

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**APLICABILIDADE DO AGREGADO SIDERÚRGICO
AÇOBRIÇA MISTURADO COM SOLO EM CAMADAS DE
PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

NAIRO DAVID TARAZONA BUITRAGO

ORIENTADOR: LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-270/16

BRASÍLIA / DF: ABRIL/ 2016

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**APLICABILIDADE DO AGREGADO SIDERÚRGICO
AÇOBRIÇA MISTURADO COM SOLO EM CAMADAS DE
PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

NAIRO DAVID TARAZONA BUITRAGO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

**LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, D.Sc. (UnB)
(ORIENTADOR)**

**ANDRÉ LUIS BRASIL CAVALCANTE, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**LUCIANA M. DELLABIANCA ARAÚJO, D.Sc. (DNIT)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 20 DE ABRIL DE 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

TARAZONA BUITRAGO, NAIRO DAVID

Aplicabilidade do agregado siderúrgico açobrita misturado com solo em camadas de pavimentos rodoviários [Distrito Federal] 2016

xviii, 85 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2016)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Agregado Siderúrgico

2. Pavimentação

3. Açobrita

4. Base

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

TARAZONA, N. (2016). Aplicabilidade agregado siderúrgico açobrita misturado com solo em camadas de pavimentos rodoviários. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-270/16, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 85 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Nairo David Tarazona Buitrago

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Aplicabilidade do agregado siderúrgico açobrita misturado com solo em camadas de pavimentos rodoviários.

GRAU / ANO: Mestre / 2016

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

Nairo David Tarazona Buitrago

Asa Norte, CLN 407, Bl. C, Apto 213.

CEP: 70855-530 - Brasília/DF - Brasil

DEDICATÓRIA

A Deus, que faz tudo possível na minha vida.

A Nossa Senhora de Aparecida, a quem encomendei minha viagem ao Brasil.

A minha mãe Senelia, que sempre me apoia e sustenta no caminho de alcançar meus propósitos, ao meu Pai Nairo (In memoriam) quem deixou para mim ensinamentos que tem sido de muita ajuda para chegar até onde hoje estou, aos meus irmãos Diego, Pipe e Alejandra, por tanto carinho e apoio, aos meus sobrinhos Martin e Sara Luciana, que roubaram meu coração e têm sido fonte de motivação para finalizar meu mestrado, Ao meu avô Eduardo, que sempre está por perto para me ajudar e ensinar.

A minha avó “Mi Tuli” (In memoriam,) que foi outra mãe para mim e partiu ao reino do céu, enquanto eu estava no Brasil.

A toda minha amada Família.

Ao povo Brasileiro, que me acolheu com muito afeto, me deu lições de vida que jamais esquecerei além de paisagens maravilhosas que ficarão na minha memória.

A todas a pessoas que torceram por mim, para que tudo desse certo nesta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo infinito amor e proteção;

Ao Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, seus professores, pela oportunidade de continuar minha formação profissional no nível de mestrado;

Ao CNPQ e à CAPES pelo apoio financeiro;

Ao meu orientador o Professor Luís Fernando Martins Ribeiro, pela ajuda, ensinamentos e compreensão no desenvolvimento desta pesquisa.

À equipe de trabalho do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) e do Instituto Aço Brasil (IABR) pela inclusão e apoio na pesquisa;

A minha família, por tanto amor, inspiração, fortaleza, apoio (sentimental e econômico), enfim, por ser o mais valioso que possuo;

Aos meus colegas e amigos de mestrado, especialmente aqueles que sempre estiveram do meu lado e me apoiaram em todo momento: Heydy, Javier, Jaime, Mariela, Diana e recentemente Juliana.

Ao Victor Oliveira pela parceria e ajuda na realização dos ensaios de laboratório;

Aos meus amigos Brasileiros Reziere, Mônica e família, Rogério, Juliana; Fernando e Guilherme; Joziel, Jokinha, Nando, Neila, Jailda, Mayra e mãe, pelo carinho, parceria e por me ensinar tanto deste lindo país, até quase me sentir mais um brasileiro;

À minha família adotiva no Brasil, sr. Edilberto, sra. Helena e Leandro, muito obrigado por me fazer sentir em casa mesmo estando longe da nossa terra;

Aos meus amigos na Colômbia que por mim torceram e sempre me deram forças para concluir felizmente meu mestrado.

Muito obrigado a todos...

“O Senhor é o meu pastor, nada me faltará...”

Salmo 23

APLICABILIDADE DO AGREGADO SIDERÚRGICO AÇOBRITA MISTURADO COM SOLO EM CAMADAS DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

O agregado siderúrgico, também denominado *açobrita*, foi desenvolvido pela indústria siderúrgica a partir das escórias de aciaria. Este é um material tratado, com expansão volumétrica controlada, britado e enquadrado numa granulometria definida, desenvolvido para se tornar uma alternativa aos agregados naturais convencionais em obras de pavimentação rodoviária. Neste contexto, esta dissertação visa à avaliação da aplicabilidade do agregado siderúrgico açobrita como constituinte de camadas de base em pavimentos rodoviários. Ressalta-se que esta pesquisa foi desenvolvida por meio de uma parceria do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT, o Instituto Aço Brasil - IABR e a Universidade de Brasília – UnB, objetivando também gerar parâmetros no sentido de obter uma normativa DNIT que oriente o uso sistemático deste produto no Brasil. Para esse fim, o DNIT planeja a implantação de trechos experimentais utilizando o agregado siderúrgico em rodovias federais no estado de Minas Gerais (BR120/MG e BR381/MG), próximos às usinas siderúrgicas, utilizando misturas de este, com diferentes materiais como solos naturais, materiais fresados e adições de cimento. Uma mistura de agregado siderúrgico e solo tropical obtido no local onde será executado um dos trechos experimentais (BR 381/MG) foi o tema de estudo nesta pesquisa. Assim, o programa experimental relativo aos ensaios geotécnicos de laboratório, foi definido incluindo a caracterização física e mecânica do agregado siderúrgico, do solo e três misturas destes dois: 70% agregado siderúrgico + 30% solo (M7030), 80% agregado siderúrgico + 20% solo (M8020) e 90% agregado siderúrgico + 10% solo (M9010). Além dos ensaios de caracterização física e mecânica dos materiais, foi determinado o potencial de expansão do agregado siderúrgico pelo método ME 113 (DNIT, 2009), conhecido internacionalmente como método PTM 130. Os resultados dos ensaios mostraram que o agregado siderúrgico açobrita proporciona características adequadas para ser empregado como material de pavimentação, principalmente por obter controle na sua expansão; e que as três misturas de agregado siderúrgico e solo, apresentam desempenho satisfatório, tendo conformidade granulométrica, expansão controlada e altos valores de Índice de Suporte de Califórnia, sendo aplicáveis como material de base de pavimentos rodoviários.

ABSTRACT

APPLICABILITY OF STEEL AGGREGATE MIXED WITH SOIL IN LAYERS OF ROAD PAVEMENTS

The steel aggregate also called steel-gravel was developed by the steel industry from steel slag. The steel-gravel is a material treated with controlled volumetric expansion, crushed and framed in a specific granulometry developed to become an alternative to conventional natural aggregates in road paving. In this context, this thesis is aimed at assessing the applicability of the steel-gravel layer as aggregate base and sub-base of pavements. It is noteworthy that this research was developed through a partnership with the National Department of Transport Infrastructure - DNIT, the Brazil Steel Institute - IABR and the University of Brasilia - UnB, aiming also generate parameters in order to obtain a DNIT standards to guide the systematic use of this product in Brazil. To this end, the DNIT will deployment of experimental sections using steel-gravel on federal roads in the state of Minas Gerais (BR-120/MG and BR381/MG), near the steel mills, using mixtures of steel-gravel with different materials such as natural soil materials milled and cement additions. A mixture of steel-gravel and tropical soil obtained at the place where will run one of the experimental sections (BR 381/MG) was the subject of study in this research. Thus, the experimental program relating to the geotechnical testing laboratory, was decided to perform the physical and mechanical behavior of the steel-gravel and soil as well as the blends of them: 70% steel-gravel + 30% soil (M7030), 80% steel -gravel + 20% soil (M8020) and 90% steel-gravel + 10% soil (M9010). In addition to the testing of physical and mechanical characterization of materials, it was determined the potential for expansion of the steel aggregate by the method ME 113 (DNIT, 2009), internationally known as PTM 130 method. The test results showed that the steel-gravel provides adequate characteristics to be used as aggregate paving mainly because it has the expansion controlled; and that the three mixtures of steel aggregate and soil, have satisfactory performance, having particle size accordingly controlled expansion and high California bearing ratio values, are applicable as the base material for road pavements.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO.....	1
1.2. OBJETIVO GERAL.....	2
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. PROCESSO DE PRODUÇÃO DO AÇO	4
2.2. GERAÇÃO DE COPRODUTOS SIDERÚRGICOS	7
2.3. ESCÓRIAS DE ALTO FORNO	7
2.4. ESCÓRIAS DE ACIARIA	8
2.4.1. EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA	11
2.4.2. CONTROLE DA EXPANSIBILIDADE NA ESCÓRIA DE ACIARIA	12
2.4.3. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE	16
2.5. UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA NA PAVIMENTAÇÃO	17
2.5.1. NORMATIVA BRASILEIRA.....	21
2.6. CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA	25
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	30
3.1. MATERIAIS DA PESQUISA	30
3.1.1. AÇOBRITA	30
3.1.2. SOLO.....	30
3.1.3. MISTURAS	31
3.2. RELAÇÃO DE ENSAIOS REALIZADOS E DOS MÉTODOS ADOTADOS	32
3.3. MÉTODOS DE ENSAIO	33
3.3.1. AMOSTRAGEM	33
3.3.1.1. PREPARAÇÃO DAS MISTURAS.....	34
3.3.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	34
3.3.3. LIMITES DE ATTERBERG OU LIMITES DE CONSISTÊNCIA	35
3.3.4. DENSIDADE REAL DOS GRÃOS (Gs)	36
3.3.5. RESISTÊNCIA À ABRASÃO <i>LOS ANGELES</i>	37
3.3.6. ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	38
3.3.7. COMPACTAÇÃO	38
3.3.8. ÍNDICE DE SUPORTE DE CALIFÓRNIA (ISC).....	40
3.3.9. POTENCIAL DE EXPANSÃO MÉTODO ME113 (DNIT, 2009).	40

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	44
4.1. AÇOBRITA	44
4.1.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	44
4.1.2. LIMITES DE ATTERBERG OU LIMITES DE CONSISTÊNCIA	46
4.1.3. DENSIDADE REAL DOS GRÃOS (Gs)	46
4.1.4. RESISTÊNCIA À ABRASÃO LOS ANGELES	48
4.1.5. ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	48
4.1.6. COMPACTAÇÃO	48
4.1.7. ÍNDICE DE SUPORTE DE CALIFÓRNIA (ISC ou CBR)	51
4.1.8. POTENCIAL DE EXPANSÃO MÉTODO ME113 (DNIT, 2009).....	53
4.2. SOLO	56
4.2.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	56
4.2.2. LIMITES DE ATTERBERG OU LIMITES DE CONSISTÊNCIA	57
4.2.3. DENSIDADE REAL DOS GRÃOS (Gs)	59
4.2.4. COMPACTAÇÃO	59
4.2.5. ÍNDICE DE SUPORTE DE CALIFÓRNIA (ISC).....	61
4.3. MISTURAS AÇOBRITA E SOLO.....	62
4.3.1. ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS	63
4.3.1.1. MISTURA M7030.....	63
4.3.1.2. MISTURA M8020.....	64
4.3.1.3. MISTURA M9010.....	65
4.3.2. LIMITES DE ATTERBERG OU LIMITES DE CONSISTÊNCIA	66
4.3.3. DENSIDADE REAL DOS GRÃOS (Gs)	67
4.3.4. COMPACTAÇÃO E ÍNDICE DE SUPORTE DE CALIFÓRNIA	67
4.3.4.1. MISTURA M7030.....	67
4.3.4.2. MISTURA M8020.....	69
4.3.4.3. MISTURA M9010.....	71
4.3.5. ANÁLISES FINAIS.....	73
5. CONCLUSÕES	76
5.1. AÇOBRITA:	76
5.2. SOLO	77
5.3. MISTURAS:	78
SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparativo dos percentuais médios dos principais compostos químicos da escória de aciaria no Brasil, Japão e Alemanha (IBS, 1998 <i>Apud</i> . Resende, 2010)	9
Tabela 2.2 - Parâmetros que influenciam na expansão das escórias de aciaria (Machado, 2000).....	11
Tabela 2.3 – Resumo dos tratamentos para controle da expansibilidade das escórias de aciaria. (Silva, 2001 <i>apud</i> Fernandes, 2010).....	15
Tabela 2.4 – Resultados do ensaio de índice de Suporte de Califórnia (Barbosa, 2013).....	21
Tabela 2.5 – Faixas granulométricas agregado siderúrgico segundo NBR 16364 (ABNT, 2015).....	23
Tabela 2.6 - Faixas granulométricas das misturas agregado siderúrgico e solo segundo NBR 16364 (ABNT, 2015).....	24
Tabela 2.7 – Resumo dos elementos químicos encontrados nas amostras de agregado siderúrgico analisadas (FCT, 2005).....	28
Tabela 2.8 – Resultados ensaios de lixiviação segundo NBR10005 (ABNT, 2004) para as amostras de agregado siderúrgico (FCT, 2005)	28
Tabela 2.9 – Resultados ensaios de solubilização segundo NBR10006 (ABNT, 2004) para as amostras de agregado siderúrgico (FCT, 2005)	29
Tabela 3.1 - Relação dos ensaios realizados no açobrita e os respectivos métodos de ensaio adotados.	32
Tabela 3.2 - Relação dos ensaios realizados no solo e dos respectivos métodos de ensaio adotados.	32
Tabela 3.3 - Relação dos ensaios realizados nas misturas e dos métodos de ensaio adotados.	33
Tabela 4.1- Resultados análises granulométricas do açobrita.....	45
Tabela 4.2 – Resumo das características granulométrica das amostras de açobrita ensaiadas segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995).	46
Tabela 4.3 – Análise da variação na densidade real dos grãos de açobrita.	47
Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de compactação e ISC para o açobrita.	52
Tabela 4.5 – Resultados do ensaio de potencial de expansão para o açobrita pelo método ME113 (DNIT, 2009).....	53
Tabela 4.6 – Resume da análise granulométrica do solo método ME 051 (DNER, 1994)	57
Tabela 4.7 – Determinação do limite de liquidez do solo.	57
Tabela 4.8 – Resultados ensaio de compactação com energias Proctor normal e modificado para o solo.	60
Tabela 4.9 - Resultados dos ensaios de compactação na energia normal e ISC para o solo. ...	61
Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios de compactação na energia modificada e ISC para o solo.	61
Tabela 4.11 – Análise granulométrica da mistura M7030 e faixa granulométrica D da norma NBR 16364 (ABNT, 2015) e suas tolerâncias.	64

Tabela 4.12 - Análise granulométrica da mistura M8020 e faixa granulométrica D da norma NBR 16364 (ABNT, 2015) e suas tolerâncias.	65
Tabela 4.13 - Análise granulométrica da mistura M9010 e faixa granulométrica da norma NBR 16364 (ABNT, 2015) e suas tolerâncias.	66
Tabela 4.14 – Valores da densidade real dos grãos para as misturas	67
Tabela 4.15 - Resultados dos ensaios de compactação e ISC para a mistura M7030.	68
Tabela 4.16 - Resultados dos ensaios de compactação e ISC para a mistura M8020.	70
Tabela 4.17 - Resultados dos ensaios de compactação e ISC para a mistura M9010.	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fluxograma esquemático do processamento e das etapas de refino do aço nas usinas siderúrgicas (UFRGS, 2015).	6
Figura 2.2. - Fluxo simplificado de produção do aço (modificado - IABR, 2008).....	6
Figura 2.3 – Esquema simplificado da geração de escórias de aciaria em usinas integradas com conversor LD e usinas semi-integradas com forno elétrico a arco e forno panela (Masuero <i>et al</i> , 2004 <i>apud</i> . Resende 2010).	10
Figura 2.4 - Expansão causada pela escória de aciaria utilizada no pavimento (Raposo, 2005).	12
Figura 2.5 – Molhagem da escória de aciaria LD dentro do processo de cura (Raposo, 2005).	14
Figura 2.6 – Aeração da escória de aciaria LD mediante revolvimento mecânico dentro do processo de cura (Raposo, 2005).....	14
Figura 2.7 – Resultados dos ensaios de módulos de resiliência para misturas solo-escória, solo-brita e solo puro (Parente <i>et al.</i> , 2003).....	19
Figura 2.8 – Curvas de compactação da EGC com tempo de estocagem de 4, 5 e 6 meses (Rodhe, 2002).....	20
Figura 2.9 – Módulos de resiliência da EGC e de materiais granulares convencionais (Rohde <i>et al</i> , 2003)	20
Figura 2.10 - Vista aérea aeroporto de Vitória – ES. Camada de base construída com agregado siderúrgico. (WIKIPÉDIA, 2015)	25
Figura 3.1 – Açobrita recebido para a pesquisa.	30
Figura 3.2 – (a) Coleta de solo por parte do DNIT na BR381/MG. (b) Solo recebido no Laboratório de Geotecnia da UnB para pesquisa.	31
Figura 3.3 – Mistura açobrita e solo M8020.....	31
Figura 3.4 – Preparação de amostras de solo.	33
Figura 3.5 – Dosagem para a preparação da mistura M8020.	34
Figura 3.6 – Ensaio de granulometria por sedimentação da fração fina do solo.	35
Figura 3.7 – Elementos utilizados nos ensaios dos limites de Atterberg.....	35
Figura 3.8 – Pentapicnômetro (Pentapyc™ 5200e) do laboratório de Geotecnia da UnB.	36
Figura 3.9 – Análise de variação na densidade real dos grãos de aço brita. (a) Grãos de açobrita compactos (b) Grãos de açobrita porosos.....	37
Figura 3.10 – Equipamento de Abrasão Los Angeles disponível no laboratório de infraestrutura da UnB	38
Figura 3.11 – Ensaio determinação da absorção de água do açobrita.	38
Figura 3.12 – Elementos utilizados no ensaio de compactação manual.....	39
Figura 3.13 – Ensaio de Índice de Suporte de Califórnia, Laboratório de Geotecnia da UnB.	40
Figura 3.14 – Processo de calibração da câmara climatizada utilizada no ensaio de expansão.	41

Figura 3.15 – Corpos-de-prova de açobrita e aparelhagem para determinação da expansão...	42
Figura 3.16 – Imersão dos corpos-de-prova em água preaquecida a 38°C.....	42
Figura 3.17 – Corpos-de-prova colocados em imersão na câmara climatizada a $71 \pm 3^\circ\text{C}$	43
Figura 4.1 – Curvas granulométricas do açobrita ensaiado.	44
Figura 4.2 – (a) Visão ampliada 50x do grão de açobrita definido como “compacto”. (b) Visão ampliada 50x do grão de açobrita definido como “poroso”.	47
Figura 4.3 – (a) Açobrita na graduação A antes do ensaio de abrasão “Los Angeles”. (b) Açobrita após ensaio de abrasão “Los Angeles”.....	48
Figura 4.4 – Curva de compactação do açobrita.	49
Figura 4.5 – (a) Superfície no final da compactação do material. (b) Consistência do corpo de prova após o retiro do disco espaçador e o papel filtro.	50
Figura 4.6 – Corpos-de-prova de açobrita desmoldados após ensaio de compactação.....	51
Figura 4.7 – (a) Etapa de penetração na prensa automática do ensaio de ISC; (b) Corpo-de-prova de açobrita após a etapa de penetração.	51
Figura 4.8 – Variação do Índice de Suporte de Califórnia e o Peso Específico Aparente Seco com o Teor de Umidade do açobrita.	52
Figura 4.9 – Curva da taxa de expansão acumulada no tempo do ensaio para o açobrita.....	54
Figura 4.10 – Amostra de açobrita após ensaio de expansão.	55
Figura 4.11 – Curva granulométrica do solo com uso e sem uso de defloculante.	56
Figura 4.12 – Determinação do Limite de Liquidez do solo método NBR 6459 (ABNT, 1984).	58
Figura 4.13 – Carta de Plasticidade de Casagrande empregada no Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).	59
Figura 4.14 – Curvas de compactação energias Proctor normal e modificado para o solo.	60
Figura 4.15 – Variação do ISC das amostras de solo compactadas na energia de Proctor normal e modificada, com o teor de umidade.	62
Figura 4.16 – Curva granulométrica mistura M7030	63
Figura 4.17 – Curva granulométrica mistura M8020.	64
Figura 4.18 - Curva granulométrica mistura M9010.....	66
Figura 4.19 – Curva de compactação para a mistura M7030	68
Figura 4.20 - Variação do Índice de Suporte de Califórnia e do Peso Específico Aparente Seco com o Teor de Umidade da mistura M7030.	69
Figura 4.21 – Curva de compactação mistura M8020.....	70
Figura 4.22 - Variação do Índice de Suporte de Califórnia e do Peso Específico Aparente Seco com o Teor de Umidade da mistura M8020.	71
Figura 4.23 - Curva de compactação mistura M9010	72
Figura 4.24 - Variação do Índice de Suporte de Califórnia e do Peso Específico Aparente Seco com o Teor de Umidade da mistura M9010.	72

Figura 4.25 – Resumo Curvas de Compactação do açobrita e das misturas.	73
Figura 4.26 – Curvas de variação do Índice de Vazios (e) do açobrita e misturas com o Teor de Umidade.	74

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABM	Associação Brasileira de Metalurgia E Materiais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	America Society of Testing Materials
BOF	Blast Oxygen Furnace
C	Carbono
CaF_2	Fluorita
CaO	Óxido de Cálcio ou Cal livre
Ca(OH)_2	Hidróxido de Cálcio
C_c	Coefficiente de curvatura do solo
C_u	Coefficiente de uniformidade do solo
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CO_2	Dióxido de Carbono
CP-III	Cimento Portland de Alto-forno
CP-II	Cimento Portland de Composto
CST	Companhia Siderúrgica Tubarão
C_2S	Silicato dicálcico
D	Diâmetro das partículas do solo
DER-MG	Departamento de Estradas e Rodagem de Minas Gerais
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
D_{10}	Diâmetro das partículas ou grãos de solo correspondente a 10% passante em peso
D_{30}	Diâmetro das partículas ou grãos de solo correspondente a 30% passante em peso

D ₆₀	Diâmetro das partículas ou grãos de solo correspondente a 60% passante em peso
EAF	Electric Arc Furnace
EB	Especificação Brasileira
EGAF	Escórias Granuladas de Alto-forno
ER	Eficiência Relativa
EOF	Electric Optimizing Furnace
EPA	Environmental Protection Agency
Fe ⁰	Ferro Metálico
Fe(OH) ₂	Hidróxido Ferroso
Fe(OH) ₃	Hidróxido Férrico
G _s	Densidade Real dos Grãos
IABR	Instituto Aço Brasil
ISC	Índice de Suporte de Califórnia
ISO.....	International Organization for Standardization
JIS	Japan Institute Standard
Kg	Quilograma
LD	Linz e Donawitz
ME	Método de Ensaio
MG	Minas Gerais - Brasil
MgO	Óxido de Magnésio ou Periclásio
Mg(OH) ₂	Hidróxido de magnésio ou Brucita
mm.....	Milímetro
Mn	Manganês
MPa	MegaPascal
N	Número equivalente de operações do eixo rodoviário padrão
NBR.....	Norma Brasileira
NSA	National Slags Association

OH	Open Heart
P	Fósforo
PTM	Pennsylvania Testing Method
pH	Potencial Hidrogeniônico
Si	Silício
SiO ₂	Dióxido de Silício
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UnB.....	Universidade de Brasília
°C	Graus Celsius

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

As obras rodoviárias apresentam altos custos econômicos e ambientais oriundos da alta demanda de agregados naturais não renováveis. Uma solução para os custos em questão é o desenvolvimento de alternativas de construção de pavimentos de baixo custo, amigáveis com o meio ambiente, com qualidade e segurança garantida aos usuários. Neste cenário, o agregado siderúrgico, escória de aciaria tratada na usina siderúrgica com características especificadas para pavimentos, tem grande aplicabilidade no Brasil, uma vez que o país em questão é o maior produtor latino-americano de aço e um dos maiores produtores mundiais.

A malha rodoviária brasileira composta por rodovias federais, estaduais e municipais, é uma das maiores no mundo, com uma extensão total de 1.720.755,7 km. Entretanto, apenas 12,3 % desse total está pavimentada, ou seja, 211.653,0 km (DNIT, 2015). Este panorama é preocupante pois, embora as rodovias sejam amplamente distribuídas, as mesmas não possuem a qualidade desejada, aumentando os custos operacionais, a poluição e a insegurança no transporte.

Segundo o Instituto Aço Brasil (IABR, 2016), no ano de 2015 o Brasil produziu 33,3 milhões de toneladas de aço bruto, sendo que cada tonelada de aço gera em torno de 100 a 150 kg de escória de aciaria. Neste contexto, adotando-se a média de 130 kg de escória de aciaria, foi obtida uma produção aproximada de 4,3 milhões de toneladas de escória só no 2015.

Entende-se, então, a relevância da aplicação destes materiais como agregados alternativos em obras de pavimentação, frente a necessidade de contribuir para a sustentabilidade do planeta, incentivando a redução do consumo de recursos naturais não renováveis, como aqueles provenientes da mineração de rochas, de areia e de outros materiais primários. Aliado a isto, verifica-se a possibilidade de transformar um potencial passivo ambiental da indústria siderúrgica em ativo econômico e ambiental, evitando a disposição desnecessária de materiais em aterros e/ou pátios das usinas, acarretando a destinação de grandes áreas para sua deposição.

A presente pesquisa foi desenvolvida através de uma parceria DNIT - IABR – UnB, visando a avaliação da aplicabilidade do agregado siderúrgico misturado com solo tropical como constituinte de camadas de base em pavimentos rodoviários e subsidiando a elaboração de uma

normativa DNIT que oriente o uso sistemático do produto. Para isto, o DNIT planeja a implantação de trechos experimentais utilizando o agregado siderúrgico em rodovias federais no estado de Minas Gerais (BR120/MG e BR381/MG), próximos às usinas siderúrgicas. Por meio do relatório técnico do DNIT (Processo nº 50600.085467/2012-72) foram definidas misturas a serem testadas nos trechos em questão, sendo uma destas foco de estudo da presente pesquisa: mistura de agregado siderúrgico e solo tropical do local onde será executado o trecho experimental. Foram definidas misturas de solo e agregado siderúrgico em diferentes porcentagens para base, visando avaliar a aplicabilidade destas misturas como constituintes de camadas de pavimentos rodoviários por meio de ensaios de laboratório.

1.2. OBJETIVO GERAL

- Avaliar mediante estudo laboratorial a aplicabilidade do agregado siderúrgico misturado com solo tropical, em diferentes proporções, como elemento constituinte nas camadas de base de pavimentos rodoviários.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar, mediante ensaios de laboratório, as propriedades físicas e mecânicas do agregado siderúrgico açobrita e sua aplicabilidade em obras de pavimentação rodoviária;
- Realizar três diferentes misturas de agregado siderúrgico açobrita com solo tropical, avaliando por meio de ensaios de laboratório suas propriedades físicas e mecânicas, determinando assim a melhor mistura para utilização como base em pavimentos rodoviários;
- Realizar a montagem do ensaio para avaliar a expansibilidade do agregado siderúrgico açobrita no laboratório de geotecnia da Universidade de Brasília, por meio do método estipulado pela especificação ME 113 (DNIT, 2009);
- Contribuir com o desenvolvimento de procedimentos normativos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) acerca da utilização do agregado siderúrgico açobrita, para aplicação em obras de pavimentação rodoviária federais.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação é apresentada em cinco capítulos:

Neste primeiro capítulo se faz uma introdução, tendo a motivação, os objetivos e a estrutura da pesquisa.

No capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica sobre os coprodutos gerados pela indústria siderúrgica, os tipos de escórias produzidas e suas características, principalmente relacionadas à expansão. Também foram estudadas as etapas de processamento das escórias na formação de agregados siderúrgicos aplicáveis na pavimentação, os quais podem ser aplicados em camadas que venham a substituir os agregado naturais. Também é apresentada a revisão das normas DNIT existentes para emprego das escórias de aciaria, escórias de alto forno e da ACERITA® em pavimentação rodoviária e da norma ABNT mais recente NBR 16364 (ABNT, 2015) para execução de sub-base e base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária.

No capítulo 3, denominado programa experimental, são apresentados os materiais utilizados e os métodos de ensaios adotados na pesquisa.

No capítulo 4, são apresentados e analisados os resultados obtidos na etapa experimental, avaliando a aplicabilidade do agregado siderúrgico açobrita misturado com solo tropical como material de base em pavimentos rodoviários.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões da pesquisa e uma série de recomendações e sugestões para pesquisas futuras.

No final do documento são listadas as referências bibliográficas consultadas para o desenvolvimento da pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para entender melhor o que é o aço produzido pelas empresas siderúrgicas apresenta-se na sequência o processo de produção do aço. O processo em questão acaba gerando escórias de aciaria, as quais posteriormente são processadas na mesma usina, adquirindo as propriedades necessárias para se converter num agregado com potencial de aplicação em obras de pavimentação rodoviária.

