

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

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE AÇOBRITA EM
PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

VICTOR HUGO SOUZA OLIVEIRA

ORIENTADOR: LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO
CO-ORIENTADOR: ANDRÉ LUIS BRASIL CAVALCANTE

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL II EM ENGENHARIA
CIVIL**

BRASÍLIA / DF: 07 / 2016

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

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE AÇOBRITA EM
PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

VICTOR HUGO SOUZA OLIVEIRA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

**LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc (UnB)
(ORIENTADOR)**

**ANDRÉ LUIS BRASIL CAVALCANTE, DSc (UnB)
(COORIENTADOR)**

**CLÁUDIA MÁRCIA COUTINHO GURJÃO, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**SILVANA FAVA MARCHEZINI, MSc (IFMT)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF, 07 de JULHO de 2016.

OLIVEIRA, VICTOR HUGO SOUZA

Análise da Viabilidade do Uso de Açobrita em Pavimentos Rodoviários

Distrito Federal, 2016.

91 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2016)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Açobrita

2. Pavimentação

3. Base e Sub-base

4. Caracterização

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, V.H.S. (2016). Análise da Viabilidade do Uso de Açobrita em Pavimentos Rodoviários. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Victor Hugo Souza Oliveira

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Análise da Viabilidade do Uso de Açobrita em Pavimentos Rodoviários.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2016

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

Victor Hugo Souza Oliveira

SHVP rua 10, chácara 162

72007310 - Taguatinga/DF - Brasil

RESUMO

Este documento apresenta o estudo sobre a utilização do açobrita como agregado em estruturas de pavimentação. Um dos coprodutos gerados a partir dos processos de produção do aço, o açobrita é o material resultante da britagem, estabilização granulométrica e redução do potencial de expansão da escória de aciaria. Realizou-se uma revisão da atual bibliografia que compreende o cenário da indústria siderúrgica no Brasil, as etapas da produção do aço, a geração de coprodutos, a produção escória, sua caracterização, aplicação e transformação em açobrita. Como parte inicial da metodologia proposta, são apresentadas as características mineralógicas, físicas e mecânicas das escórias de aciaria e do coproduto açobrita. O estudo apresenta uma avaliação dos mecanismos de expansão da escória não curada, analisando os principais métodos utilizados para caracterizar o fator expansão das escórias de aciaria. São pontuados os campos aplicáveis das escórias, especificando-se os usos em pavimentação. O estudo compreende as características recomendadas, a normativa técnica, os critérios de aceitação do insumo para este fim, as recomendações executivas e as vantagens e desvantagens econômicas, ambientais e de natureza prática da utilização do açobrita. Determinaram-se as propriedades físicas e mecânicas do açobrita, do solo e da mistura por meio de ensaios seguindo os procedimentos recomendados por normas nacionais e internacionais. Apresentou-se o comportamento do açobrita misturado com um solo tropical, em diferentes proporções, para sua utilização como elemento constituinte das camadas de pavimentos rodoviários. Este estudo é componente de um projeto que avalia a viabilidade da introdução deste coproduto no mercado para o emprego em diversas áreas da Construção Civil como agregado. Os resultados obtidos indicaram a aplicabilidade do açobrita e das misturas dele com solo tropical em obras rodoviárias e serão aplicados no desenvolvimento de procedimentos normativos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

Palavras-chave: açobrita, caracterização, expansibilidade, viabilidade e pavimentação.

ABSTRACT

This document is part of the line of research that analyses the utilization of the steel slag in structural layers of pavements. One of the byproducts from the production of steel, the steel slag is crushed, sized properly and treated in relation to its volume expansion potential to be used as a highly resistant aggregate. In this context, it was conducted a review of the current literature that involves the scenario of steel industry in Brazil, the stages of steel production, the main co-products obtained from this process, slag production, characterization, application and treatment. As an initial part of the proposed methodology, it was presented the mineralogical, physical and mechanical properties of the steel slag. Also, this study comprehends an analysis of the expansion mechanisms of untreated slags due to the presence of CaO, MgO, FeO and those ones caused by allotropic transformation of dicalcium silicate and calcium orthosilicate. It was described the primary methods developed to characterize the expansion of steel slag, as well as the most appropriate methods of volume stabilization. It is presented the several engineering areas in which the material can be applied, with special reference to pavements. The study includes the recommended characteristics, technical standards, executive recommendations and the advantages and disadvantages of economic, environmental and practical uses of steel slag. By lab testing, it was determined the physical and mechanical properties of samples of steel slag, soil and mixes, in different proportions, of these two materials. The testing stage is based on Brazilian and international geotechnical standards. This document is part of a project that assesses the feasibility of the introduction of this co-product in Construction Industry in Brazil.

Keywords: steel slag, characterization, expansion potential, feasibility, pavement.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	A INDÚSTRIA SIDERÚRGICA BRASILEIRA.....	3
2.2	OS COPRODUTOS DA SIDERURGIA.....	5
2.3	AS ESCÓRIAS.....	7
2.3.1	ESCÓRIA DE ACIARIA.....	8
2.3.2	CARACTERÍSTICAS FISIO-QUÍMICAS DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA ..	11
2.3.3	A EXPANSIBILIDADE DAS ESCÓRIAS.....	13
2.3.4	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE EXPANSIBILIDADE.....	17
2.3.5	MÉTODOS DE ESTABILIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA	1919
2.4	APLICABILIDADE DAS ESCÓRIAS.....	200
2.5	UTILIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS EM ESTRUTURAS DE PAVIMENTAÇÃO.....	21
2.5.1	NORMAS BRASILEIRAS - UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA EM CAMADAS DE PAVIMENTOS	24
2.5.2	UTILIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA COMO COMPONENTE AGREGADO DE BASE E SUB-BASE	25
2.6	O COPRODUTO AÇOBRITA.....	2929
2.6.1	HISTÓRICO DE OBRAS	355
3	METODOLOGIA.....	38
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	39
3.2	AMOSTRAGEM.....	40
3.3	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	40
3.4	PESO ESPECÍFICO REAL DOS GRÃOS	41
3.5	LIMITES DE ATTERBERG.....	41
3.6	ABSORÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO	42
3.7	ABRASÃO	42
3.8	COMPACTAÇÃO.....	42
3.9	EXPANSÃO E ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA.....	43
3.10	EXPANSÃO PELO MÉTODO PTM 130	43
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	46
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	46
4.2	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	46
4.2.1	AÇOBRITA.....	46

4.2.2	SOLO.....	48
4.2.3	MISTURA M7030.....	50
4.2.4	MISTURA M8020.....	52
4.2.5	MISTURA M9010.....	54
4.3	LIMITES DE ATTERBERG.....	56
4.3.1	AÇOBRITA.....	56
4.3.2	SOLO.....	56
4.3.3	MISTURAS M7030, M8020 e M9010	58
4.4	PESO ESPECÍFICO REAL DOS GRÃOS	59
4.4.1	AÇOBRITA.....	59
4.4.2	SOLO.....	60
4.4.3	MISTURA M7030.....	60
4.4.4	MISTURA M8020.....	Erro! Indicador não definido.
4.4.5	MISTURA M9010.....	Erro! Indicador não definido.
4.5	ABSORÇÃO.....	60
4.5.1	AÇOBRITA.....	60
4.6	RESISTÊNCIA À ABRASÃO “LOS ANGELES”	61
4.6.1	AÇOBRITA.....	61
4.7	COMPACTAÇÃO E ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA	61
4.7.1	AÇOBRITA.....	61
4.7.2	SOLO.....	64
4.7.3	M7030.....	67
4.7.4	M8020.....	69
4.7.5	M9010.....	71
4.7.6	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO E ISC	74
4.8	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE EXPANSÃO – MÉTODO ME113 (DNIT, 2009).....	76
4.8.1	AÇOBRITA.....	76
4.8.2	MISTURA M8020.....	80
5	CONCLUSÕES.....	84
5.1	ANÁLISES DO SOLO	84
5.2	ANÁLISES DO AÇOBRITA	84
5.3	ANÁLISES DAS MISTURAS M7030, M8020 E M9010.....	85
6	BIBLIOGRAFIA	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Distribuição Regional da Produção de Aço no Brasil.....	3
Tabela 2.2 - Contribuição na Produção de Aço por Processo	4
Tabela 2.3 - Composição mineralógica das escórias de aciaria (MACHADO, 2000)	11
Tabela 2.4 - Composição química da escória de aciaria BOF ou LD (IBS, 1999 apud DONIZETTI, 2010).....	12
Tabela 2.5 - Características físico-químicas das escórias de aciaria (CASTELO BRANCO, 2004).....	12
Tabela 2.6 - Características das espécies químicas isoladas antes e após a hidratação (WEAST, 1971 <i>apud</i> MACHADO, 2000)	13
Tabela 2.7 - Características dos principais métodos de determinação do potencial de expansão das escórias de aciaria (POLESE, 2007)	189
Tabela 2.8 - Faixa granulométrica da escória de aciaria LD com redução de expansão (DNIT, 2009).....	30
Tabela 2.9 - Faixa granulométrica do solo (DNIT, 2009).....	30
Tabela 2.10 - Faixas granulométricas das misturas - escória de aciaria LD com redução de expansão + solo (DNIT, 2009)	31
Tabela 2.11 - Faixa granulométrica da escória de aciaria LD com redução de expansão (DNIT, 2009).....	31
Tabela 2.12 - Faixa granulométrica do solo (DNIT, 2009).....	32
Tabela 2.13 - Faixa granulométrica da escória de aciaria LD com redução de expansão (DNIT, 2009).....	33
Tabela 4.1 - Análise Granulométrica das Amostras de Açobrita	46
Tabela 4.2 - Resumo das Características Granulométricas das Amostras de Açobrita Segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995).....	488
Tabela 4.3 - Análise Granulométrica do Solo Segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995).....	49
Tabela 4.4 - Análise Granulométrica da Mistura M7030.....	50
Tabela 4.5 - Resumo das Características Granulométricas da Mistura M7030.....	51
Tabela 4.6 - Análise Granulométrica da Mistura M8020.....	52

Tabela 4.7 - Resumo das Características Granulométricas da Mistura M8020.....	53
Tabela 4.8 - Análise Granulométrica da Mistura M9010.....	54
Tabela 4.9 - Resumo das Características Granulométricas da Mistura M9010.....	55
Tabela 4.10 - Limite de Liquidez do Solo Natural	56
Tabela 4.11 - Análise da Variação na Densidade Real dos Grãos de Açobrita	59
Tabela 4.12 - Resultados dos Ensaios de Compactação, Expansão e Índice de Suporte Califórnia para o Açobrita	63
Tabela 4.13 - Resultados Ensaio de Compactação com Energias Proctor Normal e Modificado para o Solo.....	65
Tabela 4.14 - Resultados dos Ensaios de Compactação e Índice de Suporte Califórnia na Energia Proctor Normal	65
Tabela 4.15 - Resultados dos Ensaios de Compactação e Índice de Suporte Califórnia do Solo na Energia Modificada	66
Tabela 4.16 - Resultados dos Ensaios de Compactação e ISC Para a Mistura M7030.....	68
Tabela 4.17 - Resultados dos Ensaios de Compactação e ISC Para a Mistura M8020.....	70
Tabela 4.18 - Resultados dos Ensaios de Compactação e Índice de Suporte Califórnia da Mistura M9010	72
Tabela 4.19 - Resumo dos Ensaios de Compactação e Índice de Suporte Califórnia para os Materiais Compactados na Energia Modificada.....	74
Tabela 4.20 - Resultados do Ensaio de Expansão do Açobrita pelo Método ME113 (DNIT, 2009).....	76
Tabela 4.21 - Taxa de Expansão Acumulada ao Longo do Tempo de Ensaio.....	77
Tabela 4.22 - Resultados do Ensaio de Expansão da Mistura M8020 pelo Método ME113 (DNIT, 2009)	80
Tabela 4.23 - Taxa de Expansão Acumulada ao Longo do Tempo de Ensaio.....	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Distribuição Regional da Produção de Aço.....	4
Figura 2.2 - Contribuição na Produção de Aço por Processo de Aciaria (IABR, 2014).....	4
Figura 2.3 - Distribuição da Geração de Coprodutos e Resíduos por Tipo em 2013 (IABR, 2014).....	5
Figura 2.4 - Destinação dos coprodutos e resíduos em 2013	5
Figura 2.5 – Destinação e aplicação das escórias de alto-forno em 2013 (IABR, 2014).....	6
Figura 2.6 - Destinação (à esquerda) e Aplicação (à direita) das Escórias de Aciaria em 2013 (IABR, 2014).....	7
Figura 2.7 - Os processos de aciaria EAF e LD (IABR, 2014).....	9
Figura 2.8 - Erupções no revestimento devido à cura inadequada da escória de aciaria (SILVA, 2002 apud CASTELO BRANCO, 2004)	222
Figura 2.9 - Fissuras no revestimento devido à cura inadequada da escória de aciaria (SILVA, 2002 apud CASTELO BRANCO, 2004)	23
Figura 3.1 - Corpos de Prova da Mistura M8020 Submetidos à Etapa de Submersão.....	44
Figura 4.1 - Curvas Granulométricas do Açobrita Ensaiado.....	47
Figura 4.2 - Curvas Granulométricas do Solo	49
Figura 4.3 - Curva Granulométrica da Mistura M7030.....	51
Figura 4.4 - Curva Granulométrica da Mistura M8020.....	52
Figura 4.5 - Curva Granulométrica da Mistura M9010.....	55
Figura 4.6 - Limite de Liquidez do Solo Natural	57
Figura 4.7 - Carta de Plasticidade de Casagrande	58
Figura 4.8 - Curva de Compactação do Açobrita	62
Figura 4.9 - Curvas de Compactação e Índice de Suporte Califórnia do Açobrita	63
Figura 4.10 - Corpos de Prova Desmoldados Após o Ensaio de Compactação	64
Figura 4.11 - Curvas de Compactação do Solo nas Energias Proctor Normal e Modificado...65	
Figura 4.12 - Curva de Compactação da Mistura M7030 na Energia Proctor Modificada.....	67

Figura 4.13 - Curvas de Compactação e Índice de Suporte Califórnia da Mistura M7030.....	68
Figura 4.14 - Curva de Compactação da Mistura M8020.....	69
Figura 4.15 - Curvas de Compactação e Índice de Suporte Califórnia da Mistura M8020.....	70
Figura 4.16 - Curva de Compactação da Mistura M9010.....	71
Figura 4.17 - Curvas de Compactação e Índice de Suporte Califórnia da Mistura M9010.....	73
Figura 4.18 - Curvas de Compactação do Açobrita e das Misturas Analisadas.....	74
Figura 4.19 - Índice de Vazios das Amostras de Açobrita e das Misturas Analisadas.....	75
Figura 4.20 - Valores de Expansão Acumulada do Açobrita ao Longo do Tempo de Ensaio.....	78
Figura 4.21 - Amostra de Açobrita Após Ensaio de Expansão.....	79
Figura 4.22 - Valores de Expansão Acumulada da Mistura M8020.....	82
Figura 4.23 - Amostra da Mistura M8020 Após Ensaio de Expansão.....	83

LISTA DE SÍMBOLOS

CO₂ - Dióxido de Carbono

Mn - Manganês

P - Fósforo

S - Enxofre

OH - Open Heart

BOF - Blast Oxygen Furnace

EAF - Electric Arc Furnace

CaO - Óxido de Cálcio

C - Carbono

Si - Silício

CaCO₃.MgCO₃ - Dolomito

SiO₂ - Dióxido de Silício

MnO - Óxido de Manganês

P₂O₅ - Pentóxido de fósforo

Cr₂O₃ - Óxido de Cromo

Al₂O₃ - Óxido de Alumínio

MgO - Óxido de Magnésio

FeO - Óxido de Ferro

Fe₂O₃ - Hematita

Fe(OH)₂ - Hidróxido de Ferro

CaCO₃ - Carbonato de Cálcio

CaF₂ - Fluoreto de Cálcio

MnO₂ - Dióxido de Manganês

C₂S - Silicato Dicálcico

pH - Potencial Hidrogeniônico

D_{máx} - Malha da peneira na qual ficou retido o percentual acumulado igual ou imediatamente inferior a 5%

C_c - Coeficiente de curvatura

C_{nu} - Coeficiente de não uniformidade

D₁₀ - Diâmetro para o qual há 10% de material passante

D₃₀ - Diâmetro para o qual há 30% de material passante

D₆₀ - Diâmetro para o qual há 60% de material passante

LA - Grupo de solos lateríticos areia

LA' - Grupo de solos lateríticos arenosos

LG' - Grupo de solos lateríticos argilosos

γ_s - Peso específico real dos grãos

M7030 - Mistura composta por 70% de açobrita e 30 % de solo, em peso, respectivamente

M8020 - Mistura composta por 80% de açobrita e 20 % de solo, em peso, respectivamente

M9010 - Mistura composta por 90% de açobrita e 10 % de solo, em peso, respectivamente

S - Saturação

LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - American Society for Testing and Materials

BG - Brita Graduada

BGR - Brita graduada Simples

BOF - Blast Oxygen Furnace

CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ - Concreto Asfáltico Usinado a Quente

CCA - Centro de Coprodutos Aço Brasil

COSIPA - Companhia Siderúrgica Paulista

CP - Corpo de Prova

CSN - Companhia Siderúrgica Nacional

CST - Companhia Siderúrgica de Tubarão

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre

DTP - Departamento de Transportes da Pensilvânia

EAF - Electric Arc Furnace

EOF - Electric Optimizing Furnace

IABR - Instituto Aço Brasil

IDH - Índice de Desenvolvimento Humano

IES - Índice de Estado de Superfície

IP - Índice de Plasticidade

IPR - Instituto de Pesquisas Rodoviárias

ISC - Índice de Suporte Califórnia

JIS - Japanese Industrial Standards

LD - Linz e Donawitz

LL - Limites de Liquidez

LP - Limite de Plasticidade

MR - Módulo de Resiliência

NBR - Norma Brasileira Registrada

NSA - National Slag Association

OH - Open Heart

PPG - Programa de Pós-graduação

PTM - Pennsylvania Test Method

SUCS - Sistema Unificado de Classificação de Solos

TIMS - Terminal Intermodal da Serra

TRB - Transportation Research Board

1 INTRODUÇÃO

Em 2010, o Centro de Gestão de Estudos Estratégicos, uma organização social supervisionada pelo Ministério da Ciência e Tecnologia elaborou o Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico. O documento apresenta um conjunto de medidas estruturantes que se constituem subsídio para as futuras políticas públicas relacionadas à indústria. O estudo compreende o período de 2010 a 2025, e dentre tais medidas, cita a melhoria do desempenho ambiental, o desenvolvimento de inovações incrementais, a gestão de resíduos e a importância do fomento a estudos relacionados à utilizações mais nobres de coprodutos da aciaria. Este documento atesta a necessidade do desenvolvimento de novas pesquisas e a elaboração de novas normas que regulem a utilização de resíduos como a escória de aciaria nos processos construtivos dentro das áreas de atuação da Engenharia Civil (CGEE, 2010).

Dentre as medidas estruturantes, cita-se:

- Maior articulação empresa/governo/academia e programa de vigilância tecnológica e adoção de inovações incrementais;
- Melhoria do desempenho ambiental da aciaria LD (Linz e Donawitz) com o desenvolvimento de inovações incrementais;
- Aprofundamento do conhecimento de tecnologias ainda não disseminadas na siderurgia brasileira e melhoria das condições operacionais das tecnologias já adotadas pelas siderúrgicas brasileiras;
- Vigilância tecnológica em relação aos novos produtos siderúrgicos e articulação entre as usinas siderúrgicas e os consumidores;
- Apoio ao desenvolvimento de produtos siderúrgicos de maior sofisticação tecnológica;
- Articulação governo/sociedade/empresa com definição de projetos ambientais prioritários e defesa dos interesses setoriais em negociações internacionais;
- Maior conhecimento de progressos tecnológico que permitam a retração das emissões atmosféricas em usinas integradas a coque;
- Diminuição do consumo de energia pela indústria siderúrgica brasileira;
- Aperfeiçoamento dos esforços já realizados na gestão de resíduos e reciclagem;

Estas diretrizes representam uma resposta aos questionamentos atuais e necessários acerca dos cenários ambientais que o país objetiva estabelecer. Demonstrem, portanto, a postura político-econômica que o país pode adotar durante o período que compreende esses

anos em relação à indústria siderúrgica e ao desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis. Neste contexto, percebe-se a importância de se incentivar o desenvolvimento de novos insumos e avaliar as limitações daqueles já propostos, mas que têm pouca representatividade no mercado.

Este estudo representa uma análise da viabilidade do uso da escória de aciaria e da proposta de normatização e comercialização do coproduto de processos siderúrgicos, denominado açobrita. Neste sentido, o Instituto Aço Brasil tem apoiado de forma direta estes tipos de estudo, fornecendo apoio tecnológico e gerenciamento de parcerias com as empresas siderúrgicas no sentido de produzir materiais com as especificações técnicas adequadas e fornecer amostras desse material para que grupos de pesquisa analisem a viabilidade técnica, econômica e ambiental do emprego desse material para diversos fins no contexto da Engenharia. Assim, esta pesquisa compreende a avaliação da viabilidade do uso dos coprodutos do aço em camadas de estruturas de pavimentação.

