. S. **Siderurgia e tratamento térmico dos Aços – Prof. Jaques Jonas Santos Silva.** Universidade Estadual do Rio de Janeiro - UERJ, Resende, 2009. (apostila).

WACHSMUTH, F.; GEISELER, J.; FIX, W.; KOCH, K; SCHWERDTFEGER, K. **Contribution to the structure of BOG slags and its influence on their volume stability.** Canadian Metallurgical Quarterly. Duisburg, Vol. 20, nº3, p. 284, 1981.