2.1. PROCESSO DE PRODUÇÃO DO AÇO

O aço, essencialmente é uma liga de ferro e carbono. O ferro é obtido a partir do minério de ferro que é um óxido de ferro misturado com areia fina. Como fonte de carbono na indústria siderúrgica usa-se o carvão mineral e cal.

O carvão exerce duplo papel na fabricação do aço. Como combustível, permite alcançar altas temperaturas (cerca de 1.500 °C), necessárias à fusão do minério de ferro. Como redutor, associa-se ao oxigênio que se desprende do minério com a alta temperatura, deixando livre o ferro. Este processo é conhecido como redução e ocorre no alto forno.

O minério de ferro e o carvão sofrem um pré-processamento que visa aumentar o rendimento e economia do processo no alto forno, esta etapa é conhecida como preparação da carga. Os finos do minério de ferro passa por um processo de aglomeração, via sinterização ou pelletização, dando origem, respectivamente, ao sinter e às pelotas que são usadas, além do minério de ferro de maior granulometria, na carga do alto-forno. O carvão é processado na coqueria para retirar os compostos voláteis e transforma-se em coque.

Estes materiais são carregados no alto forno onde ocorre a etapa de redução. O oxigênio, aquecido a uma temperatura de 1000 °C, é soprado pela parte de baixo do alto forno. O coque, em contato com o oxigênio, produz calor que funde a carga metálica e dá início ao processo de redução do minério de ferro em um metal líquido: o ferro-gusa.

O ferro-gusa é uma liga de ferro e carbono com teores muito elevados de carbono. A escória de alto forno é obtida nessa etapa de redução do ferro na forma de gusa líquida, ficando separada do aço por diferença de densidade.

Essa primeira redução tem como principal finalidade diminuir o teor de impurezas, ou seja, reduzir as quantidades das substâncias como Manganês (Mn), Fósforo (P) e Enxofre (S) existentes nos minérios, os quais são retirados parcialmente com escórias e/ou com os gases (Parente, *et al.* 2003).

A etapa seguinte do processo é o refino. Basicamente, existem quatro processos, os quais são caracterizados pelo emprego de diferentes fornos de refino: o Siemens-Martin (“Open Heart” - OH), o conversor a oxigênio (“Linz e Donawitz” - LD ou “Blast Oxygen Furnace” - BOF), o forno elétrico a arco (“Electric Arc Furnace” - EAF) e, atualmente, podem ser encontrados os fornos de energia otimizada (“Energy Optimizing Furnace” - EOF). Os dois processos mais utilizados mundialmente são o de fusão e de refino de sucata em fornos elétricos a arco e o de refino do ferro-gusa líquido em conversores a oxigênio (Rohde, 2002). Hoje, os fornos tipo Siemens-Martin estão praticamente em desuso devido a sua baixa produtividade: 300 toneladas de aço em um período de 5 a 14 horas. Entretanto, no processo BOF, a mesma quantidade de aço é obtida em apenas 30 a 45 minutos de sopro (Machado, 2000). O forno de energia otimizada é um forno de fusão e refino para a produção de aço líquido. Seu diferencial é a utilização de ferro-gusa líquido em baixa escala, podendo ser no percentual de 50% de sua carga, sopro submerso e pré-aquecimento de sucatas, sendo estas vantagens um enorme atrativo sobre outros equipamentos (Minitecnologias, 2009).

Esta etapa do processamento na aciaria divide-se em refino primário e refino secundário (Fig. 2.1) onde são geradas também as escórias de aciaria. O refino primário acontece no conversor a oxigênio ou elétrico, onde o ferro-gusa, geralmente adicionado à sucata de aço, é transformado em aço. Nesta fase, o Silício (Si), o Manganês (Mn) e principalmente o Carbono (C) são removidos. No refino secundário são feitas as correções mais específicas e controladas do processo de produção.

Finalmente, a terceira fase clássica do processo de fabricação do aço é a laminação. Os semiacabados, lingotes e blocos são processados por equipamentos chamados laminadores e transformados em uma grande variedade de produtos siderúrgicos, cuja nomenclatura depende de sua forma e/ou composição química.

Com a evolução da tecnologia, as fases de redução, refino e laminação estão sendo reduzidas no tempo, assegurando maior velocidade na produção (IABR, 2010).

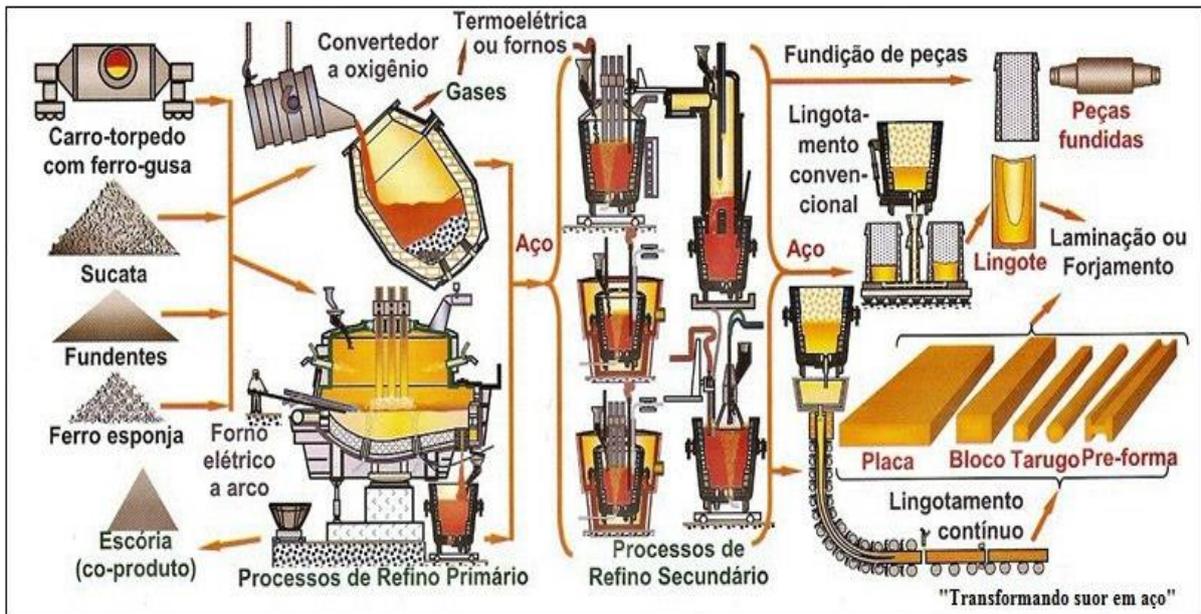


Figura 2.1 - Fluxograma esquemático do processamento e das etapas de refino do aço nas usinas siderúrgicas (UFRGS, 2015).

As usinas de aço do mundo inteiro classificam-se, segundo o seu processo produtivo, como: Integradas “Integratedmill” e Semi-integradas “Minimill” (McGannon, 1971) (Figura 2.2). As primeiras operam as três fases básicas, que são: redução, refino e laminação; assim, participam de todo o processo produtivo do aço. As segundas operam duas fases, que são o refino e a laminação. Estas usinas utilizam o ferro gusa, ferro esponja ou sucata metálica adquirida de terceiros para transformá-los em aço em aciarias elétricas e sua posterior laminação.

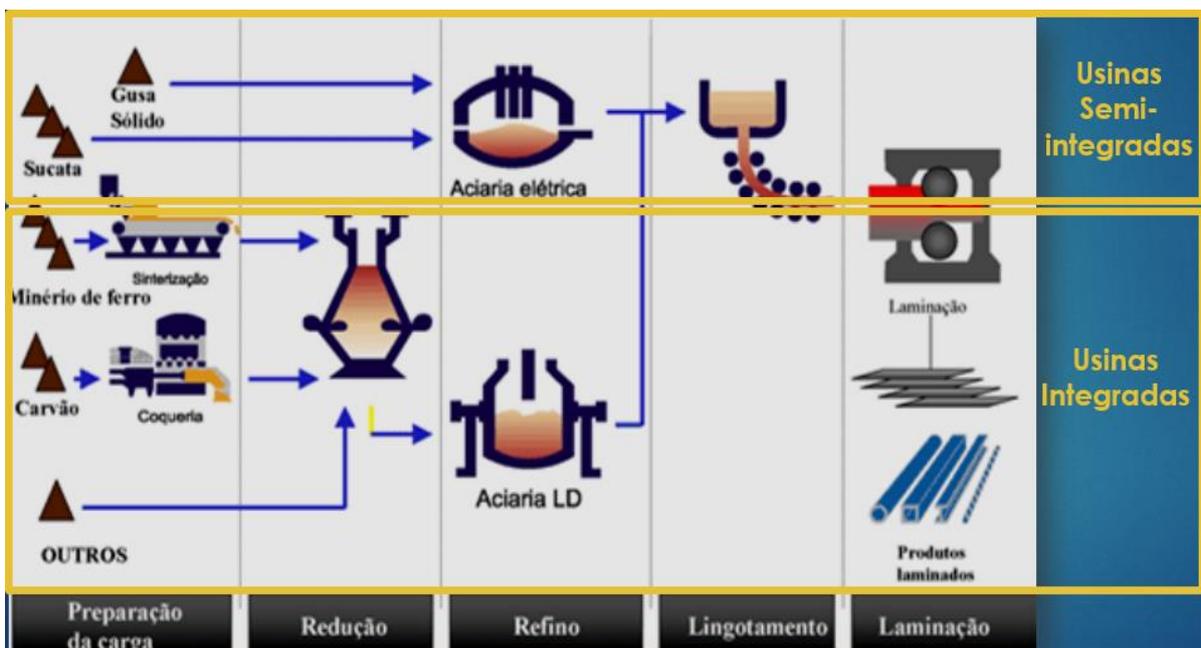


Figura 2.2. - Fluxo simplificado de produção do aço (modificado - IABR, 2008).

2.2. GERAÇÃO DE COPRODUTOS SIDERÚRGICOS

Durante sua produção, as usinas siderúrgicas geram, além do aço, outros materiais chamados coprodutos, que segundo a norma ISO14040 (ISO, 1997) são um ou mais produtos oriundos do mesmo processo ou sistema produtivo que apresentam aplicação técnica e economicamente viável por meio de reciclagem, sendo essa definição a grande diferença de coproduto e resíduo, material resultante das atividades ou serviços da organização, que se encontra nos estados sólido ou semissólido e que, pelas suas características, não apresenta aplicação técnica e economicamente viável. Dentre os coprodutos resultantes da produção do aço, podemos citar como exemplo: as escórias de aciaria, escória de alto forno, lamas das estações de tratamento de água e de tratamento de esgotos, alcatrão, dentre outros (CST, 2014).

O uso de coprodutos contribui para a sustentabilidade da indústria do aço, evitando a deposição destes em aterros, reduzindo a emissão de CO₂ e preservando os recursos naturais não renováveis.

Como as escórias representam cerca de 60% dos coprodutos gerados pelo processo produtivo do aço, encontrar alternativas para agregação de valor a estes materiais é de grande importância (IABR, 2010).

2.3. ESCÓRIAS DE ALTO FORNO

A escória de alto-forno, gerada em reatores metalúrgicos para produção de ferro-gusa, trata-se de um coproduto siderúrgico industrial, constituído basicamente de alumino-silicatos cálcicos. Estes materiais resultam da combinação da ganga ou canga do minério de ferro, com as cinzas do coque e do calcário utilizado como fundente no processo siderúrgico da fabricação do ferro fundido ou do ferro-gusa.

A escória de alto-forno é o coproduto com maior volume de geração, na faixa de 210 a 310 kg por tonelada de ferro-gusa produzida, dependendo da qualidade das matérias-primas utilizadas. No Brasil, a totalidade das usinas siderúrgicas integradas adota o procedimento de granulação da escória de alto-forno, processo que torna sua estrutura amorfa (vítrea), cujas propriedades são apropriadas à utilização na indústria do cimento. As escórias granuladas de alto-forno (EGAF) são moídas e misturadas ao clínquer, dando origem a duas importantes qualidades de cimento, que são o cimento Portland de alto-forno CP-III e o cimento Portland composto CP-II (ABCP, 2009).

Conforme exposto, a escória granulada de alto-forno é um produto regularmente fornecido e aplicado na a indústria do cimento ou do concreto. Já a escória de alto-forno, que por motivos operacionais não é granulada, tem estrutura cristalina, com propriedades que demandam aplicações semelhantes às da escória de aciaria, tais como matéria-prima para a produção de concreto, lastro ferroviário ou agregado para pavimentação.

Sob o ponto de vista ambiental, a utilização da escória granulada de alto-forno na produção de cimento, em substituição ao clínquer, é extremamente benéfica, uma vez que reduz em cerca de 50% (em média) as emissões de CO₂, economiza energia, preserva as paisagens naturais, além de conservar os recursos minerais (ABM, 2008).

2.4. ESCÓRIAS DE ACIARIA

As escórias de aciaria são coprodutos siderúrgicos formados em fornos elétricos ou em conversores a oxigênio através da conversão do ferro gusa e sucata de aço, sendo constituída por diversos elementos químicos que não interessam estarem presentes na produção do aço. As escórias são compostos formados a partir de adições de CaO (Óxido de Cálcio ou Cal livre), de uma fonte de MgO (Óxido de Magnésio ou Periclásio) e de CaF₂ (Fluorita), cuja finalidade é absorver os óxidos resultantes da reação do oxigênio insuflado no processo com as impurezas (P, S, Mn, C, etc.). A escória de aciaria é rica em CaO, MgO e SiO₂ (Dióxido de Silício), tornando-se um material com características expansivas (Castelo Branco, 2004). Dependendo dos processos utilizados na fabricação do aço e do tipo de usina siderúrgica, a escória de aciaria pode ser classificada como:

- Escória de aciaria LD: coproduto originado nas usinas integradas que utilizam conversor a oxigênio tipo LD ou BOF; geradas a partir das reações de oxidação dos elementos de carbono, fósforo e silício resultantes da injeção de oxigênio no aço fundido;
- Escória oxidante de aciaria elétrica: coproduto originado nas usinas integradas e semi-integradas que utilizam fornos a arco elétrico (EAF) obtidas pelas adições de grafite, carbono e oxigênio na carga de sucata metálica fundida. Este processo gera em torno de 80% do total das escórias de aciaria elétrica, oxidante e redutora, produzida (Resende, 2010);
- Escória redutora de aciaria elétrica: Este tipo de escória é originado na etapa secundária do refino realizado no forno-panela, sendo formada apenas pelo processo EAF. São geradas por adições de elementos de liga juntamente com o óxido de cálcio (CaO) e a

fluorita (CaF_2) na escória oxidada, visando a dessulfuração do aço fundido. Este tipo de escória é constituída predominantemente por cal e possui instabilidade dimensional durante o resfriamento, o que a torna bastante pulverulenta dificultando-se seu manuseio; por estas características diferentes este tipo de escórias cuja geração é da ordem de 10 a 40 quilogramas por tonelada de aço, não devem ser misturadas com as outras escórias de aciaria (ABM, 2008).

A composição química e mineralógica das escórias de aciaria possui uma elevada variação, em função da matéria-prima e do processo de produção empregado (Machado, 2000). Na Tabela 2.1 é apresentado um comparativo das diferenças na composição química das escórias de aciaria segundo o país de produção, encontrando diferenças significativas.

Tabela 2.1 – Comparativo dos percentuais médios dos principais compostos químicos da escória de aciaria no Brasil, Japão e Alemanha (IBS, 1998 *Apud.* Resende, 2010)

ELEMENTO QUÍMICO (%)	PAÍS		
	BRASIL	JAPÃO	ALEMANHA
Óxido de cálcio (CaO)	23 – 46	42 – 44	48 – 54
Óxido de magnésio (MgO)	5 – 13	3 – 7	1 – 4
Dióxido de silício (SiO_2)	11 – 15	11 – 14	11 – 18
Óxido de alumínio (Al_2O_3)	0,8 – 4	1 – 2	1 – 4
Ferro total (Fe)	14 – 22	18 – 21	14 – 19

Na Figura 2.3 está apresentado um esquema simplificado do processo de geração de escórias de aciaria, na etapa de refino nas usinas integradas e semi-integradas.

As siderúrgicas que utilizam o forno de arco elétrico, assim como as que utilizam o conversor a oxigênio, produzem em torno de 100 a 150 kg de escória de aciaria por tonelada de aço produzido. A variação da quantidade de coproduto gerado depende do processo de geração, das matérias primas utilizadas e das diferentes especificações dos aços produzidos em cada usina. No processo LD são gerados aproximadamente 110 kg de escória de aciaria por tonelada de aço (Geyer, 2001; Sousa, 2007).

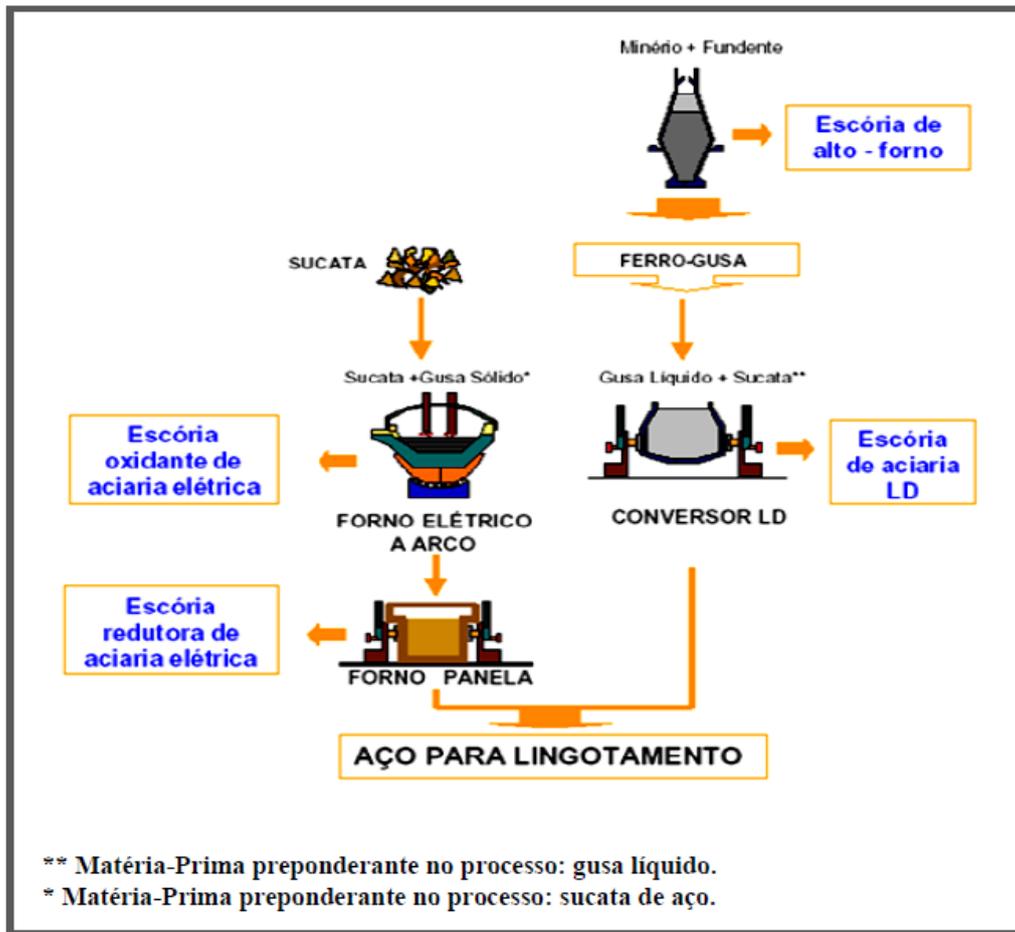


Figura 2.3 – Esquema simplificado da geração de escórias de aciaria em usinas integradas com conversor LD e usinas semi-integradas com forno elétrico a arco e forno panela (Masuero *et al*, 2004 *apud*. Resende 2010).

As características físicas dos grãos das escórias que se referem à textura superficial, granulometria e densidade variam de acordo com o processo de resfriamento sofrido pelas mesmas (Rohde, 2002). No processo lento de esfriamento ao ar ocorre a solidificação dos grãos em decorrência da cristalização dos óxidos que compõe a escória. Esta condição tem como resultado escórias de superfície rugosa e estrutura vesicular. Pelo processo de resfriamento rápido, com utilização de vapor ou ar, formam-se escórias porosas e de baixa densidade devido à expansão sofrida pelos grãos. No processo de resfriamento brusco, com jato d'água seguido de resfriamento em tanque com água, forma-se uma escória granular vítrea com estrutura porosa e textura áspera (Castelo Branco, 2004; Rohde 2002).

Após o processo de resfriamento, a escória é britada, sendo então separada em diferentes faixas granulométricas (bitolas), por meio de correias rolantes. Durante esta separação o resíduo passa por um eletroímã que tem a função de separar a escória rica em ferro, a qual poderá voltar para o forno. Esta escória é conhecida como sucata recuperada (Geyer, 2001).

2.4.1. EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA

As características expansivas na escória de aciaria são devidas principalmente à hidratação do Óxido de Cálcio (CaO) se transformado em hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), cujo cristal tem maior volume, e do Óxido de Magnésio (MgO), que forma hidróxido de magnésio ou brucita (Mg(OH)₂) e o seu cristal pode aumentar de volume em até 120% em relação ao volume inicial. Também influenciam na expansibilidade os processos de mudança nas formas alotrópicas do silicato dicálcico (C₂S) e de corrosão e de oxidação do ferro metálico residual (Machado, 2000). Na Tabela 2.2 apresentam-se os parâmetros que, de acordo Machado (2000), controlam a expansibilidade nas escórias.

Tabela 2.2 - Parâmetros que influenciam na expansão das escórias de aciaria (Machado, 2000).

ESPÉCIES QUÍMICAS	PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA EXPANSÃO	MECANISMO
CaO e MgO	<ul style="list-style-type: none">➤ Teor da espécie no estado livre➤ Umidade➤ Temperatura➤ Teor de CO₂➤ Tamanho dos grãos de escória	Hidratação
FeO	<ul style="list-style-type: none">➤ Teor de FeO➤ Umidade➤ Tempo de exposição ao ar➤ Teor de oxigênio no resfriamento➤ Tamanho dos grãos de escória	Oxidação
C ₂ S	<ul style="list-style-type: none">➤ Velocidade de resfriamento➤ Impurezas iônicas➤ Temperatura de resfriamento➤ Basicidade das escórias	Transformação alotrópica

As escórias de aciaria, devido a sua expansibilidade ou instabilidade volumétrica, já tiveram seu emprego bastante limitado como material alternativo de construção civil. Filev (2013), por exemplo, citou que no Japão, desde 1979, a escória já vinha sendo utilizada em concreto asfáltico, tendo sido criada uma norma que prevê a produção de escórias para pavimentação com base em diferentes formas de estabilização e com granulometrias específicas para viabilizar o emprego em camadas de pavimentos, misturas asfálticas, entre outros. Esta norma, denominada A 5015 (JIS, 1992), prevê que caso a expansibilidade da escória seja inferior a 2% aos 10 dias (240 horas) de ensaio, não existe perda na resistência e/ou danos no pavimento.

Emery (1978) e Rubio & Carretero (1991) citaram que o óxido de cálcio livre e o óxido de magnésio livre, nas escórias de aciaria, hidratam-se mais rapidamente e mais lentamente, respectivamente, sendo responsáveis pela instabilidade volumétrica da escória. O óxido de cálcio livre hidrata em poucas semanas, sendo responsável pela expansão inicial das escórias.

O óxido de magnésio, por apresentar reações mais lentas, é o responsável pela expansão a longo prazo (Masuero *et al.*, 2000).

O emprego de escórias não tratadas para controle de expansão, como agregado alternativo no pavimento, geram tensões internas que podem provocar trincas e fracionamento do material, conforme pode ser visto na Figura 2.4. Por isto a importância de um adequado controle da expansibilidade deste materiais para serem empregados em pavimentação rodoviária.



Figura 2.4 - Expansão causada pela escória de aciaria utilizada no pavimento (Raposo, 2005).

2.4.2. CONTROLE DA EXPANSIBILIDADE NA ESCÓRIA DE ACIARIA

Tendo conhecimento dos mecanismos, espécies químicas e dos parâmetros que influenciam a expansão das escórias de aciaria (Tabela 2.2), pode-se determinar os métodos de controle do parâmetro em questão.

No caso da expansão devida à hidratação do CaO e MgO, a melhor opção é antecipar este processo de forma controlada. Neste sentido, realiza-se um processo de hidratação do material denominado cura, podendo ser feito a céu aberto ou não, mantendo o material úmido. O tempo de estocagem vai depender do grau de exposição do material à umidade, à temperatura e do teor de CO₂ (Machado, 2000). Quando a cura é feita em pilhas, deve ser garantida a umidificação e a ação do CO₂ do ambiente em todo o material, logo estas pilhas têm que possuir alturas reduzidas (1,5 a 2,0 metros). A norma japonesa A 5015 (JIS, 1992) prevê um tempo de cura variando de 3 a 6 meses.

Rodhe (2002) fez ensaios para determinação do potencial expansivo de escória de aciaria pura, segundo a norma D 4792 (ASTM, 1995). Segundo esse autor 4 meses foi o tempo de estocagem mínimo para a redução do potencial expansivo até os limites aceitáveis de máximo de 0,5% de expansão aos 7 dias de ensaio.

Parente *et al* (2003), realizaram ensaio de determinação do potencial expansivo de uma escória de aciaria submetida ao processo de cura a céu aberto por três meses, segundo os procedimentos da norma ME113 (DNIT, 2009). Os resultados obtidos foram os seguintes: 0,34% de expansão volumétrica do material após 7 dias submerso e um total de 0,61% de expansão volumétrica do material nos 14 dias de ensaio. Como a norma D2940 (ASTM, 1992) estabelece o limite máximo de 0,5% de expansão aos 7 dias, pode-se concluir que o tempo de cura utilizado na pesquisa em questão foi adequado.

Raposo (2005) desenvolveu uma pesquisa experimental com base na compactação e expansão de escória de aciaria LD para uso em pavimentação, utilizando três tipos de amostras:

- Não tratada: Estocagem de 2 meses ao ar no pátio da usina siderúrgica;
- Tratada 1: Estocagem de 2 meses e meio ao ar e mais um mês de cura por molhagem e aeração (revolvimento) do material (Figura 2.5 e Figura 2.6);
- Tratada 2: Amostra coletada após terem passado quatro meses e meio de estocagem ao ar da amostra *Tratada 1* e um período adicional de 2 meses de cura por molhagem e aeração.

Estas amostras foram tomadas das pilas de estocagem da usina siderúrgica seguindo os métodos das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas: NM26 - Amostragem de agregados (NBR, 2001) e 10007 - Amostragem de resíduos sólidos (NBR, 2004), já que não existe norma específica para amostragem da escória de aciaria.



Figura 2.5 – Molhagem da escória de aciaria LD dentro do processo de cura (Raposo, 2005).



Figura 2.6 – Aeração da escória de aciaria LD mediante revolvimento mecânico dentro do processo de cura (Raposo, 2005).

Foi determinada a expansão da escória de aciaria pelos métodos A5015 (JIS, 1992), D4792 (ASTM, 2000) e PTM130 (PTM, 1978), observando-se que as três amostras estavam acima dos limites de expansão dos métodos A5015 (JIS, 1992), 2% de expansão máxima, e D4792 (ASTM, 2000), 0,5% de expansão máxima. Além disso, das três amostras estudadas por Raposo (2005), somente a amostra *Tratada 2* atendeu ao limite de expansão de 3% estabelecido pelas normas PRO263 (DNIT, 1994) e EM262 (DNIT, 1994), determinada de acordo com o método PTM130 (PTM, 1978). Ressalta-se a importância do processo de cura nas escórias de aciaria para seu emprego em obras de pavimentação rodoviária.

Já a expansão do ferro metálico (Fe^0) basicamente acontece pela exposição do material ao oxigênio do ar e à umidade, causando a geração de produtos de corrosão, como hidróxido

ferroso $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ou o hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (Sienko, 1968 *apud* Machado, 2000). Por esse motivo, a expansão pode ser controlada também no processo de cura. O controle da expansão pelas transformações alotrópicas do C_2S ainda não é claro, no entanto recomenda-se que o processo de resfriamento seja feito de forma rápida ou brusca através de jato d'água, impedindo a nucleação dos cristais e dificultando estas transformações.

Na Tabela 2.3 estão apresentados, de maneira simplificada, outros tipos de tratamentos para o controle da expansibilidade das escórias de aciaria, a descrição e o momento de atuação destes tratamentos, assim como as vantagens e desvantagens dos métodos em questão. A eficiência relativa (ER) é mostrada na tabela, porém alguns tratamentos não têm indicado a eficiência do processo (NP), sendo necessária a confirmação da efetividade dos tratamentos sugeridos.

Tabela 2.3 – Resumo dos tratamentos para controle da expansibilidade das escórias de aciaria. (Silva, 2001 *apud* Fernandes, 2010).