1.1. OBJETIVOS

- Avaliar a aplicabilidade do coproduto siderúrgico açobrita como elemento constituinte nas camadas de pavimentos rodoviários.
- Determinar as propriedades físicas e mecânicas do açobrita por meio de ensaios de laboratório.
- Avaliar o comportamento do açobrita misturado com um solo tropical, em diferentes proporções, para sua utilização como elemento constituinte de camadas de sistemas viários e contribuir com o desenvolvimento de procedimentos normativos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A INDÚSTRIA SIDERÚRGICA BRASILEIRA

O parque siderúrgico brasileiro é o maior da América do Sul, representando o parque de maior importância da América Latina e a nona maior produção de aço no mundo, ocupando o sexto lugar mundial como exportador líquido de aço em 2014. O parque siderúrgico brasileiro é composto atualmente por 29 usinas, administradas por 11 grupos empresariais (IABR, 2016)

A partir de 1994, após os processos de privatização e reestruturação do mercado, o setor tem movimentado um expressivo afluxo de capitais e produz por ano 33 milhões de toneladas de aço bruto. Este valor representa um saldo comercial de US\$ 2,7 bilhões anualmente (IABR, 2015). Dada a intensa demanda gerada pelos principais setores consumidores de aço, dos quais destacam-se a Construção Civil e o setor Automotivo, fazem-se necessárias diretrizes que compreendam a modernização tecnológica e o desenvolvimento de planos de melhoria do gerenciamento ambiental.

Grande parte das indústrias siderúrgicas está localizada na região Sudeste, o que corresponde 94% da produção nacional em 2014 (IABR, 2014). Entretanto, a instalação de siderúrgicas nas regiões Sul e Norte ampliou a dispersão geográfica do parque produtivo.

Na Tabela 2.1, pode-se observar a distribuição regional da produção de aço bruto no Brasil:

**Tabela 2.1- Distribuição Regional da Produção de Aço no Brasil
(IABR, 2014)**

DISTRIBUIÇÃO REGIONAL DA PRODUÇÃO		
JANEIRO/DEZEMBRO - 2014		
ESTADO	AÇO BRUTO (10 ³ t)	PARTICIPAÇÃO (%)
MINAS GERAIS	11,085.8	32.7
RIO DE JANEIRO	10,474.1	30.9
SÃO PAULO	4,800.0	14.2
ESPÍRITO SANTO	5,699.2	16.8
OUTROS	1,853.1	5.5
TOTAL	33,912.2	100.0

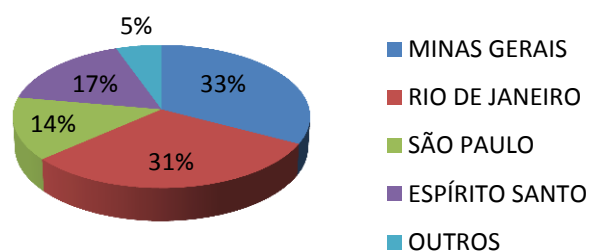


Figura 2.1 - Distribuição Regional da Produção de Aço no Brasil (IABR, 2014)

No Brasil os dois processos de aciaria mais utilizados são o de fusão e refino de sucata em fornos elétricos a arco e o de refino do ferro-gusa líquido em conversores a oxigênio.

Na Tabela 2.2 pode-se observar a contribuição na produção de aço pelos dois tipos de processos de aciaria no Brasil:

Tabela 2.2 - Contribuição na Produção de Aço por Processo de Aciaria (IABR, 2014)

PRODUÇÃO DE AÇO BRUTO POR PROCESSO DE ACIARIA (2014)		
PROCESSO	10 ³ t	PARTICIPAÇÃO (%)
<i>OXIGÊNIO(LD)/EOF</i>	26,127.0	77.0
<i>ELÉTRICO</i>	7,785.2	23.0

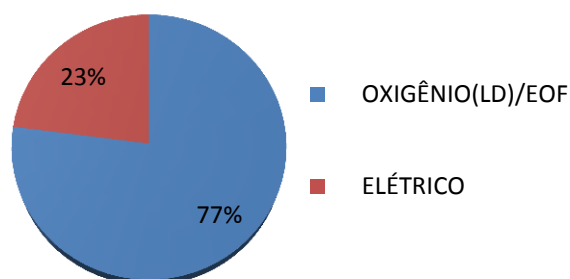


Figura 2.2 - Contribuição na Produção de Aço por Processo de Aciaria (IABR, 2014)

2.2 OS COPRODUTOS DA SIDERURGIA

A produção de coprodutos e resíduos é bastante significativa no processo de produção de aço. Para cada tonelada de aço bruto produzido, gera-se mais de 600 kg de coprodutos e resíduos. Em 2011, as empresas associadas produziram um total de 19,2 milhões de toneladas de coprodutos e resíduos. Atualmente, 80% do total de coprodutos e resíduos são aproveitados, seja internamente nas próprias empresas ou por terceiros (IABR, 2014).

A Figura 2.3 apresenta o resumo da geração dos diferentes tipos de coprodutos no país no ano de 2013:

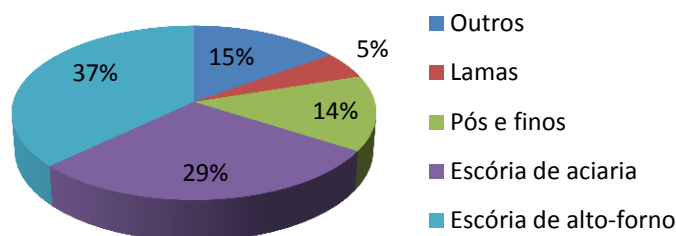


Figura 2.3 - Distribuição da Geração de Coprodutos e Resíduos por Tipo em 2013 (IABR, 2014)

Segundo a pesquisa do Relatório de Sustentabilidade do Instituto Aço Brasil de 2014 (IABR, 2014), a geração de escória de alto-forno representa 37%, e escória de aciaria, 29%. O restante é formado por finos, pós, lamas e outros, resultantes dos processos e sistemas de tratamento existentes. Desse total, 88% são reaproveitados (Figura 2.4).

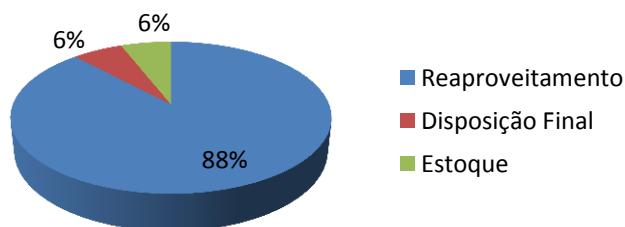


Figura 2.4 - Destinação dos coprodutos e resíduos em 2013 (IABR, 2014)

O desenvolvimento de pesquisas relacionadas à geração de coprodutos atrai as empresas do setor, uma vez que parte considerável da receita se deve a esse reaproveitamento. A geração média de coprodutos e resíduos no processo de produção varia em função dos processos de aciaria e dos produtos finais de cada companhia. Apenas uma pequena parte do total de resíduos (pouco mais de 3%) é classificada como resíduos perigosos classe I, que precisam ser tratados e encaminhados para aterros industriais, construídos de acordo com as especificações requeridas para receber esse tipo de resíduo. Aproximadamente 66% dos coprodutos gerados no processo são escórias. Estes materiais, resultantes da redução do minério de ferro e da transformação do ferro-gusa em aço, podem ser utilizados na produção de cimento, bases de estradas, produção de fertilizantes e corretivos de solos, entre outras aplicações, a maior parte vem sendo utilizada na produção de cimentos. A utilização deste tipo de componente traz benefícios ambientais significativos, como a redução das emissões de CO₂ devido à substituição do clínquer (IABR, 2014).

Observa-se atualmente a iniciativa das empresas de se desenvolver, juntamente ao Centro de Coprodutos Aço Brasil (CCA), projetos para ampliação dos mercados existentes e para a abertura de novos mercados a fim de potencializar a venda desses materiais.

Segundo o Relatório de Sustentabilidade (IABR, 2012), a venda dos coprodutos gerou, em 2011, uma receita de aproximadamente R\$ 393,8 milhões às empresas do setor. Neste número está incluído ainda os valores de exportação, que em 2011, foram cerca de 17.975 toneladas, sendo a China o principal destino desse material.

O IABR (2014) fornece os dados da destinação e da aplicação do coproduto escória de alto-forno. Observa-se que sua quase totalidade (99%) foi vendida em 2013. Sua utilização é aplicada principalmente na produção de cimento (Figura 2.5).

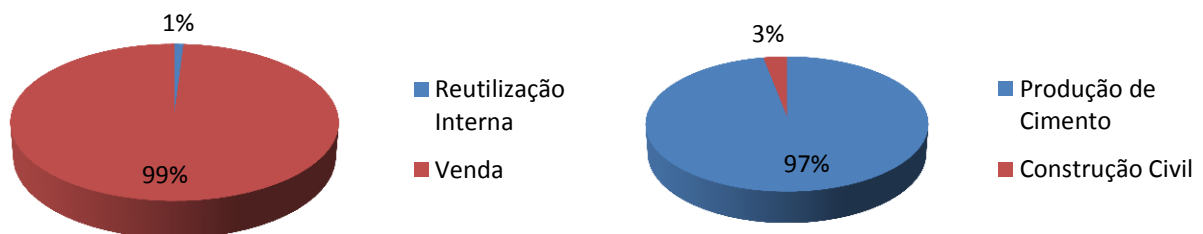


Figura 2.5 – Destinação e aplicação das escórias de alto-forno em 2013 (IABR, 2014)

No caso das escórias de aciaria, 52% foram vendidas e 26% reutilizadas internamente. A Figura 2.6 mostra esta realidade. Com base nesta figura pode-se observar que a principal aplicação (62%) foi como base e sub-base na pavimentação de estradas (IABR, 2014).

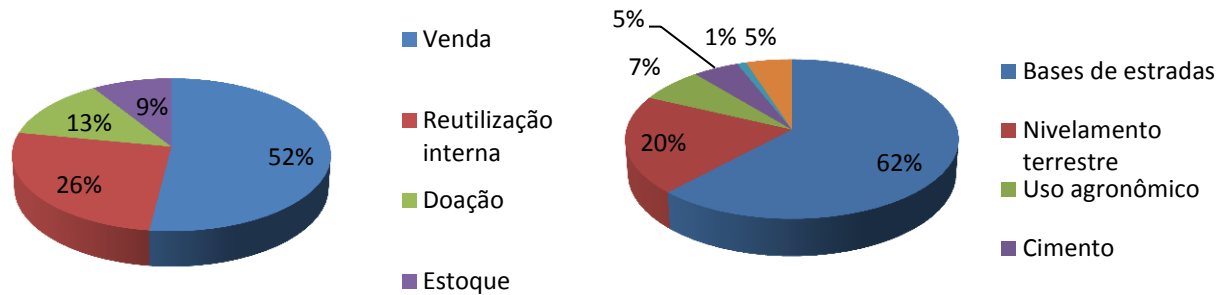


Figura 2.6 - Destinação (à esquerda) e Aplicação (à direita) das Escórias de Aciaria em 2013 (IABR, 2014)

2.3 AS ESCÓRIAS

A etimologia da palavra escória deriva do latim “scoria” e do grego “skória”, e significa resíduo silicioso que se forma juntamente com a fusão de metais, sem valor agregado, mas de importância fundamental no processo siderúrgico (BALTAZAR, 2001).

O termo escória refere-se ao resíduo da fusão de metais ou da redução de minérios provenientes de sua combustão ou tratamento industrial. A produção em larga escala da escória é resultante de dois processos siderúrgicos e que definem sua classificação: a fusão redutora dos minérios no alto forno para a obtenção do ferro gusa, que resulta na geração da escória de alto-forno; a produção do aço proveniente dos conversores a oxigênio e fornos elétricos, que gera a escória de aciaria durante a conversão do ferro gusa líquido e da sucata em aço (SOUZA, 2007).

A composição química das escórias de aciaria é consideravelmente variável, sendo função matéria-prima utilizada e de seu processo de produção. A escória do gusa (ferro de primeira fusão) ou escória de alto-forno apresenta cerca de 4% de carbono em sua constituição química, enquanto as escórias de aciaria apresentam até 1,7% de carbono (SILVA, 1988 *apud* BALTAZAR, 2001).

Devido aos processos que precedem a produção da escória de aciaria, de forma geral, sua composição é predominantemente de óxidos e silicatos, com a eventual presença de aluminatos, fosfatos e boratos em uma reação endotérmica. (MOORE, 1990 *apud* GRAFFITTI, 2002).

2.3.1 ESCÓRIA DE ACIARIA

O processo siderúrgico começa nas minerações, onde são extraídas as matérias-primas, tais como minério de ferro, minério de calcário, dolomita e carvão mineral. Essas matérias-primas são transportadas até as usinas, e após o beneficiamento, são levadas aos altos fornos, onde, sob ação do calor e oxigênio, o minério de ferro é reduzido. 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 as escórias e/ou com os gases (PARENTE *et al.* 2003), em processos siderúrgicos integrados.

Três processos são os mais representativos, 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) e o forno elétrico a arco (Electric Arc Furnace - EAF). Os processos recorrentes atualmente são o de fusão e refino de sucata em fornos elétricos a arco e o de refino do ferro-gusa líquido em conversores a oxigênio. A utilização de fornos do tipo Siemens-Martin não ocorre no Brasil (ROHDE, 2002).

No processo LD não há necessidade de fonte de calor externa. Mistura-se ferro gusa líquido, escorificantes e oxigênio na cuba (GEYER, 2001).

Segundo Castelo Branco (2004), no EAF existe a necessidade de utilização de uma fonte de calor externa. As matérias-primas são colocadas em recipientes em quantidades que dependem das características do aço que se deseja obter e, posteriormente, são colocadas em uma abóboda fechada.

Após a separação da escória de alto forno, o ferro-gusa é encaminhado à aciaria, processo em que será transformado em aço. Nessa segunda transformação, com o objetivo de reduzir o teor de carbono do gusa para a obtenção do aço é necessária a adição da cal (CaO) (para remoção de C, Si e P), com um consumo de aproximadamente 24 a 32 kg/ton., e de dolomito (CaCO₃.MgCO₃) para a proteção do refratário do forno, sendo, portanto, a escória um produto resultante da combinação desses elementos (MACHADO, 2000). O ideal é que a cal seja dissolvida rapidamente para que a composição da escória seja realizada em regiões de alta basicidade (GEYER, 2001). Nessa transformação tem-se a geração simultânea de aço, cujas porcentagens de carbono são inferiores a 2,04%, e escória de aciaria, em quantidade aproximada de 140 kg em peso de escória por tonelada de aço (MACHADO, 2000).

A Figura 2.7 (IABR, 2014) representa um esquema dos processos siderúrgicos:

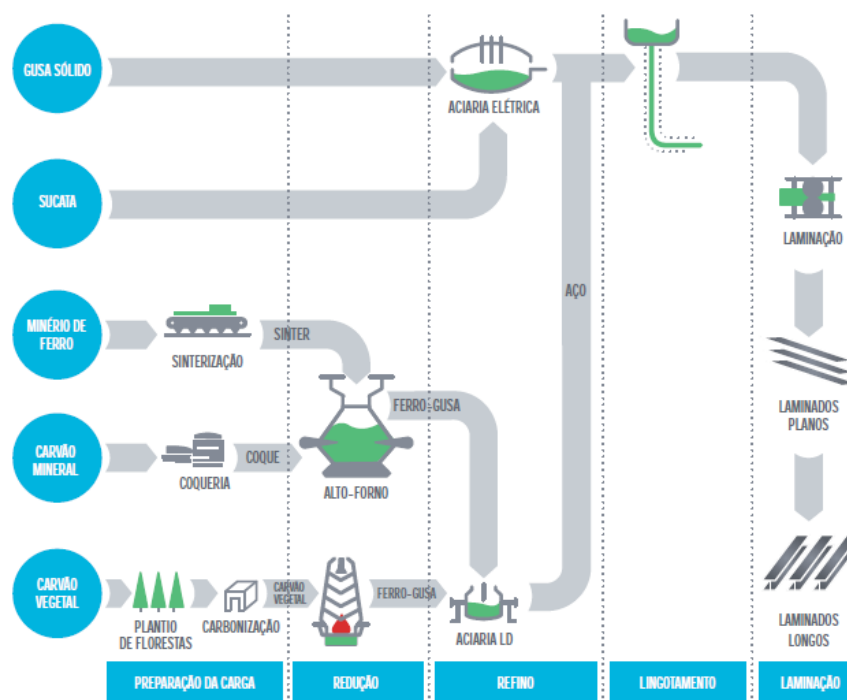


Figura 2.7 - Os processos de aciaria EAF e LD (IABR, 2014)

Segundo Kudrin (1984) as fontes de formação da escória de aciaria no forno, tanto LD quanto do EAF, são:

Os produtos de oxidação de impurezas introduzidas dentro do forno junto com o ferro-gusa e sucata, como SiO_2 , MnO , P_2O_5 e Cr_2O_3 ; as impurezas trazidas com a carga (areia, lama, argila, etc.), com concentrações de SiO_2 e Al_2O_3 ; os produtos do desgaste do revestimento da instalação. Caso seja a base de magnésita, adicionará à escória o MgO ; caso seja a base de sílica, adicionará SiO_2 na escória; os produtos de oxidação da sucata, isto é, FeO , Fe_2O_3 e $\text{Fe}(\text{OH})_2$; os materiais adicionais e oxidantes (calcário, cal, bauxita, fluorita, minérios de ferro e manganês, etc.) que podem conter CaCO_3 , CaO , Al_2O_3 , CaF_2 , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , MnO_2 , entre outros.

Durante a fusão, o metal líquido está em contínuo contato e interação com a escória. A composição da escória, a temperatura, a fluidez e outros parâmetros exercem uma influência decisiva no processo de fundição e na qualidade do aço. A remoção das impurezas deve ser realizada de maneira a não comprometer o aço. A escória desempenha papel fundamental na retirada destas impurezas e, também, impede o retorno dessas impurezas ao aço. A escória, além das funções já mencionadas acima, tem também como função impedir o contato do metal líquido com a atmosfera, evitando assim sua reoxidação e a perda de temperatura (KUDRIN, 1984).

Existem dois tipos de escórias de refino: a escória oxidante e a escória redutora. Nos processos de redução o metal obtido ainda não possui a composição química especificada do produto final, contendo ainda impurezas. Como exemplo pode ser citado: o ferro gusa sai do processo do alto forno com aproximadamente 4,0% de carbono, e outros materiais (silício, manganês, fósforo, enxofre, entre outros) em diferentes concentrações. Uma das maneiras de garantir a composição desejada do aço é a partir da combinação de um refino oxidante e de um refino redutor, também denominado de refino secundário (GEYER, 2001).

Segundo Geyer (2001), a escória de aciaria é normalmente vazada em uma panela e/ou descarregada em áreas, nas quais pode se solidificar em forma cristalina. O resfriamento é feito por bicos de aspersão de água ou através de jatos de água de mangueiras, e devido ao choque térmico, ela é fragmentada. Após o resfriamento, a escória de aciaria é britada. Após britagem, por meio de correias rolantes, a escória é separada em distintas granulometrias (bitolas). Normalmente é processada para a recuperação da fração metálica, empregada na própria aciaria, ou na sinterização ou no alto-forno. Em média, essa recuperação corresponde a 30% da sua geração. A fração não metálica é reciclada no alto-forno (em menor escala) e na aciaria. Esta escória reaproveitada no forno é conhecida como sucata C ou sucata recuperada. A escória separada por bitolas tem outras utilizações como, por exemplo, na indústria da Construção Civil ou na fabricação de fertilizantes como corretivo de solo (GEYER, 2001).

A escória é um material que apresenta funções fundamentais no processo de fabricação do aço, a fim de garantir boa qualidade ao produto final. Até recentemente, era considerado um resíduo de pouco ou nenhum valor econômico, onde apenas o aço era visto como único produto com valor agregado para as siderúrgicas. Hoje em dia, esta visão está se modificando e a escória já é considerada, em muitos países, um subproduto capaz de conferir valor agregado aos materiais nos quais é aplicada (GRAFFITTI, 2002). Esta abordagem tem se difundido ao redor do mundo.

O processamento da escória de aciaria é realizado por intermédio das seguintes operações: resfriamento controlado, britagem, separação magnética, classificação granulométrica e estabilização volumétrica.

Todas as etapas de processamento são importantes para a obtenção de um material de construção eficaz, utilizado como alternativa ao agregado natural. O resfriamento acelerado é necessário para redução do tamanho inicial dos blocos de agregados formados e também para facilitar a etapa de separação magnética (ABM, 2008).

O desenvolvimento e continuidade da aplicação das escórias de aciaria enfrentam, porém, restrições de ordem econômica vinculadas ao baixo valor unitário deste coproduto, quando comparado com seu principal concorrente, o agregado natural, ainda considerado abundante no Brasil. Dessa forma, fica limitado o alcance economicamente viável para sua comercialização a partir da fonte de geração. O raio máximo de alcance do agregado siderúrgico, a partir de sua fonte de geração, é, em geral, de cerca de 100 km, podendo aumentar caso não existam jazidas de agregados naturais na região (ABM, 2008). Conclui-se, portanto, que apesar do baixo valor do agregado proveniente do tratamento e processamento da escória de aciaria, tem-se a distância de transporte como um fator limitante para sua utilização.