Tratamento	Descrição	Momento de Atuação	Vantagens	Desvantagens	ER
Aumento da dissolução dos fundentes	Redução da granulometria da cal/dolomita	Antes da geração	Baixo custo	NP	NP
Alteração do agente escorificante	Utilização de um material sintético como fundente	Antes da geração	Aumenta a atividade hidráulica da escória	Não altera o teor de MgO Livre	Baixa
Adição de sílica e oxigênio	Adição de sílica e oxigênio à escória líquida com uma fonte de calor	Após a geração com a escória no estado líquido	Redução dos teores de CaO e MgO livre para abaixo de 1%	Alto custo	Média
Granulação com água	Resfriamento brusco com água	Após a geração com a escória no estado líquido	Aumenta a atividade hidráulica da escória	Alteração da granulometria; necessária secagem; problemas ambientais; friabilidade	Alta
Granulação a seco	Resfriamento brusco a seco	Após a geração com a escória no estado líquido	Aumenta a atividade hidráulica da escória; mais simples que a granulação com água	Alteração da granulometria; friabilidade	Alta
Cura ao tempo	Exposição ao tempo - ocasionalmente com molhagem	Após a geração com a escória no estado sólido	Baixo custo e simplicidade	Demorado, falta de definição metodológica; heterogeneidade	Variável
Cura a vapor sob pressão atmosférica	Injeção de vapor à escória sem pressão	Após a geração com a escória no estado sólido	Redução considerável dos teores de CaO e MgO livres	Alto custo, principalmente se não há rede de vapor disponível	Alta
Cura a vapor sob pressão atmosférica	Injeção de vapor à escória em autoclave	Após a geração com a escória no estado sólido	Redução considerável dos teores de CaO e MgO livres	Alto custo	Muito Alta

2.4.3. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE

Os métodos de avaliação de expansibilidade, tradicionalmente empregados em escórias siderúrgicas, são adaptados para atender aos requisitos de compactidade e de estabilidade volumétrica em matérias de pavimentação, dada sua principal utilização como agregado para base e sub-base de rodovias (Rohde, 2002). Os métodos de ensaio mais usados para medição da expansão de escórias de aciaria, para uso em base e sub-base de pavimentos, são os seguintes: A5015 (JIS, 1992), D4792 (ASTM, 2000) e 130 (PTM, 1978). Os três ensaios são conceitualmente semelhantes. Utilizam-se corpos de prova cilíndricos compactados na energia especificada em cada ensaio e as medidas de expansão são feitas com o material em imersão em água aquecida e expressas em função do aumento de altura do corpo de prova. Alguns detalhes podem ser ressaltados:

- O Departamento de Transportes da Pensilvânia desenvolveu o método de ensaio PTM 130 (PTM, 1978), o qual foi adaptado no Brasil pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais, no método de ensaio DMA-1 (DER-MG, 1982) e atualizada na norma ME113 (DNIT, 2009). Este ensaio consiste na medição volumétrica, durante 14 dias, de três corpos de prova de escória, compactados na energia modificada do ensaio de Proctor, sendo um no ramo seco, outro no ramo úmido e o terceiro na umidade ótima ou próxima. As amostras são mantidas a temperatura constante de 160 ± 5 °F (71 ± 3 °C) durante todo o ensaio. Nos primeiros 7 dias os corpos de prova são submetidos à imersão em água e, nos 7 restantes, os mesmos são submetidos às condições de saturação (não submersa), sendo feitas leituras cada 24 horas nas duas condições. O limite de expansão deste método é de 3,0% aos 14 dias de ensaio;
- A norma japonesa A 5015 (JIS, 1992) especifica um método de ensaio e critérios de expansão para escórias de aciaria. Os corpos-de-prova compactados com a energia Proctor Modificado são submersos em um banho térmico com água e sujeitos a ciclos de aquecimento. Os ciclos consistem em 6 horas de aquecimento, à temperatura de 80°C, seguidos de 18 horas sem aquecimento, a cada 24 horas, repetindo-se este processo por 10 dias. A expansão, assim como no método PTM 130 (PTM, 1978), é medida diariamente através de um extensômetro instalado no topo de cada corpo-de-prova, sendo expressa em porcentagem a variação da altura do corpo-de-prova após 10 dias de ensaio. O limite de expansão deste método é de 2,0% aos 10 dias de ensaio;

- No método de ensaio de expansão D 4792 - *Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions* (ASTM, 2000), os corpos de prova cilíndricos compactados na energia Proctor normal são submersos em um banho térmico com água a temperatura de $70 \pm 2^\circ\text{C}$. Instala-se um extensômetro no topo de cada corpo-de-prova para acompanhamento da expansão vertical. A partir da primeira leitura, são feitas leituras diárias, no mesmo horário, durante pelo menos sete dias. Se a taxa de expansão não apresentar uma pronunciada redução após esse período, o ensaio pode continuar para obtenção de dados adicionais. Por outro lado, a norma D 2940 (ASTM, 2003), que trata da utilização de escórias de aciaria em bases e sub-bases, estabelece uma expansão máxima de 0,5%, medida aos 7 dias de ensaio.

Grande dispersão dos resultados de expansão de escória de aciaria pode ser encontrada devido às diferenças nos procedimentos apresentados pelos métodos de ensaio e pela heterogeneidade do material (Rodhe, 2002).

Raposo (2005) também realizou um estudo visando a comparação dos três métodos de avaliação da expansão em amostras de escória de aciaria com e sem tratamento prévio de estabilização volumétrica, observando que todas as amostras superaram o limite de 0,5% do método D 4792 (ASTM, 2000) e de 2,0% do método A5015 (JIS, 1992). Só as amostras tratadas atenderam o limite de 3% de expansão estabelecido pelas normas específicas de escória de aciaria PRO 263 (DNER, 1994) e EM 262 (DNER, 1994). Além disso, esse autor estudou a influência da energia de compactação no ensaio de expansão, observando que a energia do Proctor modificado provocou menores valores de expansão pelo método PTM130 (PTM, 1978) em relação à energia do Proctor normal na amostra não tratada da escória de aciaria LD do estudo.

2.5. UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA NA PAVIMENTAÇÃO

Embora o uso generalizado de escória em muitas aplicações atuais tenha sido um desenvolvimento relativamente recente, o próprio material é tão antigo quanto o processo de fundição que o produz. Já em 1589, os alemães estavam fazendo balas de canhão com a escória de aço. Os registros disponíveis indicam que as escórias siderúrgicas foram utilizadas para trabalhos de alvenaria na Europa do século 18. A história de uso de escória na construção de estradas remonta ao tempo do Império Romano, cerca de 2000 anos atrás, quando escória triturada das forjas de produção de ferro em bruto daquela época eram utilizadas na construção

da camada de base. Estradas feitas a partir de escória foram construídas pela primeira vez na Inglaterra em 1813 e, apenas 17 anos mais tarde, a primeira estrada com uso de escória foi construída nos Estados Unidos. Até o ano de 1880, blocos de escória eram usados de modo geral na pavimentação de ruas, tanto na Europa quanto nos Estados Unidos, sendo que neste último a grande aplicação da escória, por muito tempo, foi como lastro ferroviário (NSA, 2013). No Brasil, o uso da escória de aciaria e de alto-forno em pavimentação também não é recente, havendo trechos executados há mais de 20 anos (Rohde, 2002).

Na década de 80 já existiam no país pesquisas sobre o uso de escórias granuladas de alto-forno e escórias de aciaria como agregados para pavimentação (Campos, 1987; *apud* Balbo, 2007), sendo as mesmas em alguns casos utilizadas como materiais granulares em base, sub-base e como agregados em revestimento asfáltico. No entanto, enfatiza-se que devem ser adotadas medidas de controle em relação à expansibilidade do material e às suas características físicas, químicas e mecânicas para a aplicação na pavimentação rodoviária.

Parente *et al.*, (2003), fizeram ensaios de determinação do potencial expansivo da escória de aciaria pelo método PTM130 (PTM, 1978) obtendo aos 7 dias de ensaio uma expansão de 0,34% e no final do ensaio após 14 dias uma expansão volumétrica de 0,61%, tendo que o material está dentro dos limites dos métodos já referidos. Os autores também estudaram misturas de solo-escória e solo-brita comparando os resultados de ensaios de compactação, índice de suporte de Califórnia (ISC) e de módulo de resiliência obtendo que as misturas solo-escória apresentaram maiores valores de massa específica seca máxima e menores valores de umidade ótima, quando comparadas com as misturas solo-brita e o solo sem adição de agregado. O valor de ISC para a mistura solo-escória é, em média, 3 vezes maior que o do solo puro e, em média, o dobro dos valores de ISC das misturas solo-brita. Em quanto aos ensaios de módulo de resiliência as misturas solo-escória apresentaram, considerando qualquer nível de tensão desvio, maiores módulos quando comparados com as misturas solo-brita e solo sem agregado. Os autores justificam este comportamento pelo fato da porosidade da escória proporcionar maior intertravamento na mistura. O efeito da tensão confinante no valor do módulo de resiliência em todos os materiais é pequeno se comparado com o efeito da tensão desvio. Observou-se também que os módulos de resiliência decrescem com o aumento da tensão desvio em todas as misturas analisadas (Figura 2.7).

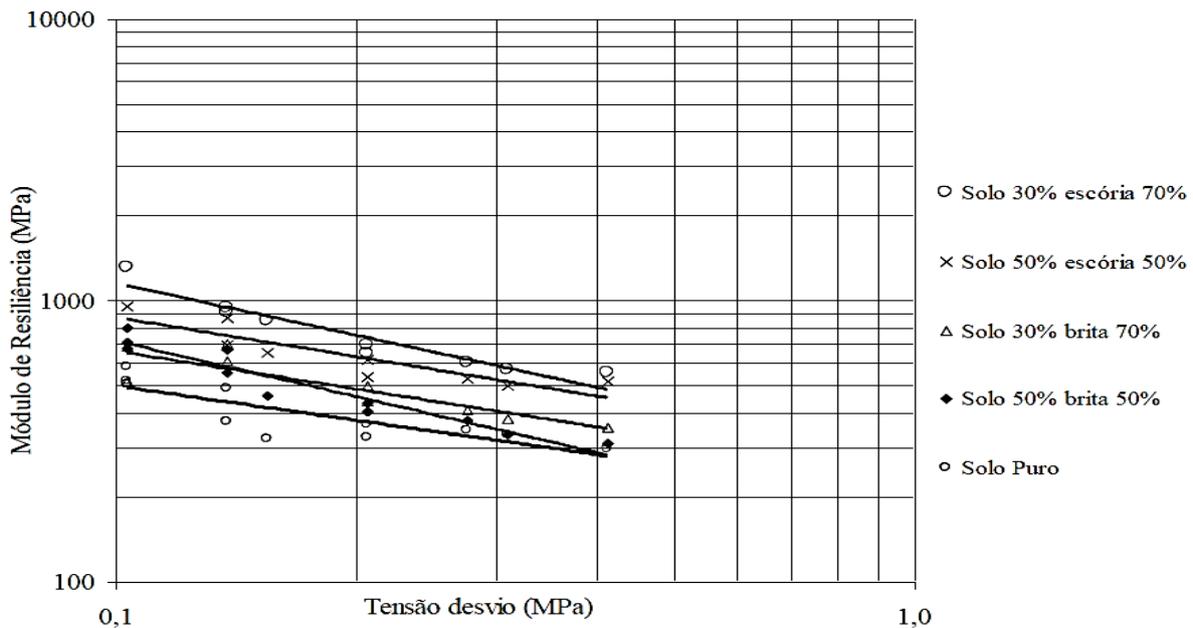


Figura 2.7 – Resultados dos ensaios de módulos de resiliência para misturas solo-escória, solo-brita e solo puro (Parente *et al.*, 2003)

Sob o aspecto econômico, o emprego deste agregado siderúrgico é vantajoso uma vez que seu preço de aquisição é 4 vezes menor que o do agregado oriundo do desmonte de rocha viva (Parente *et al.*, 2003), mas também deve-se levar em conta o custo de transporte.

Alvarenga (2001) analisou e comparou as propriedades resilientes e os custos de pavimentos flexíveis utilizando escória de aciaria como base. O autor utilizou o método de dimensionamento mecanicista baseado no módulo resiliente e concluiu que a escória de aciaria estudada mostrou-se adequada para o uso como camada de base. O módulo de resiliência da escória de aciaria foi comparado com o de uma brita de pedra, concluindo-se que os módulos foram muito parecidos. Observou-se também que o módulo de resiliência da escória de aciaria era pouco sensível à variação de umidade. Para a região investigada e em empreendimentos realizados até 120 km de distância do centro gerador de escória de aciaria, este material, além de atender às prescrições de ordem técnica, mostrou-se economicamente vantajoso.

Rodhe (2002) executou ensaios de compactação com energia do Proctor modificado para amostras de escória de aciaria EAF com diferentes tempos de estocagem (4, 5 e 6 meses), ela obteve curvas de formatos muito “irregulares” e valores de CBR inferiores aos esperados, por isto resolveu corrigir granulometricamente a escória de aciaria EAF para que se enquadrasse na faixa C do DNIT. A seguir, executou novos ensaios de compactação com energia do Proctor modificado na escória granulometricamente corrigida (EGC) obtendo as curvas de compactação apresentadas na Figura 2.8.

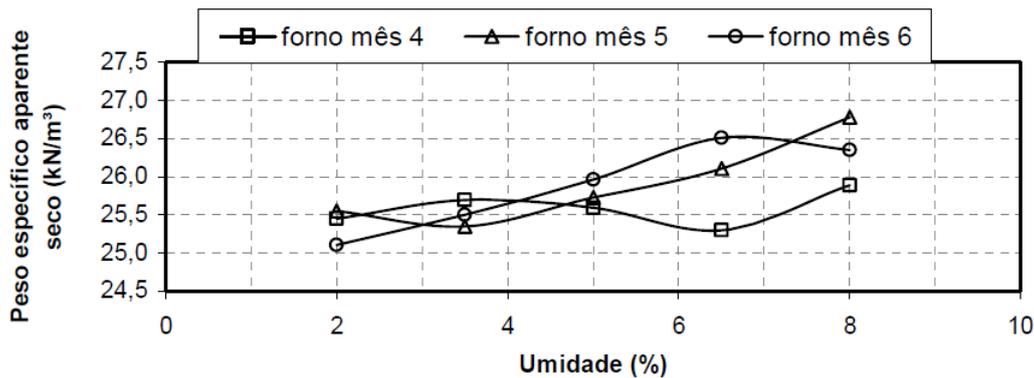


Figura 2.8 – Curvas de compactação da EGC com tempo de estocagem de 4, 5 e 6 meses (Rodhe, 2002)

As curvas de compactação obtidas por Rodhe (2002) não apresentam um pico definido impossibilitando a determinação do peso específico aparente seco máximo e o teor de umidade ótimo de compactação. A autora para definir a umidade de moldagem, optou por seguir o critério de trabalhabilidade do material, sendo a umidade definida como a máxima umidade possível sem causar a drenagem de água pelo molde e perda de material fino. Essa umidade foi de $5 \pm 0,2\%$ para todas as amostras.

Já no 2003, Rodhe *et al.* avaliaram a utilização de escória de aciaria como material constituinte de bases e de sub-bases em pavimentos, obtendo valores de Índice de Suporte Califórnia (ISC) da ordem de 200%, cerca de duas vezes o valor de uma brita comum. Os autores também obtiveram que para qualquer nível de tensão confinante a escória de aciaria granulometricamente corrigida (EGC) apresenta módulo de resiliência superior ao de materiais granulares tradicionais como basalto, saibro e granito (Figura 2.9). Por exemplo, para uma tensão confinante de 1000 kPa foi obtido um módulo de resiliência de 478 MPa para a EGC, de 335 MPa para a brita de basalto e de 275 MPa para a brita de granito.

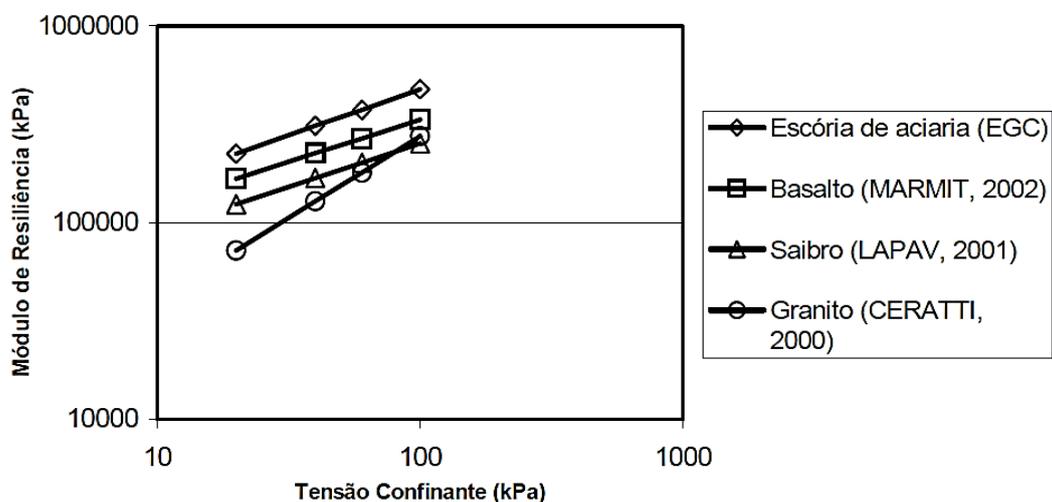


Figura 2.9 – Módulos de resiliência da EGC e de materiais granulares convencionais (Rodhe *et al.*, 2003)

Barbosa (2013) fez ensaios de compactação e índice de suporte de Califórnia pelo método ME049 (DNER, 1994) em cinco amostras de escória de aciaria produzidas e tratadas por diferentes usinas siderúrgicas do Brasil obtendo os resultados apresentados na tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Resultados do ensaio de índice de Suporte de Califórnia (Barbosa, 2013)

Amostra	Umidade Ótima (%)	ISC (%)
Siderúrgica 01	9,0	227,9
Siderúrgica 02	5,6	106,4
Siderúrgica 03	5,7	108,8
Siderúrgica 04	6,0	135,8
Siderúrgica 05	8,5	125,3

Os resultados de ISC obtidos por Barbosa (2013) para as cinco amostras estudadas são maiores de 100% atingindo um máximo de 227,9%, a autora ressalta que as escórias de aciaria são materiais excelentes para serem compactadas em pista, apresentando nenhuma ou baixíssima dificuldade construtiva.

Mymrin (2007) estudou as propriedades auto ligantes de diferentes tipos de escória de aciaria, encontrando que em função do processo de hidratação da escória siderúrgica, ocorre uma dissolução parcial da parte sólida, formando um sistema de partículas coloidal. Com o aumento da concentração de colóides nos poros, ocorre à formação de um gel amorfo. Este gel se solidifica devido aos vários estágios de sinérese (envelhecimento de gel). Após 28 dias de hidratação, este material atinge resistências à compressão da ordem de 1,1 a 3,9 MPa. Em 90 dias essa resistência à compressão pode alcançar valores de 5 a 32 MPa. Com um ano, a resistência deste material aumenta até 40 MPa. Estes novos materiais têm uma alta resistência à imersão e ao congelamento. Estradas urbanas executadas com estes materiais mostraram alto desempenho, por mais de 25 anos, em diferentes regiões da Rússia, incluindo a região norte e a Sibéria.

2.5.1. NORMATIVA BRASILEIRA

No Brasil, o DNIT também desenvolveu normas para utilização da escória em pavimento rodoviário. A norma EM 260 (DNER, 1994) descreve como a escória de alto-forno deve ser empregada nas camadas do pavimento, assim como a norma EM 262 (DNER, 1994), que fixa as condições para aplicação da escória de aciaria em pavimentos rodoviários, devendo-se obedecer aos seguintes limites:

- ✓ Máximo de 3,0% de expansão pelo método PTM 130 (PTM, 1978);

- ✓ Estar isentas de impurezas orgânicas, contaminação com escórias de alto forno, solos e outros materiais;
- ✓ Composição granulométrica: 40% na faixa de até 1,27 cm (1/2”) e 60% na faixa de 1,27cm a 5,08 cm (2”) de abertura nominal, devendo atender a granulometria de projeto;
- ✓ Absorção de água: 1,0% a 2,0% em peso;
- ✓ Peso específico: 30 a 35 kN/m³;
- ✓ Massa unitária: 1,5 a 1,7 kg/cm³;
- ✓ Desgaste por abrasão Los Angeles: no máximo igual a 25,0% para sub-base, base e revestimento;
- ✓ Durabilidade ao sulfato de sódio: 0,0% a 5,0%, em 5 ciclos.

Para a escória ser utilizada como agregado na construção civil é necessário seu tratamento em relação à expansão e também a britagem em tamanhos adequados. Este procedimento tem sido atualmente adotado pelas indústrias siderúrgicas, produzindo de forma direta um material com as características adequadas para sua utilização em obras rodoviárias, adquirindo este material o nome de agregado siderúrgico.

No Brasil, por exemplo, inicialmente foi desenvolvido pela Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST) um produto denominado ACERITA[®] (denominação comercial da companhia para o agregado siderúrgico), que é a escória de aciaria, já tratada, com baixa de expansão, granulometria na faixa C do DNIT, com densidade do material solto de 1,75 t/m³, alta resistência à abrasão e ausência de material orgânico. Este produto foi aplicado em diferentes obras rodoviárias com resultados bons em termos de qualidade, economia e sustentabilidade ambiental. Algumas normas foram desenvolvidas para o emprego específico deste material na pavimentação rodoviária, como:

- DNIT 114 ES (DNIT, 2009) – Pavimentação rodoviária – Sub-base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria - ACERITA[®] - Especificação de Serviço;
- DNIT 115 ES (DNIT, 2009) – Pavimentação rodoviária – Base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria - ACERITA[®] - Especificação de Serviço.

Atualmente, o DNIT e o Instituto Aço Brasil, subsidiado pela presente e por outras pesquisas paralelas, visam desenvolver novas normativas e revisar as normativas atuais para o uso sem restrição do agregado siderúrgico produzido pelas empresas siderúrgicas associadas com as especificações requeridas pelo setor, tendo como base a norma NBR 16364 (ABNT, 2015):

“Execução de sub-base e base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária — Procedimento”, a qual estabelece os seguintes requisitos específicos:

- O agregado siderúrgico deve apresentar as seguintes características:
 - ✓ O índice de suporte Califórnia (ISC) deve ser igual ou superior a 80 %, com energia de compactação do método C (Proctor modificado), conforme NBR 9895 (ABNT, 1987);
 - ✓ A abrasão “Los Angeles” deve apresentar desgaste inferior a 55 %, admitindo-se valores maiores no caso de ter apresentado desempenho satisfatório em utilização anterior, conforme NBR NM 51 (ABNT, 2001);
 - ✓ A média do potencial de expansão de três corpos de prova deve ser inferior a 3%, conforme o método ME113 (DNIT, 2009);
 - ✓ O módulo de resiliência na umidade ótima deve ser igual ou superior a 90 MPa, para o menor valor de tensão confinante aplicada;
 - ✓ A distribuição granulométrica deve ser conforme a NBR 7181 (ABNT, 1984) e satisfazer a faixa da Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Faixas granulométricas agregado siderúrgico segundo NBR 16364 (ABNT, 2015).

Peneiras	Tamanho de abertura (mm)	% em massa passante	Tolerância da faixa
2”	50,00	100	± 7
1”	25,00	80 – 100	± 7
3/8”	9,500	50 – 85	± 7
Nº 4	4,750	35 – 65	± 5
Nº 10	2,000	20 – 50	± 5
Nº 40	0,425	5 – 30	± 2
Nº 200	0,075	0 – 15	± 2

- A mistura de agregado siderúrgico e solo deve apresentar as seguintes características:
 - ✓ Em solos com características lateríticas, a mistura para base deve apresentar:
 - Limite de liquidez determinado conforme a NBR 6459 (ABNT, 1984), menor ou igual a 40 %;
 - Índice de plasticidade determinado conforme a NBR 7180 (ABNT, 1984), menor ou igual a 15 %;
 - ✓ Em solos que não possuam características lateríticas, a mistura para base deve apresentar:
 - Limite de liquidez determinado conforme a NBR 6459 (ABNT, 1984), menor ou igual a 25 %;

- Índice de plasticidade determinado conforme a NBR 7180 (ABNT, 1984), menor ou igual a 6 %.
- ✓ Em relação ao índice de suporte Califórnia, quando ensaiado de acordo com a NBR 9895 (ABNT, 1987) e em mistura com agregado siderúrgico:
 - Para sub-base: deve ser igual ou superior a 20 % e com expansão inferior ou igual a 1 %;
 - Para base: deve ser igual ou superior a 60 % para um número N inferior ou igual a 5×10^6 e com expansão inferior ou igual a 0,5 %. O índice de suporte Califórnia deve ser igual ou superior a 80 % para um número N maior do que 5×10^6 e com expansão inferior ou igual a 0,5 %.
- ✓ A distribuição granulométrica, para uso em bases, deve se enquadrar na NBR 7181 (ABNT, 1984) e deve satisfazer uma das faixas recomendadas na tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Faixas granulométricas das misturas agregado siderúrgico e solo segundo NBR 16364 (ABNT, 2015).

Tipos	Para $N > 5 \times 10^6$				Para $N < 5 \times 10^6$		Tolerância da faixa
	A	B	C	D	E	F	
	% em massa passante						
2"	100	100	–	–	–	–	± 7
1"	–	75-90	100	100	100	100	± 7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	–	–	± 7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	± 5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	± 5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	± 2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	± 2

Em nota técnica de 2014, o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais (DER-MG) relaciona dados de trechos de rodovias construídas utilizando escórias de aciaria como agregado de estrutura do pavimento, algumas das quais são:

- Rodovia BR381/MG, trecho de 16 km na divisa ES/MG Belo Horizonte. Volume Médio Diário (VMD): 12.000 veículos. Data da obra Junho de 2006. A escória foi utilizada como material granular de sub-base e base com espessura de 30 cm sob revestimento de duas camadas de 5 cm de CBUQ.
- Rodovia LMG/759, trecho entre BR458/MG – Pingo D'água. VMD: 900 veículos. Data da obra: Junho de 2012. A escória foi utilizada como material granular de sub-base e base com espessura de 30 cm, misturada com argila na proporção de 11% sob revestimento de duas camadas de 5 cm de CBUQ. O DER-MG manifesta que o pavimento se apresenta em ótimas condições, sem problema aparente.

- Rodovia LMG/823, trecho entre BR116/MG – São Domingo das Dores. VMD: 500 veículos. Data da obra: Abril de 2007. A escória foi utilizada como material granular de sub-base e base com espessura de 20 cm misturada com argila na proporção de 30% sob revestimento de TSD. O DER-MG manifesta que desde então não foi realizada intervenção no trecho e que a estrutura do pavimento se apresenta com bom comportamento.

Castelo Branco (2004) cita algumas obras rodoviárias nacionais, executadas com a utilização da escória de aciaria como agregado: BR-393 (Volta Redonda – Três Rios), BR-116 (Volta Redonda-Divisa RJ/SP), RJ-157 (Barra Mansa-Divisa RJ/SP), ES-466 (Colatina-Itaimbé), pistas de pouso e decolagem do aeroporto internacional de Vitória –ES (Figura 2.10), duplicação da Rodovia do Sol - ES, acesso ao Terminal de Produtos Siderúrgicos da CST, estradas do município da Serra - ES, estradas rurais do município de Santa Maria de Jetibá – ES e vários pavimentos na região do município de Volta Redonda.



Figura 2.10 - Vista aérea aeroporto de Vitória – ES. Camada de base construída com agregado siderúrgico. (WIKIPÉDIA, 2015)

2.6. CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA

O potencial risco ao meio ambiente e à saúde humana, resultante do emprego de escória de aciaria em obras de engenharia, tem sido tema de pesquisa para vários autores e objeto de regulamentação ambiental. Nos Estados Unidos, desde 1920, a Associação Nacional da Escória (NSA) apresentam relatórios técnicos que mostram as escórias de aciaria como não perigosas.

Em 1980, nesse mesmo país, a Agência de Proteção Ambiental (EPA) propôs um regulamento para resíduos perigosos, que originalmente continha três itens que englobariam as escórias neste regulamento. Estas foram: (1) calor retido que pode gerar incêndios, (2) limite de pH = 12 em lixiviados que estariam classificados como "corrosivos" e (3) classificação como "Reativo", que poderia gerar gases tóxicos quando exposto a ácido ou condições alcalinas. Tanto o Instituto Americano do Ferro e o Aço (AISI) quanto a Associação Nacional da Escória (NSA) apresentaram observações formais à EPA, opondo-se a estas disposições com base no fato de as escórias não serem perigosas e, no entanto, poderem ser classificadas nessa categoria por definições ou requisitos impróprios. Todas estas considerações foram consideradas pela EPA, que procedeu mudanças na regulamentação final, publicada em maio de 1980, baseando-se em estudos de investigação e em ensaios feitos nas escórias, classificando-as como “**Resíduos Não Perigosos**” nos métodos e padrões de teste existentes.

No Brasil, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), mediante resolução 313 (CONAMA, 2002), realizou um inventário dos resíduos sólidos industriais e expediu as seguintes normativas (versões atualizadas) para classificação e identificação:

- NBR 10004 (ABNT, 2004) – “Resíduos sólidos, classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde pública, para que estes resíduos possam ter manuseio e destinação adequados”;
- NBR 10005 (ABNT, 2004) – “Lixiviação de resíduos – Procedimento”;
- NBR 10006 (ABNT, 2004) – “Solubilização de resíduos – Procedimento”.

Segundo a norma NBR 10004, os resíduos podem ser classificados como: Perigosos (Classe I) e Não Perigosos (Classe II). Estes últimos também podem ser classificados como Não Inertes (Classe IIA) e Inertes (Classe IIB). Os resíduos classificados como perigosos são todos aqueles resíduos, ou misturas de resíduos, que apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade e, também, aqueles que mesmo não apresentando estas características supracitadas, estiverem codificados pela NBR 10004 (ABNT, 2004), os quais são identificados mediante o ensaio de Lixiviação (NBR 10005 - ABNT, 2004). Os resíduos classificados como não perigosos, mas que se enquadram na classe IIA - não inertes, são aqueles que não se enquadram como classe IIB – inertes, já que possuem constituintes solubilizados em concentrações superiores às estipuladas na norma NBR 10004 (ABNT, 2004) anexo G.

Mancio (2001) avaliou o impacto ambiental causado pela utilização de escória de aciaria, observando que quando submetida ao ensaio de lixiviação nenhum elemento presente na composição química do material foi lixiviado. Entretanto, no ensaio de solubilização, esse autor observou que o teor de fluoreto (F) ultrapassou os limites estabelecidos pela NBR10004 (ABNT, 2004), classificando a escória de aciaria como um resíduo não perigoso, mas também, não inerte.

Raposo (2005) fez ensaios de lixiviação e de solubilização em amostras de escórias de aciaria tipo LD, observando que os elementos analisados (mercúrio, arsênio, cádmio, chumbo, cromo, selênio, prata, bário e fluoreto) no ensaio de lixiviação, apresentaram valores de concentração inferiores aos limites estabelecidos pela NBR10004 (ABNT, 2004), sendo então classificadas como não perigosas.

Barbosa (2013) fez uma caracterização geoambiental das escórias de aciaria de cinco estados brasileiros (siderúrgicas localizadas em Pindamonhangaba – SP, Barão de Cocais – MG, Simões Filho – BA, Sapucaia do Sul – RS e Rio de Janeiro – RJ), mostrando que os ensaios de lixiviação e de solubilização indicaram que as escórias de aciaria geram baixo impacto no meio ambiente quando aplicadas, pois as mesmas são classificadas como resíduos Classe IIA, enquanto os elementos que excederam os limites disponíveis são em sua maioria encontrados em solos convencionais nos estados brasileiros avaliados.

Em 2005 a Fundação Centro Tecnológico de Juiz de Fora – MG (FCT) apresentou o segundo relatório técnico de ensaios de caracterização do agregado siderúrgico, no qual inclui a classificação ambiental para 7 amostras de agregado siderúrgico produzido pelas siderúrgicas brasileiras Aços Villares, Usiminas (amostra de tamanho 1” a 2”), Gerdau Guaira, Usiminas (amostra de tamanho 1,5” a 3”), Companhia Siderúrgica Tubarão (CST), Gerdau Açominas e Companhia Siderúrgica Nacional (CSN); mediante ensaios de lixiviação e solubilização seguindo a normativa ABNT obtendo, em resumo, os resultados apresentados na tabela 2.7, classificando seis das sete amostras como resíduos classe II-A: *Não perigosos, não inertes* e a amostra da siderúrgica Aços Villares na classe II-B: *Não perigoso, não inerte*, segundo a norma NBR10004 (ABNT, 2004).

Tabela 2.7 – Resumo dos elementos químicos encontrados nas amostras de agregado siderúrgico analisadas (FCT, 2005)

Extrato	Aços Villares	Usiminas 1" a 2"	Gerdau Guaira	Usiminas 1,5" a 3"	CST	Gerdau Açominas	CSN
Lixiviado	-	-	-	-	-	-	-
Solubilizado	-	Alumínio	Alumínio, fluoreto	Alumínio	Alumínio	Alumínio, fenóis totais	Alumínio, fenóis totais

Na tabela 2.8 são apresentados os resultados dos ensaios de lixiviação segundo a norma NBR10005 (ABNT, 2004) para as amostras de agregado siderúrgico estudado pelo FTC, tendo que nenhuma delas ultrapassa os limites estabelecidos.

Tabela 2.8 – Resultados ensaios de lixiviação segundo NBR10005 (ABNT, 2004) para as amostras de agregado siderúrgico (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.

Os resultados obtidos pelo FTC nos ensaios de solubilização são apresentados na tabela 2.9, onde se observa que o alumínio é o elemento solubilizado na maioria das amostras e que excede as concentrações limite estabelecidas pela norma NBR10004 (ABNT, 2004) no seu anexo G.

Tabela 2.9 – Resultados ensaios de solubilização segundo NBR10006 (ABNT, 2004) para as amostras de agregado siderúrgico (FCT, 2005)

SOLUBILIZAÇÃO										
Parâmetro	un.	V.M.P.	L.D.	Aços Villares	Usiminas 1" a 2"	Gerlau Guaira	Usiminas 1,5" a 3"	CST	Gerlau 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.

Os resultados dos estudos de caracterização ambiental encontrados na literatura para escórias de aciaria em geral as classificam como matérias não perigosos, mas também não inertes tendo alguns elementos químicos solubilizados, que não implicam risco para o meio ambiente ou saúde humana pela sua utilização.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. MATERIAIS DA PESQUISA

Este capítulo tem por objetivo apresentar os materiais utilizados na pesquisa, sua origem, obtenção e características gerais.

3.1.1. AÇOBRYTA

O agregado siderúrgico açobryta, ou simplesmente açobryta, utilizado neste estudo foi gerado a partir de escória de aciaria produzida em conversor a oxigênio tipo LD, por uma usina siderúrgica, integrante do Instituto Aço Brasil (IABR). Na usina foram realizados todos os processamentos prévios do material. O material foi fornecido diretamente nas dependências da Universidade de Brasília (UnB), sendo uma amostra de aproximadamente 3 toneladas, material este que também será utilizado para outras pesquisas no Programa de Pós-graduação de Geotecnia da UnB (PPG / UnB).



Figura 3.1 – Açobryta recebido para a pesquisa.

3.1.2. SOLO

O solo utilizado na pesquisa foi coletado no dia 29 de maio de 2015, no local onde está projetada a construção do trecho experimental, na BR 381/MG, estaca 780, pelo DNIT (Fig. 3.1.a) e recebido no Laboratório de Geotecnia da UnB, embalado em sacolas plásticas (Figura 3.2 b). Trata-se de um solo fino, cor amarelo avermelhado, cujas propriedades encontram-se especificadas e detalhadas no capítulo de resultados (Capítulo 4).



Figura 3.2 – (a) Coleta de solo por parte do DNIT na BR381/MG. (b) Solo recebido no Laboratório de Geotecnia da UnB para pesquisa.

3.1.3. MISTURAS

Por meio do relatório técnico do DNIT (Processo nº 50600.085467/2012-72) foi predefinida como material de base do trecho experimental projetado, uma mistura de 80% açobrita + 20% solo. Por este motivo, foram definidas e estudadas, junto a mistura predefinida, mais duas misturas, com maior e menor percentual de açobrita na sua composição;

- Mistura 1: 70 % açobrita + 30 % Solo, material este denominado de M7030 no presente documento;
- Mistura 2: 80 % açobrita + 20 % Solo, material este denominado de M8020 no presente documento (Fig. 3.3);
- Mistura 3: 90 % açobrita + 10 % Solo, material este denominado de M9010 no presente documento.



Figura 3.3 – Mistura açobrita e solo M8020.

Os resultados obtidos na presente pesquisa se baseiam nos ensaios de laboratório, a partir dos quais foram determinadas as propriedades e características do açobrita, do solo e das misturas destes dois para sua utilização em camadas de pavimentos rodoviários.

3.2. RELAÇÃO DE ENSAIOS REALIZADOS E DOS MÉTODOS ADOTADOS

Na Tabela 3.1 encontra-se apresentada a relação dos ensaios realizados para caracterização e classificação do açobrita e para determinação de suas características mecânicas referentes à pavimentação, assim como os métodos de ensaio adotados.

Tabela 3.1 - Relação dos ensaios realizados no açobrita e os respectivos métodos de ensaio adotados.

Tipo de Ensaio	Ensaio	Método de Ensaio
Caracterização e classificação	Análise Granulométrica	ME 083 (DNER, 1998)
	Limites de Atterberg ou de consistência	NBR 7180 (ABNT, 1984) e NBR 6459 (ABNT, 1984)
	Densidade Real dos Grãos	D5550 (ASTM, 2014)
	Absorção de Água	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Propriedades mecânicas para pavimentação	Compactação	ME 164 (DNIT, 2013)
	Índice de Suporte de Califórnia	ME 172 (DNIT, 2016)
	Abrasão "Los Angeles"	NBR NM 51 (ABNT, 2001)
	Expansão PTM 130	ME 113 (DNIT, 2013)

Na Tabela 3.2 está apresentada a relação dos ensaios realizados para a caracterização, classificação e determinação de propriedades mecânicas do solo aplicadas a pavimentação, além dos métodos de ensaio adotados.

Tabela 3.2 - Relação dos ensaios realizados no solo e dos respectivos métodos de ensaio adotados.

Tipo de Ensaio	Ensaio	Método de Ensaio
Caracterização e classificação	Análise Granulométrica	ME 051 (DNER, 1994)
	Limites de Atterberg ou de consistência	NBR 7180 (ABNT, 1984) e NBR 6459 (ABNT, 1984)
	Densidade Real dos Grãos	D5550 (ASTM, 2014)
Propriedades mecânicas para pavimentação	Compactação	ME 164 (DNIT, 2013)
	Índice de Suporte de Califórnia	ME 172 (DNIT, 2016)

Finalmente, na Tabela 3.3 é apresentada a relação dos ensaios realizados para caracterização e classificação das misturas de açobrita e solo (M7030, M8020 e M9010) e a determinação das suas características mecânicas para utilização em pavimentação, assim como os métodos de ensaio adotados.

Tabela 3.3 - Relação dos ensaios realizados nas misturas e dos métodos de ensaio adotados.

Tipo de Ensaio	Ensaio	Método de Ensaio
Caracterização e classificação	Análise Granulométrica	ME 083 (DNER, 1998)
	Limites de Atterberg ou de consistência	NBR 7180 (ABNT, 1984) e NBR 6459 (ABNT, 1984)
	Densidade Real dos Grãos	D5550 (ASTM, 2014)
Propriedades mecânicas para pavimentação	Compactação	ME 164 (DNIT, 2013)
	Índice de Suporte de Califórnia	ME 172 (DNIT, 2016)

3.3. MÉTODOS DE ENSAIO

Nesta seção estão descritos os métodos de amostragem dos materiais, além dos procedimentos de preparação das misturas e de execução dos ensaios de laboratório, segundo as especificações adotadas para cada um deles.

3.3.1. AMOSTRAGEM

Para a execução desta pesquisa, inicialmente as amostras de açobrita e de solo foram secas ao ar para que, posteriormente, fosse feita a homogeneização e o quarteamento das mesmas.

Os métodos de preparação de amostras para os ensaios de compactação e de caracterização (teor de umidade, análise granulométrica, determinação dos limites de liquidez e de plasticidade e absorção de água dos grãos retidos na peneira 4,8 mm) foram realizados de acordo a especificação NBR 6457 (ABNT, 1986). As amostras de solo foram desagregadas completamente, eliminando os torrões no almofariz com utilização da mão de gral (Figura 3.4), tomando-se o cuidado para não reduzir o tamanho natural das partículas individuais do solo. No caso do ensaio de compactação, o material ainda foi peneirado na peneira de malha No 4 (4,76 mm).



Figura 3.4 – Preparação de amostras de solo.

3.3.1.1. PREPARAÇÃO DAS MISTURAS

As misturas de açobrita e solo (M7030, M8020 e M9010) foram preparadas a partir das respectivas massas em peso. Assim, por exemplo, para a mistura de 80% açobrita + 20% Solo (M8020), foram misturados 4,8 kg de açobrita e 1,2 kg de solo, como mostra a Figura 3.5.



Figura 3.5 – Dosagem para a preparação da mistura M8020.

3.3.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Foram feitos ensaios de granulometria por peneiramento de acordo com as recomendações do método ME083 (DNER, 1998) para o açobrita e para as misturas. A análise granulométrica do solo foi feita pelo método ME051 (DNER, 1994), incluindo a sedimentação (Figura 3.6).

A classificação do açobrita foi feita com base nos seguintes métodos: Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS, norma D 2487 (ASTM, 1990), e; *Transportation Research Board* – TRB, também conhecido como Sistema AASHTO. O SUCS é um sistema que pode ser aplicado, de forma geral, em todos os tipos de obras de engenharia, enquanto que o sistema AASHTO é específico para obras rodoviárias e de pavimentação. Verificou-se também se a granulometria das amostras de açobrita, solo e misturas estudadas se enquadram nas faixas da norma NBR 16364 (ABNT, 2015) para camadas de pavimentos.



Figura 3.6 – Ensaio de granulometria por sedimentação da fração fina do solo.

3.3.3. LIMITES DE ATTERBERG OU LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Para a determinação dos limites de consistência utilizaram-se os métodos de ensaio das normas NBR 7180 (ABNT, 1984): “Solo - Determinação do limite de Plasticidade” e a NBR 6459 (ABNT, 1984): “Solo - Determinação do limite de Liquidez”. Foi empregado o aparelhagem estipulado pelas referidas normas (Fig. 3.7). Esses procedimentos utilizam apenas a fração do material que passa pela peneira No. 40, cuja abertura é de 0,42 mm. O solo utilizado nestes ensaios foi previamente seco ao ar.



Figura 3.7 – Elementos utilizados nos ensaios dos limites de Atterberg.

3.3.4. DENSIDADE REAL DOS GRÃOS (Gs)

A densidade real dos grãos foi determinada utilizando o equipamento Pentapicnômetro, modelo *Pentapyc™ 5200e*, da fabricante Quantachrome Instruments (Figura 3.8), disponível no Laboratório de Geotecnia da UnB. Este equipamento de última geração utiliza gás para determinação da densidade real e do volume de diferentes materiais. O ensaio foi realizado de acordo com os procedimentos da norma D5550 (ASTM, 2014): *Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer*.

Este modelo de pentapicnômetro pode ser carregado com até cinco amostras (podendo ser diferentes materiais), em cápsulas que segundo o tamanho nominal da amostra podem ser grandes, médias ou pequenas. Assim, as amostras são analisadas automaticamente, sem envolvimento do operador. O resultado é um valor médio de densidade real das diferentes leituras feitas pelo equipamento.



Figura 3.8 – Pentapicnômetro (Pentapyc™ 5200e) do laboratório de Geotecnia da UnB.

Devido à heterogeneidade encontrada no material, foi realizada uma análise da variação na densidade real dos grãos do açobrita, em função do tamanho dos grãos e das diferenças basicamente de porosidade percebidas visualmente em estes. Foram separados grãos passantes na peneira de 9,5 mm de abertura e retidos na peneira de 4,8 mm de abertura, identificados visualmente como “compactos” (Figura 3.9 a) e “porosos” (Figura 3.9 b), sendo então determinada no Pentapicnômetro sua densidade real como a média de três análises.



Figura 3.9 – Análise de variação na densidade real dos grãos de aço brita. (a) Grãos de açobrita compactos (b) Grãos de açobrita porosos.

Foi determinada também a densidade real do material passante na peneira de 4,8 mm de abertura e retido na peneira de 2,0 mm de abertura, além do material passante na peneira de 2,0 mm de abertura e retido na peneira de 0,074 mm de abertura, visando avaliar a variabilidade desta propriedade pelo tamanho dos grãos.

Foram feitas análises adicionais com misturas aleatórias de grãos de açobrita para determinar um valor de G_s representativo para toda a amostra de açobrita.

3.3.5. RESISTÊNCIA À ABRASÃO *LOS ANGELES*

A abrasão *Los Angeles* foi determinada no Laboratório de Infraestrutura da UnB, de acordo com o procedimento especificado na norma NBR NM 51 (ABNT, 2001). Esse ensaio foi realizado com base na graduação “A” especificada na referida norma, onde o material, seco em estufa, foi pesado em quatro frações com diferentes granulometrias de 1,25 kg cada uma e, posteriormente, colocado juntamente com a carga abrasiva de 12 esferas metálicas, dentro do tambor cilíndrico da máquina *Los Angeles* (Figura 3.10), completando 500 rotações. Logo que o material foi retirado do tambor, o mesmo foi peneirado na malha de 1,7 mm de abertura, lavado e secado na estufa para então ser feita a determinação da porcentagem de perda por abrasão, através da seguinte fórmula:

$$P = \frac{m - m_1}{m} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde:

P = Perda por abrasão (%);

m = massa da amostra seca (g);

m_1 = massa do material retido na peneira com abertura de malha de 1,7 mm (g).



Figura 3.10 – Equipamento de Abrasão Los Angeles disponível no laboratório de infraestrutura da UnB

3.3.6. ABSORÇÃO DE ÁGUA

O ensaio foi realizado para a fração de açobrita retida na peneira de 4,8 mm de abertura (Figura 3.11), determinada de acordo com o procedimento estabelecido na norma NBR NM 53 (ABNT, 2009), o resultado foi definido como a média de três ensaios.



Figura 3.11 – Ensaio determinação da absorção de água do açobrita.

3.3.7. COMPACTAÇÃO

Visando determinar os pesos específicos aparentes secos máximos e os teores de umidade ótimos do açobrita, do solo e das misturas destes dois, foram executados ensaios de compactação, segundo o método ME 164 (DNIT, 2013). Os corpos-de-prova foram moldados

na energia do Proctor Modificado (2700 kJ/m^3), utilizando compactação manual sem reuso e com secagem prévia da amostra até a umidade higroscópica. Para amostra de solo também foi feita uma compactação na energia do Proctor Normal (600 kJ/m^3), com reuso de material, visando ter uma estimativa inicial do teor de umidade ótimo para compactação do solo.

Foi preparada uma amostra de aproximadamente 6 kg de material para a determinação de cada ponto da curva de compactação. Para obtenção do teor de umidade para cada um dos pontos requeridos na construção da curva de compactação, foi feito o cálculo da quantidade de água a adicionar, sendo então o material misturado e posteriormente colocado em câmara úmida por cerca de 24 horas, visando uma hidratação homogênea do material antes do ensaio.

Para o ensaio de compactação e posterior determinação de Índice de Suporte de Califórnia (ISC) utilizou-se um cilindro metálico grande de volume útil igual a $2085 \pm 22 \text{ cm}^3$, além de um disco espaçador com 63,5 mm de altura. A compactações da amostra de material foi feita em cinco camadas, cada uma delas por meio de 12 golpes, no caso da energia normal, e 55 golpes, no caso da energia modificada, de um soquete com peso de 4,5 kg, caindo de uma altura de 45 cm. Tomou-se cuidado para que as espessuras finais das camadas compactadas fossem aproximadamente iguais, garantindo assim que a energia de compactação fosse melhor distribuída. Na Figura 3.12 estão apresentados alguns dos elementos utilizados nos ensaios de compactação.



Figura 3.12 – Elementos utilizados no ensaio de compactação manual.

3.3.8. ÍNDICE DE SUPORTE DE CALIFÓRNIA (ISC)

O Índice de Suporte de Califórnia (ISC) ou *California Bearing Ratio* (CBR) do açobrita, do solo e das misturas foi determinado conforme o método ME172 (DNIT, 2016). O ISC foi determinado para todos os pontos da curva de compactação dos materiais, visando obter as curvas de ISC vs Umidade, enquanto que o ISC adotado para cada material foi o valor correspondente à umidade ótima do ensaio de compactação. Foi também determinada a expansão para os corpos-de-prova compactados de solo, açobrita e misturas, durante um período de 4 dias de imersão em água a temperatura ambiente; este procedimento é o método tradicional para determinar a expansão dos materiais para pavimentação.

Foi utilizada a prensa automática da marca Solotest para ensaios de ISC – Marshall, com célula de carga com capacidade de 5.000 kgf (Figura 3.13).



Figura 3.13 – Ensaio de Índice de Suporte de Califórnia, Laboratório de Geotecnia da UnB.

3.3.9. POTENCIAL DE EXPANSÃO MÉTODO ME113 (DNIT, 2009).

O potencial de expansão do açobrita, além de avaliado na etapa de imersão por 4 dias em água a temperatura ambiente do ensaio de Índice de Suporte de Califórnia, foi avaliado segundo o método descrito pela norma ME113 (DNIT, 2009), dadas as características especiais deste material enquanto expansão. Este método é uma adaptação do método PTM 130 (*Pennsylvania Test Method No. 130: Evaluation of Potential Expansion of Steel Slags*).

Inicialmente, foi feita uma calibração da câmara climatizada marca BASS, Modelo: UCC-400/2006, com controle de temperatura e umidade e de circulação interna de ar, disponível no Laboratório de Geotecnia da UnB, visando determinar sua aplicabilidade ao ensaio proposto. Assim, durante um período de 3 dias, os recipientes metálicos com água que seriam utilizados no ensaio foram colocados dentro da câmara (Figura 3.14). Foram tomadas leituras diárias de temperatura, garantindo que a câmara apresentasse as condições requeridas para a execução do ensaio de expansão.



Figura 3.14 – Processo de calibração da câmara climatizada utilizada no ensaio de expansão.

Na sequência, tendo os resultados prévios da curva de compactação (umidade ótima e peso específico aparente seco máximo) do açobrita, foi feita a moldagem de três corpos-de-prova: um no ramo seco, outro no ramo úmido e o terceiro na umidade ótima. Os corpos de prova foram compactados em 3 camadas de espessura aproximadamente igual, cada uma sendo submetida a 56 golpes do soquete cilíndrico de 4,50 kg de peso, com altura de queda de 45,70 cm e diâmetro da face inferior igual a 5,00 cm, o que corresponde a energia do Proctor modificado. Seguidamente, foi feita a instalação da aparelhagem necessária para acompanhamento da expansão vertical, colocando-se o papel filtro e o prato perfurado com a sobrecarga e, em seguida, o tripé com o extensômetro de precisão 0,01 mm (Figura 3.15). Após essa montagem, os corpos-de-prova foram imersos em água pré-aquecida a 38 °C (Figura 3.16)

e levados à câmara climatizada a 69°C (Figura 3.17), estando dentro das especificações da norma ($71 \pm 3^\circ\text{C}$). A medida inicial foi feita após 30 minutos, permitindo a expansão térmica dos aparelhos de teste. As medidas foram anotadas durante um período de 7 dias, cada dia à mesma hora, tomando-se o cuidado de adicionar água suficiente para que as amostras em teste permanecessem completamente submersas, duas horas antes da leitura do dia. Após o período de 7 dias, a água foi removida, mantendo-se as amostras na estufa à temperatura de $71 \pm 3^\circ\text{C}$ na condição de saturação (não submersa) por mais 7 dias, prosseguindo-se com as medidas diárias. Para garantir a condição de saturação das amostras, foram adicionados, todos os dias, 500 cm^3 de água na parte de cima das amostras. Após as duas semanas de expansão, os corpos-de-prova foram retirados do molde e desmanchados, sendo então possível verificar se houve formação cristalina na superfície das partículas do açobrita.



Figura 3.15 – Corpos-de-prova de açobrita e aparelhagem para determinação da expansão.



Figura 3.16 – Imersão dos corpos-de-prova em água preaquecida a 38°C .



Figura 3.17 – Corpos-de-prova colocados em imersão na câmara climatizada a $71 \pm 3^\circ\text{C}$.

Após o ensaio, foi calculada a porcentagem de expansão volumétrica dividindo-se a diferença entre a leitura do extensômetro após 14 dias e a leitura inicial, pela altura inicial da amostra (Eq. 3.2):

$$\% \text{ Exp.} = \frac{(L_f - L_i)}{H_i} \times 100 \quad (3.2)$$

Onde:

%Exp. = Porcentagem de expansão volumétrica do açobrita (%);

L_f = Leitura do extensômetro no final do ensaio (mm);

L_i = Leitura do extensômetro no início do ensaio (mm);

H_i = 116,4 mm (Altura inicial da amostra).

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados da fase experimental do estudo de aplicabilidade do agregado siderúrgico açobrita como constituinte de camadas de pavimentos rodoviários. Inicialmente, encontram-se apresentados os resultados dos ensaios realizados com o açobrita, seguidos pelos resultados dos ensaios do solo e, finalmente, pelos resultados dos ensaios realizados nas misturas de açobrita e solo.

4.1. AÇOBRITA

A seguir, estão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física e mecânica do açobrita, assim como sua expansão volumétrica determinada pelo método ME113 (DNIT, 2009).

4.1.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Foram realizadas 5 análises granulométricas por peneiramento (G1, G2, G3, G4 e G5) no açobrita recebido no Laboratório de Geotecnia da UnB. Na Figura 4.1 estão apresentadas as curvas granulométricas obtidas para as amostras de açobrita e a faixa granulométrica definida pela norma NBR 16364 (ABNT, 2015).

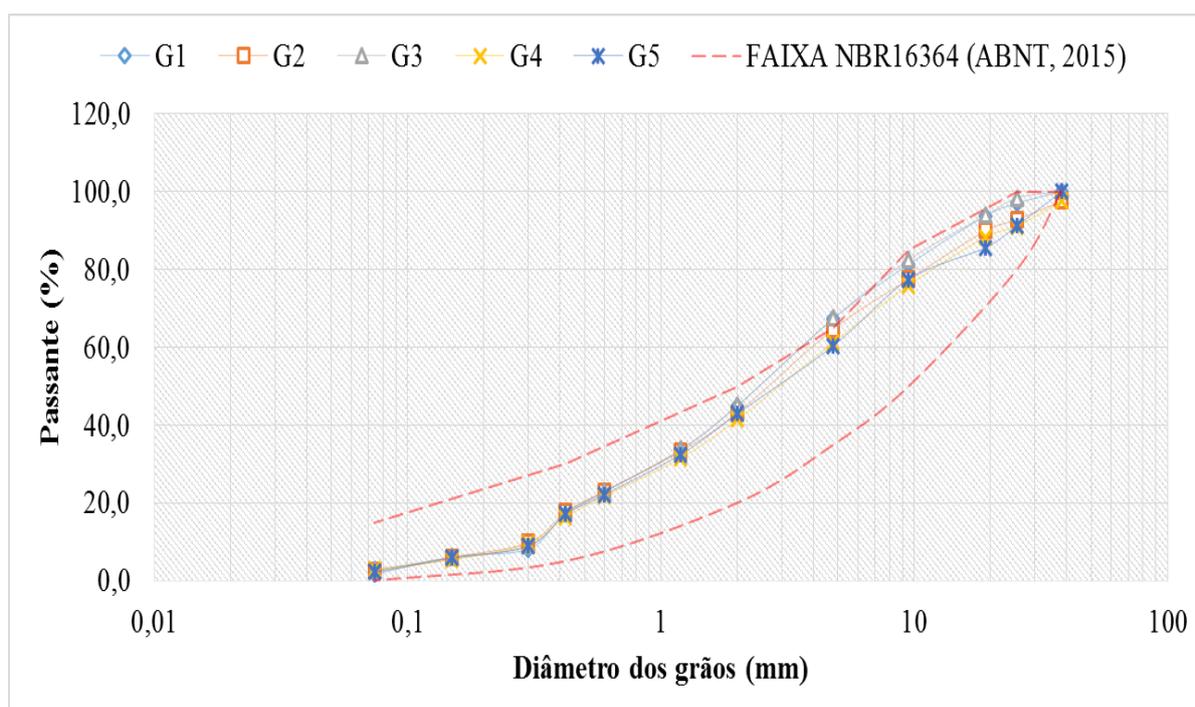


Figura 4.1 – Curvas granulométricas do açobrita ensaiado.

Analisando as curvas granulométricas (Fig. 4.1) e os resultados apresentados na Tabela 4.1, tem-se que de uma maneira geral, os resultados estão dentro dos limites da faixa granulométrica para agregado siderúrgico, segundo a NBR 16364 (ABNT, 2015). Apenas em duas análises (G1 e G3) a porcentagem de material passante na peneira com abertura de 4,8 mm foi superior ao limite. No entanto, os materiais permaneceram dentro do limite de tolerância de $\pm 5\%$ estipulado pela norma.

Tabela 4.1- Resultados análises granulométricas do açobrita.