2.3.2 CARACTERÍSTICAS FISIO-QUÍMICAS DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA

Como mencionado anteriormente, a escória de aciaria é um resíduo obtido a partir da produção do aço. Portanto, constitui-se principalmente de misturas de óxidos de cálcio e magnésio, silicatos de cálcio, ferro, além de outras espécies químicas em menor escala. Ao final do processo, após a oxidação do fósforo e do silício, parte da cal e do magnésio presentes na escória precipita ao ultrapassar os limites de solubilidade da escória fundida. Este fato explica os elevados teores de CaO e MgO livres presentes na escória. Como se observa na Tabela 2.3, mineralogicamente, as escórias são compostas por silicato dicálcico (Iarnita), ferrita cálcica, óxido de ferro (FeO), cal livre (CaO), periclásio (MgO), portlandita (Ca(OH)₂) e calcita (CaCO₃), dentre outras espécies químicas (MACHADO, 2000).

Tabela 2.3 - Composição mineralógica das escórias de aciaria (MACHADO, 2000)

Fase Mineral	Fórmula	Ponto de fusão (°C)
Silicato dicálcico - Iarnita (β -C ₂ S)	β - 2CaO.SiO ₂	2130
Silicato tricálcico (C ₃ S)	3 CaO.SiO ₂	1900
Silicato de magnésio	β - 2MgO.SiO ₂	-
Ferrita dicálcica	2 CaO.Fe ₂ O ₃	1430
Mervinita	Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂	-
Diopsita	Ca Mg(SiO ₃) ₂	-
Brown millerita	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	1410
Bredigita	α - 2CaO.SiO ₂	-
Gelenita	CaO.Al ₂ O ₃ .SiO ₂	-
Óxidos de alumínio e magnésio	MgO.Al ₂ O ₃	-
Wüstita (óxido de ferro)	FeO	-
Periclásio (óxido de magnésio)	MgO	2800
Óxido de cálcio	CaO	2570

A Tabela 2.4, especifica as composições químicas apresentadas na escória de aciaria nas principais siderúrgicas brasileiras que utilizam fornos LD ou BOF (IBS, 1999 *apud* DONIZETTI, 2010).

Tabela 2.4 - Composição química da escória de aciaria BOF ou LD (IBS, 1999 *apud* DONIZETTI, 2010)

USINAS	COMPOSIÇÃO QUÍMICA ESCÓRIA DE ACIARIA BOF OU LD (%)							
	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	Fe (total)	S	P ₂ O ₅
CST	45,20	5,50	0,80	12,20	7,10	18,80	0,07	2,75
Acesita	44,81	7,32	2,42	15,47	2,09	14,06	0,06	1,18
Belgo Mineira	47,00	8,00	1,50	15,00	3,00	19,00	-	-
USIMINAS	41,40	6,20	1,40	11,00	6,30	22,00	-	1,80
AÇOMINAS	45,58	9,48	0,75	12,01	6,59	16,71	-	2,23
Gerdau (Cocais)	36,20	12,50	0,93	15,40	5,80	21,00	0,04	1,01
Mannesmann	43,00	7,00	0,80	15,00	3,00	22,00	0,20	1,60
CSN	35,00	6,00	4,00	15,00	3,50	19,70	0,34	0,70
COSIPA	38,69	9,76	1,29	11,17	6,42	22,29	0,06	1,44

Na Tabela 2.5, Castelo Branco (2004) apresenta algumas outras características físico-químicas das escórias de aciaria:

Tabela 2.5 - Características físico-químicas das escórias de aciaria (CASTELO BRANCO, 2004)

Característica	Valor
Densidade Aparente	3,2 - 3,6
Porosidade (%)	> 3
Abrasão Los Angeles (%)	20 - 25
Durabilidade ao sulfato de sódio (%)	< 12
Dureza	6-7
ISC (%)	> 300
Polaridade	Alcalina (pH 8 - 10)
Teor de ligante (%), misturas densas	> 6,5

Segundo Rohde (2002) uma das vantagens das escórias é o fato de serem 100% trituráveis, o que facilita a obtenção da composição granulométrica desejada, permitindo uma melhor trabalhabilidade e compacidade e favorecendo a estrutura onde a escória será empregada, como no caso da pavimentação.

As escórias de aciaria também apresentam como características a hidraulicidade, que é o processo pelo qual o material endurece através da reação com a água. Na prática rodoviária

recebe o nome de cimentação ou concrecionamento. Esta propriedade é de extrema importância, pois além de melhorar as demais características mecânicas da camada compactada, propicia um comportamento estrutural semelhante ao das estruturas rígidas ou semirrígidas (ROHDE, 2002).

2.3.3 A EXPANSIBILIDADE DAS ESCÓRIAS

A norma NBR 16364 (ABNT, 2015) cita que é necessário um rigoroso controle da escória de aciaria, quando da sua aceitação, relativamente à expansão, não devendo ser superior a 3% ou o valor determinado pela especificação particular de projeto, conforme o método PTM 130 (GEYER, 2001).

As reações expansivas envolvem certos compostos presentes na escória de aciaria. Essa expansão gera tensões internas que originam trincas e resultam até na pulverização do material. Dentre estes compostos volumetricamente instáveis, o CaO e o MgO são os mais importantes e maiores responsáveis pela desintegração e pelo enfraquecimento por diferença de volume molar nas suas reações (MACHADO, 2000). Como mencionado anteriormente, a origem dos óxidos de cálcio e magnésio na escória de aciaria ocorre no final do processo do refino do aço, quando parte da cal e do magnésio presente na escória se precipita, ao ultrapassar os limites de solubilidade da escória fundida. Por esta razão, há um alto teor de CaO e MgO expansivos presentes na escória (MACHADO, 2000).

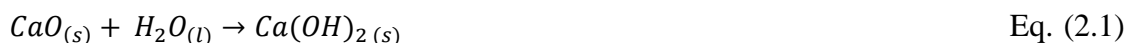
Machado (2000) concluiu que a escória de aciaria é levada à expansão pelo aumento de volume significativo em relação às dimensões originais dos cristais, nas transformações por hidratação, carbonatação e oxidação, conforme mostra a Tabela 2.6 (WEAST, 1971 *apud* MACHADO, 2000):

Tabela 2.6 - Características das espécies químicas isoladas antes e após a hidratação (WEAST, 1971 *apud* MACHADO, 2000)

Fórmula	Nome	Densidade (g/cm ³)	M.mol(g/mol)	Vol. Molar (cm ³ /mol)	Variação de volume (%)
MgO	Periclásio	3,58	40,31	11,26	Em relação ao MgO
Mg(OH) ₂	Brucita	2,36	58,33	24,72	119,5
CaO	Cal	3,38	56,08	16,59	Em relação ao CaO
Ca(OH) ₂	Portlandita	2,24	74,09	33,08	99,4
CaCO ₃	Calcita	2,93	100,09	34,16	105,9
	Aragonita	2,71	100,09	36,93	122,6
CaCO ₃ .MgCO ₃	Dolomita	2,87	184,41	64,25	287,3
Fe ⁰	Ferro (metálico)	7,86	55,85	7,11	Em relação ao Fe ⁰

FeO	Wüstita	5,70	71,85	12,61	77,4
Fe ₂ O ₃	Hematita	5,24	159,69	30,48	328,7
Fe(OH) ₂	Hidróxido	3,40	89,86	26,43	271,7
FeO(OH)	Goetita	4,28	88,85	20,76	192,0

A cal virgem é empregada para retirar e neutralizar os elementos como fósforo, enxofre e silício, no processo de refino de ferro-gusa para a produção do aço. A escória de aciaria retém parte da cal virgem em sua composição (POLESE, 2007). A primeira reação a ser observada na escória de aciaria é a reação de hidratação deste componente (Eq. 2.1), formando o hidróxido de cálcio [Ca(OH)₂], aumentando o volume molar em 99% e a superfície do cristal em 54% (MACHADO, 2000):



A cal livre é o composto encontrado na escória de aciaria que desenvolve a maior expansão, em função da quantidade presente (MACHADO, 2000). A expansão devido ao óxido de cálcio é influenciada por fatores como o teor e o tipo do CaO presente, a umidade, a temperatura e o tamanho dos grãos (GEYER, 2001).

O CaO pode ser classificado em residual ou precipitado. O residual se divide em esponjosa (6µm a 50µm) e granular (3µm a 10µm). A cal livre precipitada se divide na cal agregada ao C2F (< 4µm), e na cal livre precipitada nos cristais de C3S (< 4µm). Além disso, existe a cal livre proveniente de fragmentos não dissolvidos, que se hidratam facilmente (MACHADO, 2000).

Destaca-se que a hidratação mais significativa é a da cal livre esponjosa, que é constituída por grãos que apresentam dimensões de até 50 µm. Com a redução da granulometria e, conseqüentemente, aumento da superfície exposta, ocorre maior hidratação no CaO. Além disto, as frações menores que 8 µm apresentam maiores teores de cálcio e menores teores de ferro, quando comparadas às frações mais grossas (GEYER, 2001). A formação de CaCO₃, por carbonatação da cal e de dolomita (CaCO₃.MgCO₃) ocorrem em menor escala, mas geram um aumento de volume de 105,9% a 122,6% e 287,3%, respectivamente (WEAST, 1971 *apud* MACHADO, 2000).

A origem do MgO na escória de aciaria LD está na utilização da dolomita no forno para minimizar o desgaste do revestimento refratário. Este composto existe em três fases diferentes:

- Quimicamente combinado: monticelita (CaOMgOSiO_2) e merwinita (3CaOMgOSiO_2);
- Não combinado ou livre ou reativo (periclásio);
- Em solução sólida, fase RO_2 da escória de aciaria, podendo chegar a um teor total de 10% na escória de aciaria (MACHADO, 2000).

De forma geral, o óxido de magnésio presente na escória de aciaria é encontrado sob forma de soluções sólidas, compostas de FeO e MnO, e denominadas magnésio-wustita, enquanto que o MgO, sob a forma de periclásio, é mais raro. Entretanto, é na forma de periclásio que o MgO apresenta o comportamento com maior tendência à expansão (MACHADO, 2000).

O óxido de magnésio em sua forma livre origina-se, principalmente, da dissolução incompleta da dolomita durante o refino. Porém, o periclásio normalmente se forma quando existem teores maiores que 3% de MgO total na escória, o que ocorre na maior parte das aciarias (POLESE, 2007).

Na forma de monticelita ou merwinita, o MgO é vítreo e quimicamente estável, o que não acontece no caso do periclásio, um composto cristalino na forma livre ou reativa. A reação expansiva de hidratação do MgO na forma de periclásio (Eq. 2.2) forma a brucita ou hidróxido de magnésio [Mg(OH)_2], um composto que tem variação de volume de 119,5% em relação ao MgO (MACHADO, 2000).



Devido ao tempo de hidratação mais lento do periclásio, a instabilidade ocasionada por ele ocorre de maneira mais tardia que aquela causada pelo hidróxido de cálcio livre. Isso se deve à forma cristalina em que ele se encontra. A depender do grau de cristalização, essa atuação da água sobre o cristal pode ocorrer após semanas, meses ou anos (COUTINHO, 1973 *apud* RODRIGUES, 2007).

O ferro metálico é um componente da escória de aciaria que gera expansão, geralmente, com menor influência que a expansão causada pelo CaO e o MgO. Em média, o teor de ferro total na escória representa de 15% a 20% da sua composição.

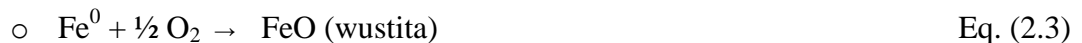
A escória de aciaria contém, além dos componentes não metálicos, uma grande quantidade de partículas de aço ou ferro metálico que ficam incorporadas à escória no sopro

de oxigênio. Estas partículas podem contribuir para a instabilidade volumétrica da escória, por meio da geração de produtos de corrosão e oxidação (MACHADO, 2000).

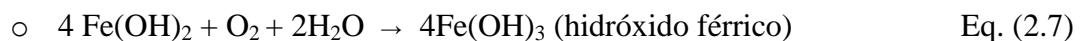
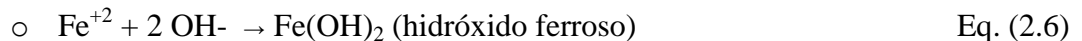
A expansão do Ferro Metálico (FeO) é causada por reações de oxidação e corrosão, formando os compostos: FeO (wustita), com aumento de volume molar de 77,4%; a hematita (Fe₂O₃) com aumento de volume de 328,7%; seguida do hidróxido ferroso [Fe(OH)₂] e a goetita [FeO(OH)], com variação de volume de 271,7% e 192,0%, respectivamente, em relação ao ferro metálico. Destaca-se que 70% dos compostos formados estão na forma de wustita (MACHADO, 2000).

Nas reações de oxidação do ferro (Eq. 2.3, Eq. 2.4 e Eq. 2.5), este passa de sua forma metálica Fe⁰ para suas formas iônicas Fe⁺² e Fe⁺³. Já nas reações de corrosão (Eq. 2.6 e Eq. 2.7) os íons reagem com o íon hidroxila da água e o oxigênio, formando os hidróxidos ferroso e férrico, que são mais comuns (MACHADO, 2000).

- Reações de oxidação:



- Reações de corrosão:



Destaca-se a importância da relação MgO/(FeO+MnO) para a expansão da escória de aciaria, uma vez que, se esta relação for menor que 1, há o aumento no espaçamento basal dos cristais e a formação de wustita, Mg-wustita ou Mg-Mn-wustita, compostos estáveis volumetricamente. Todavia, se a relação for maior que 1, a fase RO de periclásio ou periclásio ferroso torna-se volumetricamente instável (MACHADO, 2000).

Outra reação que determina a expansão da escória de aciaria é a transformação alotrópica do silicato dicálcico ou ortossilicato de cálcio (2CaO.SiO₂ ou C₂S). Por favorecer o agravamento dos efeitos da expansibilidade causados pelo CaO e pelo MgO anteriormente mencionados, a ocorrência deste tipo de reação promove modificações de volume significativas.

O mineral mais encontrado na escória de aciaria LD solidificada é o C₂S. Este composto se apresenta em quatro formas distintas, denominadas α, α', β e γ, exibindo uma mudança volumétrica associada às alterações de fase, derivadas do α. No momento em que ocorre a transformação do α-C₂S para o α'-C₂S, ocorre uma redução de volume da ordem de

8%, com o sistema cristalino modificando-se da forma trigonal para ortorrômbica. Quando a transformação é de α' -C₂S para β -C₂S, há um crescimento de volume de 1%, e o sistema cristalino altera-se para monoclinico. Na última transformação, do β -C₂S em γ -C₂S, ocorre um aumento de volume de 10,4%, com o sistema cristalino tornando-se ortorrômbico, fato que reduz progressivamente a simetria molecular. Entretanto, a depender das condições de temperatura, há a possibilidade de ocorrência da transformação direta da fase α' para a fase γ (MACHADO, 2000).

Dessa forma, constata-se que a transformação para a forma γ -C₂S é a mais prejudicial para a estabilidade volumétrica da escória de aciaria LD, pois gera maior aumento de volume (MACHADO, 2000).

2.3.4 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE EXPANSIBILIDADE

Com o propósito de analisar a expansão das escórias sob diferentes processos de cura, Baltazar (2001) avalia os seguintes métodos de caracterização do fator expansão das escórias de aciaria:

- PTM 130 - Método de Ensaio para Avaliação do Potencial de Expansão de Escória de Aciaria: As seguintes vantagens são observadas: a aparelhagem utilizada é comum a todos os laboratórios de geotecnia e estradas e às empresas que atuam na área de pavimentação rodoviária; Basicamente, os equipamentos são os recomendados pela norma NBR 9895 – Solo – Índice de Suporte Califórnia; a preparação da amostra segue os mesmos critérios estabelecidos na NBR 9895 (ABNT, 1987) .
- D 4792/00 - Standard Test Method for Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions (ASTM, 2000): o método se assemelha com o método PTM 130.
- Norma japonesa JIS A 5015/92 - Método de ensaio de dilatação em água para escória siderúrgica (JIS, 1992): Segundo Baltazar (2001), É uma norma pouco difundida no meio rodoviário brasileiro, sendo, portanto de acesso mais restrito. A norma adota, também, uma série de ensaios complementares que se encontram padronizados por outras normas japonesas, envolvendo ensaios de compactação via apiloamento, CBR e peneiramento, dentre outros.

Em sua obra, MACHADO (2000) cita alguns destes métodos de avaliação da expansibilidade das escórias, destacando seus principais aspectos:

- Norma japonesa A 5015 (JIS, 1992): avalia a expansão em cps que, depois de imersos em água, são aquecidos a 80°C em ciclos de 6 horas diárias. Recomenda uma expansão máxima de 2,5% aos dez dias para que o pavimento não sofra perda de resistência, para misturas asfálticas do tipo CBUQ. Fixa ainda outras condições, tais como: massa específica (em torno de 2,45 kg/dm³), absorção de água (< 3,0%) e abrasão (< 30,0%);
- D 4792 (ASTM, 2000): Analisa a expansão de cps a partir do aumento vertical dos mesmos, depois de imersos em água a 71 ± 2°C;

POLESE (2007) relaciona os diversos métodos de determinação do potencial de expansão das escórias de aciaria. A Tabela 2.7 resume as principais características identificadas em alguns dos métodos já mencionados acima:

Tabela 2.7 - Características dos principais métodos de determinação do potencial de expansão das escórias de aciaria (POLESE, 2007)

Métodos	Características
D 4792 (ASTM, 2000)	Energia de compactação: Proctor Normal; Mecanismo de aceleração da expansão: Imersão em água aquecida; Temperatura de imersão: 70 ± 3 °C; Período ensaio: 07 dias (mínimo); Limite de expansão: 0,5% (aos 07 dias).
A 5015 (JIS, 1992)	Energia de compactação: Proctor Modificado; Mecanismo de aceleração da expansão: Imersão em água, com períodos diários de aquecimento de 6 horas; Temperatura de imersão: 80 ± 3°C; Período de ensaio: 10 dias; Limite de expansão: 2,0%; Observação: granulometria específica;
PTM 130 (DTP, 1978)	Energia de compactação: Proctor Normal; Mecanismo de aceleração da expansão: Imersão em água aquecida e aquecimento em estufa; Temperatura de imersão: 71 ± 3°C; Período de imersão: 07 dias; Período de aquecimento em estufa: 07 dias; Limite de expansão: 3,0% no Brasil e 0,5% nos EUA;

Le Chatelier NBR 11582 (ABNT, 1991)	Traço de argamassa de escória e cimento; Mecanismo de aceleração da expansão: imersão em água ; Temperatura de imersão: temperatura ambiente e 100°C; Período de imersão à temperatura ambiente: 24 horas; Período de imersão a 100°C: 3h a 5h (apenas no ensaio a quente); Obs: limite não normalizado para escória de aciaria;
Autoclave R2211 (JIS, 1991)	Conformação do corpo-de-prova: pressão de 2 x 10 kg/m ² (215°C) Cura úmida por 16 horas; Mecanismo de aceleração da expansão: vapor e variação de pressão em autoclave; Período em autoclave: 1 hora com aumento de pressão e 2 horas com redução de pressão;
EM 1744 (BS, 1998)	Energia de compactação: Proctor normal; Mecanismo de aceleração da expansão: Percolação de vapor pela amostra; Temperatura do vapor: 100°C; Período de ensaio: 24h ou 168 horas; Limite de expansão: não normalizado Observação: granulometria específica.

2.3.5 MÉTODOS DE ESTABILIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA

A partir de trabalhos anteriores, sugere-se um período de no mínimo 4 meses de cura através de estocagem a céu aberto para a garantia de que níveis de expansão não comprometam a qualidade da estrutura que será composta da escória na função de agregado (ROHDE, 2002).

Uma forma de diminuir a expansão da escória de aciaria é armazená-la em pequenas pilhas e com altura reduzida (de 1,5 a 2,0 metros). LIMA et al. (2000) sugerem no máximo 10.000 toneladas de material por pilha e que as mesmas não sejam muito altas para evitar que alguma parte do material não seja curada. Estas medidas devem ser tomadas para que o processo expansivo ocorra o mais rápido possível.

Outra forma de minimizar os prejuízos causados pela expansão do material para a aplicação na forma de agregado em estruturas como camadas de reforço do subleito, base e sub-base, é misturá-lo com outro material capaz de absorver esta expansão, como argila, por exemplo (SILVA, 2001).

Sendo este um processo apenas físico sem considerar que nenhuma reação química ocorre entre a escória e o material utilizado na mistura. Geralmente, usa-se um material mais

fino do que a escória para diminuir a permeabilidade e também o contato escória-água. Deve-se atentar também para a qualidade do material utilizado. Para o caso da argila, a mesma deve ser laterítica não possuindo caráter expansivo. SILVA (1994) realizou a mistura de várias amostras de escória adquiridas na Companhia Siderúrgica Tubarão (CST) com argila da região para a execução de camadas de sub-base e base. Essa escória foi usada sem nenhuma espécie de cura, utilizando tal argila para combater a expansão. A maior expansão encontrada para as misturas utilizadas foi de 0,5%.

GEYER (2001) cita ainda a possibilidade de obter-se uma cura acelerada deste rejeito. A escória é submetida a um *spray* de água quente e em seguida à injeção de vapor ou passagem através de zona de vapor. Com o uso destas técnicas é possível reduzir o tempo de cura das escórias para vinte dias. Há ainda o resfriamento brusco onde a mesma é fragmentada por um jato d'água e resfriada em um tanque com água. Deve-se atentar, porém para a presença de MgO que possui um alto potencial expansivo e que neutraliza somente a longo prazo.