DIÂMETRO (mm)	% PASSA					FAIXA NBR 16364 (ABNT, 2015)	
	G1	G2	G3	G4	G5		
38,100	100,0	97,6	100,0	97,5	100,0	100	100
25,400	97,0	92,8	98,4	91,1	91,3	80	100
19,100	93,8	89,9	93,9	88,4	85,6	-	-
9,500	81,3	77,5	82,5	75,9	77,4	50	85
4,800	67,4	64,7	67,5	61,3	60,4	35	65
2,000	44,9	43,1	45,0	41,4	42,9	20	50
1,200	33,7	33,3	33,9	31,6	32,5	-	-
0,600	22,9	23,1	22,9	21,8	22,2	-	-
0,420	17,5	17,7	17,1	16,4	17,1	5	30
0,300	8,2	9,8	8,9	9,7	9,0	-	-
0,150	6,2	6,1	5,9	5,4	5,9	-	-
0,074	1,7	2,6	3,0	2,8	2,3	0	15

Na Tabela 4.2 estão apresentadas algumas características granulométricas das amostras de açobrita ensaiadas, como: composição granulométrica segundo a escala apresentada na NBR 6502 (ABNT, 1995); o diâmetro efetivo (D_{10}), os diâmetros para os quais há 30% (D_{30}) e 60% (D_{60}) de material passante; o coeficiente de curvatura (C_c), e o coeficiente de não uniformidade (C_u).

Dada a semelhança entre curvas granulométricas obtidas, foram adotados valores médios para realização da classificação do material segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), obtendo-se valor médio do coeficiente de não uniformidade ($C_u=13,64$) e do coeficiente de curvatura ($C_c=0,71$) que caracterizam um material de uniformidade média (C_u entre 5 e 15), sendo o mesmo descontínuo, já que seu valor de C_c é menor que 1. Mais da metade da amostra passa na malha com abertura de 4,8 mm e a maior parte da amostra fica retida entre as malhas com aberturas de 4,8 mm e 0,074 mm. Além disso, verificou-se a existência de pouco material fino (2,47 %), classificando-se o açobrita pelo SUCS como um material SP, quer dizer, um material com características semelhantes à areia limpa mal graduada.

A classificação pelo Sistema AASHTO resultou no enquadramento no grupo A-1-a, ao qual pertencem materiais formados predominantemente por pedregulhos e areias com muito pouco material fino, que são considerados excelentes agregados granulares.

Em geral, do ponto de vista granulométrico, o agregado siderúrgico açobrita cumpre com as características requeridas para ser empregado na construção de camadas granulares de pavimentos.

Tabela 4.2 – Resumo das características granulométrica das amostras de açobrita ensaiadas segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995).

RESUMO COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA						
Análises	G1	G2	G3	G4	G5	Média
Características						
D10 [mm]	0,32	0,30	0,32	0,31	0,31	0,31
D30 [mm]	0,94	0,93	0,92	1,07	1,01	0,97
D60 [mm]	3,87	4,19	3,87	4,62	4,73	4,26
Cu	11,99	13,84	12,25	15,10	15,02	13,64
Cc	0,70	0,68	0,70	0,80	0,68	0,71
Pedregulho (> 4,8 mm) [%]	32,6	35,3	32,5	38,7	39,6	35,72
Areia grossa (4,8 - 2,0 mm) [%]	22,5	21,6	22,4	19,9	17,5	20,79
Areia média (2,0 - 0,42 mm) [%]	27,5	25,4	27,9	25,0	25,8	26,32
Areia fina (0,42 - 0,074 mm) [%]	15,7	15,2	14,1	13,6	14,8	14,69
Finos (< 0,074 mm) [%]	1,7	2,6	3,0	2,8	2,3	2,47

4.1.2. LIMITES DE ATTERBERG OU LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Ensaída uma fração de açobrita passante na malha de 0,42 mm de abertura, determinou-se que o material é não plástico (NP). Este material fino presente no açobrita é resultado do processo de britagem, portanto apresenta as mesmas características da fração grossa, ou seja não sensíveis à água, característica desejada em agregados granulares para obras de pavimentação rodoviária.

4.1.3. DENSIDADE REAL DOS GRÃOS (Gs)

Na Tabela 4.3 estão apresentados os resultados das análises para a determinação da densidade real dos grãos do açobrita. Analisando estes resultados percebe-se uma variação na densidade real dos grãos do açobrita, tendo diferentes valores para cada tamanho estudado e adicionalmente uma variação, no caso dos grãos entre 9,5 mm e 4,8 mm, também pelas diferenças nas características físicas dos grãos que se referem à textura superficial, foram separados considerando como material “compacto” (Figura 4.2.a) e “poroso” (Figura 4.2.b),

tendo que este último apresenta um maior valor de Gs. Segundo Rodhe (2002), as características físicas como textura superficial, granulometria e densidade variam de acordo com o processo de resfriamento sofrido pelo material; ela obteve valores de densidade real dos grãos de escória de aciaria variando de 3,39 a 3,51.

Tabela 4.3 – Análise da variação na densidade real dos grãos de açobrita.

Tamanho (mm)		Densidade Real dos Grãos			
Passante	Retido	Análises			Média
		1	2	3	
9,50	4,80	4,284	4,362	4,335	4,327*
9,50	4,80	5,204	5,373	5,321	5,299**
4,80	2,00	3,858	3,896	3,875	3,876
2,00	0,07	3,357	3,390	3,405	3,384

*Valor médio de Gs para os grãos de açobrita definidos como compactos.

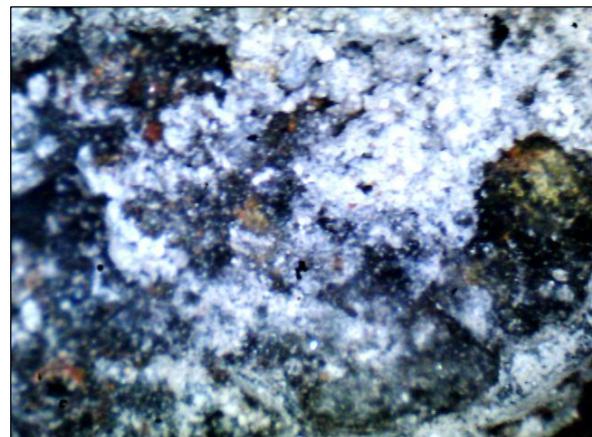
** Valor médio de Gs para os grãos de açobrita definidos como porosos.

Evidenciada a variabilidade dos resultados do Gs pelo tamanho e aparência física dos grãos de açobrita analisados, foram realizados ensaios adicionais no pentapicnômetro com grãos de diferentes tamanhos misturados (porosos e compactos), obtendo-se um valor médio representativo para a amostra de 3,623.

Na Figura 4.2 se mostra uma visão ampliada dos grãos de açobrita com tamanho entre 4,8 mm e 9,5 mm, observando melhor as diferenças entre as duas amostras ensaiadas e sua alta heterogeneidade. Na figura 4.2.(a) o grão de açobrita apresenta menor porosidade e formato arredondado. Na figura 4.2.(b) o grão se mostra mais poroso, de formato anguloso e expõe maiores variações na sua composição mineralógica.



(a)



(b)

Figura 4.2 – (a) Visão ampliada 50x do grão de açobrita definido como “compacto”. (b) Visão ampliada 50x do grão de açobrita definido como “poroso”.

4.1.4. RESISTÊNCIA À ABRASÃO LOS ANGELES

Foi determinada a perda por abrasão no equipamento “*Los Angeles*” para o açobrita, resultando no valor de 28%.

O valor obtido encontra-se dentro do limite estabelecido pela norma NBR 16364: Execução de base e sub-base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária – procedimento (ABNT, 2015), que é igual a 55%.

Na Figura 4.3, está mostrada a aparência do material antes e após do ensaio de abrasão, sendo possível observar que a maior perda por abrasão aconteceu nas frações de material mais finas.



(a)

(b)

Figura 4.3 – (a) Açobrita na graduação A antes do ensaio de abrasão “Los Angeles”. (b) Açobrita após ensaio de abrasão “Los Angeles”.

4.1.5. ABSORÇÃO DE ÁGUA

A absorção de água do açobrita foi determinada em 1,93% em peso, sendo esta a média de três ensaios, segundo o procedimento NBR NM 53 (ABNT, 2009). A norma NBR 16364 (ABNT, 2015) não especifica um limite para esta propriedade no agregado siderúrgico. No entanto, a especificação EM 262 (DNER, 1994) para escórias de aciaria limita a absorção de água de 1% a 2% em peso.

4.1.6. COMPACTAÇÃO

Os ensaios de compactação foram realizados manualmente, sem reuso de açobrita, com energia de Proctor modificado, para obtenção da curva de compactação mostrada na Figura 4.4.

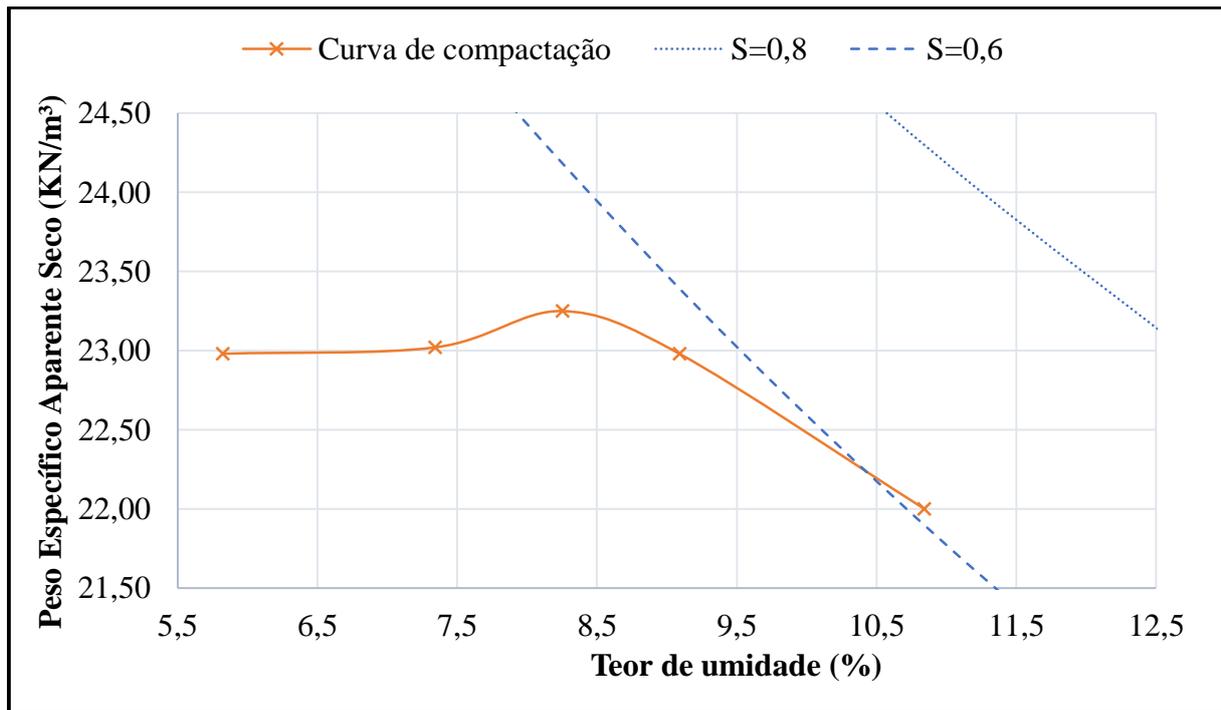


Figura 4.4 – Curva de compactação do açobrita.

A curva de compactação obtida apresentou-se abatida, sem um pico bem definido, tendo características similares ao comportamento de uma curva de compactação de uma areia limpa, o qual é explicável dado seu baixo conteúdo de material fino e também por ser um material não coesivo. Estes resultados estão de acordo com os obtidos nas pesquisas realizadas por Machado (2000), Rodhe (2002) e Raposo (2005), os quais utilizaram escórias de aciaria; não obstante, os autores em questão comentaram a respeito da dificuldade em encontrar um valor de umidade ótima em função da ausência de um pico bem definido na curva.

Para a determinação do valor de peso específico aparente seco máximo equivalente a 23,10 kN/m^3 e o teor de umidade ótima de compactação equivalente a 8,75 % para o açobrita utilizado nesta pesquisa, foi realizada uma análise conjunta dos resultados dos ensaios de compactação e índice de suporte de Califórnia identificando o ponto de melhor desempenho do material.

Foram avaliadas também as curvas de saturação de 100% ($S=1$) 80% ($S=0,8$) e 60% ($S=0,6$), com o valor de $G_s = 3,623$, sendo que a curva de 100% de saturação se encontra amplamente separada da curva de compactação do material. Por esse motivo, foram apresentadas na Figura 4.4 somente as curvas correspondentes a 80% e 60% de saturação e que estão mais próximas da curva de compactação obtida. O teor de umidade definido como ótimo encontra-se em um grau de saturação menor que 60% indicando que neste material, mesmo após o processo de compactação, se mantem muitos vazios com presença de ar.

A construção da curva de compactação do açobrita foi complexa, dada principalmente dificuldade na estimativa de um valor presumível de teor de umidade ótima e na obtenção dos teores de umidade para cada ponto necessário na construção da curva, isto devido, principalmente, à heterogeneidade do material, tanto em tamanho como em composição, precisando por isto a moldagem de um maior número de corpos-de-prova.

Os resultados confirmaram os estudos realizados por Raposo (2005) a respeito da ocorrência de um processo de drenagem da água durante a compactação, mais pronunciado nas camadas inferiores. Portanto, para obter um teor de umidade representativo do corpo-de-prova devem ser feitas mínimo três determinações, uma com material do topo, outra com material da porção central e outra com material da base do corpo-de-prova.

Durante o processo de compactação foi tomado cuidado para não deixar material grosso (tamanho de pedregulho) na superfície de divisão entre o molde e o colarinho (Figura 4.5.). Sendo assim, foi possível obter um valor real de volume do corpo-de-prova compactado, já que este valor influencia os cálculos para a determinação da curva de compactação.

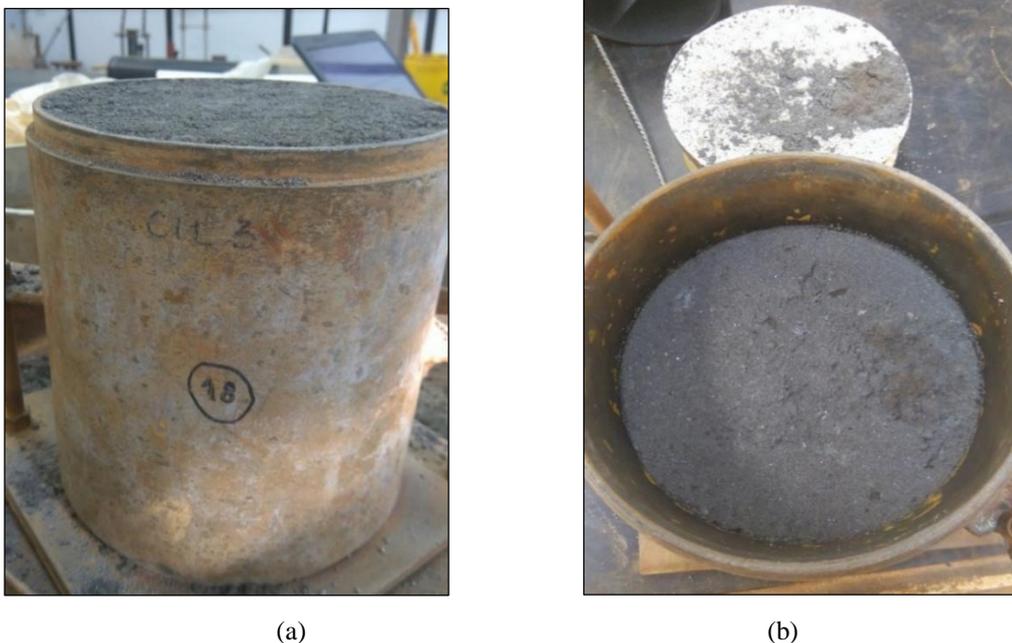


Figura 4.5 – (a) Superfície no final da compactação do material. (b) Consistência do corpo de prova após o retiro do disco espaçador e o papel filtro.

Em geral, os corpos-de-prova, após o processo de compactação, mantiveram sua forma original sem rupturas em todos os teores de umidade, mesmo após serem desmoldados (Figura 4.6), esta característica apresentada pelo açobrita pode ser explicada pela distribuição granulométrica do

material que facilita o intertravamento dos grãos de diferentes tamanhos, tornando mais fácil e efetivo o processo de compactação.



Figura 4.6 – Corpos-de-prova de açobrita desmoldados após ensaio de compactação.

4.1.7. ÍNDICE DE SUPORTE DE CALIFÓRNIA (ISC ou CBR)

Os ensaios de ISC foram realizados nos 5 corpos-de-prova utilizados na construção da curva de compactação. Seguindo o método ME 172 (DNIT, 2016), após da etapa de imersão em água dos corpos de prova, foi realizada a etapa de penetração na prensa automática da Solotest (Figura 4.7), obtendo-se dados de pressão no pistão relativos às penetrações estabelecidas para cada amostra (Figura 4.8).



(a)



(b)

Figura 4.7 – (a) Etapa de penetração na prensa automática do ensaio de ISC; (b) Corpo-de-prova de açobrita após a etapa de penetração.

Na tabela 4.4 estão apresentados os resultados dos ensaios de compactação e de expansão, durante a fase de imersão em água dos corpos-de-prova, além dos valores de Índice de Suporte de Califórnia obtidos na fase de penetração da amostra.

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de compactação e ISC para o açobrita.

Ponto	Peso específico aparente seco (kN/m ³)	Teor de umidade (%)	Expansão (%)	ISC (%)
1	22,98	5,8	0,00	74,5
2	23,02	7,3	0,00	61,6
3	23,25	8,3	0,00	118,4
4	22,98	9,1	0,00	183,5
5	22,00	10,8	0,00	87,4

Analisando os resultados de expansão, observa-se que os corpos-de-prova de açobrita não apresentam variação volumétrica durante os 4 dias de imersão em água a temperatura ambiente, resultado satisfatório para este material, mas é preciso avaliar a expansão do açobrita também pelo método ME113 (DNIT, 2009) contemplando maior tempo de ensaio e acréscimo na temperatura da água de imersão.

Já nos resultados de Índice de Suporte de Califórnia, o maior valor obtido foi de 183% para a amostra com 9,1% de umidade de compactação. Na Figura 4.8 encontra-se apresentada a variação do ISC e do peso específico aparente seco do açobrita em relação ao teor de umidade.

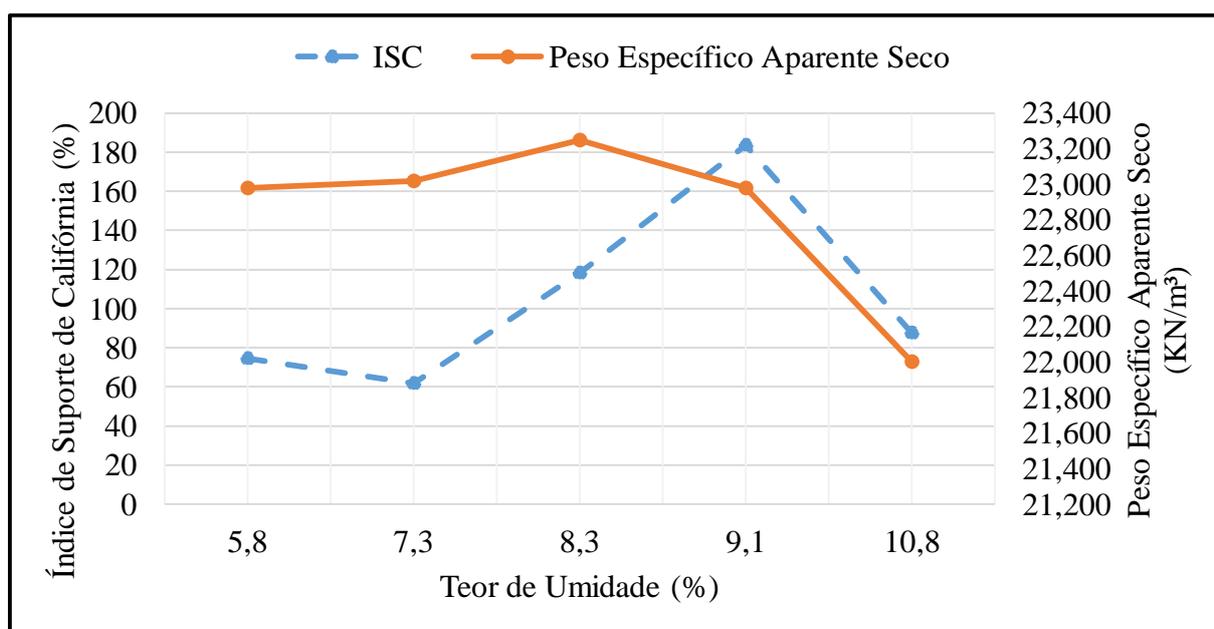


Figura 4.8 – Variação do Índice de Suporte de Califórnia e o Peso Específico Aparente Seco com o Teor de Umidade do açobrita.

Analisando as curvas (Fig. 4.8) nota-se que as duas curvas não possuem um pico comum, por tanto pode-se definir no ponto de entrecruzamento destas o ponto de melhor desempenho e estabilidade do açobrita para um teor de umidade ótima de 8,75%, peso específico aparente seco máximo de 23,10 kN/m³ e um ISC de 155%. Pode-se ressaltar que o ramo seco de compactação apresentou os menores valores de ISC, tendo um incremento pronunciado na zona da umidade ótima e uma diminuição brusca do ISC no ramo úmido.

A norma NBR 16364 (ABNT, 2015) estabelece que o agregado siderúrgico como material constituinte de base e sub-base de pavimentos deve apresentar um índice de suporte de Califórnia igual ou superior a 80% com energia de compactação de Proctor modificado no ponto de teor de umidade ótimo de compactação; por tanto o agregado siderúrgico açobrita ensaiado cumpre com este requisito, com valores muito acima desse limite.

4.1.8. POTENCIAL DE EXPANSÃO MÉTODO ME113 (DNIT, 2009).

Na Tabela 4.5 estão apresentados os resultados do ensaio de expansão do açobrita segundo o procedimento descrito na norma ME113 (DNIT, 2009), mais comumente denominado método PTM 130, realizado pela primeira vez no Laboratório de Geotecnia da UnB.

Tabela 4.5 – Resultados do ensaio de potencial de expansão para o açobrita pelo método ME113 (DNIT, 2009).

Corpo de Prova		1	2	3
Teor de Umidade (%)		8,5 (Ótima)	10,1 (Ramo Úmido)	6,0 (Ramo Seco)
Dia No.		Expansão Acumulada (%)		
IMERSÃO	0	0,00	0,00	0,00
	1	0,21	0,07	0,03
	2	0,37	0,16	0,21
	3	0,46	0,25	0,35
	4	0,55	0,33	0,51
	5	0,63	0,41	0,62
	7	0,74	0,52	0,77
SATURAÇÃO	8	0,78	0,57	0,74
	9	0,82	0,60	0,76
	10	0,82	0,67	0,79
	11	0,80	0,72	0,82
	12	0,84	0,79	0,85
	13	0,85	0,84	0,88
	14	0,87	0,96	0,92

Analisando estes resultados, temos que no final dos 14 dias de duração do ensaio a maior expansão apresentada pelo açobrita foi de 0,96%, observada no corpo-de-prova compactado no ramo úmido, já no corpo-de-prova compactado na umidade ótima obteve-se a menor taxa de expansão igual a 0,87%. A média de expansão para o agregado siderúrgico é de 0,92% no final do ensaio.

Estes valores de expansão estão dentro das especificações da NBR 16364 (ABNT, 2015) para agregado siderúrgico que estabelece que a média do potencial de expansão de três corpos-de-prova deve ser inferior a 3% aos 14 dias de ensaio.

Pode-se analisar também a expansão acumulada ao longo do tempo de ensaio para cada corpo-de-prova, ressaltando as fases do ensaio:

- Dia 1: Início do ensaio na condição de submersa dos corpos-de-prova.
- Dia 7: Metade do ensaio, as características do ensaio mudam da condição submersa para a condição saturada não submersa.
- Dia 14: Final do ensaio, mantendo a condição saturada não submersa.

Com estes dados também foram traçadas as curvas de expansão acumulada ao longo do tempo de ensaio, as quais se encontram apresentadas na Figura 4.9 para cada corpo-de-prova.

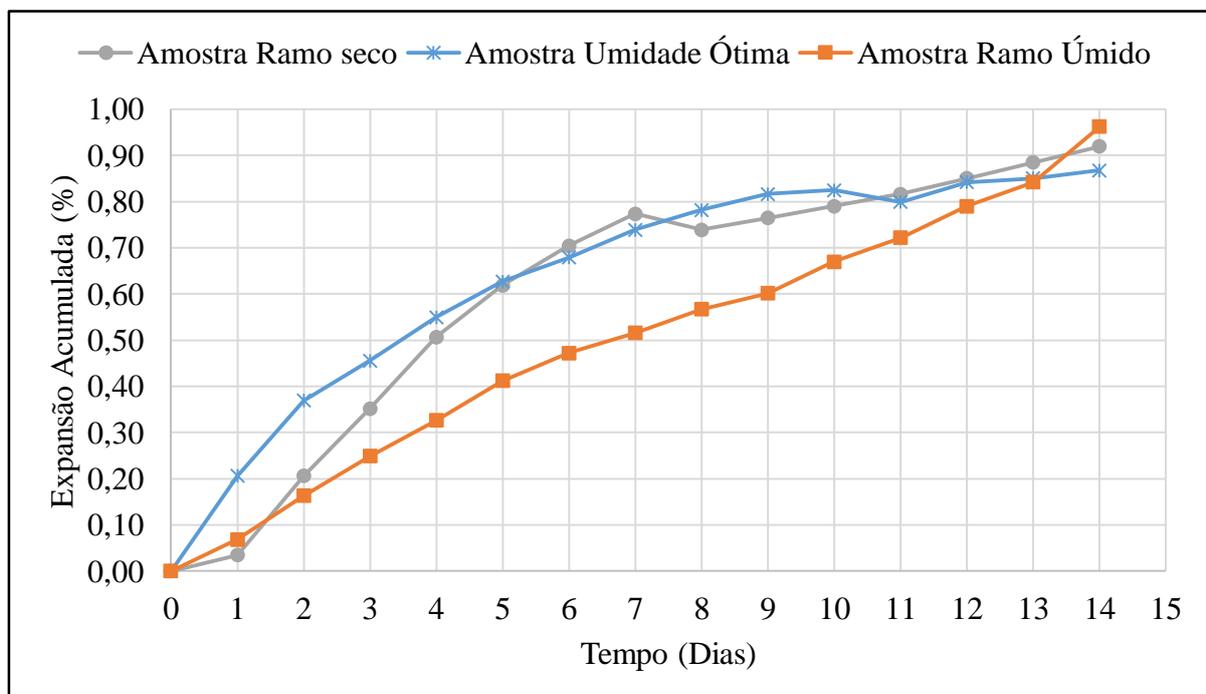


Figura 4.9 – Curva da taxa de expansão acumulada no tempo do ensaio para o açobrita.

Analisando a Figura 4.9 e os dados da Tabela 4.5 pode-se notar que a expansão da amostra compactada na umidade ótima é maior no início do ensaio e apresenta um crescimento rápido na etapa de imersão, ou seja, até o sétimo dia. Após o sétimo dia, o incremento é menor, sendo observada no final do ensaio a menor taxa de expansão acumulada para os três corpos-de-prova.

No corpo-de-prova compactado no ramo úmido acontece exatamente o contrário, um incremento devagar, mas constante, na primeira etapa de imersão, e; na etapa de saturação (não imerso) um incremento muito rápido, sendo no final do ensaio a maior taxa de expansão acumulada.

Para a amostra compactada no ramo seco, em geral, observou-se uma tendência média em relação aos dois casos anteriores. Entretanto, após sete dias de ensaio observa-se um decréscimo na taxa de expansão, retomando seu crescimento no dia seguinte, sendo mantida a média até o final do ensaio.

Após o ensaio de expansão, as amostras de açobrita foram retiradas dos moldes e desmanchadas cuidadosamente como indicado nos procedimentos do ensaio ME113 (DNIT, 2009), verificando-se visualmente que não se apresentaram nenhum tipo de formação cristalina na superfície dos grãos de açobrita, como mostra a Figura 4.10. A norma de ensaio não especifica outra metodologia para realizar esta verificação.



Figura 4.10 – Amostra de açobrita após ensaio de expansão.

A realização deste ensaio fornece informações mais reais do potencial de expansão do açobrita em camadas de pavimentos rodoviários, onde pode estar submetido à ação de altas temperaturas nas condições testadas de submersão e saturação. Dessa forma, pode-se considerar que o

açobrita, utilizado nesta pesquisa, cumpre com as especificações em termos de expansão para sua aplicação em camadas de pavimentos rodoviários.

4.2. SOLO

A seguir estão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física e mecânica do solo utilizado na pesquisa.

4.2.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Na Figura 4.11 apresenta-se a curva granulométrica do solo, incluindo a análise por sedimentação da parte fina com e sem uso de defloculante.

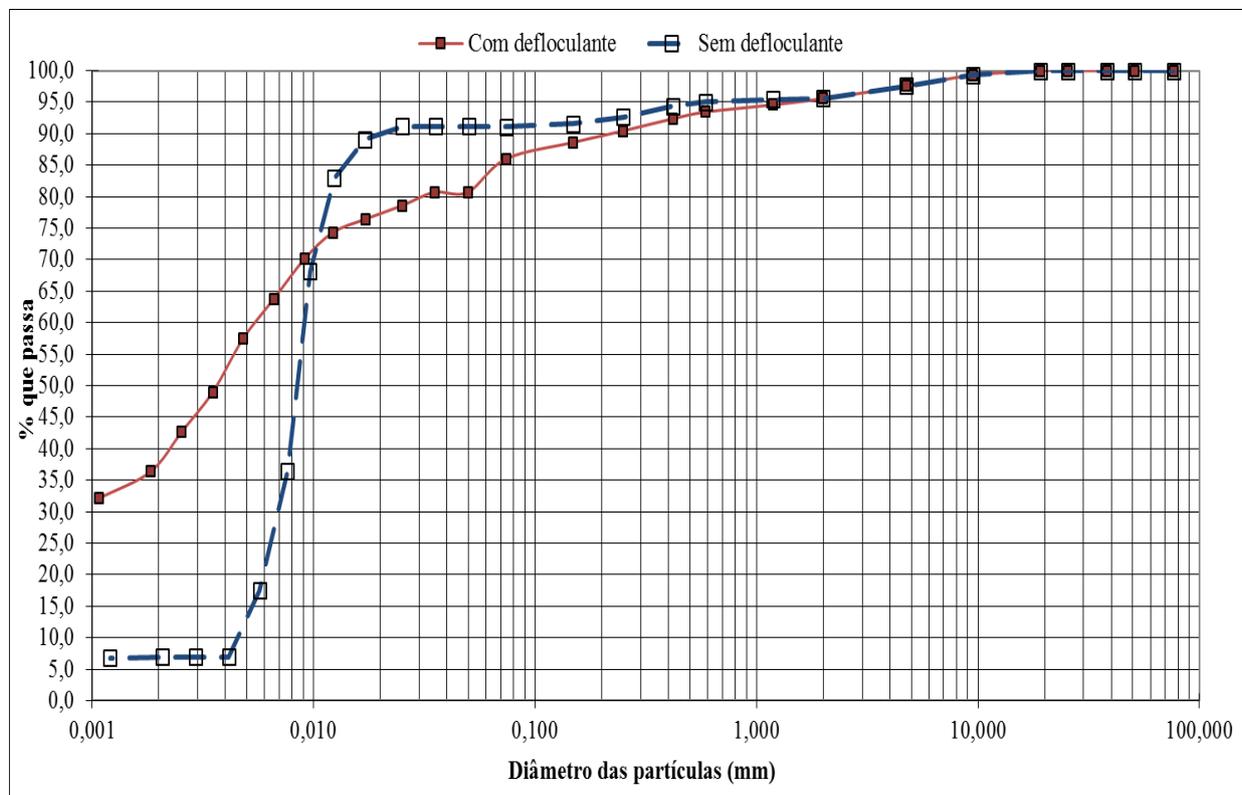


Figura 4.11 – Curva granulométrica do solo com uso e sem uso de defloculante.

Nas curvas se observa que o 70 % das partículas do solo tem tamanhos menores de 0,01 mm podendo-se classificar como um material fino. Percebe-se também, pela diferença entre as curvas com e sem uso de defloculante, que muitas destas partículas encontram-se em agregações que são desfeitas diante da presença do defloculante (hexametáfosfato de sódio).

Na Tabela 4.6 são apresentados os dados da análise granulométrica do solo tendo a escala de tamanhos de material segundo NBR 6502 (ABNT, 1995).

Tabela 4.6 – Resume da análise granulométrica do solo método ME 051 (DNER, 1994)

Análise Granulométrica do Solo		
Material	% do material	
	Com defloculante	Sem defloculante
Pedregulho (> 4,8 mm)	4,4	4,4
Areia grossa (4,8 - 2,0 mm)	2,1	0,6
Areia média (2,0 - 0,42 mm)	3,9	3,4
Areia fina (0,42 - 0,074 mm)	8,9	0,5
Silte (0,074 - 0,002 mm)	36,5	84,0
Argila (< 0,002 mm)	44,2	7,1

Avaliando estes dados, temos que o teor de silte, na amostra de solo ensaiada por sedimentação, apenas com água destilada (sem defloculante), representa 84,0 % da amostra, sendo muito elevado, já que o teor de argila foi de apenas 7,1 %. No entanto, com o uso de defloculante, estes valores apresentaram uma grande variação, sendo maior a fração argila que a fração silte. Com relação a fração areia, observou-se que no ensaio sem uso de defloculante houve menor porcentagem de particular em relação ao ensaio com o uso de defloculante. A relação do teor de argila com defloculante e sem defloculante é muito maior que um, revelando que grande parte da argila está sob a forma de agregados, característica de material bastante intemperizado.

4.2.2. LIMITES DE ATTERBERG OU LIMITES DE CONSISTÊNCIA

A consistência do solo é uma importante informação no campo da engenharia. Ela determina o comportamento do solo ao sofrer tensões e deformações, além de ser determinante na resistência do solo à penetração e após a compactação. A consistência do solo refere-se ao grau de resistência e plasticidade do solo que dependem das ligações internas entre partículas. Na Tabela 4.7 estão apresentados os dados obtidos no ensaio para a determinação do limite de liquidez, segundo o método NBR 6459 (ABNT, 1984) que pressupõe a utilização do aparelho de Casagrande, com os quais foi traçado o gráfico na Figura 4.12. O teor de umidade correspondente ao limite de liquidez foi aquele em que, na interpolação, correspondeu a um número de 25 golpes.

Tabela 4.7 – Determinação do limite de liquidez do solo.

Limite de liquidez					
Umidade média (%)	61,14	61,66	69,08	70,02	79,00
Número de golpes	37	30	25	20	15

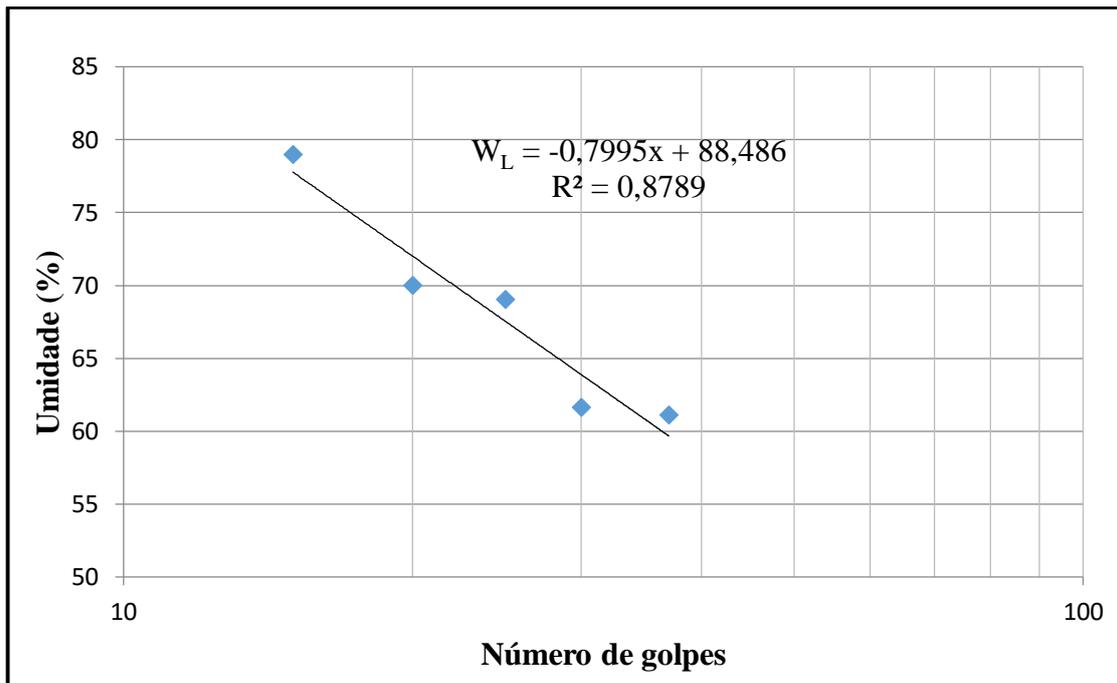


Figura 4.12 – Determinação do Limite de Liquidez do solo método NBR 6459 (ABNT, 1984).

Utilizando a equação de regressão linear foi obtido valor de limite de liquidez (w_L) igual a 68,50%, o qual pode ser considerado bastante elevado e pressupõe um material com grande variação volumétrica em presença de água.

A determinação do limite de plasticidade do solo foi feita segundo o método NBR 7180 (ABNT, 1984), obtendo-se um valor de 47,16%.

Com os resultados de limite de liquidez (w_L) e limite de plasticidade (w_P) foi calculado o Índice de plasticidade (IP) como a diferença numérica destes, obtendo-se um valor de $IP = 21,34\%$. O índice de plasticidade pode ser interpretado como a quantidade máxima de água que pode ser adicionada ao solo, a partir de seu limite de plasticidade, de modo que o solo mantenha a sua consistência plástica. O valor de IP determinado para este solo, indica sua alta plasticidade.

Tendo estes resultados foi possível realizar a classificação do solo pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS, utilizando a carta de plasticidade de Casagrande (Fig. 4.13), obtendo-se que o solo pertence aos grupos MH – OH, que são solos argilo-siltosos de alta plasticidade. Pela classificação da AASHTO, o solo foi classificado no grupo A-7, argilas e limos (não menos de 75% do material passa na malha de 0,074 mm) com elevado índice de liquidez e com grandes mudanças de volume nos estados seco e úmido.

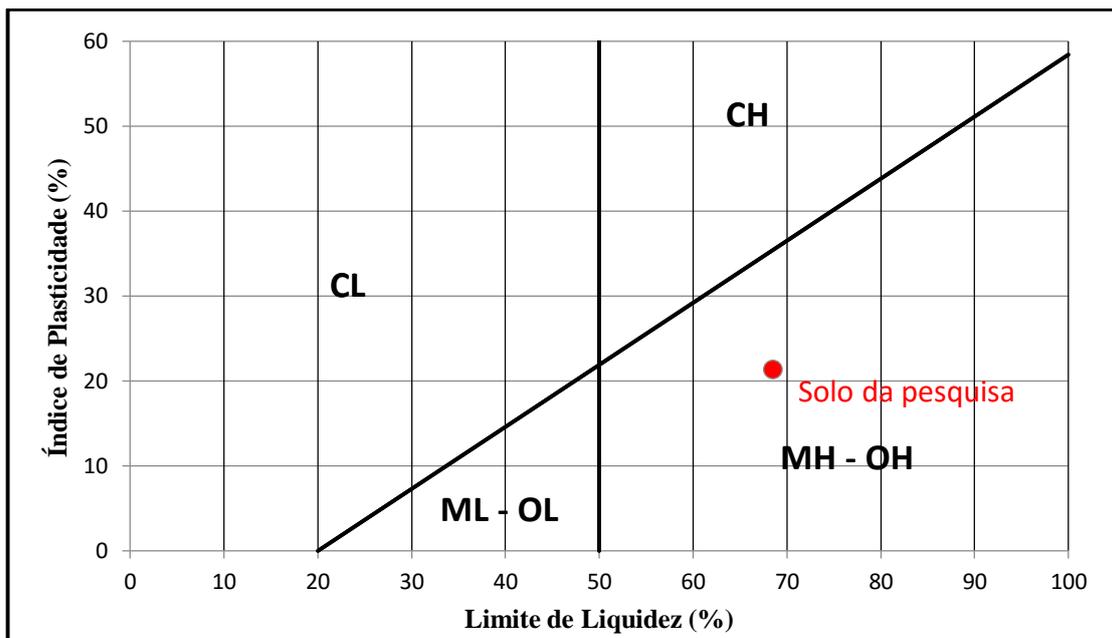


Figura 4.13 – Carta de Plasticidade de Casagrande empregada no Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

Estes resultados de limite de liquidez e índice de plasticidade não atendem a especificação para misturas de açobrita e solo, da norma NBR 16364 (ABNT, 2015), que determina para solos com características lateríticas um limite de liquidez menor ou igual a 40% e um índice de plasticidade menor ou igual a 15%, determinados segundo os métodos utilizados nesta pesquisa. Portanto, este solo não é adequado para este fim segundo a referida especificação. Mas, tendo que este solo se encontra no local definido pelo DNIT para o projeto de construção do trecho rodoviário experimental, foi estudado este material na presente pesquisa visando seu potencial uso nas misturas com açobrita como constituintes das camadas de base, diminuindo custos econômicos e operacionais na obra.

4.2.3. DENSIDADE REAL DOS GRÃOS (Gs)

A densidade real dos grãos do solo foi obtida como o valor médio de três análises realizadas no pentapicnômetro, sendo de 2,751, apresentando-se este valor alto para a média dos solos brasileiros. Resende (2010) apresenta valores de Gs para argila de subleito em rodovias do estado de Minas Gerais de 2,670. Considera-se também que a presença de óxidos de ferro e outros minerais pesados no solo elevam o valor da densidade real dos grãos.

4.2.4. COMPACTAÇÃO

Foram feitas duas curvas de compactação para o solo, utilizando compactação manual. Uma das curvas foi feita utilizando 100% da energia do Proctor normal, com reuso de material

(basicamente pela disponibilidade de material), objetivando com este ensaio obter uma estimativa do teor de umidade ótima de compactação e as propriedades deste solo como material de subleito. A outra curva de compactação foi construída com a metodologia definida também para a compactação das misturas; utilizando 100% da energia do Proctor modificado, sem reuso de material, e posterior determinação do índice de suporte de Califórnia considerando a etapa de imersão em água dos corpos-de-prova para a determinação da sua expansão. As curvas de compactação obtidas estão apresentadas na Figura 4.14 juntamente às curvas de saturação de 100% ($S=1$) e 90% ($S=0,9$).

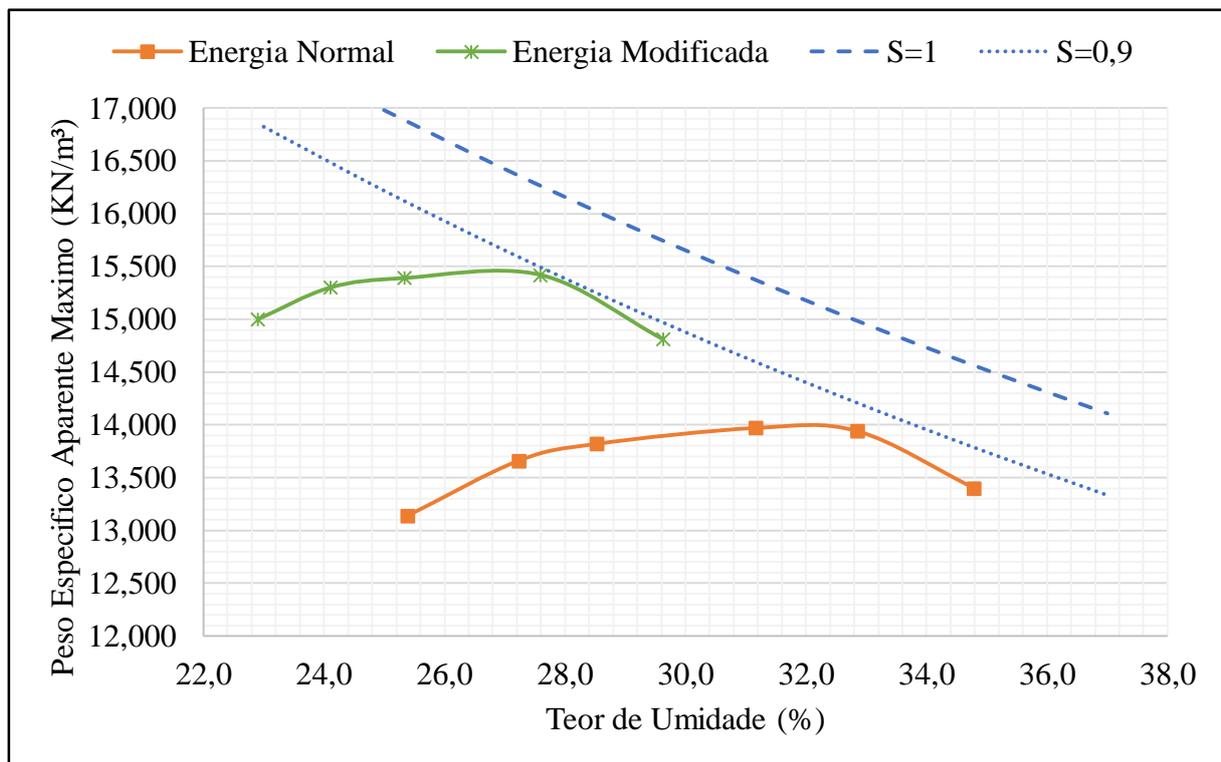


Figura 4.14 – Curvas de compactação energias Proctor normal e modificado para o solo.

As curvas apresentam o formato típico das curvas de compactação de solos coesivos, tendo bem definido o ponto de máximo peso específico aparente seco, onde o teor de umidade é ótimo para a compactação. Estes valores estão apresentados na Tabela 4.8, tendo sido obtidas umidades ótimas de compactação elevadas para este solo e pesos específicos aparentes secos máximos baixos.

Tabela 4.8 – Resultados ensaio de compactação com energias Proctor normal e modificado para o solo.

Energia de Compactação	Umidade Ótima (%)	Peso Específico Aparente Seco Máximo (kN/m³)
Normal	31,0	14,00
Modificada	26,5	15,50

4.2.5. ÍNDICE DE SUPORTE DE CALIFÓRNIA (ISC)

O ensaio de Índice de Suporte de Califórnia foi realizado em todos os corpos-de-prova moldados no ensaio de compactação tanto na energia de Proctor normal quanto na energia de Proctor modificada. A fase de imersão dos corpos-de-prova em água para avaliação da expansão foi realizada somente na compactação com energia de Proctor modificada já que esta foi feita sem reuso de material, diferentemente do que foi feito na compactação na energia normal, que por uma estimativa de disponibilidade de material, se decidiu fazer reuso de material pelo qual a etapa de imersão em água para determinação da expansão não foi realizada.

Na Tabela 4.9, são apresentados os resultados dos ensaios de compactação na energia de Proctor normal e índice de suporte de Califórnia para o solo.

Tabela 4.9 - Resultados dos ensaios de compactação na energia normal e ISC para o solo.

Ponto	Peso Específico Aparente Seco (KN/m ³)	Teor de Umidade (%)	ISC (%)
1	13,14	25,4	18,1
2	13,66	27,2	24,5
3	13,82	28,5	25,4
4	13,97	31,2	26,0
5	13,94	32,9	8,7
6	13,40	34,8	2,4

Este solo apresenta um valor máximo de ISC de 26% na umidade ótima de compactação, percebendo-se que com o aumento no teor de umidade os valores de índice de suporte de Califórnia decrescem até um valor de 2,4%.

Na Tabela 4.10 estão apresentados os resultados dos ensaios de compactação na energia de Proctor modificada e o índice de suporte de Califórnia, incluindo os resultados de expansão, para o solo.

Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios de compactação na energia modificada e ISC para o solo.

Ponto	Peso Específico Aparente Seco (kN/m ³)	Teor de Umidade (%)	Expansão (%)	ISC (%)
1	15,00	22,9	4,90	7,9
2	15,30	24,1	3,87	19,9
3	15,39	25,3	3,03	32,5
4	15,42	27,6	2,64	22,3
5	14,81	29,6	2,30	9,1

Obteve-se um valor máximo de ISC para o solo compactado na energia de Proctor modificada foi de 32,5%. Na Figura 4.15 apresenta-se a variação dos valores de ISC das amostras de solo

compactadas na energia de Proctor normal e modificada com o teor de umidade. Os valores de ISC para as amostras de solo compactadas na energia normal não se apresentam significativamente menores quando comparados com os resultados para as amostras compactadas na energia modificada, fato que pode ser explicado pela não imersão em água dos corpos-de-prova compactados na energia normal dado que foi feita reutilização de material.

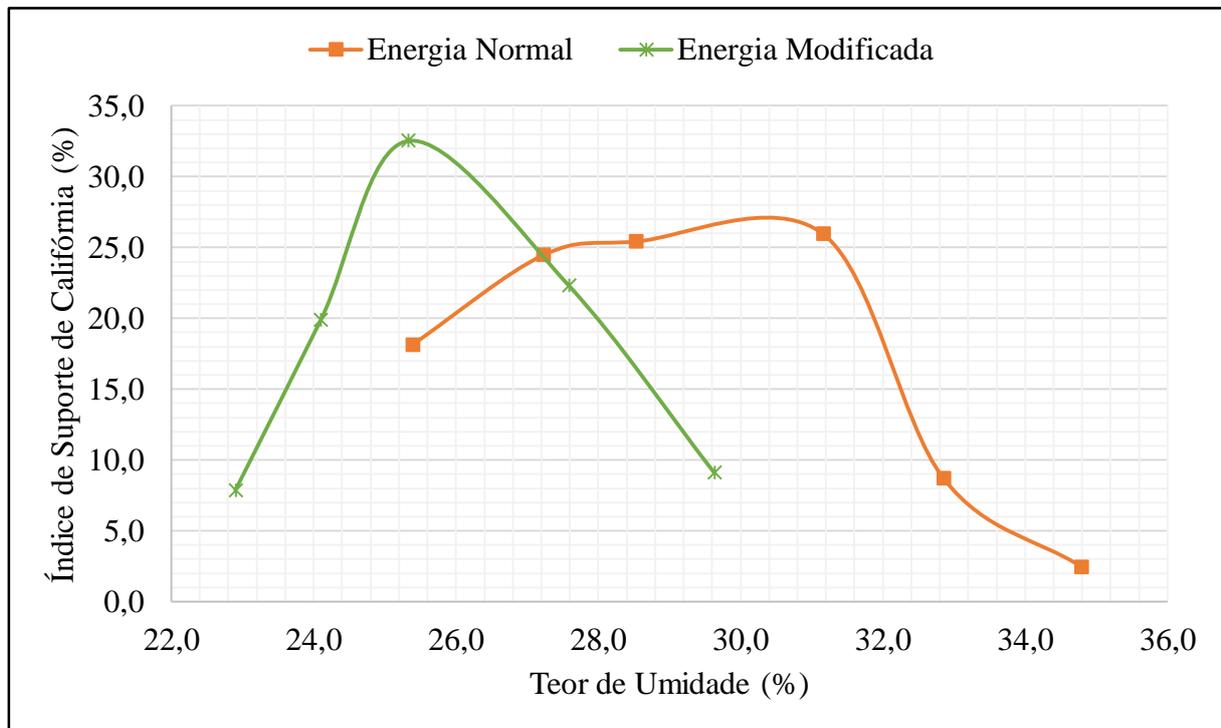


Figura 4.15 – Variação do ISC das amostras de solo compactadas na energia de Proctor normal e modificada, com o teor de umidade.

Analisando os resultados de expansão do solo compactado na energia modificada, temos que estes se apresentaram muito elevados, atingindo um máximo de 4,9% de expansão no ramo seco, 3,0% no ponto de umidade ótima e um mínimo de 2,3% no ramo úmido de compactação; podendo afirmar que este solo apresenta mudanças volumétricas para qualquer teor de umidade.

4.3.MISTURAS AÇOBRIÇA E SOLO

A seguir estão apresentados os resultados dos ensaios de laboratório realizados as três misturas estudadas:

- M7030: Mistura de 70% açobriça e 30% solo.
- M8020: Mistura de 80% açobriça e 20% solo (Proposta inicial do DNIT para a execução da base para o trecho experimental)
- M9010: Mistura de 90% açobriça e 10% solo

4.3.1. ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS

4.3.1.1. MISTURA M7030

Foi realizada a análise granulométrica da mistura por peneiramento, obtendo-se a curva granulométrica mostrada na Figura 4.16 e os dados apresentados na Tabela 4.11, onde também se apresenta a faixa granulométrica D para misturas de agregado siderúrgico e solo especificada na norma NBR 16364 (ABNT, 2015) na qual esta mistura se enquadra.

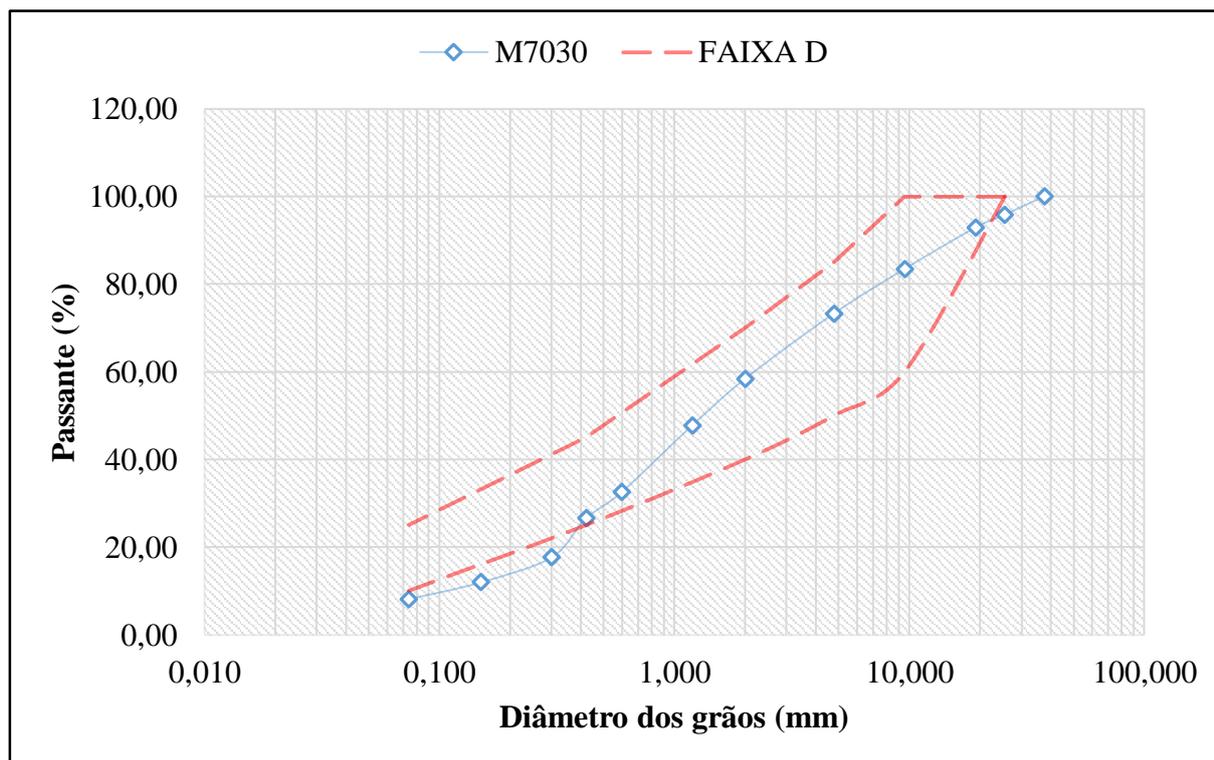


Figura 4.16 – Curva granulométrica mistura M7030

A mistura M7030 se encontra dentro da faixa granulométrica D, uma das estipuladas pela norma NBR 16364 (ABNT, 2015) para este tipo de misturas (Tab. 2.6); esta faixa estabelece uma distribuição granulométrica com maior quantidade de finos quando comparada com as faixas A, B e C, também aceitas para suportar tráfegos com $N > 5 \times 10^6$, sendo que a porcentagem de material fino ($<0,074$ mm) é levemente menor que a estipulada, entretanto encontra-se no limite de tolerância de $\pm 2\%$.

Tabela 4.11 – Análise granulométrica da mistura M7030 e faixa granulométrica D da norma NBR 16364 (ABNT, 2015) e suas tolerâncias.

Diâmetro das partículas (mm)	% em massa passante	Faixa granulométrica D, NBR 16364 (ABNT, 2015)	Tolerância da faixa (%)
37,500	100,0	-	± 7
25,400	95,8	100	± 7
19,100	92,9	-	-
9,520	83,4	60 - 100	± 7
4,760	73,3	50 - 85	± 5
2,000	58,4	40 - 70	± 5
1,190	47,8	-	-
0,595	32,5	-	-
0,420	26,6	25 - 45	± 2
0,300	17,7	-	-
0,150	12,0	-	-
0,074	8,1	10 - 25	± 2

Observa-se pela curva granulométrica que os pontos com partículas de diâmetros de 0,30 e 0,15 mm ficaram fora da faixa D, entretanto estes pontos não são passíveis de especificação no contexto desta norma.

4.3.1.2. MISTURA M8020

Foi realizada a análise granulométrica da mistura por peneiramento, obtendo-se a curva granulométrica mostrada na Figura 4.17 e os dados apresentados na tabela 4.12 onde também se apresenta a faixa granulométrica D para misturas de agregado siderúrgico e solo especificada na norma NBR 16364 (ABNT, 2015) na qual esta mistura se enquadra.