2.4 APLICABILIDADE DAS ESCÓRIAS

A maioria das escórias de aciaria é aplicada como agregados na construção de bases, sub-bases, revestimento asfáltico, materiais para aterros, obras hidráulicas, cimento, estabilização de solos, em lastros de ferrovias, em contenções com gabiões e enrocamentos. Outras aplicações divulgadas desse coproduto são ainda como fertilizante e corretivo de solos na agricultura, controle na drenagem de ácidos, entre outros. A evolução de grande parte das técnicas de aplicação da escória de aciaria, em nível mundial, abrange além das normas internacionais, a existência de vários autores com aprimorados trabalhos para viabilização desse coproduto (DAYRELL, 2013), uma vez que o aproveitamento desse material se faz apresentar vantagens econômicas e ambientais para a indústria siderúrgica e para o cliente.

Destaca-se que o contínuo desenvolvimento de estudos relacionados à expansibilidade da escória de aciaria se faz necessário para melhoria do quadro de normas que determinam as técnicas construtivas a serem adotadas quando se opta pela utilização desse material como agregado. Ainda são identificadas diversas patologias relacionadas ao uso inadequado da escória de aciaria em obras no Brasil. Este tópico será retomado mais adiante no texto.

2.5 UTILIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS EM ESTRUTURAS DE PAVIMENTAÇÃO

No Brasil o uso da escória de aciaria em pavimentação não é recente, havendo vários trechos executados há mais de 20 anos. A escória é empregada como agregado miúdo e graúdo nesta aplicação, sendo particularmente adequada por sua dureza, durabilidade e drenagem livre. Apresenta também elevada resistência ao esmagamento, que permite sua utilização por longos períodos com mínima manutenção (ROHDE, 2002).

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2012) 80,4% (202.988 km) da malha rodoviária nacional é não pavimentada, sendo 90,9% (1.234.918 km) deste número de jurisdição municipal. Grande parte da malha não pavimentada corresponde a rodovias de Baixo Volume de Tráfego, comumente situados em locais com baixo Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e em acesso a localidades ou regiões não integradas ao processo de desenvolvimento econômico.

Uma das grandes dificuldades do engenheiro rodoviário é estimar, de forma satisfatória, a vida útil de um pavimento novo ou do reforço de um pavimento antigo. Este problema ocorre devido à complexidade dos fatores que envolvem um pavimento, como principalmente: estudo de tráfego inadequado, utilização de materiais alternativos na estrutura do pavimento, mudança do tipo de carregamento (modernização dos veículos) durante a vida estimada de projeto, geralmente de 10 a 30 anos (SILVA, 2001). Neste sentido, o controle da expansibilidade da escória empregada como agregado é extrema importância para a garantia do atendimento dos estados de serviço do pavimento.

O estado da superfície de qualquer estrada depende do material, das intempéries, do tráfego e da manutenção. Uma boa rodovia deve ter largura da faixa de rolamento suficiente para comportar o tráfego da região e resistência suficiente para suportar as cargas das rodas sem a ocorrência de deformações excessivas. Deve, além disso, apresentar o sistema de drenagem compatível com a durabilidade da via e com a conservação ambiental ao entorno de sua faixa de domínio (FERREIRA, 2007).

As estruturas de pavimento são projetadas para resistirem a numerosas solicitações de carga, dentro do período de projeto, sem que ocorram danos estruturais fora do aceitável e previsto. Os principais danos considerados são a deformação permanente e a fadiga. Para se utilizar a escória de aciaria na composição das camadas e dimensionar adequadamente uma estrutura de pavimento, devem-se conhecer bem as propriedades dos materiais que a compõem, sua resistência à ruptura, permeabilidade e deformabilidade, frente à repetição de carga e ao efeito do clima. A mecânica dos pavimentos é a disciplina da engenharia civil que

trata dessa forma de entendimento do pavimento como um sistema em camadas no qual devem estar compatibilizadas as tensões e deslocamentos solicitantes com as propriedades dos materiais e espessuras das camadas. Esses conceitos devem ser utilizados no dimensionamento da estrutura e condicionam a escolha dos materiais (BERNUCCI *et al.*, 2006).

A escória de aciaria é um material que tem condições de atender a todas as faixas de granulometrias, apresentar alto Índice de Suporte Califórnia, baixa abrasão Los Angeles, boa adesividade para emulsões e CAPs e excelente poder hidráulico (Silva, 1994). Sua alcalinidade, no entanto, deve ser considerada, uma vez que o pH da escória de aciaria pode atingir valores que variam entre 10 e 14. Em consequência, a escória de aciaria não deve ser usada próxima a águas paradas como poços, lagos ou terrenos alagadiços (ROHDE, 2002).

Uma das maiores dificuldades quanto à utilização da escória de aciaria na execução de obras rodoviárias é o tratamento inadequado do seu potencial expansivo. Esta expansão pode chegar a 10,0%, ocasionando erupções na pista, que podem atingir até 10 cm de altura (SILVA e MENDONÇA, 2001 *apud* CASTELO BRANCO, 2004). As Figuras 2.8 e 2.9 ilustram pavimentos com utilização de escória não curada.



Figura 2.8 - Erupções no revestimento devido à cura inadequada da escória de aciaria (SILVA, 2002 *apud* CASTELO BRANCO, 2004)



Figura 2.9 - Fissuras no revestimento devido à cura inadequada da escória de aciaria (SILVA, 2002 apud CASTELO BRANCO, 2004)

A identificação destes defeitos no revestimento asfáltico pode ser realizada através da observação da formação de trincas radiais de tamanho reduzido e do estufamento do revestimento. A formação de defeitos no pavimento ocasionados pela expansão pode ocorrer tanto quando a escória é utilizada em base e/ou sub-base, ou como agregado em revestimentos asfálticos. Neste segundo caso, apesar de inicialmente o ligante impermeabilizar os grãos da escória, com o desgaste, ocorre o contato entre a escória e a água provocando reações de hidratação e, conseqüentemente, a expansão do material (SILVA, 2002 *apud* CASTELO BRANCO 2004).

Apesar da necessidade de se adotar técnicas de cura para a utilização desse material, a possibilidade da execução de camadas mais finas de bases e sub-bases, para a mesma resistência à carga/compressão e durabilidade, em relação à aplicação de materiais convencionais, como areia e brita, contribui para as vantagens econômicas da utilização de escórias como agregados na construção de pavimentos. Evidentemente, o custo do transporte até a obra deve ser levado em consideração pelo construtor na escolha do melhor agregado (ABM, 2008).

2.5.1 NORMAS BRASILEIRAS - UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA EM CAMADAS DE PAVIMENTOS

No Brasil, o DNER desenvolveu normas que estabelecem as técnicas e requisitos necessários à utilização da escória de aciaria em camadas de pavimentos. Após a reestruturação do sistema de transportes terrestre e aquaviário do país, o DNIT se tornou responsável pela manutenção, ampliação, construção, fiscalização, e elaboração de estudos técnicos de qualquer problema relacionado ao tráfego nos transportes terrestres, sendo hoje o responsável pelo desenvolvimento e monitoramento da aplicação das normas para esse tipo de material.

Abaixo estão identificadas as normas vigentes para a utilização de escórias em pavimentação:

- EM 262 (DNER, 1994)

A norma estabelece requisitos gerais e específicos para a utilização de escórias de aciaria em camadas de pavimento.

O potencial de expansão é determinado pelo Método PTM 130 (DTP, 1978) (Pensylvania Testing Material), não podendo ultrapassar o limite de 3% de expansão ou o valor determinado pela especificação particular de projeto.

As escórias de aciaria não podem apresentar impurezas orgânicas, contaminação com escórias de alto forno, solos ou outros materiais que podem prejudicar os valores especificados em projeto.

Em relação à granulometria, sua composição deve-se manter na proporção de 40% na faixa de até 1,27 cm (1/2") e 60% na faixa de 1,27 cm a 5,08 cm (2") de abertura nominal e deve atender à granulometria de projeto.

As escórias devem ainda obedecer aos seguintes limites específicos de utilização para agregados graúdos:

- Absorção de água (% em peso) 1 a 2 %;
- Massa específica: 3,0 a 3,5 g/cm³;
- Massa unitária: 1,5 a 1,7 kg/dm³;
- 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;

- PRO 263 (DNER, 1994)

A norma determina a possibilidade de emprego das escórias de aciaria em construção de sub-base, base e em misturas betuminosas, nos casos em que haja a conformidade com as exigências aprovadas constantes de projetos a que elas se destinarem.

Após a reestruturação, o DNIT desenvolveu normas para a utilização do coproduto açobrita. Este tópico será retomado no Capítulo 2.6 deste texto.

2.5.2 UTILIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA COMO COMPONENTE AGREGADO DE BASE E SUB-BASE

Os pavimentos rígidos são compostos por uma camada superficial de concreto de cimento Portland, apoiada geralmente sobre uma camada de material granular ou de material estabilizado com cimento (chamada sub-base), assentada sobre o subleito ou sobre um reforço do subleito quando necessário (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Segundo Bernucci *et al.*(2006), os pavimentos flexíveis, são compostos por camada superficial asfáltica, o revestimento, apoiada sobre camadas de base, de sub-base e de reforço do subleito, constituídas por materiais granulares, solos ou misturas de solos, sem adição de agentes cimentantes. Dependendo do volume de tráfego, da capacidade de suporte do subleito, da rigidez e espessura das camadas, e condições ambientais, uma ou mais camadas podem ser suprimidas.

A seleção é uma etapa preliminar que consiste em avaliar os materiais disponíveis quanto às características de natureza para serem empregados nas camadas de base e sub-base. As características de natureza física e mecânica interferem nas propriedades geotécnicas no estado compactado. De maneira geral, os materiais de pavimentação compactados devem apresentar-se resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com sua função na estrutura (BERNUCCI *et al.*, 2006). Ainda segundo Bernucci *et al.*(2006), para a seleção e a caracterização dos agregados, emprega-se tecnologia tradicional, pautada principalmente na distribuição granulométrica e na resistência, forma e durabilidade dos grãos. Para os materiais constituídos essencialmente de agregados graúdos e de agregados miúdos, prevalecem as propriedades dessas frações granulares.

Para o dimensionamento de estruturas de pavimentos, utilizam-se no país principalmente dois parâmetros de caracterização mecânica: o Índice de Suporte Califórnia

(ISC), usado no dimensionamento convencional do DNIT e o Módulo de Resiliência (MR) usado na Mecânica dos Pavimentos (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Segundo Senço (2001) *apud* Ferreira (2007), podem ainda ser aplicadas técnicas de estabilização de pavimentos às camadas de base e sub-base, resultando em um melhor desempenho de resistência ao cisalhamento e à deformação. Solos estabilizados granulometricamente (adequada distribuição das diversas faixas dos diâmetros dos grãos) ou com melhoria de suas propriedades via adição e/ou mistura de agentes químicos, são favoráveis a apresentarem melhor desempenho e durabilidade.

Segundo Bernucci *et al.* (2006), alguns materiais de uso corrente no país podem constituir as camadas de base, sub-base e reforço do subleito para comporem as estruturas de pavimentos com revestimentos asfálticos. Esses materiais de base, sub-base e reforço do subleito são ainda classificados segundo seu comportamento frente aos esforços em: materiais granulares e solos, materiais estabilizados quimicamente ou cimentados, e materiais asfálticos. Os materiais mais empregados em pavimentação da classe dos granulares e solos são: brita graduada simples (BGS) e bica ou brita corrida; macadame hidráulico; macadame a seco; misturas estabilizadas granulometricamente; solo-agregado; solo natural; solo melhorado com cimento ou cal.

As escórias de refino como agregado apresentam características físicas e mecânicas que podem ser superiores às dos agregados comumente utilizados nas camadas de base e sub-base.

Como anteriormente mencionado, cerca de 60% de toda a quantidade gerada das escórias de aciaria no Brasil são destinadas as obras de pavimentação (IABR, 2014). Segundo Parente *et al.*, (2003), o agregado siderúrgico (escória de aciaria) também pode ser adicionado ao solo para utilização na construção de bases e sub-bases estabilizadas granulometricamente.

De acordo com Rohde (2002), a escória compete com a areia e brita nestas aplicações, sendo particularmente adequada por sua dureza, durabilidade e drenagem livre. Apresenta também elevada resistência ao esmagamento, que permite sua utilização por longos períodos com mínima manutenção. Existem muitas especificações relacionadas ao uso da escória de aciaria para base de estradas. Sob o aspecto econômico, o emprego deste agregado siderúrgico é vantajoso visto que, seu preço de aquisição é 4 vezes menor que o agregado oriundo do desmonte de rocha viva (PARENTE *et al.*, 2003).

Segundo National Slag Association (NSA, 2015), associação americana para estudos de viabilidade de diversas aplicações das escórias dos Estados Unidos, os principais benefícios do uso da escória em pavimentação para base rodoviária são:

- Economia: os custos são reduzidos quando se aplica a escória de aciaria e as qualidades do asfalto projetado são mantidas;

- Durabilidade: durante os 50 anos de aplicação, as bases da pavimentação feitas com escória de aciaria demonstraram que com mínima manutenção é suficiente para garantir o bom desempenho da estrutura;
- Rapidez e facilidade de construção: pode ser construído rapidamente e eficientemente com os equipamentos de construção disponíveis para esse tipo de obra, ou seja, não requer nenhum equipamento diferenciado;
- Alta estabilidade quando saturada: o agregado curado é estável sob condição de umidade e não sofre alterações significativas quando submetido a mudanças climáticas.
- Drenagem: alta capacidade de drenagem;
- Redução do stress do subleito: distribuição uniforme de tensão em toda a sub-base;
- Melhoria da qualidade da pista de rolamento: não há problemas com a sub-base;
- Redução da espessura do pavimento: apresenta alto ISC com alta estabilidade;
- Facilidade de compactação: baixo esforço de compactação devido à alta densidade e capacidade de rolamento;
- Quantidade ótima de finos: menos de 200 mesh são aceitáveis até 7% para a construção de boas bases de pavimentos e isso garante a estabilidade e resistência do pavimento.

Com o objetivo de obter um agregado com maior qualidade, alguns aspectos devem ser observados, tais como se o agregado produzido não foi contaminado com outros materiais, como lixo industrial, plástico, refratário, entre outros, assim como não se deve misturar escória de diferentes tipos, como, por exemplo, escória de aciaria e alto-forno. A escória de aciaria possibilita versatilidade de atendimento à demanda de alguns clientes, pois se a utilização da escória depender de alguma classificação granulométrica prévia, isto pode ser facilmente conseguido nas fontes geradoras. Na verdade, a maioria das fontes geradoras já utiliza a britagem no seu processo de beneficiamento da escória de aciaria.

Conforme anteriormente mencionado, as escórias de aciaria apresentam a característica de hidraulicidade, que é o processo pelo qual a escória endurece através da reação com a água. Esta característica se mostra importantíssima, pois melhora as demais características mecânicas da camada compactada.

Segundo Geyer (2001), as propriedades dos agregados variam conforme a composição e resfriamento das escórias. Geralmente escórias ácidas produzem agregados mais densos e escórias básicas agregados com estrutura vesicular. Nas aciarias brasileiras são geradas escórias básicas, onde o índice de basicidade é maior que um.

Geyer (2001) afirma ainda que as escórias de aciaria possuem alta resistência à abrasão, facilitando a sua aplicação na construção de estradas.

A aplicação da escória de aciaria como agregado é de uso corrente em bases e sub-bases na Europa, Estados Unidos e Austrália em virtude de suas vantagens em relação ao agregado natural, onde se destacam: formato cúbico que aumenta resistência à deformação e resistência à abrasão que traz um aumento da durabilidade.

Segundo Rohde (2002), em termos de equivalência estrutural, o pavimento executado com escória de aciaria equivale a 30 cm e o executado com material convencional 66 cm de material granular padrão. Outros países, tais como: França, África do Sul, Austrália, Reino Unido, Alemanha, Bélgica, Holanda, Estados Unidos, Canadá, Japão e Índia também tem desenvolvido pesquisas na área de pavimentação.

Segundo Parente (2003), 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, três vezes maior que o do solo puro e, em média, o dobro dos valores de ISC das misturas solo-brita.

Donizetti (2010) comparou o comportamento do aço brita com o do cascalho, na camada de base de um trecho de rodovia instrumentado. Atestou-se um adequado comportamento técnico da escória de aciaria pura ou com 20% de argila, apresentando-se superior ao do cascalho. Na análise granulométrica, utilizando-se amostras dos materiais extraídos in loco observou-se um determinado desarranjo granulométrico, principalmente nas amostras de cascalho, muito pouco relevante na escória de aciaria, que praticamente enquadrou-se na faixa especificada pela norma ES 303 (DNER, 1997). Donizetti (2010) cita ainda que nos resultados do ensaio de Índice de Suporte Califórnia realizados com ambos os materiais (escória de aciaria e cascalho), a escória de aciaria obteve melhor comportamento, apresentando suporte mais elevado que o cascalho. No ensaio de desgaste Los Angeles foi constatado um valor de 18,7%. Para este material, a norma EM 262 (DNER, 1994) estabelece um desgaste menor ou igual a 25%, portanto, a escória de aciaria analisada suportaria bem aos esforços de impacto e polimento.

Rohde (2002) compara o comportamento das escórias de aciaria granulometricamente corrigida com materiais comumente utilizados como agregados nas camadas de base e sub-base: As curvas de compactação da escória de aciaria elétrica não têm o formato tradicional (um ramo ascendente e um descendente), não apresentando um formato único. Os valores encontrados para peso específico aparente seco máximo são muito elevados (cerca de 2,6

Kgf/cm³) e variam pouco em função da umidade de compactação. Portanto, o principal critério de controle de execução das camadas de base e sub-base é a umidade de compactação. O Índice de Suporte Califórnia (ISC) é da ordem de 200%, ou seja, cerca de duas vezes a capacidade de suporte do material padrão (BG = brita graduada). Além disso, o material apresenta durabilidade ao ataque de sulfatos elevada, com perdas de massa de 0,5%, muito abaixo do limite especificado por norma (5%). Para qualquer nível de tensão confinante a escória de aciaria apresenta módulo de resiliência superior ao de materiais granulares tradicionalmente empregados em pavimentação, comprovando seu excelente comportamento quanto a deformações elásticas. Avaliando seu emprego como material de base, o coproduto siderúrgico apresenta módulo de resiliência 43% superior ao de uma brita graduada (BG) de basalto e 74% superior ao de uma BG de granito. Na camada de sub-base seu comportamento superior é ainda mais evidente. Seu módulo de resiliência é 85% superior ao de um saibro e 122% superior ao de uma BG de granito.

Rohde (2002) conclui ainda que o emprego de escória de aciaria elétrica em camadas granulares permite a construção de pavimentos de melhor qualidade técnica e contribui de forma expressiva para a redução de problemas ambientais.

2.6 O COPRODUTO AÇOBRITA

No Brasil, a escória de aciaria estabilizada volumetricamente é denominada açobrita. Alguns grupos siderúrgicos atualmente investem no desenvolvimento de produtos resultantes da cura, britagem e da correção granulométrica das escórias geradas a partir de seus processos de aciaria. Em 2009 o DNIT (DNIT, 2009) implementou normas técnicas que definem a sistemática a ser empregada na execução das camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários utilizando este tipo de coproduto tratado à expansão com molhagem e aeração:

- ES 114 (DNIT, 2009)

Define os requisitos para a execução da camada de sub-base, estabelecendo a proporção máxima de 80% e mínima de 50% em peso da composição da mistura do coproduto com o solo.

A escória de aciaria LD com redução de expansão deve apresentar as seguintes características:

- Composição granulométrica satisfazendo a faixa da Tabela 2.8:

Tabela 2.8 - Faixa granulométrica da escória de aciaria LD com redução de expansão (DNIT, 2009)

Peneiras	% em peso passando	Tolerâncias de faixa de projeto
1''	100	± 7
3/8''	50 – 85	± 7
Nº 4	35 – 65	± 5
Nº 10	25 – 50	± 5
Nº 40	15 – 30	± 2
Nº 200	5 – 15	± 2

- Índice de Suporte Califórnia igual ou superior a 60%, com energia de compactação intermediária;
- Los Angeles: desgaste inferior a 40%, admitindo-se valores maiores no caso de terem apresentado desempenho satisfatório em utilização anterior.
- Média do potencial de expansão de três corpos de prova deve ser inferior a 3%;
- Módulo de resiliência na umidade ótima deve ser igual ou superior a 300 MPa.

O solo destinado à confecção da sub-base deve apresentar um comportamento laterítico pertencente a um dos grupos LA, LA' ou LG' da classificação M.C.T. O material pode ter até 15%, em peso, retido na peneira nº10. Sua composição granulométrica deve satisfazer à faixa da Tabela 2.9:

Tabela 2.9 - Faixa granulométrica do solo (DNIT, 2009)

Peneiras	Faixas, % em peso passando
1''	100
3/8''	90 – 100
Nº 4	89 – 99
Nº 10	85 – 97
Nº 40	63 – 80
Nº 100	52 – 67
Nº 200	45 – 65

A mistura de açobrita estabilizada granulometricamente com o solo deve apresentar as características seguintes:

- Composição granulométrica satisfazendo a uma das faixas recomendadas na Tabela 2.10.