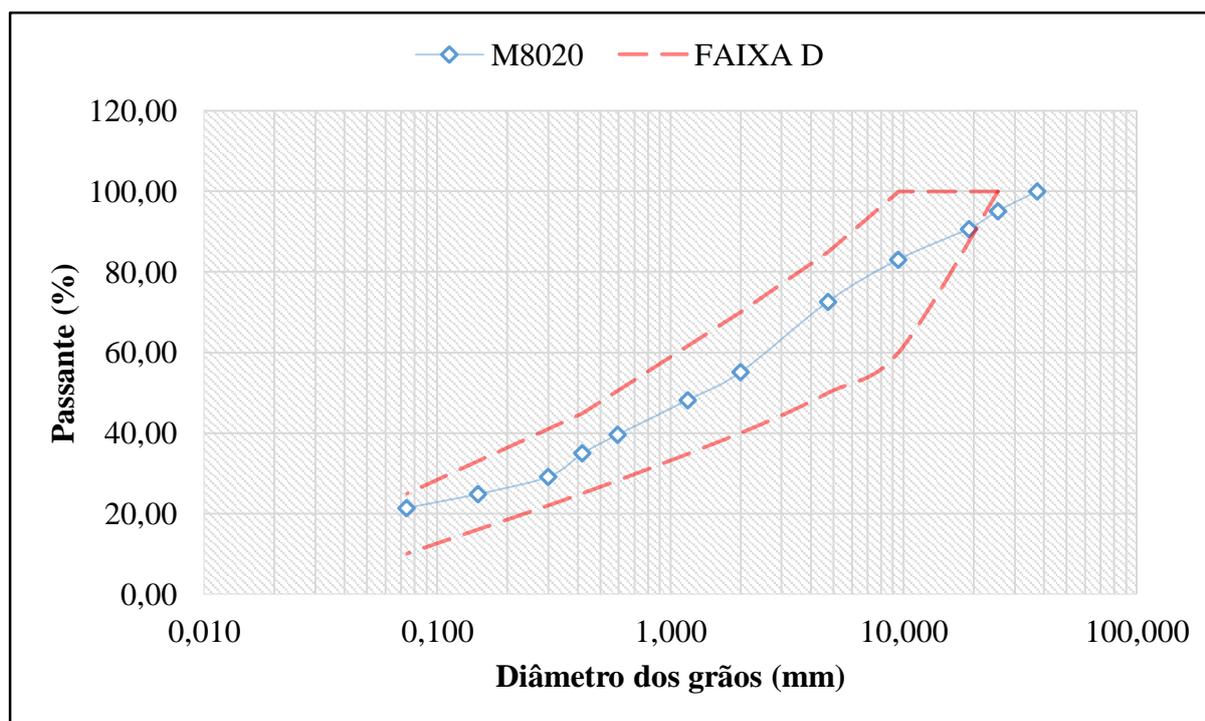


Figura 4.17 – Curva granulométrica mistura M8020.

Tabela 4.12 - Análise granulométrica da mistura M8020 e faixa granulométrica D da norma NBR 16364 (ABNT, 2015) e suas tolerâncias.

Diâmetro das partículas (mm)	% em massa passante	Faixa granulométrica D, NBR 16364 (ABNT, 2015)	Tolerância da faixa (%)
37,500	100,00	-	± 7
25,400	95,15	100	± 7
19,100	90,77	-	-
9,520	83,09	60 - 100	± 7
4,760	72,69	50 - 85	± 5
2,000	55,13	40 - 70	± 5
1,190	48,22	-	-
0,595	39,62	-	-
0,420	34,95	25 - 45	± 2
0,300	29,18	-	-
0,150	24,91	-	-
0,074	21,43	-	± 2

Assim como a mistura M7030, a mistura M8020 se encontra dentro da faixa granulométrica D da norma NBR 16364 (ABNT, 2015), cumprindo a especificação granulométrica para suportar tráfegos com $N > 5 \times 10^6$. Somente a porcentagem de material passante na malha de 24,5 mm é menor que a estipulada, no entanto se encontra no limite de tolerância da mesma, que é de $\pm 7\%$.

4.3.1.3. MISTURA M9010

Igual que para as misturas anteriores, foi realizada a análise granulométrica da mistura por peneiramento, obtendo a curva granulométrica apresentada na Figura 4.18 e os dados decorrentes apresentados na Tabela 4.13 junto a faixa granulométrica A para misturas de agregado siderúrgico e solo especificada na norma NBR 16364 (ABNT, 2015) na qual esta mistura se enquadra.

Esta mistura, ao contrário das duas anteriores, se encaixa na faixa granulométrica A, cumprindo também com as especificações granulométricas para uso em bases de pavimentos rodoviários com tráfego com $N > 5 \times 10^6$. Esta faixa A comparada com as faixas B, C e D que também atendem a especificação de tráfego, diminui a quantidade de material fino que pode estar presente na mistura.

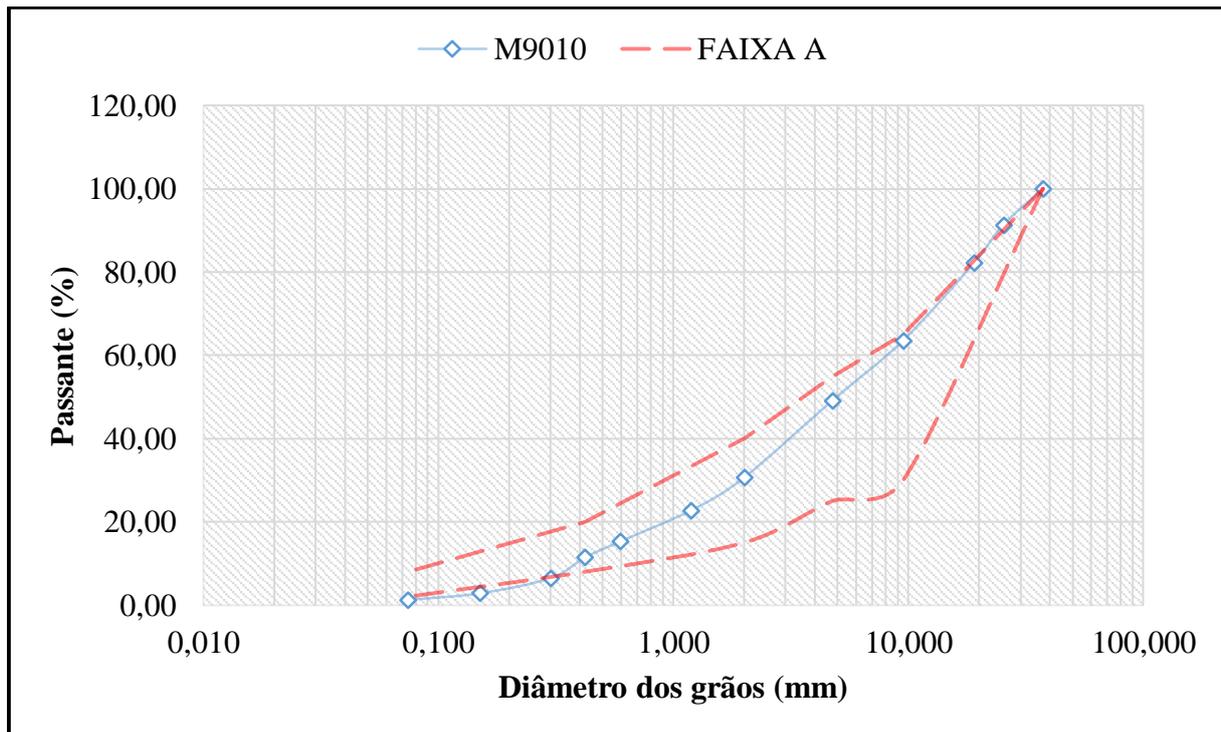


Figura 4.18 - Curva granulométrica mistura M9010.

Tabela 4.13 - Análise granulométrica da mistura M9010 e faixa granulométrica da norma NBR 16364 (ABNT, 2015) e suas tolerâncias.

Diâmetro das partículas (mm)	% em massa passante	Faixa granulométrica A, NBR 16364 (ABNT, 2015)	Tolerância da faixa (%)
37,500	100,00	100	± 7
25,400	91,35	-	-
19,100	82,30	-	-
9,520	63,59	30 - 65	± 7
4,760	49,18	25 - 55	± 5
2,000	30,65	15 - 40	± 5
1,190	22,79	-	-
0,595	15,33	-	-
0,420	11,46	8 - 20	± 2
0,300	6,51	-	-
0,150	2,87	-	-
0,074	1,28	2 - 8	± 2

4.3.2. LIMITES DE ATTERBERG OU LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Foi ensaiada a fração de material passando a malha de 0,42 mm de abertura das três misturas, observando-se que se tratam de materiais não plásticos (NP).

Estes resultados surpreendem dado que a mistura M7030 que apresenta na sua composição a maior porcentagem de solo (30%) das três misturas, também apresenta um comportamento não plástico na fração ensaiada.

4.3.3. DENSIDADE REAL DOS GRÃOS (Gs)

A densidade real dos grãos das misturas foi obtida pelo valor médio de três análises realizadas no pentapicnômetro, estando os resultados apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Valores da densidade real dos grãos para as misturas

Mistura	Densidade real dos grãos (Gs)
M7030	3,271
M8020	3,314
M9010	3,380

Analisando estes resultados se observa uma relação direta do aumento no valor do Gs com o aumento da porcentagem de açobrita na mistura.

4.3.4. COMPACTAÇÃO E ÍNDICE DE SUPORTE DE CALIFÓRNIA

Os ensaios de compactação para as três misturas foram realizados manualmente, sem reuso de material, com 100% da energia do Proctor modificado. Os corpos-de-prova moldados no ensaio de compactação foram logo imersos em água por cinco dias obtendo as leituras para a avaliação da expansão; após este período os corpos-de-prova foram ensaiados para determinar seu índice de suporte de Califórnia.

Foi necessária a apresentação e análise conjunta dos resultados destes dois ensaios para a definição de teor de umidade ótima de compactação e de peso específico aparente seco máximo e assim obter valores que representem verdadeiramente o ponto de melhor desempenho mecânico para cada mistura.

4.3.4.1. MISTURA M7030

Na Figura 4.19 apresenta-se a curva de compactação para a mistura M7030, na qual são apresentados somente cinco pontos de compactação mas para sua construção foram moldados mais corpos-de-prova em função da variabilidade observada nos resultados e da dificuldade na obtenção do teor de umidade esperado para cada ponto da curva.

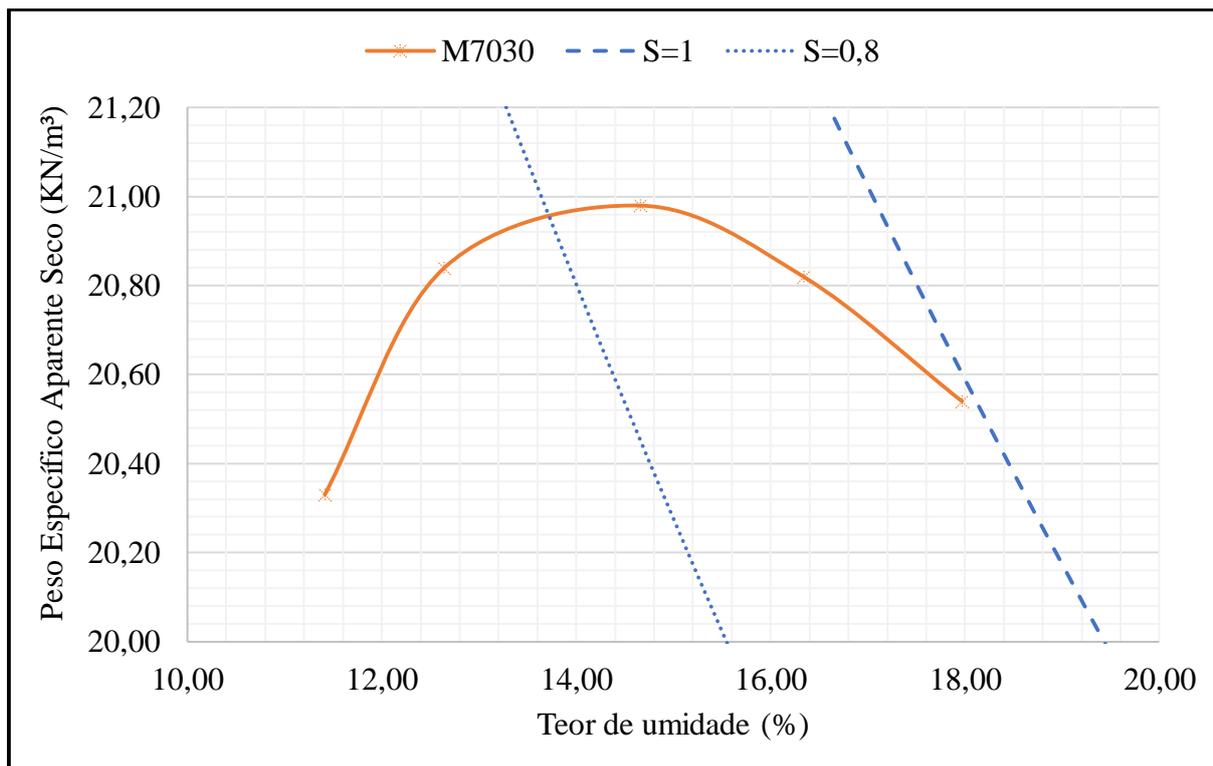


Figura 4.19 – Curva de compactação para a mistura M7030

Na tabela 4.15 são apresentados os resultados dos ensaios de compactação e índice de suporte de Califórnia incluindo os resultados de expansão (pelo método do ensaio de ISC) para a mistura M7030.

Tabela 4.15 - Resultados dos ensaios de compactação e ISC para a mistura M7030.

Ponto	Peso Específico Aparente Seco (kN/m ³)	Teor de Umidade (%)	Expansão (%)	ISC (%)
1	20,33	11,41	0,51	142,9
2	20,84	12,64	0,42	170,6
3	20,98	14,66	0,41	213,4
4	20,82	16,34	0,46	151,1
5	20,54	17,97	0,11	143,9

A curva de compactação obtida para esta mistura apresenta claramente um ponto de máximo valor de peso específico aparente seco e que seu ramo seco de compactação se apresenta mais íngreme quando comparado com o ramo úmido de compactação.

Na Figura 4.20 se apresenta a variação de peso específico aparente seco e do índice de suporte de Califórnia com o teor de umidade da mistura, nela identifica-se claramente o ponto de teor de umidade ótima de compactação de 14,7% da mistura para o qual se tem os valores de peso específico aparente seco máximo de 21,00 kN/m³ e um índice de suporte de Califórnia de 213%.

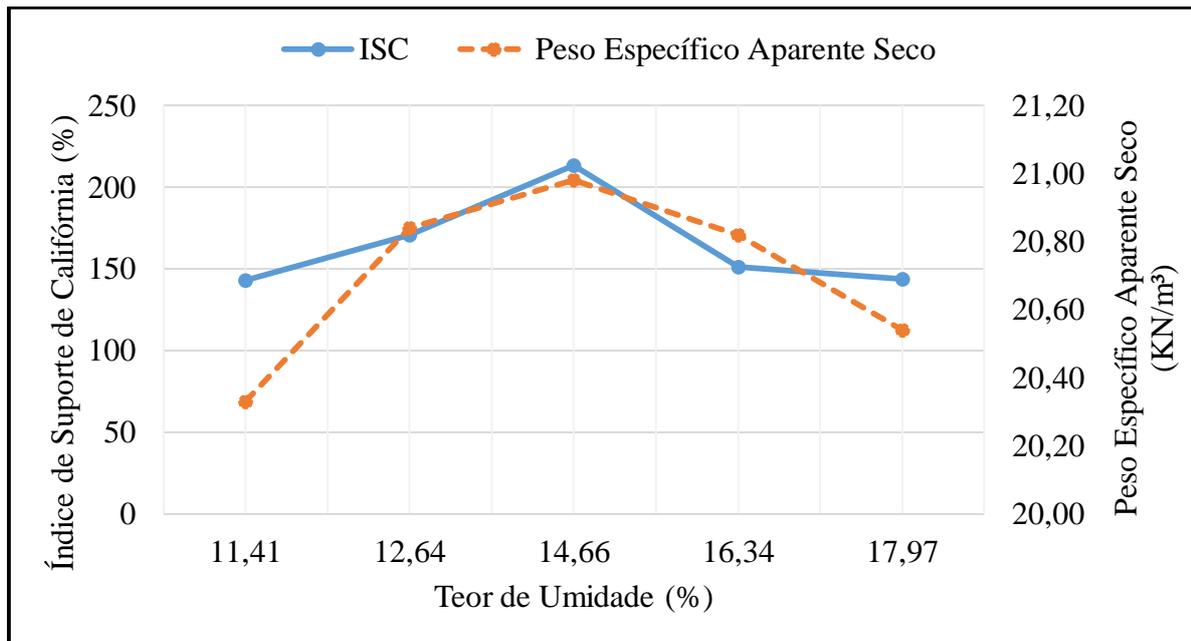


Figura 4.20 - Variação do Índice de Suporte de Califórnia e do Peso Específico Aparente Seco com o Teor de Umidade da mistura M7030.

Foram avaliadas também as curvas de saturação de 100% ($S=1$) e 80% ($S=0,8$) apresentadas com a curva de compactação na Figura 4.19, sendo que para o teor de umidade ótimo, a mistura apresenta uma saturação de aproximadamente 85%.

Os resultados do ensaio de Índice de Suporte de Califórnia mostram que todos os valores apresentaram acima de 100%, o que significa que o material supera as especificações em termos de suporte do material definido como padrão para este ensaio, além da norma NBR 16364 (ABNT, 215) que estabelece um mínimo de Índice de Suporte de Califórnia de 80% para materiais de base e sub-base, atendendo a mistura amplamente este requisito. Observa-se também que os menores valores de ISC foram obtidos para os menores valores de umidade, tendo uma grande variabilidade, de forma semelhante aos resultados do ensaio de compactação.

Ponderando a expansão apresentada pela mistura na etapa de imersão, obtém-se que esta foi baixa, sendo a máxima de 0,5 % e sabendo que o açobrita não apresentou expansão nestas mesmas condições, conclui-se que a expansão apresentada na mistura é atribuída ao solo.

4.3.4.2. MISTURA M8020

Na Tabela 4.16 são apresentados os resultados dos ensaios de compactação e índice de suporte de Califórnia incluindo os resultados de expansão para a mistura M8020.

Tabela 4.16 - Resultados dos ensaios de compactação e ISC para a mistura M8020.

Ponto	Peso Específico Aparente Seco (kN/m ³)	Teor de Umidade (%)	Expansão (%)	ISC (%)
1	20,87	9,10	0,43	100,2
2	21,44	11,49	0,38	185,7
3	21,37	14,03	0,18	179,5
4	21,28	15,72	0,15	179,0
5	20,60	17,60	0,08	98,7

Com estes resultados foi avaliada a curva de compactação da mistura M8020, que se apresenta na Figura 4.21. Observa-se que, assim como a curva de compactação da mistura M7030, esta apresenta um ponto de máximo peso específico aparente seco facilmente identificável, mas com os ramos de compactação seco e úmido igualmente íngremes.

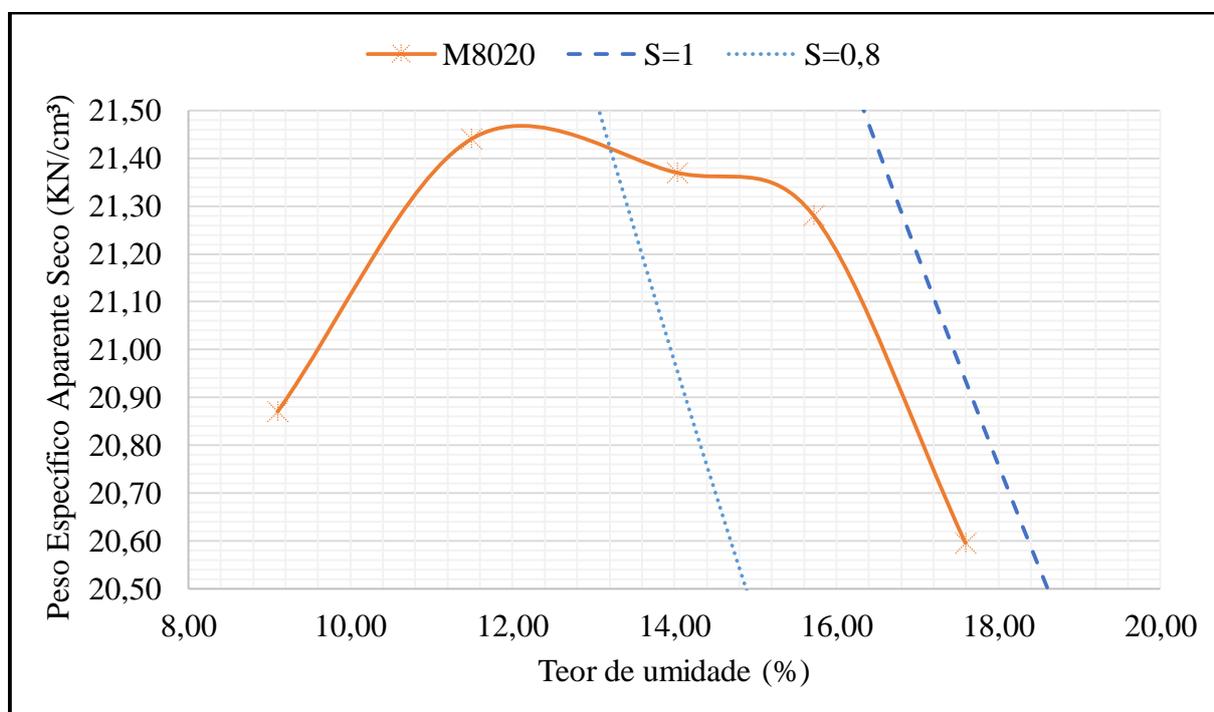


Figura 4.21 – Curva de compactação mistura M8020.

Na Figura 4.22 se apresenta a variação do peso específico aparente seco e do Índice de Suporte de Califórnia com relação ao teor de umidade na mistura. Pela análise da Figura 4.21 define-se que para o teor de umidade de 11,49% se observam os melhores resultados, sendo estes, peso específico aparente seco máximo de 21,44 kN/m³ e Índice de Suporte de Califórnia de 185,7%.

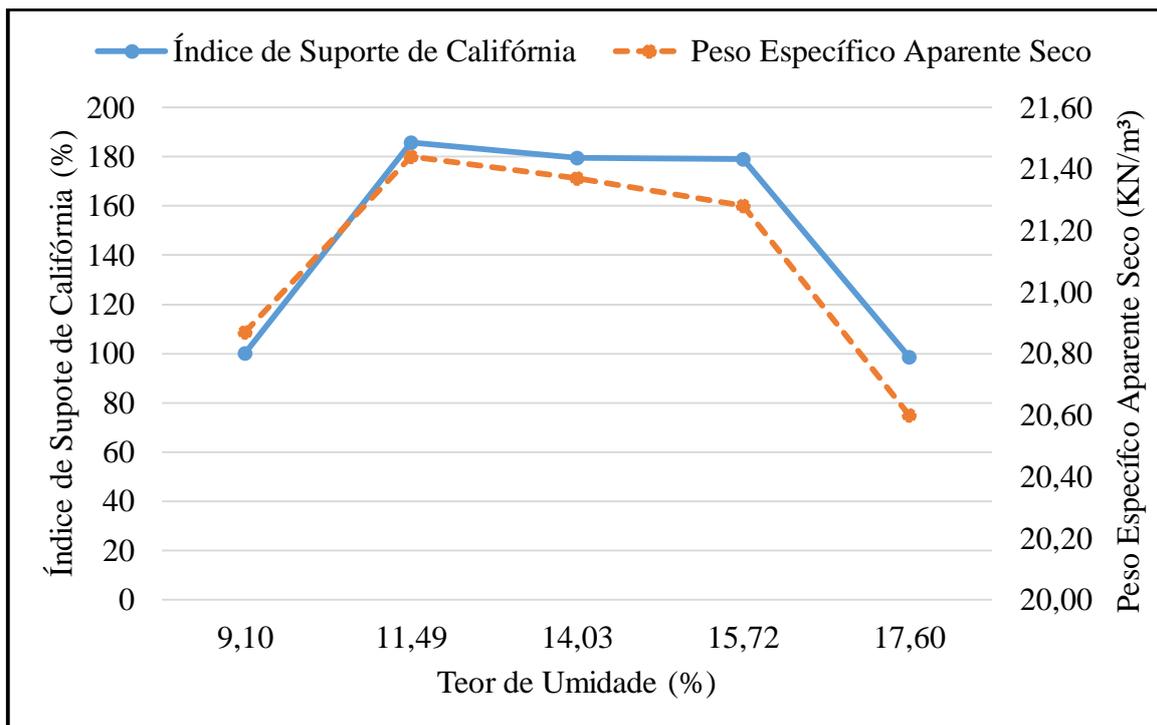


Figura 4.22 - Variação do Índice de Suporte de Califórnia e do Peso Específico Aparente Seco com o Teor de Umidade da mistura M8020.

4.3.4.3. MISTURA M9010

Os resultados dos ensaios de compactação e índice de suporte de Califórnia para a mistura M9010 são apresentados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 - Resultados dos ensaios de compactação e ISC para a mistura M9010.

Ponto	Peso Específico Aparente Seco (kN/m ³)	Teor de Umidade (%)	Expansão (%)	ISC (%)
1	22,24	6,24	0,22	59,08
2	22,35	8,26	0,10	135,23
3	22,91	9,87	0,05	254,87
4	21,83	12,60	0,03	201,69
5	21,78	14,65	0,00	25,66

Na Figura 4.23 está apresentada a curva de compactação obtida para esta mistura. Observa-se concordância com a curvas obtidas para as duas misturas anteriores, pois apresenta um ponto de valor máximo no peso específico aparente seco facilmente identificável. Nesta curva os maiores decréscimos no valor do peso específico aparente seco se apresentam no ramo úmido de compactação.

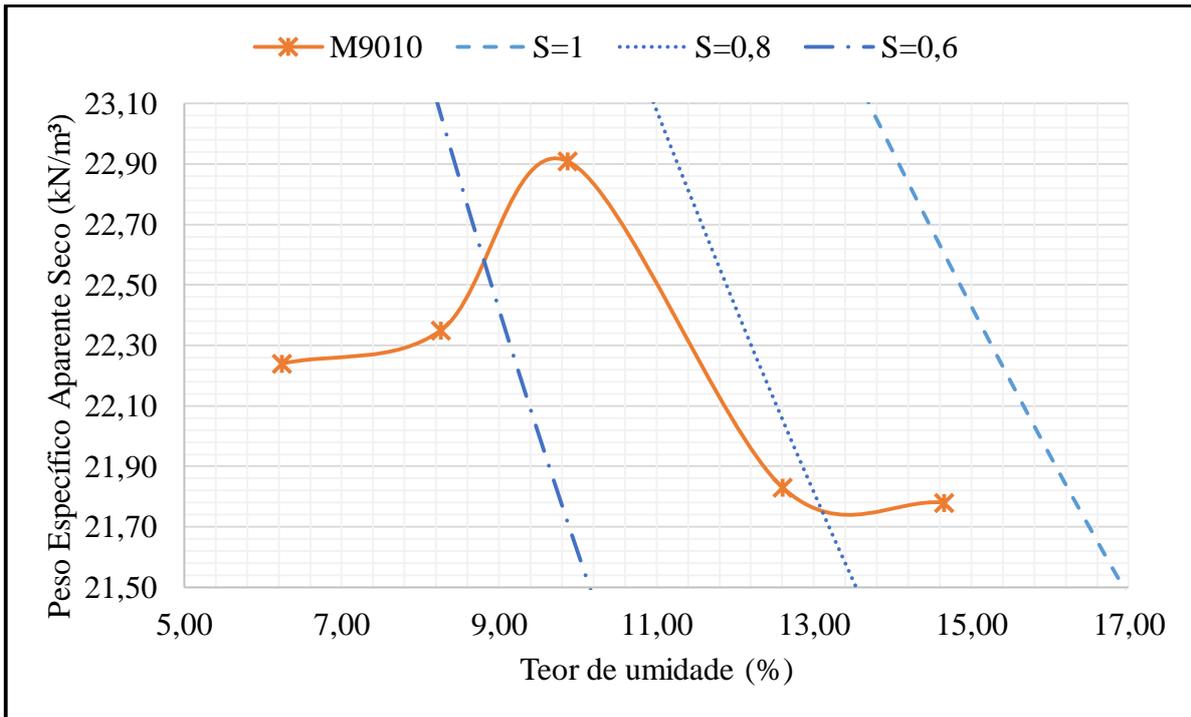


Figura 4.23 - Curva de compactação mistura M9010

Na Figura 4.24, se apresenta a variação de peso específico aparente seco e de ISC em relação ao teor de umidade da mistura.

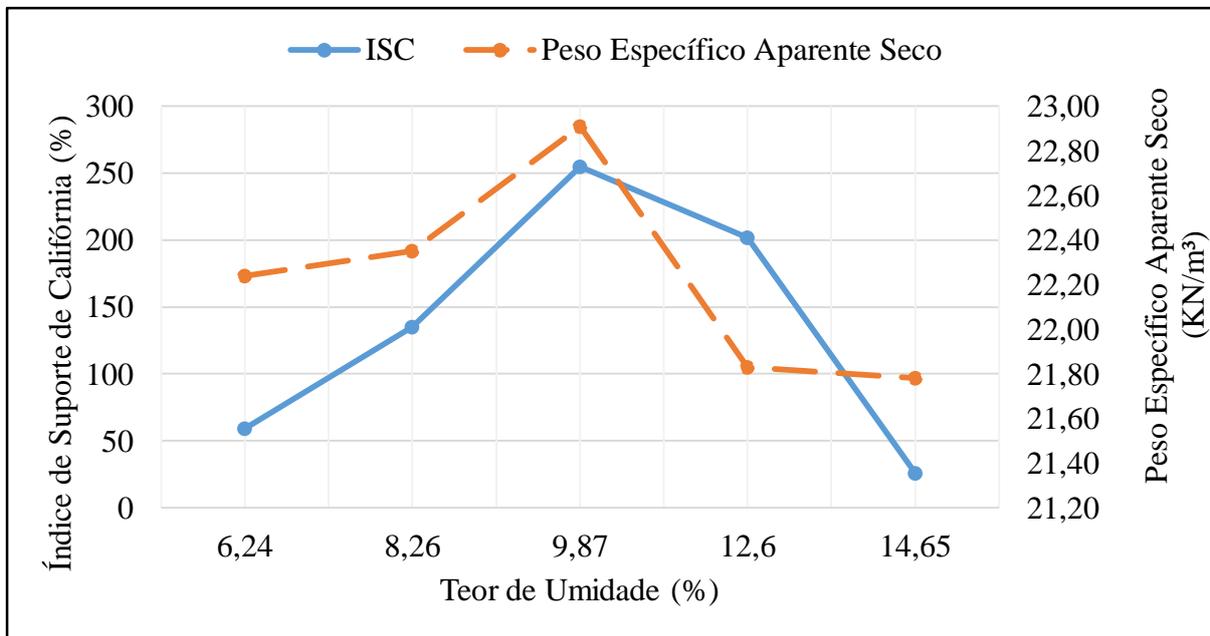


Figura 4.24 - Variação do Índice de Suporte de Califórnia e do Peso Específico Aparente Seco com o Teor de Umidade da mistura M9010.

Analisando os resultados na figura 4.24, foi determinado para esta mistura o teor de umidade ótimo para compactação em 9,87%, o valor de peso específico aparente seco máximo em 22,91 kN/m³ e o valor de Índice de Suporte de Califórnia em 254,87%.

Esta mistura apresenta os maiores valores de índice de suporte de Califórnia no teor de umidade ótima, mas também percebe-se, que para os teores de umidade acima e abaixo do teor ótimo, os valores de ISC são do mesmo modo, os menores para as três misturas, tendo uma grande variabilidade. Em quanto os resultados de expansão esta mistura apresenta os menores valores das três misturas, concordante com a diminuição do teor de solo.

Em resumo, observa-se que as três misturas cumprem amplamente a especificação preconizada na norma NBR 16364 (ABNT, 2015) que estabelece que o valor de índice de suporte de Califórnia, da mistura de agregado siderúrgico com solo, para ser utilizada em sub-base, deve ser igual ou superior a 20% e com expansão inferior ou igual a 1%; e para base, deve ser igual ou superior a 60% para um número N inferior ou igual a 5×10^6 e com expansão inferior ou igual a 0,5% e ser igual ou superior a 80% e com expansão inferior ou igual a 0,5% para um número N maior do que 5×10^6 .

4.3.5. ANÁLISES FINAIS

Para uma análise mais aprofundada do efeito da compactação no açobrita e em cada uma das misturas, apresenta-se na Figura 4.25 uma avaliação conjunta de todas as curvas de compactação obtidas nesta pesquisa.

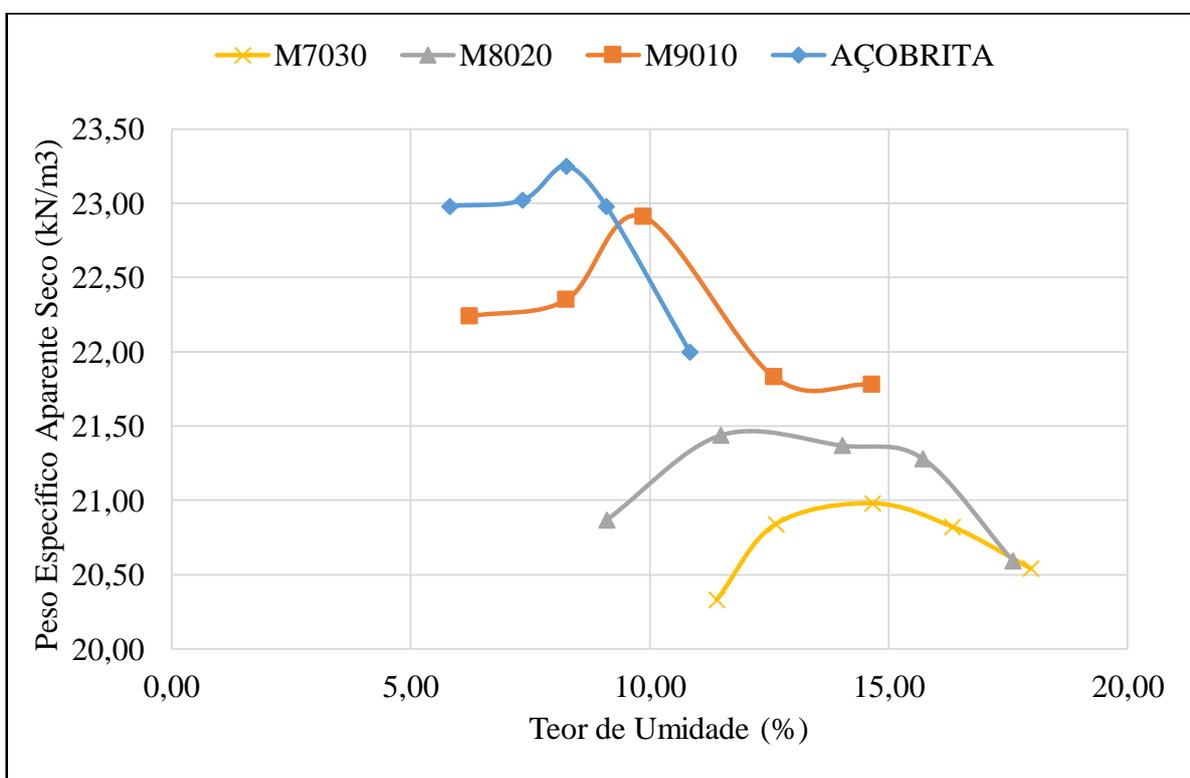


Figura 4.25 – Resumo Curvas de Compactação do açobrita e das misturas.

Observa-se claramente na figura 4.25, que as três misturas, M7030, M8020 e M9010, apresentam aumento nos valores de peso específico aparente seco com o aumento no teor de açobrita em cada uma delas, equivalentemente, uma diminuição no teor de umidade ótimo de compactação.

Visando definir a maior efetividade do processo de compactação, foi avaliada a variação no índice de vazios para o açobrita e as três misturas em relação ao teor de umidade. Este tipo de análise se justifica em função da diferença nos valores de Gs do solo natural e do açobrita, que tenderia a condicionar um aumento no valor do peso específico aparente seco com o aumento da porcentagem de adição de açobrita ao solo. A Figura 4.26 apresenta a variação do índice de vazios em função do teor de umidade de compactação.

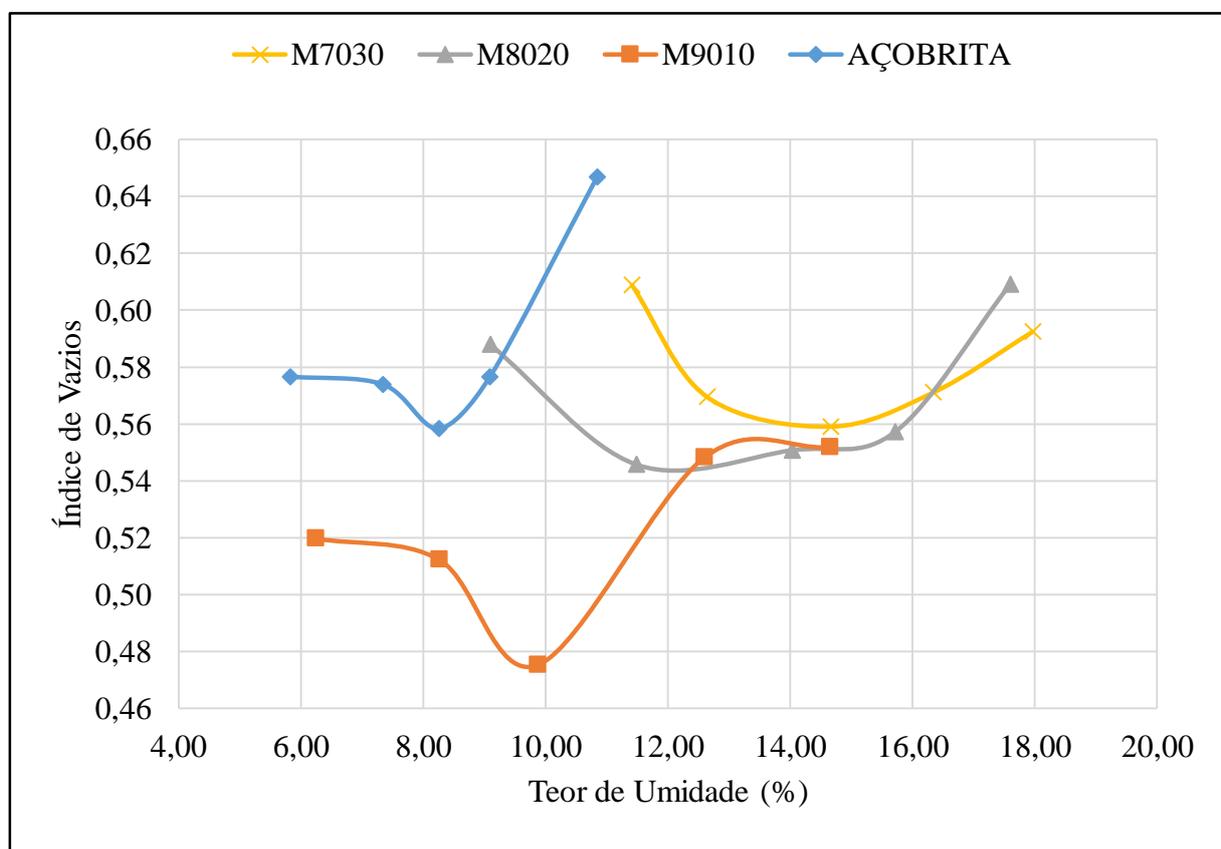


Figura 4.26 – Curvas de variação do Índice de Vazios (e) do açobrita e misturas com o Teor de Umidade.

Observa-se que os menores valores de índice de vazios foram obtidos na mistura M9010, percebendo-se uma maior efetividade no processo de compactação para esta mistura. Além disso, as outras duas misturas apresentam valores de índice de vazios muito similares entre si e com o açobrita. Analisando estes resultados do ponto de vista granulométrico, temos que concordantemente, para a distribuição considerada na faixa A da norma NBR 16364 (ABNT,

2015) na qual se enquadra a mistura M9010, se tem melhores resultados no processo de compactação.

Os resultados laboratoriais obtidos para as três misturas de açobrita e solo para caracterização física e propriedades mecânicas de pavimentação, são muito satisfatórios, determinando que embora o solo utilizado apresente alta plasticidade, este não influencia negativamente o comportamento das misturas. Por isto deve ser melhor analisada a limitação de uso destes materiais de empréstimo em obras de pavimentação rodoviária estipulado pela norma NBR16364 (ABNT, 2015) podendo obter assim maior eficiência econômica e ambiental nestes projetos.

5. CONCLUSÕES

A partir das análises dos resultados obtidos nos ensaios realizados nesta pesquisa, foram obtidas as seguintes conclusões para cada material:

5.1. AÇOBRITA:

- O agregado siderúrgico açobrita cumpre com as especificações granulométricas contidas na norma NBR 16364 (ABNT, 2015). Segundo a ASSTHO o açobrita se classifica como um material A-1-a, consiste predominantemente em pedregulhos e areias com muito pouco material fino, sendo um excelente agregado granular;
- O agregado siderúrgico açobrita não apresentou plasticidade, sendo esta uma característica típica de materiais granulares. Com base nesta propriedade este material pode ser empregados como agregados em obras de pavimentação rodoviária;
- A densidade real dos grãos do açobrita é alta e muito variável, tendo diferenças no valor, não só pelo tamanho do grão analisado, mas também pela heterogeneidade na aparência física exibida por este. Essa heterogeneidade nos grãos, como citado por Rodhe (2002) pode ser atribuída a mudanças na composição química e mineralógica pela desigualdade nos processos físicos de resfriamento do material;
- O agregado siderúrgico açobrita apresentou uma perda por abrasão através do ensaio *Los Angeles* de 28% para a graduação A, da norma NBR NM 51 (ABNT, 2001). Este resultado está dentro do limite de 55% estabelecido pela norma NBR 16364 (ABNT, 2015) para agregado siderúrgico de bases e sub-bases de pavimentos rodoviários;
- O agregado siderúrgico açobrita apresenta uma curva de compactação abatida, sem um pico bem definido, característica de materiais granulares com baixa presença de finos; o que gerou dificuldade na identificação do teor de umidade ótimo e o peso específico aparente máximo da amostra; em consequência, nesta pesquisa se fez uma análise conjunta dos resultados dos ensaios de compactação e índice de suporte de Califórnia para definir o teor de umidade para o qual o material apresenta o melhor desempenho.
- O agregado siderúrgico açobrita apresentou um resultado de Índice de Suporte de Califórnia máximo de 183%, valor muito acima da especificação de 80% da norma NBR 16364 (ABNT, 2015) para agregado siderúrgico como material de pavimentação rodoviária.

- A expansão do agregado siderúrgico açobrita, obtida durante a fase de imersão dos corpos-de-prova em água a temperatura ambiente do ensaio de índice de suporte de Califórnia, que é o método tradicional para determinação da expansão de matérias para obras de pavimentação rodoviária, foi nula.
- Foi realizado no laboratório de geotecnia da Universidade de Brasília, o ensaio de expansão PTM 130 para o agregado siderúrgico açobrita, seguindo o procedimento descrito na norma ME113 (DNIT, 2009). Foi observada uma expansão média de três corpos-de-prova de 0,92%, muito menor que o limite de 3% estabelecido pela norma NBR 16364 (ABNT, 2015).
- A avaliação do potencial de expansão no agregado siderúrgico açobrita pelo método ME113 (DNIT, 2009), comumente denominado, PTM 130, tem uma grande importância, já que este representa fielmente por 14 dias as condições às quais o material pode estar submetido nas camadas de pavimento baixo a capa asfáltica, respeito a temperatura e condições de presença de água, sendo 7 dias na condição de submersa em água aquecida e mais 7 dias na condição saturada (não submersa) mantendo a temperatura. Por esse motivo, com base aos resultados obtidos pode-se considerar que o procedimento de controle da expansibilidade volumétrica adotado para este material é satisfatório, cumprindo com as especificações de expansão para uso em pavimentação rodoviária.

5.2. SOLO

- A análise granulométrica por sedimentação do solo, indicou que há a presença de aproximadamente 44% de partículas de argila; for determinado o limite de plasticidade de 47%, limite de liquidez de 68% e um índice de plasticidade de 21%, indicando uma alta plasticidade neste solo, características que segundo a recomendação da norma NBR 16364 (ABNT, 2015) restringem seu uso em misturas com agregado siderúrgico para camadas de base e de sub-base de pavimentos;
- O solo apresenta uma curva de compactação típica para solos coesivos, tanto para a energia normal quanto para energia modificada de compactação. O mesmo apresenta altos valores de umidade ótima de compactação e baixos valores de peso específico aparente seco máximo;

- O solo apresenta Índice de Suporte de Califórnia máximo de 26% na energia de compactação de Proctor normal e de 32% na energia de compactação de Proctor modificada, valores de suporte elevados para um material de subleito;
- A expansão, determinada na fase de imersão em água dos corpos-de-prova antes do ensaio de índice de suporte de Califórnia para a energia de compactação modificada, foi alta, mostrando mudanças volumétricas do material para qualquer teor de umidade. Este comportamento é indesejável para qualquer material que tenha interesse em ser empregado como matéria-prima em obras de pavimentação.

5.3. MISTURAS:

- As três misturas de açobrita e solo, atenderam as especificações granulométricas da norma NBR 16364 (ABNT, 2015). As misturas M7030 e M8020 enquadraram-se na faixa D da norma, enquanto a mistura M9010 enquadrou-se na faixa A da norma, basicamente por sua menor porcentagem de material fino. Por esses motivos, estas misturas, do ponto de vista granulométrico, são consideradas adequadas como material de base para projetos de pavimentação rodoviária com tráfego estimado de $N > 5 \times 10^6$;
- Quanto ao ensaio de limites de Atterberg, as três misturas se apresentaram não plásticas. Mesmo para mistura M7030, que possui 30% de solo na sua composição, este resultado foi muito importante, dado que as características adversas da alta plasticidade do solo não influenciaram de maneira negativa o comportamento mecânico das misturas;
- Em geral as curvas de compactação obtidas apresentaram uma configuração que mostram claramente um pico no valor de peso específico aparente seco e permitem determinar o teor de umidade ótimo de compactação para a mistura, sendo este corroborado avaliando conjuntamente com os resultados dos ensaios de Índice de Suporte de Califórnia.
- Os resultados dos ensaios de compactação revelam que mesmo tendo diferenças nos valores de Gs dos materiais das misturas, houve aumento do peso específico aparente seco máximo ponderado com o aumento no teor de açobrita em cada uma delas, equivalentemente, uma diminuição no teor de umidade ótimo de compactação e da análise das curvas de variação no índice de vazios em relação ao teor de umidade, percebe-se que os menores valores de índice de vazios foram obtidos para mistura M9010. Assim, pode-se dizer que esta mistura apresentou uma maior efetividade no

processo de compactação, tendo os melhores resultados para ser utilizada como camada de base para pavimentos rodoviários. Entretanto, levando-se em conta análises de custos e outras variáveis, as três misturas têm aplicabilidade para esta finalidade;

- Os resultados do ensaio de Índice de Suporte de Califórnia para as três misturas satisfazem amplamente os requerimentos da norma NBR 16364 (ABNT, 2015) para serem empregados como material de base de pavimentos rodoviários. Levando em conta critérios de dimensionamento e resultados de ensaios de Módulo de Resiliência, estes altos valores de Índice de Suporte de Califórnia podem ser traduzidos em menores espessuras das camadas de base de pavimentos rodoviários;
- A expansão determinada na fase de imersão em água dos corpos-de-prova antes do ensaio de índice de suporte de Califórnia nas três misturas foi baixa, mantendo-se dentro da especificação de 1% da norma NBR 16364 (ABNT, 2015). Os resultados indicam que embora o solo utilizado apresente uma alta plasticidade, estas características tem pouca influência no comportamento das misturas respeito aos ensaios de compactação e índice de suporte de Califórnia, abrindo a possibilidade de, com estudos complementares, reavaliar as especificações da norma NBR 16364 (ABNT, 2015) para o solo aplicável em misturas com açobrita, nos processos normativos DNIT dos quais esta pesquisa é subsidiária;
- O agregado siderúrgico açobrita apresentou bom desempenho para ser utilizado em obras de pavimentação rodoviária. Entretanto, dada a heterogeneidade do material, é recomendável a realização de ensaios de controle no material a ser utilizado em obra antes de sua aplicação;
- Os resultados obtidos nesta dissertação tenderão a contribuir nos processos normativos em elaboração pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), em relação a utilização de agregado siderúrgico açobrita misturado com solo, como material de base em pavimentos rodoviários. Vale ressaltar que os resultados obtidos ainda podem ser aplicados em trechos experimentais do DNIT, não somente com a mistura M8020 inicialmente proposta, mas também com as outras duas misturas avaliadas, M7030 e M9010, que igualmente apresentaram bom desempenho; podendo-se verificar a real influência em obra da utilização do açobrita misturado com este tipo de solo em camadas de base.

- Considerando-se que esta dissertação foi desenvolvida numa parceria DNIT-IABR-UnB vale ressaltar a importância da interação dos órgãos federais, as universidades e a empresa privada na busca do desenvolvimento sustentável de um país.

SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Esta dissertação é mais um passo no estudo da aplicabilidade do agregado siderúrgico açobrita em obras de pavimentação rodoviária, tema muito importante do ponto de vista técnico, econômico e ambiental. Por isto sugerem-se a seguir alguns tópicos para pesquisas futuras.

- Baseando-se nos resultados já obtidos, sugere-se a realização de ensaios de módulo de resiliência e compressão simples em amostras de misturas agregado siderúrgico açobrita com solo.
- Realizar ensaios com misturas de menores teores de agregado siderúrgico açobrita para que possam ser utilizadas como material de camadas de sub-base de pavimentos rodoviários.
- Realizar ensaios de expansão pelo método ME113 (DNIT, 2009) também para as misturas açobrita e solo, mesmo quando a referida norma estipula o ensaio somente para os materiais obtidos a partir de escórias siderúrgicas.
- Sugere-se o estudo, do ponto de vista mineralógico e químico, das mudanças nos valores de densidade real dos grãos do agregado siderúrgico açobrita, permitindo assim um melhor entendimento de seu comportamento.
- Estudar a influência da mistura de açobrita no melhoramento de solos de alta plasticidade.
- Avaliar os efeitos da sobrecarga nos ensaios de expansão pelo método do ISC e pelo método ME113 (DNIT, 2009), assim como as implicações das variações na energia de compactação dos corpos-de-prova e na temperatura dos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCP - Associação Brasileira De Cimento Portland (2009) Disponível em: < <http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/tipos/a-versatilidade-do-cimento-brasileiro#.VPhRDfmG8eE>> Acesso em: 5 de fevereiro de 2015.
- ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (2008). Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico, Gestão de Coprodutos – Nota Técnica. Brasília, DF.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 6459, Solo – Determinação do Limite de Plasticidade – Método de Ensaio.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 7180, Solo – Determinação do Limite de Liquidez – Método de Ensaio.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986). NBR 6457, Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização – Método de Ensaio.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1987). NBR 9937, Solo – Determinação do Limite de Liquidez – Método de Ensaio.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). NBR NM 51, Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles" – Método de Ensaio.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 10004, Resíduos sólidos – classificação.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 10005, Lixiviação de resíduos – Procedimento.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 10006, Solubilização de resíduos – Procedimento.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR NM 53, Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água – Método de Ensaio.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015). NBR 16364, Execução de sub-base e base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária — Procedimento.
- ALVARENGA, J. C. A. (2001) Um Estudo para a Avaliação Estrutural e Econômica de Pavimentos Flexíveis de Escória de Aciaria. Dissertação de mestrado, COPPE/Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ASTM – American Society for Testing and Materials (2003) D2940, Standard Specification for Graded Aggregate Material for Bases or Subbases for Highways or Airports.

ASTM – American Society for Testing and Materials (2014) D5550, Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer.

BALBO, J. T. (2007). Pavimentação Asfáltica – Materiais, Projeto e Restauração. Oficina de Textos, São Paulo/SP, Brasil.

BARBOSA, M. (2013). Caracterização Geoambiental da Escória de Aciaria de Cinco Estados Brasileiros. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

CASTELO BRANCO, V. T. F. (2004). Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CST - Companhia Siderúrgica Tubarão (2014) ACERITA ®. Disponível em <http://www.cst.com.br/sustentabilidade/gestao_ambiental/acerita/acerita.asp> Acesso em: 2 de fevereiro de 2015.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). EM 260, Emprego da Escória de Alto-forno em Pavimento Rodoviário – Especificação de Material.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). EM 262, Escória de Aciaria para Pavimento Rodoviário – Especificação de Material.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 051, Solos – Análise granulométrica – Método de Ensaio.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). ME 083, Agregados – Análise granulométrica – Método de Ensaio.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2016). ME 172, Solos – Determinação do Índice de Suporte de Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2013). ME 113, Pavimentação rodoviária – Agregado artificial – Avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria – Método de Ensaio.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2009). ME 164, Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio.

- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2014). Rede Rodoviária do Plano Nacional de Viação, atualizado até 08/01/2015.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2009). DNIT 114 ES, Pavimentação rodoviária – Sub-base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria – ACERITA® - Especificação de serviço.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2009). DNIT 115 ES, Pavimentação rodoviária – Base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria – ACERITA® - Especificação de serviço.
- EMERY, J. J. (1978). Utilisation des scories d'aciérie dans la construction des autoroutes canadiennes. Revue de Métallurgie, Canada. 303 p.
- FCT – Fundação Centro Tecnológico de Juiz de Fora (2005). Projeto IBS, 2º Relatório Técnico de Acompanhamento: Apresentação ensaios de caracterização do agregado siderúrgico. Juiz de Fora, MG, Brasil. 108 p.
- FREITAS, H. B. (2007). Misturas Asfálticas de Módulo Elevado com Uso de Escória de Aciaria como Agregado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- GEYER, R. M. T. (2001). Estudo Sobre a Potencialidade de Uso das Escórias de Aciaria como Adição ao Concreto. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
- IABR- Instituto Aço Brasil (2015). Estadísticas. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/estatisticas.asp>> Acesso em: 5 de fevereiro de 2015.
- IABR- Instituto Aço Brasil (2010). Panorama de Escória de Aciaria no Brasil. Seminário Internacional de Aplicação da Escória de Aciaria. Belo Horizonte/MG – Brasil.
- ISO – International Organization for Standardization (2006). ISO 14040: Environmental Management. Life Cycle assessment. Principles and Framework.
- JAPAN INSTITUTE STANDARD (1992). JIS A 5015 – Escória siderúrgica para construção de estradas – (tradução em português).
- MACHADO, A. T. (2000). Estudo Comparativo dos Métodos de Ensaio para Avaliação da Expansibilidade das Escórias de Aciaria. Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia de Construção Civil - POLI/USP, São Paulo, SP, Brasil. 135 p.

- MANCIO, M. (2001). Contribuição ao estudo do fenômeno de instabilidade volumétrica das escórias de aciaria elétrica. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil.
- MASUERO, A. B; VILELA, A. C.; DAL MOLIN, D (2000). Emprego de escória de aciaria elétrica como adição a concretos. Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais, São Paulo, Brasil.
- MASUERO, A. B; VILELA, A. C.; DAL MOLIN, D (2004). Estabilização e viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria elétrica. Ambiente Construído. v.4, n.2. Porto Alegre, Brasil.
- MCGANNON, H. E. (1971). The Making, Shaping and Treating of Steel. Pittsburgh, Pennsylvania: United States Steel Corporation. Ninth Edition.
- MINITECNOLOGIAS (2009). Processos De Minitecnologias. Disponível em: <<http://www.minitecnologias.com.br/processos.html>> Acesso em: 23 de fevereiro de 2015.
- MYMRIN, V.; PONTE H. A. (2007). Auto-Binding Properties of Different Types of Steelmaking Slags. Technical contribution to XXXVIII Steelmaking Seminar – International, May 20th to 23rd, 2007, Belo Horizonte, MG, Brazil.
- NSA - NATIONAL SLAG ASSOCIATION (2013). Slag in History. Disponível em: <<http://www.nationalslag.org/slag-history>> Acesso em: 23 de Junho de 2015.
- NSA - NATIONAL SLAG ASSOCIATION (1980). Iron and Steel Slags, Non-Hazards. Disponível em: <http://www.nationalslag.org/sites/nationalslag/files/nsa_194-5_slag_non-hazard.pdf> Acesso em: 23 de novembro de 2015.
- PARENTE, E.B.; BOAVISTA A.H e SOARES J.B (2003). Estudo do comportamento mecânico de misturas de solo e escória de aciaria para aplicação na construção rodoviária na região metropolitana de Fortaleza. XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Brasil.
- PENNSYLVANIA TESTING METHOD – PTM 130 (1978). Evaluation of Potential Expansion of Steel Slags.
- RAPOSO, C. (2005). Estudo experimental de compactação e expansão de uma escória de aciaria LD para uso em pavimentação. Dissertação de mestrado da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil. 163 p.
- RESENDE, A. D. Utilização da escoria de aciaria pura e com adição de argila como camada de base em pavimentação rodoviária. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil. 210 p.

- RHODE, L. (2002). Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos - estudo laboratorial. Dissertação de mestrado em engenharia Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. 101 p.
- RHODE, L; NUÑEZ, W e CERATTI, J. (2003) Escória de aciaria elétrica: uma alternativa ao materiais granulares tradicionais. Revista de Transportes, vol XI, ANPET – Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. Brasil
- RUBIO, A. R., CARRETERO, J. G. (1991) Application of Steel slags in roadways (in Spanish). Civil engineering, Spain.
- SOUZA, M. L. (1980) Pavimentação rodoviária. Livros Técnicos e Científicos S. A. Rio de Janeiro. Brasil
- SOUSA, G. M. (2007). Estudo Experimental de Escórias de Aciaria para Fins de Caracterização Tecnológica como Material de Lastro Ferroviário em Vias Sinalizadas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil. 124p.
- UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2015). Matérias Primas Para Engenharia De Materiais. Disponível em: <URL <http://www.ufrgs.br/lacor/AluminioCobreFerro.html>> Acesso em: 3 de fevereiro de 2015.