Tabela 2.10 - Faixas granulométricas das misturas - escória de aciaria LD com redução de expansão + solo (DNIT, 2009)

Peneiras	% em peso passando		Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	
1"	100	100	± 7
3/8"	50 – 85	60 – 100	± 7
Nº 4	35 – 65	50 – 85	± 5
Nº 10	25 – 50	40 – 70	± 5
Nº 40	15 – 30	25 – 50	± 2
Nº 200	5 – 15	10 – 35	± 2

- Índice de Suporte Califórnia deve ser superior a 20% e a expansão máxima deve ser de 1,0%, compactando-se com energia intermediária;
- A expansão medida no ensaio definido pela Norma ME 113 (DNIT, 2009) deve ser inferior a 1,5%.

Além das condições específicas mencionadas, a norma especifica requisitos relacionados aos equipamentos empregados e ao procedimento executivo da utilização do açobrita em sub-bases. Estabelece ainda condicionantes ambientais e determina os procedimentos de inspeção e os critérios de medição dos serviços conformes.

- ES 115 (DNIT, 2009)

Define os requisitos para a execução da camada de base, estabelecendo a proporção máxima de 80% e mínima de 50% em peso da composição da mistura do coproduto com o solo.

A escória de aciaria LD com redução de expansão deve apresentar as seguintes características:

- Composição granulométrica satisfazendo a faixa da Tabela 2.11:

Tabela 2.11 - Faixa granulométrica da escória de aciaria LD com redução de expansão (DNIT, 2009)

Peneiras	% em peso passando	Tolerâncias de faixa de projeto

1''	100	± 7
3/8''	50 – 85	± 7
Nº 4	35 – 65	± 5
Nº 10	25 – 50	± 5
Nº 40	15 – 30	± 2
Nº 200	5 – 15	± 2

- Índice de Suporte Califórnia igual ou superior a 80%, utilizando a energia de compactação intermediária;
- Los Angeles: desgaste inferior a 40%, admitindo-se valores maiores no caso de terem apresentado desempenho satisfatório em utilização anterior.
- Média do potencial de expansão de três corpos de prova deve ser inferior a 3%;
- Módulo de resiliência na umidade ótima deve ser igual ou superior a 300 MPa.

O solo destinado à confecção da base deve apresentar um comportamento laterítico pertencente a um dos grupos LA, LA' ou LG' da classificação M.C.T. O material pode ter até 15%, em peso, retido na peneira nº10. Sua composição granulométrica deve satisfazer à faixa da Tabela 2.12:

Tabela 2.12 - Faixa granulométrica do solo (DNIT, 2009)

Peneiras	Faixas, % em peso passando
1''	100
3/8''	90 – 100
Nº 4	89 – 99
Nº 10	85 – 97
Nº 40	63 – 80
Nº 100	52 – 67
Nº 200	45 – 65

A mistura de açobrita estabilizada granulometricamente com o solo deve apresentar as características seguintes:

- Composição granulométrica satisfazendo a uma das faixas recomendadas na Tabela 2.13.

Tabela 2.13 - Faixa granulométrica da escória de aciaria LD com redução de expansão (DNIT, 2009)

Peneiras	% em peso passando		Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	
1"	100	100	± 7
3/8"	50 – 85	60 – 100	± 7
Nº 4	35 – 65	50 – 85	± 5
Nº 10	25 – 50	40 – 70	± 5
Nº 40	15 – 30	25 – 50	± 2
Nº 200	5 – 15	10 – 35	± 2

- Índice de Suporte Califórnia deve ser superior a 60% e a expansão máxima deve ser de 0,5%, compactando-se com energia intermediária;
- Módulo de resiliência na umidade ótima deve ser igual ou superior a 300Mpa.
- A expansão medida no ensaio definido pela Norma DNIT 113/2009-ME deve ser inferior a 1,5%.

Além das condições específicas de insumo mencionadas, a norma especifica requisitos relacionados aos equipamentos empregados e ao procedimento executivo da utilização do açobrita em camadas de base. Estabelece ainda condicionantes ambientais e determina os procedimentos de inspeção e os critérios de medição dos serviços.

Atualmente, uma parceria entre o DNIT e o Instituto Brasileiro do Aço objetiva o desenvolvimento de um conjunto de normas para a utilização do açobrita produzido pelas siderúrgicas associadas com as especificações gerais para uso. A partir de linhas de pesquisa relacionadas ao tema, implementou-se a norma NBR 16364 (ABNT, 2015): “Execução de sub-base e base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária”, que estabelece os seguintes requisitos específicos:

- NBR 16364 (ABNT, 2015)

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 113 (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 2.14:

Tabela 2.14 – Faixas granulométricas agregado siderúrgico (ABNT, 2015).

Peneiras	% em peso passando	Tolerâncias de faixa de projeto
1"	80 – 100	± 7
3/8"	50 – 85	± 7
Nº 4	35 – 65	± 5
Nº 10	20 – 50	± 5
Nº 40	5 – 30	± 2
Nº 200	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 2.15:

Tabela 2.15 - Faixas granulométricas das misturas agregado siderúrgico e solo segundo NBR 16364 (ABNT, 2015).

Tipos	Para $N > 5 \times 10^6$				Para $N < 5 \times 10^6$		Tolerâncias 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

2.6.1 HISTÓRICO DE OBRAS

Alvarenga (2001) apresenta algumas obras em que a escória de aciaria foi empregada como agregado em camadas de pavimentação:

- BR-393 (Volta Redonda-Três Rios)
- RJ-157 (Barra Mansa- Divisa RJ/SP), RJ-141 (BR-393-Vargem Alegre)
- BR-116 (Volta Redonda - Divisa RJ/SP), 13 km de Volta Redonda – Nossa Senhora do Amparo (Barra Mansa);

- Mogi das Cruzes, em São Paulo, de 1981 até 1983, na pavimentação urbana em sub-base, base e revestimento;

Complementarmente, IPR (1988) e CST (2006) listam as seguintes obras:

- São Domingos do Prata/MG, na base, da sede municipal à BR-262, em 1978, 9 km;
- Coronel Fabriciano – Ipatinga (MG), BR-381, com 13 km, na sub-base e base, com tráfego pesado (volume médio diário de 15 mil veículos) em 1980;
- Salvador/BA, pavimentação urbana com 300 mil toneladas de escória de aciaria em bases, revestimentos e recapamentos no período de 1979 a 1983;
- Ipatinga – Governador Valadares, MG, 1986 e 1987, 300 mil toneladas de escória nas camadas de base, regularização, binder e capa asfáltica, concreto dos drenos, canaletas e meio-fio;
- Via Dutra, trecho de Rezende, no Estado do Rio de Janeiro;
- Rodovia do Sol, Estado do Espírito Santo, no leito de aterro como camada drenante;
- Aeroporto de Vitória, Estado do Espírito Santo, na camada de base;
- Terminal de Produtos Siderúrgicos da Arcelor Mittal Tubarão, em vias de acesso ao terminal com sub-base, base e CBUQ.

Destaca-se ainda a ocorrência de casos de aplicações mal sucedidas: O estacionamento do Vitória Apart Hospital, em Vitória-ES apresentou deformações e fissuras no revestimento do pavimento. A causa destas aplicações mal sucedidas foi a falta de orientação adequada e os critérios técnicos na utilização de escória de aciaria (PENA, 2004).

Outro exemplo da ocorrência de patologias relacionadas à utilização inadequada de escórias de aciaria constatou-se na estrutura de pavimentação do TIMS (Terminal Intermodal da Serra) após dois anos de utilização. A escória foi utilizada nas camadas de base. Não havia registro da origem, da expansibilidade e da granulometria do material.

Na recuperação do pavimento, utilizou-se a mesma escória de aciaria removida anteriormente. Realizou-se o tratamento à expansão até a redução do seu potencial para a conformidade do limite da norma de 1,5%. Realizou-se então a inspeção visual no pavimento, após 5 anos de utilização. O resultado alcançado pelo índice do estado de superfície do

pavimento (IES) se mostrou satisfatório. Entretanto, foram detectadas algumas fissuras radiais e longitudinais, principalmente nos locais de tráfego reduzido.

3 METODOLOGIA

Apresenta-se, neste capítulo, o comportamento das amostras de açobrita provenientes do processo LD utilizada neste estudo através de ensaios de caracterização física e mecânica executados conforme as metodologias definidas pelo DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, pela ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas e baseando-se em normas técnicas internacionais utilizadas em estudos anteriores.

As amostras de açobrita caracterizadas no presente estudo foram fornecidas com o apoio do grupo IABR - Instituto Aço Brasil. Todas têm procedência definida por uma área próxima ao local onde a princípio seriam executadas as camadas de base e sub-base sob a forma de trechos experimentais em pontos predefinidos da obra de restauração da rodovia BR 381/MG. A região Sudeste apresenta a maior concentração de produção siderúrgica do país, e consequentemente a maior produção de escória de aciaria.

Além das amostras de açobrita, foram analisadas também amostras do solo argiloso presente no local, que seria utilizado como a camada de sub-leito da obra de pavimentação do trecho mencionado. Realizaram-se ensaios de caracterização física e mecânica das amostras fornecidas.

As análises foram realizadas no Laboratório de Geotecnia e no INFRALAB – Laboratório de Infraestrutura, ambos pertencentes ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da UnB - Universidade de Brasília. O estudo é resultado do trabalho realizado em conjunto com Tarazona (2016) e compõe parcela da linha de pesquisa relacionada ao uso de materiais alternativos em pavimentos. Esta linha de pesquisa é resultado da parceria entre o Instituto Aço Brasil, o DNIT e instituições acadêmicas.

Para a análise do comportamento destes materiais simulando as condições de campo especificadas para essa obra e visando avaliar a influência das proporções de material nas características mecânicas, as amostras foram preparadas da seguinte forma:

- Solo argiloso puro;
- Mistura composta por 70% de açobrita e 30% de solo, em peso;
- Mistura composta por 80% de açobrita e 20% de solo, em peso;
- Mistura composta por 90% de açobrita e 10% de solo, em peso;
- Açobrita puro;

Segue abaixo a relação de normas técnicas a serem observadas para os ensaios:

- Abrasão: ME 035/98 (DNER, 1998), NBR 16364 (ABNT, 2015), EM 262 (DNER, 1994);
- Absorção do Agregado Graúdo: NBR NM 53 (ABNT, 2009), NBR 16364 (ABNT, 2015);
- Análise Granulométrica: NBR-7181 (ABNT, 1984), ME 083/98 (DNER, 1998), NBR 16364 (ABNT, 2015);
- Amostragem: NBR 6457 (ABNT, 1986);
- Compactação, ISC, Expansibilidade: NBR-7182 (ABNT, 1984), NBR-9895 (ABNT, 1987), ME 113 (DNIT, 2009), ME 160 (DNIT, 2012), DNIT ME 164 (DNIT, 2013), DNIT ME 172 (DNIT, 2016), NBR 16364 (ABNT, 2015), ES 139 (DNIT, 2010), ES 141 (DNIT, 2010);
- Densidade real dos grãos: NBR-6508 (ABNT, 1984), 081/98 (DNER, 1998), NBR 16364 (ABNT, 2015), D5550 (ASTM, 2014);
- Expansão pelo método PTM 130: ME 113 (DNIT, 2013);
- Limites de Atterberg: NBR-6459 (ABNT, 1984), NBR-7180 (ABNT, 1984), NBR 16364 (ABNT, 2015);

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

O agregado siderúrgico utilizado neste estudo resulta do processo de aciaria em conversor a oxigênio do tipo LD de uma usina siderúrgica integrante do Instituto Aço Brasil (IABR). A escória de aciaria foi britada e estabilizada em relação à granulometria. A cura deste material ocorreu por estocagem a céu aberto. O material pôde então ser transportado ao local de armazenamento nas dependências da Universidade de Brasília. A amostra, de aproximadamente três toneladas, é destinada às linhas de pesquisa do Programa de Pós-graduação de Geotecnia da UnB (PPG / UnB).

O solo utilizado na pesquisa foi coletado pelo DNIT no dia 29 de maio de 2015, no local destinado à construção do trecho experimental, na BR 381/MG, estaca 780, e armazenado no Laboratório de Geotecnia da UnB, embalado em sacolas plásticas. As propriedades do material serão descritas no capítulo referente às análises deste estudo.

Objetivando-se avaliar o desempenho da mistura composta por açobrita e solo quando utilizada em estruturas de pavimentos rodoviários e a influência que diferentes proporções de material exercem sobre as características mecânicas das misturas, prepararam-se:

- Amostras da mistura composta por 70% de açobrita + 30% de solo, em peso (denominada M7030), que a princípio é ensaiada para a verificação da adequação ao uso em bases e sub-bases;
- Amostras da mistura composta por 80% de açobrita + 20% de solo, em peso (denominada M8020), sugestão compreendida pela proposta inicial do DNIT para a execução da base para o trecho experimental;
- Amostras da mistura composta por 90% de açobrita + 10% de solo, em peso (denominada M9010), objetivando-se a avaliação da alternativa mais adequada para o uso em estruturas de pavimentação;

3.2 AMOSTRAGEM

Para a preparação dos ensaios de caracterização, as amostras de açobrita e de solo foram secas ao ar no laboratório para que, posteriormente, fosse feita sua homogeneização e o quarteamento. Utilizou-se a norma NBR 6457 (ABNT, 1986), que prescreve o método para a preparação de amostras de solos para os ensaios de compactação e 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). As amostras de solo foram desagregadas completamente com utilização da mão de gral, evitando-se a quebra das partículas.

3.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Os ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação, antes da compactação, utilizando o solo extraído in loco na rodovia mencionada foram executados em Outubro de 2015, em observância à norma NBR 7181 Análise Granulométrica (ABNT, 1984); Para a análise granulométrica do açobrita e das misturas solo + açobrita, foram utilizadas as normas NBR 7181 (ABNT, 1984) e ME 083 (DNER, 1998).

Classificou-se o açobrita fundamentando-se nos seguintes métodos: Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS e Transportation Research Board – TRB, 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.

3.4 PESO ESPECÍFICO REAL DOS GRÃOS

Devido à observada heterogeneidade do açobrita em relação à forma, porosidade e textura, três tipos de amostras foram tomadas para a determinação do peso específico real dos grãos. Ensaíram-se amostras quarteadas observando-se a norma D5550 (ASTM, 2014): *Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer*, sem separações ou procedimentos adicionais. Através de uma análise tátil-visual, optou-se ainda por subclassificar o material em dois grupos a partir das características contrastantes dos grãos, observadas no mesmo lote: forma dos grãos, textura superficial e porosidade. Para a determinação do peso específico real das amostras, utilizou-se o pentapicnômetro. O equipamento determina a densidade real dos grãos a partir da diferença de pressões entre o recipiente que abriga o volume da amostra e o valor referência. O peso específico real dos grãos é obtido a partir dos resultados de densidade real dos grãos. O modelo pode realizar até 5 análises simultaneamente, sendo o resultado final o valor médio das diferentes leituras.

Objetivando-se determinar a influência do tamanho dos grãos nos resultados de γ_s , realizou-se a determinação para três diâmetros distintos: grãos passantes na peneira de 9,5 mm de abertura e retidos na peneira de 4,8 mm; material passante na peneira de 4,8 mm de abertura e retido na peneira de 2,0 mm; grãos passantes na peneira de 2,0 mm de abertura e retidos na peneira de 0,074 mm. Os materiais foram subclassificados em grãos “rugosos” e grãos “lisos”. Os resultados auxiliam a verificação da influência do processo de aciaria nas características de textura e forma dos grãos.

3.5 LIMITES DE ATTERBERG

Para a determinação dos Limites de Liquidez (LL) e Limites de Plasticidade (LP), utilizaram-se as seguintes normas: NBR-6459 (ABNT, 1984): Determinação do limite de liquidez; e NBR-7180 (ABNT, 1984): Determinação do limite de plasticidade. Todos os ensaios foram precedidos pela secagem das amostras ao ar. Submeteu-se ao ensaio o material que passa pela peneira de 0,42 mm de abertura das amostras de açobrita puro, solo e das misturas M7030, M8020 e M9010. A partir destes resultados, determinaram-se os índices de plasticidade das amostras, quando possível.

3.6 ABSORÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO

Utilizou-se o procedimento NBR NM 53 (ABNT, 2009) para a determinação da absorção de água do açobrita. A absorção é definida pelo aumento de massa de agregado, resultado do preenchimento por água de seus vazios permeáveis, expresso como porcentagem de sua massa seca. Seu valor foi determinado através da média de três resultados.

3.7 ABRASÃO

Fundamentando-se nos procedimentos normativos descritos pelas normas NBR NM 51 (ABNT, 2001) e ME 035/98 (DNER, 1998), determinou-se o desgaste do açobrita, expresso pela porcentagem, em peso, do material que passa, após o ensaio, pela peneira de malhas quadradas de 1,7 mm.

Para tanto, selecionou-se a faixa de graduação A da amostra composta por açobrita puro.

O açobrita, seco em estufa, foi pesado em quatro frações com diferentes granulometrias de 1,25 kg cada, e introduzido no tambor cilíndrico do equipamento “Los Angeles”, juntamente com a carga abrasiva de 12 esferas metálicas. Submeteu-se o conteúdo a 500 revoluções, à velocidade de 30 rpm. Discussões acerca do valor de perda por abrasão serão apresentadas no capítulo 4 desta pesquisa.

3.8 COMPACTAÇÃO

Objetivando-se a determinação do peso específico aparente máximo e da umidade ótima de compactação das amostras, procedeu-se segundo as especificações da norma ME 164 (DNIT, 2013).

Em uma primeira análise, compactou-se o solo com a energia do Proctor Normal (600 kJ/m³), com reuso do material, intentando a obtenção de uma estimativa da umidade ótima de compactação. Posteriormente, os corpos de prova das amostras de solo, de açobrita e das misturas M7030, M8020 e M9010 foram compactados utilizando-se a energia do Proctor Modificado (2700 kJ/m³). Para cada amostra, obtiveram-se no mínimo cinco pontos a partir da compactação manual, sem reuso e com a secagem prévia do material até a umidade higroscópica.

Utilizaram-se aproximadamente 7 quilogramas de material para a moldagem dos corpos de prova das amostras de solo. Já para as amostras compostas pelo açobrita puro e para as misturas, necessários aproximadamente 6 quilogramas. Procedeu-se à introdução de água,

medida em peso, para a obtenção das umidades, sendo necessárias 24 horas de armazenamento na estufa úmida para a completa homogeneização dos materiais.

Ao término da compactação, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de expansibilidade e Índice de Suporte Califórnia.

3.9 EXPANSÃO E ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

Os ensaios para determinação dos ISC “Índices de Suporte Califórnia” foram realizados nas amostras de solo, do açobrita e das misturas compostas por estes. Procedeu-se conforme a prescrição contida na norma técnica ME 172 (DNIT, 2016): Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas.

Realizadas as moldagens necessárias para caracterizar a curva de compactação, os corpos de prova foram submetidos à imersão em água, a temperatura ambiente, por 96 horas. Anotaram-se medidas das expansões de 24 em 24 horas.

Ao término do período de embebição, procedeu-se ao ensaio de penetração para a determinação das curvas Índice de Suporte Califórnia vs Umidade para todos os pontos da curva de compactação obtidos. O ISC adotado para cada material foi relacionado à umidade ótima obtida através do ensaio de compactação.

Utilizou-se para este fim a prensa automática para ensaios de ISC-Marshall, que possui célula de carga com capacidade de 5.000 kgf.

3.10 EXPANSÃO PELO MÉTODO PTM 130

O Método de Ensaio para Avaliação do Potencial de Expansão de Escória de Aciaria, adaptado pela norma ME 113 (DNIT, 2013), baseia-se na norma PTM 130, desenvolvida pelo órgão *Pennsylvania Department of Transportation: Method of test for Evaluation Of Potential Expansion Of Steel Slags (DTP, 1978)*. As especificações são fundamentadas nas características de campo às quais as escórias de aciaria podem ser submetidas quando utilizadas em estruturas de pavimentação. Além da verificação do potencial de expansão do açobrita puro, ensaiou-se também a mistura M8020.

A preparação das amostras segue os mesmos critérios estabelecidos na normativa ME 172 (DNIT, 2016), sendo os equipamentos utilizados basicamente os mesmos recomendados pela norma brasileira para a determinação do Índice de Suporte Califórnia.

Iniciou-se o ensaio com o quartamento até a obtenção da amostra representativa de cada material. Para a moldagem dos corpos de prova, 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.

Determinaram-se a umidade ótima de compactação e a densidade máxima segundo as especificações da norma ME 164 (DNIT, 2013), observando, entretanto, que os materiais houveram de ser compactados em três camadas iguais com 56 golpes por camada. Moldaram-se três corpos de prova para cada material analisado: um no ramo seco, outro no úmido e um terceiro na umidade ótima. Finalizada a moldagem, aplicaram-se pesos para produzir sobrecarga de 4,542 kg e posicionou-se o tripé com o extensômetro com precisão de 0,01 mm.

Utilizou-se a câmara climatizada da marca Bass, modelo: UCC – 400/2006, com controle de temperatura e umidade.

Submergiram-se os moldes com os pesos em água pré-aquecida na câmara climatizada a 38°C por 30 minutos. Iniciou-se então a medição dos valores expressos pelo extensômetro com as amostras submersas numa posição nivelada na estufa, à temperatura de $69 \pm 3^\circ\text{C}$ (Figura 3.1):



Figura 3.1 - Corpos de Prova da Mistura M8020 Submetidos à Etapa de Submersão

As medidas foram anotadas diariamente, por um período de 7 dias, duas horas após a adição de água, que havia de ser suficiente para que a amostra permanecesse completamente submersa. Após este período, a água foi parcialmente removida do recipiente para o início da

etapa de expansão da amostra saturada (não submersa) por mais 7 dias. Para a garantia da saturação das amostras, adicionaram-se, diariamente, 500 ml de água às amostras. Após as duas semanas de expansão, os corpos de prova foram retirados do molde e desmanchados.

Verificou-se então, o surgimento de formações cristalinas na superfície das partículas do açobrita.

Foi possível, após o ensaio, o cálculo da expansão volumétrica, expresso em porcentagem, através da relação entre a diferença das leituras após 14 dias e inicial e a altura inicial da amostra (Eq. 3.1):

$$\% \text{Exp.} = \frac{(L_f - L_i)}{H_i} \times 100 \quad \text{Eq. (3.1)}$$

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

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos durante a etapa experimental do estudo do emprego do agregado siderúrgico como material de base de pavimentos.

Este estudo objetivou caracterizar as amostras recebidas de solo e açobrita, enfatizando suas propriedades relacionadas ao uso como agregado. Verificou-se, ainda, a influência das diferentes proporções das misturas compostas por açobrita e solo argiloso para este uso.

4.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

4.2.1 AÇOBRITA

Realizaram-se cinco análises granulométricas do agregado siderúrgico por peneiramento: AG1, AG2, AG3, AG4 e AG5. Os resultados são apresentados na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 - Análise Granulométrica das Amostras de Açobrita

Diâmetro	% que passa						Limites NBR 16364	
	AG1	AG2	AG3	AG4	AG5	Média		
38,1	100,0	97,6	100,0	97,5	100,0	99,0	100	100
25,4	97,0	92,8	98,4	91,1	91,3	94,1	80	100
19,1	93,8	89,9	93,9	88,4	85,6	90,3	-	-
9,5	81,3	77,5	82,5	75,9	77,4	78,9	50	85
4,8	67,4	64,7	67,5	61,3	60,4	64,3	35	65
2,0	44,9	43,1	45,0	41,4	42,9	43,5	20	50
1,2	33,7	33,3	33,9	31,6	32,5	33,0	-	-
0,6	22,9	23,1	22,9	21,8	22,2	22,6	-	-
0,42	17,5	17,7	17,1	16,4	17,1	17,2	5	30
0,3	8,2	9,8	8,9	9,7	9,0	9,1	-	-
0,15	6,2	6,1	5,9	5,4	5,9	5,9	-	-
0,074	1,7	2,6	3,0	2,8	2,3	2,5	0	15

As curvas granulométricas obtidas a partir das análises realizadas em cada amostra são apresentadas na Figura 4.1:

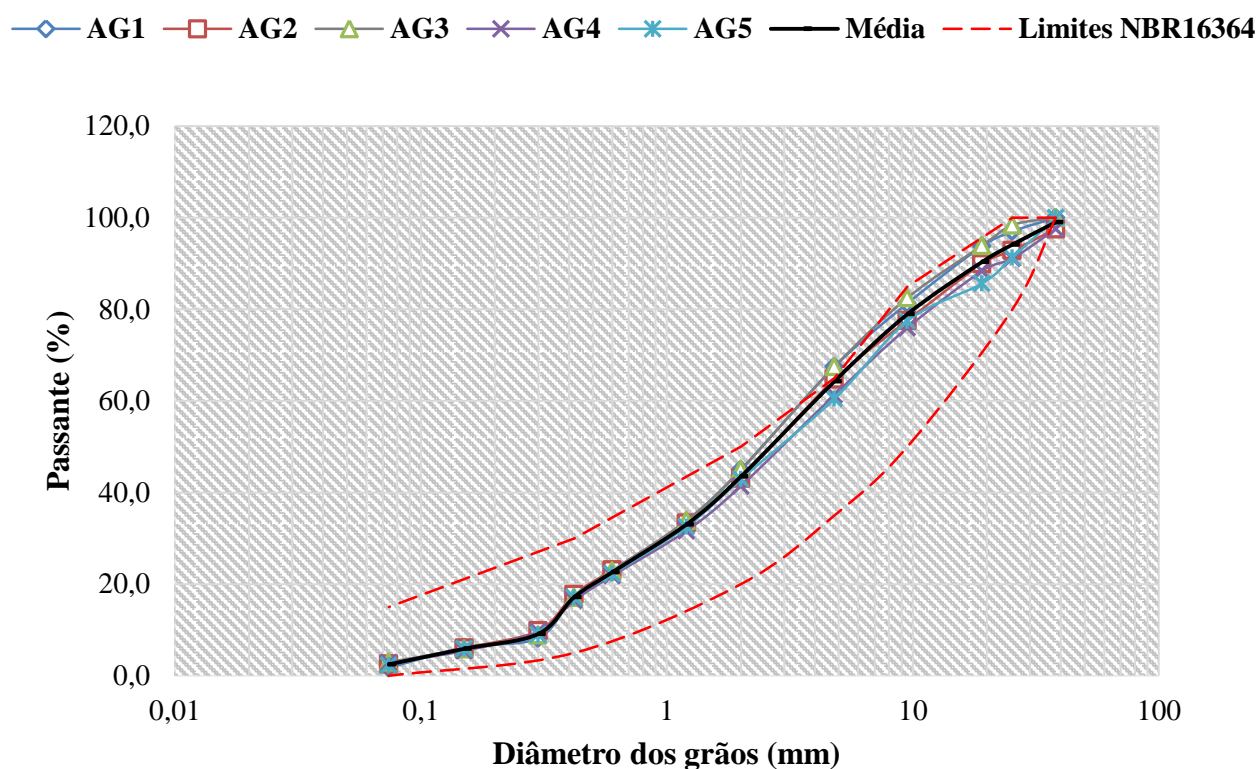


Figura 4.1 - Curvas Granulométricas do Açobrita Ensaiado

As curvas granulométricas, em média, apresentam-se dentro dos limites da faixa granulométrica para agregado siderúrgico segundo a NBR 16364 (ABNT, 2015) conforme apresentado na Tabela 4.1. Em duas análises (AG1 e AG3) a porcentagem de material passante na peneira com abertura de 4,8 mm ultrapassou o limite superior, respeitando, porém, a tolerância de $\pm 5\%$ prevista na norma.

Na Tabela 4.2 estão apresentadas algumas características granulométricas das amostras de açobrita ensaiadas. Apresentou-se a composição granulométrica segundo a escala da NBR 6502 (ABNT, 1995); o diâmetro máximo ($D_{m\acute{a}x}$), definido como a malha da peneira na qual ficou retido o percentual acumulado igual ou imediatamente inferior a 5%; 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), que fornece a ideia do formato da curva e permite detectar discontinuidades no conjunto; o coeficiente de não uniformidade (C_{nu}), que indica a falta de uniformidade do material:

Tabela 4.2 - Resumo das Características Granulométricas das Amostras de Açobrita Segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995).

RESUMO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA						
Características	AG1	AG2	AG3	AG4	AG5	Média
D _{máx} [mm]	25,4	38,1	25,4	38,1	38,1	33,02
D ₁₀ [mm]	0,32	0,30	0,32	0,31	0,31	0,31
D ₃₀ [mm]	0,94	0,93	0,92	1,07	1,01	0,97
D ₆₀ [mm]	3,87	4,19	3,87	4,62	4,73	4,26
CNU	11,99	13,84	12,25	15,10	15,02	13,64
C _c	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

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). O diâmetro máximo (valor médio de 33,02 mm) obtido a partir das curvas AG1 e AG3 é de 25,4 mm. Para as curvas AG2, AG4 e AG5, este valor é de 38,1 mm. Os valores médios do coeficiente de não uniformidade ($C_{nu}=13,64$) e do coeficiente de curvatura ($C_c=0,71$) caracterizam o agregado siderúrgico como material de uniformidade média (C_{nu} entre 5 e 15) e má graduação ($C_c < 1$). 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. Constatou-se ainda, pouca presença de material fino (2,47%), possibilitando a classificação do material como areia mal graduada limpa (SP), cor cinza.

A partir da classificação AASHTO, o material é não plástico, pertencente ao grupo A-1-a, que apresenta como materiais constituintes fragmentos de pedra, pedregulho fino e areia, sugerindo um comportamento adequado para bases e sub-bases.

Observou-se, portanto, a adequação do material aos requisitos relacionados às características granulométricas para a utilização em camadas granulares de pavimentos.

4.2.2 SOLO

Realizaram-se as análises granulométricas do solo por sedimentação da parte fina com e sem defloculante. As curvas granulométricas são apresentadas na Figura 4.2:

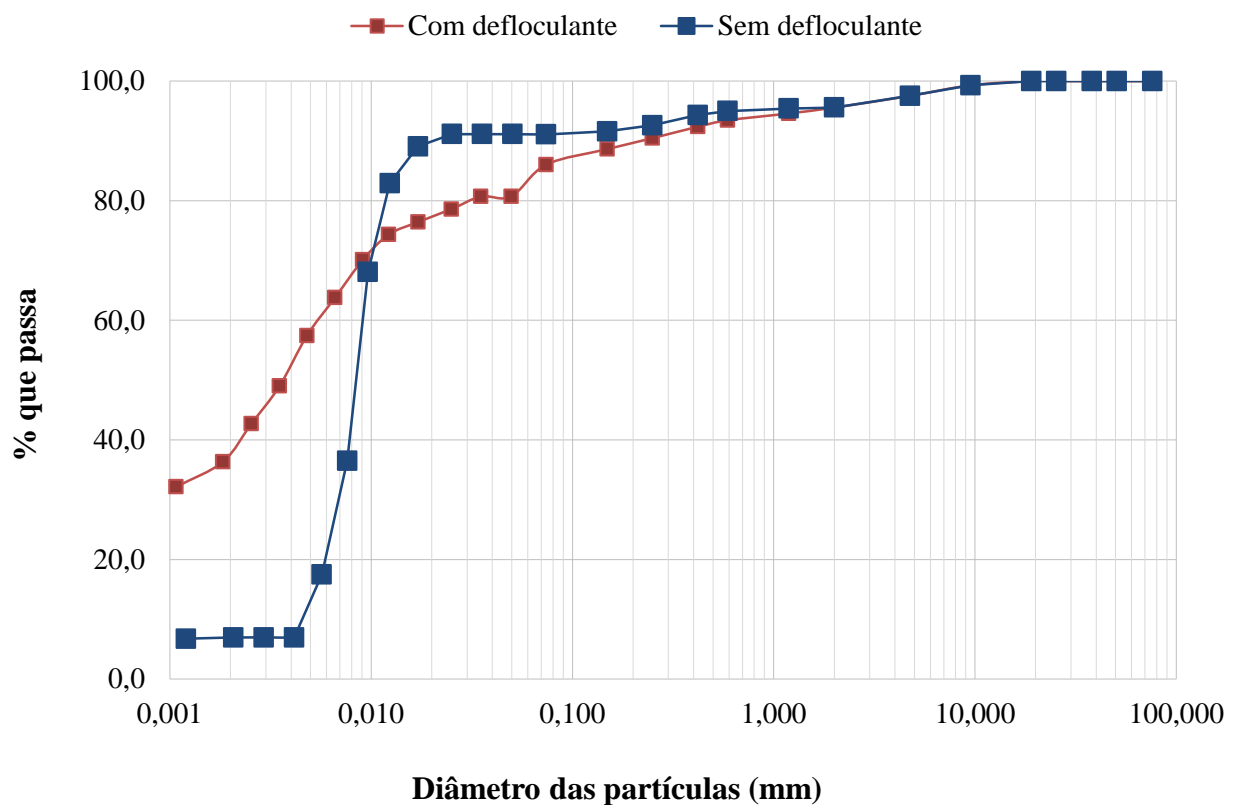


Figura 4.2 - Curvas Granulométricas do Solo

Na Tabela 4.3 são apresentados os dados da análise granulométrica do solo a partir da escala de diâmetros da NBR 6502 (ABNT, 1995).

Material [mm]	% do material	
	Com defloculante	Sem defloculante
20,0 < Pedregulho grosso < 60,0	0,0	0,0
6,0 < Pedregulho médio < 20,0	2,0	2,0
2,0 < Pedregulho fino < 6,0	2,4	2,4
0,6 < Areia grossa < 2,0	2,1	0,6
0,2 < Areia média < 0,6	3,9	3,4
0,06 < Areia fina < 0,2	8,9	0,5
0,002 < Silte < 0,06	36,5	84,0
Argila < 0,002	44,2	7,1

O material pode ser classificado como fino, uma vez que 70 % das suas partículas apresentam diâmetros menores que 0,06 mm.

O teor de silte na amostra de solo ensaiada por sedimentação sem defloculante representa 84% da amostra, sendo o teor de argila, 7,1%. Com o uso do defloculante, os

valores de teores de silte e argila passam a ser de 36,5 e 44,2, respectivamente. A relação entre os teores de argila com e sem defloculante (hexametáfosfato de sódio) é de 8,42, revelando considerável nível de agregação das partículas.

Analisando-se os teores de areia, observam-se porcentagens maiores na curva caracterizada com o uso de defloculante, sendo a relação entre os teores de areia com e sem defloculante igual a 3,3.

4.2.3 MISTURA M7030

Realizou-se a primeira análise granulométrica por peneiramento das misturas compostas por agregado siderúrgico e solo, na proporção de 70% e 30%, respectivamente. Os resultados são apresentados na Tabela 4.4:

Tabela 4.4 - Análise Granulométrica da Mistura M7030

Diâmetro	% que passa	Faixa D da NBR 16364		Tolerância
37,50	100,0	100	100	± 7
25,40	95,8	100	100	± 7
19,10	92,9	-	-	-
9,52	83,4	60	100	± 7
4,76	73,3	50	85	± 5
2,00	58,4	40	70	± 5
1,19	47,8	-	-	-
0,60	32,5	-	-	-
0,42	26,6	25	45	± 2
0,30	17,7	-	-	-
0,15	12,0	-	-	-
0,07	8,1	10	25	± 2

As curvas granulométricas obtidas a partir das análises realizadas em cada amostra são apresentadas na Figura 4.3:

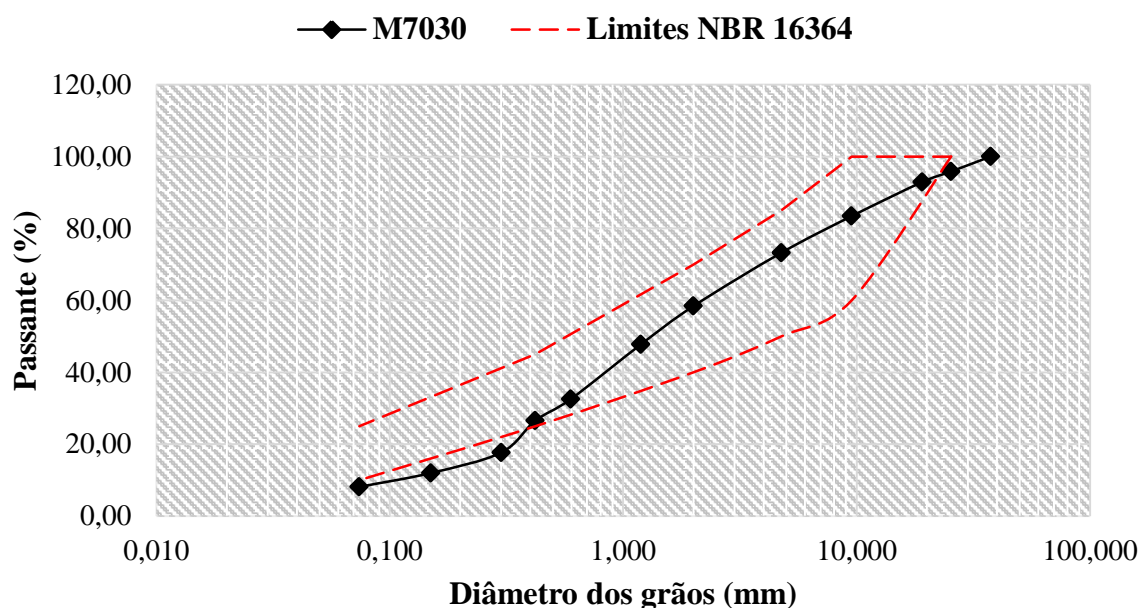


Figura 4.3 - Curva Granulométrica da Mistura M7030

A mistura M7030 se encontra dentro da faixa granulométrica D, uma das estipuladas pela norma NBR 16364 (ABNT, 2015). 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 $N > 5 \times 10^6$, estando esta porcentagem de material fino ($< 0,074$ mm) no limite de tolerância de $\pm 2\%$.

A Tabela 4.5 apresenta um resumo das principais características granulométricas obtidas a partir da análise realizada:

Tabela 4.5 - Resumo das Características Granulométricas da Mistura M7030

Características	M7030
D _{máx}	25,4
D ₁₀ [mm]	0,11
D ₃₀ [mm]	0,52
D ₆₀ [mm]	2,29
CNU	20,73
Cc	1,07
Pedregulho ($> 4,8$ mm) [%]	26,7
Areia grossa (4,8 - 2,0 mm) [%]	14,8
Areia média (2,0 - 0,42 mm) [%]	31,9
Areia fina (0,42 - 0,074 mm) [%]	18,4
Finos ($< 0,074$ mm) [%]	8,1

Os valores dos coeficientes de não uniformidade ($C_{nu}=20,73$) e de curvatura ($C_c=1,07$) caracterizam o agregado siderúrgico como material não uniforme ($C_{nu} > 15$) e bem graduado ($1 < C_c < 3$). 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. Constatou-se ainda, considerável quantidade de material fino (8,1%).

4.2.4 MISTURA M8020

Foi realizada a análise granulométrica da mistura M8020 por peneiramento, obtendo-se os dados apresentados na Tabela 4.6, acompanhados dos limites da norma para cada faixa granulométrica:

Tabela 4.6 - Análise Granulométrica da Mistura M8020

Diâmetro	% que passa	Faixa D da NBR 16364		Tolerância
37,50	100,0	100	100	± 7
25,40	95,1	100	100	± 7
19,10	90,8	-	-	-
9,52	83,1	60	100	± 7
4,76	72,7	50	85	± 5
2,00	55,1	40	70	± 5
1,19	48,2	-	-	-
0,60	39,6	-	-	-
0,42	35,0	25	45	± 2
0,30	29,2	-	-	-
0,15	24,9	-	-	-
0,07	21,4	10	25	± 2

Na Figura 4.4 podem ser observados a curva granulométrica que resulta da análise e os limites da faixa granulométrica D para misturas de agregado siderúrgico e solo, especificados pela norma NBR 16364 (ABNT, 2015):

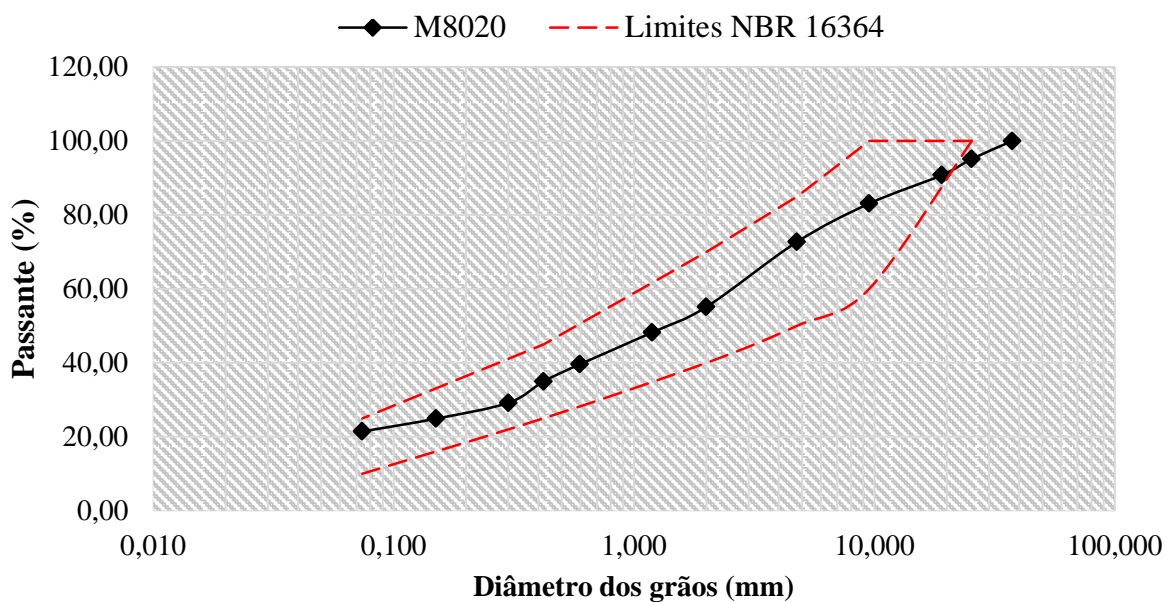


Figura 4.4 - Curva Granulométrica da Mistura M8020

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, respeitando, porém, o limite de tolerância da norma, de $\pm 7\%$.

A Tabela 4.7 apresenta um resumo das principais características granulométricas obtidas a partir da análise realizada:

Tabela 4.7 - Resumo das Características Granulométricas da Mistura M8020

Características	M8020
D _{máx}	25,4
D ₃₀ [mm]	0,32
D ₆₀ [mm]	2,77
CNU	80,09
C _c	1,05
Pedregulho (> 4,8 mm) [%]	27,3
Areia grossa (4,8 - 2,0 mm) [%]	17,6
Areia média (2,0 - 0,42 mm) [%]	20,2
Areia fina (0,42 - 0,074 mm) [%]	13,5
Finos (< 0,074 mm) [%]	21,4

Os valores dos coeficientes de não uniformidade ($C_{nu}=80,09$) e de curvatura ($C_c=1,05$) caracterizam o agregado siderúrgico como material não uniforme ($C_{nu} > 15$) e bem graduado ($1 < C_c < 3$). 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. Constatou-se ainda, grande quantidade de material fino (21,4%).

4.2.5 MISTURA M9010

Utilizando-se os mesmos procedimentos adotados para a obtenção das características granulométricas das misturas M7030 e M8020, obtiveram-se os resultados da análise granulométrica por peneiramento, representados na Tabela 4.8. Os limites da faixa A da NBR 16364 (ABNT, 2015), aos quais o material se adequa são apresentados para cada peneira:

Tabela 4.8 - Análise Granulométrica da Mistura M9010

Diâmetro	% que passa	Faixa A da NBR 16364		Tolerância
37,50	100,0	100	100	± 7
25,40	91,3	-	-	± 7
19,10	82,3	-	-	-
9,52	63,6	30	65	± 7
4,76	49,2	25	55	± 5
2,00	30,6	15	40	± 5
1,19	22,8	-	-	-
0,60	15,3	-	-	-
0,42	11,5	8	20	± 2
0,30	6,5	-	-	-
0,15	2,9	-	-	-
0,07	1,3	2	8	± 2

A curva granulométrica resultante da análise, juntamente com as curvas correspondentes aos limites da norma, é apresentada na Figura 4.5:

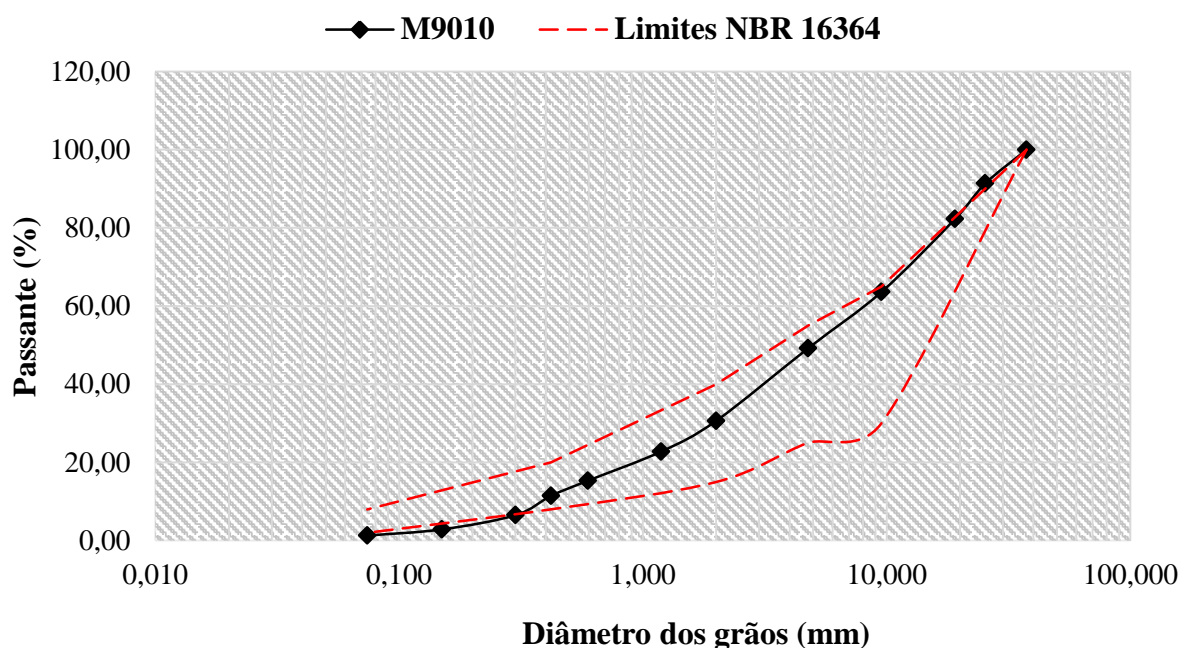


Figura 4.5 - Curva Granulométrica da Mistura M9010

Diferentemente do anteriormente exposto para as duas outras amostras analisadas, o material M9010 se encaixa na faixa granulométrica A, cumprindo com as especificações granulométricas para uso em bases de pavimentos rodoviários com tráfego com $N > 5 \times 10^6$. Esta faixa comparada com as faixas B, C e D, que também atendem à especificação de tráfego, apresenta uma maior limitação da quantidade de material fino presente na mistura.

A Tabela 4.6 apresenta um resumo das principais características granulométricas obtidas a partir da análise realizada:

Tabela 4.9 - Resumo das Características Granulométricas da Mistura M9010

Características	M9010
D _{máx}	25,4
D ₁₀ [mm]	0,38
D ₃₀ [mm]	1,93
D ₆₀ [mm]	8,33
CNU	21,67
Cc	1,17
Pedregulho (> 4,8 mm) [%]	50,8
Areia grossa (4,8 - 2,0 mm) [%]	18,5
Areia média (2,0 - 0,42 mm) [%]	19,2
Areia fina (0,42 - 0,074 mm) [%]	10,2
Finos (< 0,074 mm) [%]	1,3

Os valores dos coeficientes de não uniformidade ($C_{nu}=80,09$) e de curvatura ($C_c=1,05$) caracterizam o agregado siderúrgico como material não uniforme ($C_{nu} > 15$) e bem graduado ($1 < C_c < 3$). 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. O teor de material fino obtido da análise (1,3%) é o mais baixo dentre aqueles correspondentes às misturas.

4.3 LIMITES DE ATTERBERG

4.3.1 AÇOBRYTA

A partir da submissão do agregado siderúrgico aos procedimentos descritos nas normas NBR-6459 (ABNT, 1984) e NBR-7180 (ABNT, 1984), determinou-se que o material é não plástico (NP).

Da fração de açobryta passante na malha de 0,42 mm, apenas 2,47% do material é composto por finos. Essa fração é resultado do processo de britagem, não sendo, portanto, comum a presença de finos com as mesmas elevadas áreas superficiais e pequenos diâmetros das argilas ($< 0,002$ mm).

4.3.2 SOLO

Na Tabela 4.7 estão apresentados os dados obtidos no ensaio para a determinação do limite de liquidez a partir dos procedimentos descritos no método NBR 6459 (ABNT, 1984). O limite de liquidez é o teor de umidade correspondente a um número de 25 golpes com a utilização do aparelho Casagrande.

Tabela 4.10 - Limite de Liquidez do Solo Natural

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

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4.80, construiu-se a curva apresentada na Figura 4.6:

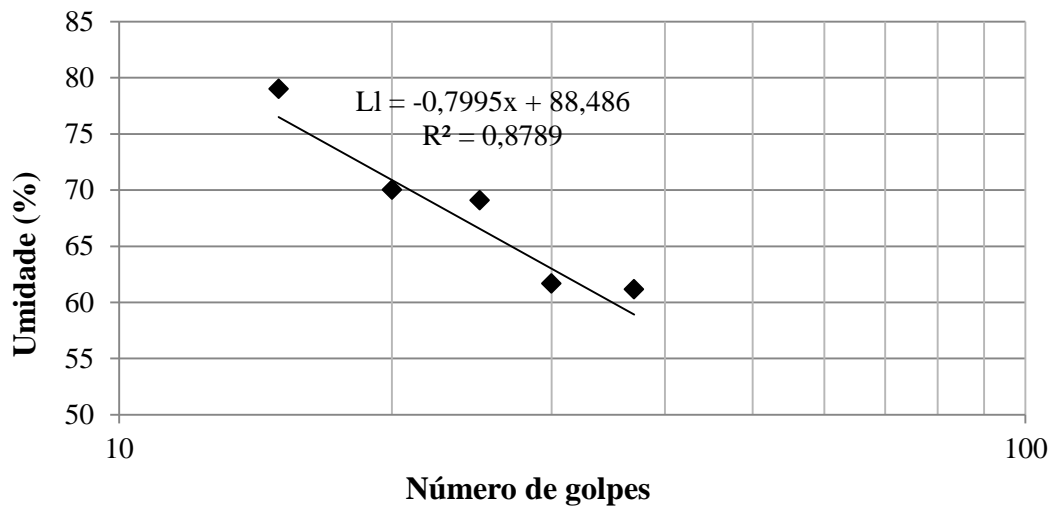


Figura 4.6 - Limite de Liquidez do Solo Natural (TARAZONA, 2016)

A partir da equação de regressão linear, obteve-se um valor de limite de liquidez de 68,50%, resultado elevado que pressupõe um material com grande variação volumétrica quando em contato com a água.

Determinou-se o limite de plasticidade do solo a partir do método descrito na NBR 7180 (ABNT, 1984), obtendo-se um valor de 47,16%.

A partir dos resultados de limite de liquidez (L_L) e limite de plasticidade (L_P), calculou-se o Índice de plasticidade (IP), obtendo-se um valor de $IP = 21,34\%$. O índice de plasticidade pode ser interpretado como a umidade máxima a 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.

De posse destes valores, realizou-se a classificação do solo pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS, utilizando a carta de plasticidade de Casagrande. O material pertence ao grupo MH – OH, composto por solos argilo-siltosos de alta plasticidade. Pela classificação da AASHTO, o solo é classificado como A-7: argilas e limos (mais 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.

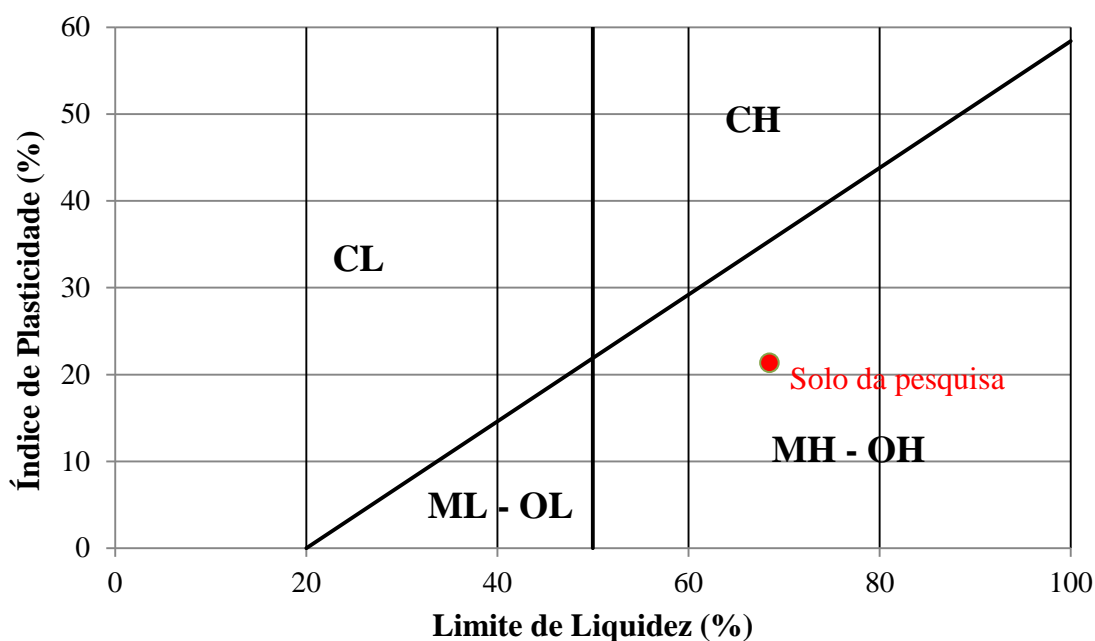


Figura 4.7 - Carta de Plasticidade de Casagrande

A norma NBR 16364 (ABNT, 2015) não especifica o limite de liquidez e índice de plasticidade do solo natural antes de misturado com o açobrita para o emprego em bases e sub-bases. Faz-se necessária, portanto, a avaliação destes índices após a realização da mistura com o açobrita.

Destaca-se que este material se mostraria inadequado à esta utilização, caso fosse empregado sem a adição do agregado siderúrgico devido à sua alta plasticidade, característica responsável por deformações não elásticas em estruturas de pavimentação.

4.3.3 MISTURAS M7030, M8020 e M9010

Realizou-se o ensaio da fração de material que passa pela malha de 0,42 mm de abertura das três misturas. Nas três análises, as misturas foram classificadas como não plásticas (NP), uma vez que não foi possível a determinação dos limites de liquidez e de plasticidade.

Considerando a plasticidade do solo puro analisado ($L_P = 47,16$ e $IP = 21,34\%$), observa-se que os Limites de Atterberg do açobrita predominam sobre as propriedades do solo quando misturados.

Por serem classificadas como não plásticas (NP), as misturas se adequam às especificações para misturas de agregado siderúrgico 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%.

4.4 PESO ESPECÍFICO REAL DOS GRÃOS

4.4.1 AÇOBRYTA

As etapas do processo de produção, estocagem, britagem e estabilização das escórias de aciaria apresentam considerável variabilidade, devendo-se este fato à variabilidade da estruturação dos processos siderúrgicos de cada usina fornecedora. O açobryta é, portanto, um material heterogêneo, podendo apresentar texturas superficiais variáveis em um mesmo lote.

A amostra de agregado siderúrgico analisada apresenta diferenças nas características físicas relacionadas à textura superficial. Uma parcela dos grãos apresenta textura superficial “lisa”, sendo outra parcela mais “rugosa”.

Os resultados obtidos nos ensaios para a determinação do peso específico real dos grãos são apresentados na Tabela 4.11. Através da análise destes resultados, percebe-se uma variação no peso específico real dos grãos de açobryta, obtendo-se diferentes valores para cada diâmetro estudado e uma variação adicional, no caso dos grãos entre 9,5 mm e 4,8 mm, relacionada à sua textura superficial. O material considerado “rugoso” apresenta um maior valor de γ_s . Segundo Rodhe (2002), as características físicas como textura superficial, granulometria e peso específico variam de acordo com o processo de resfriamento sofrido pelo material.

Procedeu-se então à determinação da densidade real dos grãos de diversos diâmetros sem a separação do material por sua textura superficial. Obtiveram-se valores mais baixos nesta etapa, sendo a média igual a 36,23 kN/m³. Este foi o valor referência utilizado para as análises posteriores.

Tabela 4.11 - Análise da Variação no Peso Específico Real dos Grãos de Açobryta (TARAZONA, 2016)

Textura Superficial	Tamanho (mm)		Peso Específico Real dos Grãos (kN/m ³)			
	Passante	Retido	1	2	3	Média
Lisos	9,5	4,8	42,84	43,62	43,35	43,27
	9,5	4,8	52,04	53,73	53,21	52,99
Lisos e Rugosos	4,8	2	38,58	38,96	38,75	38,76
	2	0,07	33,57	33,9	34,05	33,84

4.4.2 SOLO

Realizaram-se três análises utilizando o pentapicnômetro para a determinação do peso específico real dos grãos do solo. O valor médio obtido foi de 29,51 kN/m³.

4.4.3 MISTURAS M7030, M8020 E M9010

Análogo ao procedimento descrito para a determinação da densidade real dos grãos do solo, determinou-se o valor médio de três análises da amostra da mistura M7030, sendo este 32,71 kN/m³. O material, como esperado, apresentou valores mais baixos quando comparados àqueles obtidos nas análises das misturas M8020 e M9010.

Adotou-se o mesmo procedimento descrito no subitem anterior para a determinação do peso específico real dos grãos da mistura M8020. A média das três análises do material foi de 33,14 kN/m³.

Como esperado, a média das três determinações de peso específico real dos grãos da mistura M9010 foi a mais alta dentre aquelas obtidas para as três misturas. O valor obtido foi de 33,80 kN/m³.

4.5 ABSORÇÃO

4.5.1 AÇOBRITA

A norma NBR 16364 (ABNT, 2015), que determina os procedimentos para a execução de sub-base e base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico na pavimentação rodoviária, não especifica limites para a propriedade de absorção de água do açobrita. Utilizou-se, portanto, os limites de 1% a 2%, em peso, referenciados pela norma EM 262 (DNER, 1994), que estabelece as especificações do material escória de aciaria para emprego em pavimentos rodoviários. Utilizando o procedimento descrito na norma NBR NM 53 (ABNT, 2009), a média de três resultados do ensaio de absorção de água foi determinada em 1,93%, adequando-se aos limites da referida norma.

Ressalta-se a importância da obtenção deste resultado, uma vez que, considerada a heterogeneidade do material, a aplicação dos teores de umidade para certos pontos dos ensaios de compactação resultou em valores não esperados. Este fato se repetiu durante a etapa de compactação das misturas de agregado siderúrgico com solo.

4.6 RESISTÊNCIA À ABRASÃO “LOS ANGELES”

4.6.1 AÇOBRITA

A análise da resistência mecânica do açobrita foi realizada a partir dos resultados obtidos neste ensaio, que apresentou um desgaste de 28%. A norma EM 262 (DNER, 1994) recomenda para uso em revestimento e sub-base, o valor máximo de 25% de desgaste para escórias de aciaria. A norma NBR 16364 (ABNT, 2015), porém, estabelece os limites de desgaste de 55%. O material apresentaria, portanto, resistência mecânica adequada à utilização em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

4.7 COMPACTAÇÃO E ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

4.7.1 AÇOBRITA

Considerada a heterogeneidade do material em relação à sua composição e estrutura, a etapa de aplicação da umidade dos pontos necessários à construção da curva mostrou-se complexa, com resultados destoantes do inicialmente estimado. Raposo (2005) descreve um processo de drenagem da água durante a compactação, mais pronunciado nas camadas inferiores. Desta forma, para a obtenção de um teor de umidade representativo do corpo de prova, recomenda-se um mínimo de três determinações de teores de umidade, sendo elas referentes aos materiais de topo, das camadas centrais e das camadas de base do corpo de prova.

A Figura 4.8 apresenta os resultados do ensaio de compactação realizado para o açobrita utilizando-se 100% da energia do Proctor Modificado, sem reuso do material:

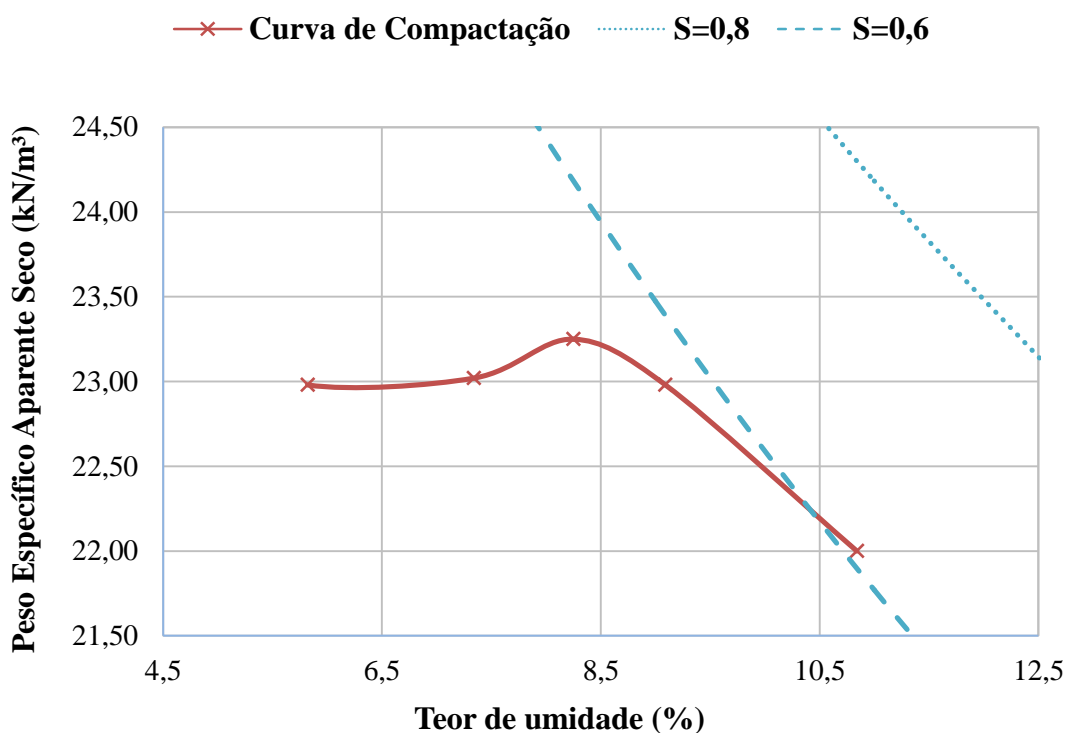


Figura 4.8 - Curva de Compactação do Açobrita

Obeve-se uma curva abatida, com características similares às de curvas de compactação de areias limpas. Isto é possivelmente explicado por seu baixo conteúdo de material fino e sua não plasticidade.

Determinou-se o valor do máximo peso específico aparente seco equivalente a 23,10 kN/m³ e da umidade ótima de compactação de 8,75%, considerando a trabalhabilidade do material e os resultados do ensaio de ISC posteriormente apresentados.

Construíram-se as curvas de saturação de 80% (S= 0,8) e 60% (S= 0,6), a partir do valor de $\gamma_s = 36,23$ kN/m³. O ponto correspondente à umidade ótima encontra-se em um grau de saturação menor que 60%, indicando a presença ainda considerável de vazios após o processo de compactação.

Procedeu-se ao ensaio de ISC, realizado nos cinco corpos de prova. A partir do método ME 172 (DNIT, 2016), após da etapa de imersão em água dos corpos de prova para a avaliação da expansibilidade, foi realizada a etapa de penetração na prensa automática.

A Tabela 4.9 resume os resultados obtidos dos ensaios de compactação, expansão e ISC:

Tabela 4.12 - Resultados dos Ensaios de Compactação, Expansão e Índice de Suporte Califórnia 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

Obtiveram-se valores nulos de variação volumétrica na etapa de imersão à temperatura ambiente dos corpos de prova. Este fato sugere um resultado satisfatório do processo de cura ao qual o material foi submetido na usina, antes de ser enviado para as análises neste trabalho descritas. Verificou-se novamente este comportamento no ensaio proposto pela norma ME 113 (DNIT, 2009), posteriormente apresentado.

O ponto referente à umidade ótima é obtido a partir do encontro entre as curvas de compactação e ISC representadas abaixo (Figura 4.9):

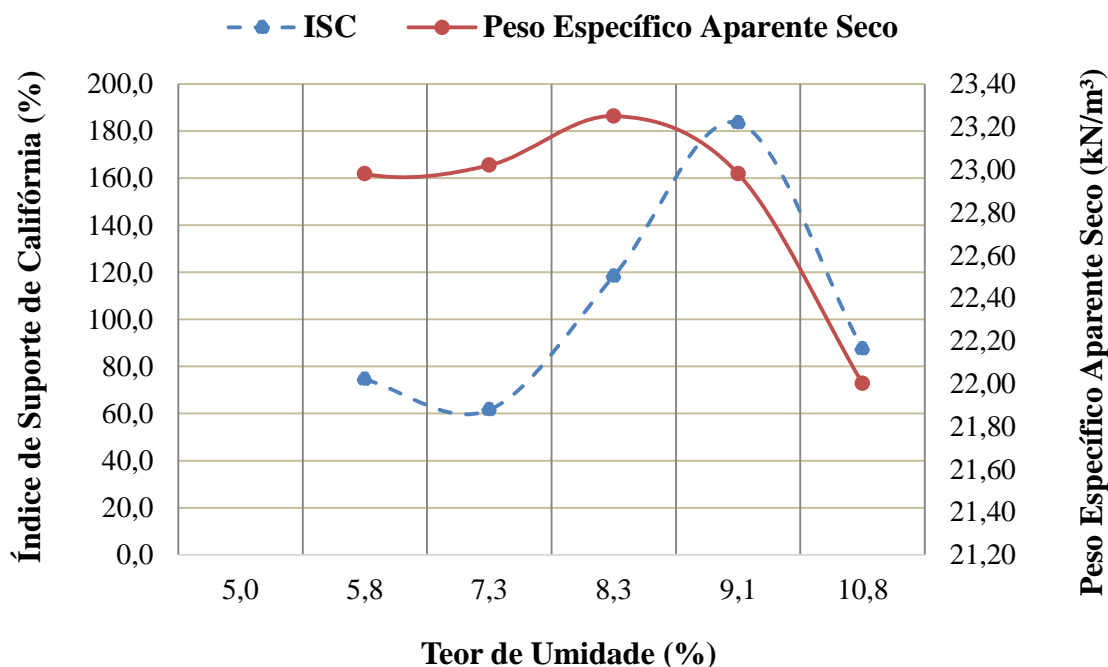


Figura 4.9 - Curvas de Compactação e Índice de Suporte Califórnia do Açobrita

O máximo peso específico aparente seco é superior aos valores dos agregados tradicionais (20 a 22 kN/m³), sendo a umidade ótima de compactação muito similar. Observa-se ainda que o material no ramo seco é pouco sensível às variações de umidade no ensaio de compactação. O valor máximo obtido de Índice de Suporte de Califórnia foi de 183% para a amostra com 9,1% de umidade de compactação. Em geral, os valores de ISC se mostraram superiores aos dos agregados convencionais. O ISC na umidade ótima é de 164%.

A norma NBR 16364 (ABNT, 2015) estabelece limites inferiores de ISC para a utilização do agregado siderúrgico como material constituinte de base e sub-base em 80% e 20%, respectivamente. O material cumpre, portanto, com as especificações para utilização em ambas as camadas.

Finalizado o processo de compactação, avaliou-se a integridade dos corpos de prova, que não apresentaram fissuras, mesmo após o desmolde (Figura 4.10)



Figura 4.10 - Corpos de Prova Desmoldados Após o Ensaio de Compactação

4.7.2 SOLO

Realizaram-se dois ensaios de compactação do solo. Na primeira análise, compactou-se o solo com a energia do Proctor Normal (600 kJ/m³), com reuso do material, intentando-se a obtenção de uma estimativa da umidade ótima de compactação e o comportamento deste solo como material de subleito. Posteriormente, outra curva foi construída utilizando a energia do Proctor modificado, sem reuso do material, procedida pela determinação do Índice de Suporte Califórnia. As curvas obtidas são representadas juntamente com as curvas de saturação S=100% e S=90% (Figura 4.11):

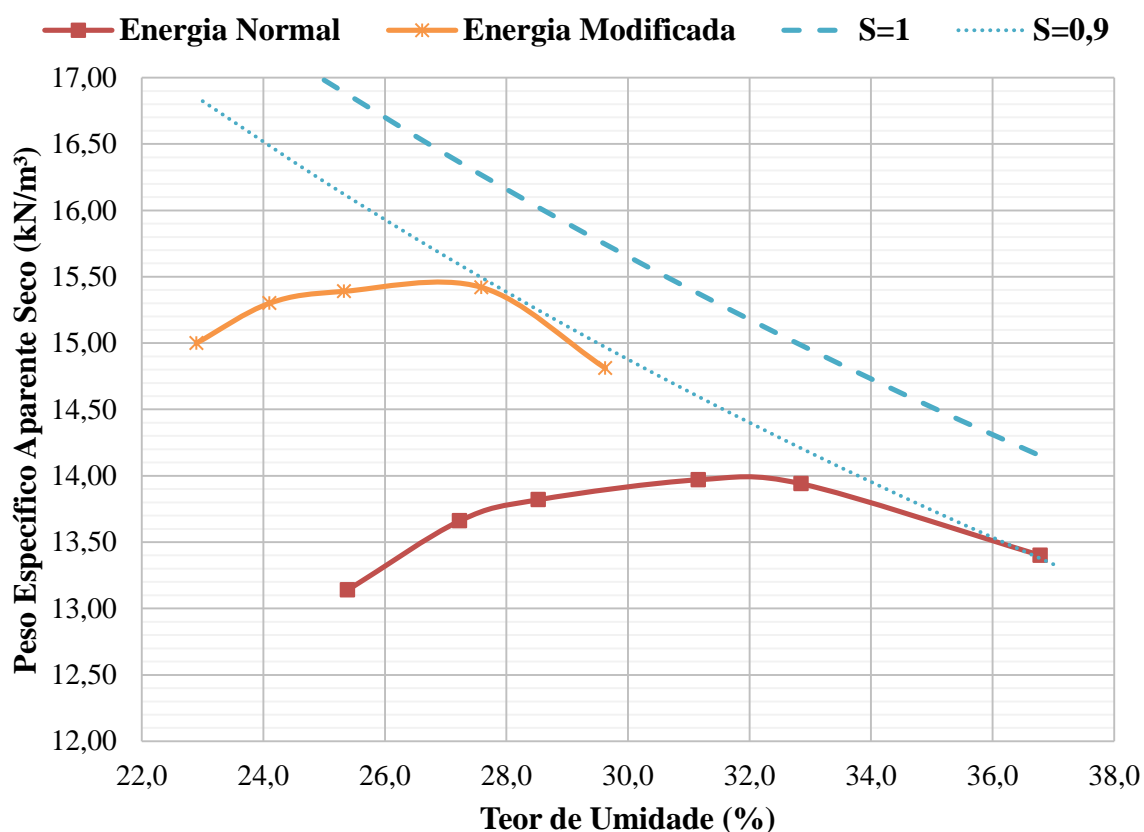


Figura 4.11 - Curvas de Compactação do Solo nas Energias Proctor Normal e Modificado

As curvas apresentam o formato típico das curvas de compactação de solos coesivos, com pontos de máximo peso específico aparente seco bem definidos. Estes resultados são apresentados na Tabela 4.13:

Tabela 4.13 – Resultados Ensaio de Compactação com Energias Proctor Normal e Modificado para o Solo.

Energia de Compactação	Umidade Ótima (%)	Peso Específico Aparente Seco Máximo (kN/m ³)
Normal	31,0	14,00
Modificada	26,5	15,50

Procedeu-se à determinação do Índice de Suporte Califórnia para o solo compactado utilizando a energia Proctor Normal. Os resultados são apresentados na Tabela 4.10:

Tabela 4.14 - Resultados dos Ensaios de Compactação e Índice de Suporte Califórnia na Energia Proctor Normal

Ponto	Peso Específico Aparente Seco (KN/m3)	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	36,8	2,4

Esta primeira amostra apresentou um valor máximo de ISC de 26% na umidade ótima. Destaca-se que para a utilização deste material como subleito, devem ser observados os valores mínimos previstos em projeto. Quando não atendido este critério, deve ser observada a necessidade de uma camada de reforço do subleito.

Determinou-se ainda o Índice de Suporte Califórnia e o potencial de expansão para o solo compactado na energia do ensaio Proctor modificado, objetivando-se a determinação do comportamento deste, quando componente de misturas com açobrita, para emprego em bases e sub-bases. Os resultados são apresentados na Tabela 4.15:

Tabela 4.15 - Resultados dos Ensaios de Compactação e Índice de Suporte Califórnia do Solo na Energia Modificada

Ponto	Peso Específico Aparente Seco (kN/m³)	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 nesta etapa um valor máximo de ISC de 32,5%. As normas NBR 16364 (ABNT, 2015), ES 114 (DNIT, 2009) e ES 115 (DNIT, 2009) não estabelecem valores mínimos deste parâmetro quando o solo puro é analisado.

A normativa ES 139 (DNIT, 2010) especifica o valor mínimo do ISC em 20% para solos empregados na execução de sub-bases. O material já atenderia à este critério, portanto, sem a necessidade da mistura com agregado siderúrgico. Para camadas de base, porém, a norma ES 141 (DNIT, 2010) estabelece o valor mínimo de ISC em 80% para Número N > 5 x 10⁶. O solo puro, portanto, não seria adequado à utilização em camadas de base de pavimentos rodoviários.

Os resultados da avaliação de expansão se mostraram elevados, atingindo o valor máximo de 4,9% no ramo seco. No ramo úmido e na umidade ótima, estes valores alcançaram 2,3% e 3,0%, respectivamente. A norma NBR 16364 (ABNT, 2015) não especifica limites para valores de expansão quando o solo a ser misturado com açobrita é analisado independentemente. Referenciando, porém, as normas ES 139 (DNIT, 2010) e ES 141 (DNIT, 2010), compreende-se que estes valores de expansão sugerem a não adequação do solo à utilização em camadas de base e sub-base, caso este não fosse misturado ao agregado siderúrgico. Os limites máximos determinados para sub-bases e bases são de 1% e 0,5%, respectivamente.

4.7.3 M7030

A Figura 4.9 apresenta a curva de compactação obtida a partir dos resultados do ensaio da mistura composta por 70% de açobrita e 30% de solo, utilizando-se a energia Proctor modificada.

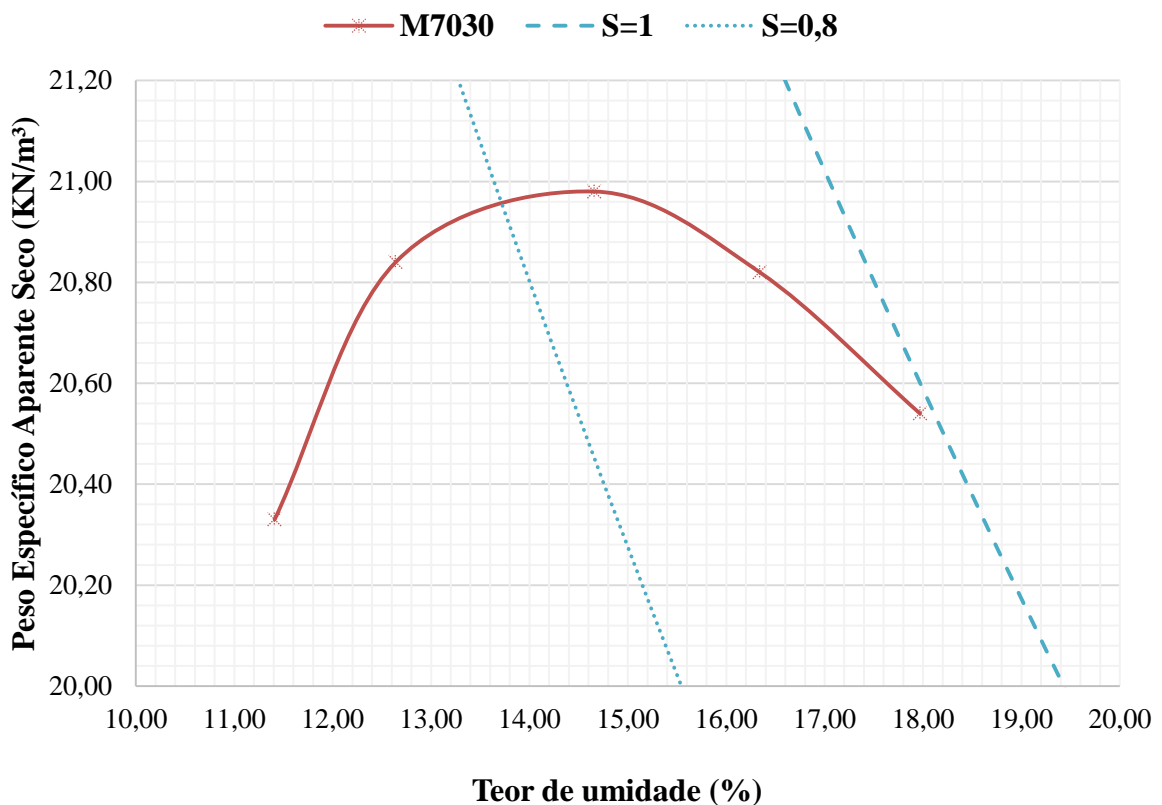


Figura 4.12 - Curva de Compactação da Mistura M7030 na Energia Proctor Modificada

Quando analisados apenas os ensaios de compactação, observa-se o formato típico de curvas de compactação de solos, tendo bem definidos os pontos de máximo peso específico

aparente seco relacionados aos teores de umidade ótima para a compactação. Para o ponto de umidade ótima, o valor de saturação é de 85%.

Similarmente ao ocorrido durante os ensaios de compactação do açobrita, a etapa de aplicação da umidade dos pontos necessários à construção da curva mostrou-se complexa, com resultados destoantes do inicialmente estimado. Objetivando-se uma análise mais assertiva, determinou-se o máximo peso específico aparente seco utilizando os resultados das etapas de compactação e determinação do Índice de Suporte Califórnia.

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 M7030:

Tabela 4.16 - Resultados dos Ensaios de Compactação e ISC Para a Mistura M7030

Ponto	Peso Específico Aparente Seco (kN/m³)	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 partir dos resultados apresentados, construíram-se as curvas referentes aos dados de ISC e Peso Específico Aparente Seco, representadas na Figura 4.13:

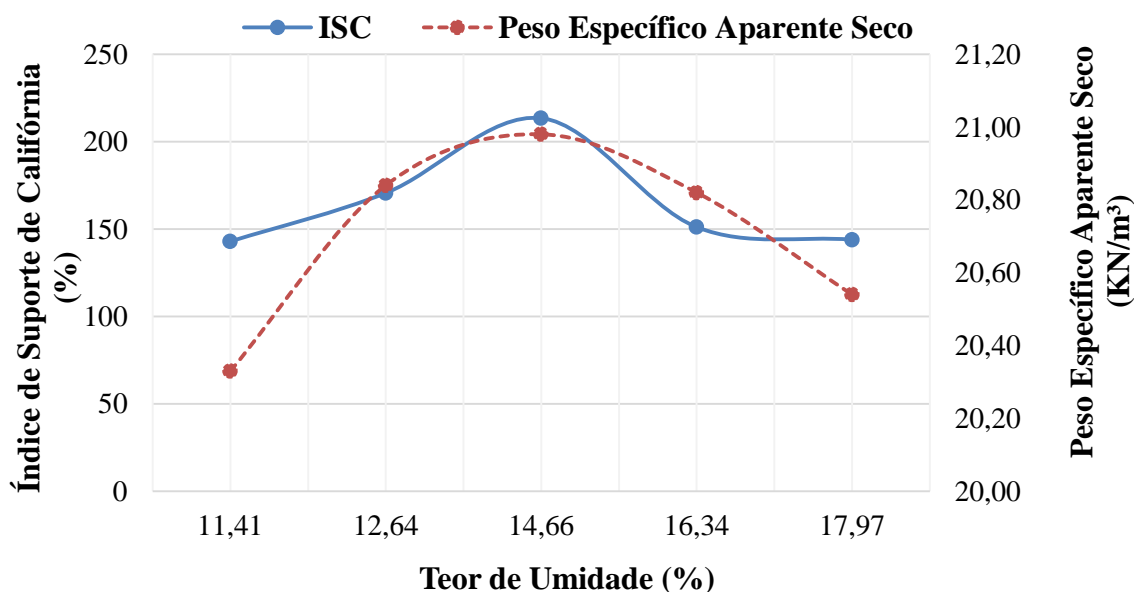


Figura 4.13 - Curvas de Compactação e Índice de Suporte Califórnia da Mistura M7030

Define-se a umidade ótima em 14,7%, o ponto referente ao valor máximo de ambas as curvas de compactação e ISC. Obtém-se, portanto, o valor do peso específico aparente seco máximo de 21,00 kN/m³ e o Índice de Suporte Califórnia de 213,4%.

A norma NBR 16364 (ABNT, 2015) estabelece o valor mínimo de ISC em 80% e 20% para materiais utilizados em base e sub-base, respectivamente. Todos os pontos obtidos no ensaio se mostraram acima de 100%, tornando o material adequado a este fim quando analisada a capacidade de suporte.

A etapa de imersão resulta no valor máximo de expansão de 0,5%, referente ao corpo do prova compactado na umidade mais baixa. Considerando que estes resultados para os materiais açobrita e solo, quando analisados individualmente, foram de 00,00% e 4,9%, respectivamente, atribui-se o valor de expansão da mistura ao comportamento do solo. A norma NBR 16364 (ABNT, 2015) estabelece o valor máximo de expansão de 0,5% e 1% para materiais destinados à execução de bases e sub-bases, respectivamente. A mistura, portanto, atenderia às especificações normativas em relação à expansão para este fim.

4.7.4 M8020

A Figura 4.14 apresenta a curva de compactação obtida a partir dos resultados do ensaio da mistura composta por 80% de açobrita e 20% de solo, utilizando-se a energia Proctor modificada:

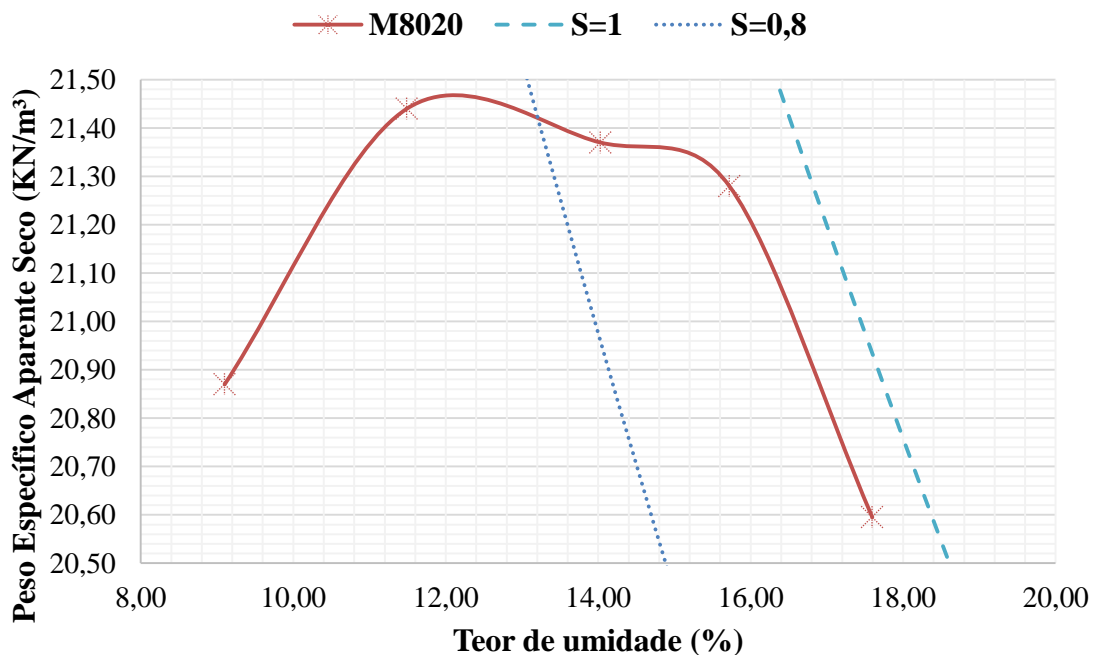


Figura 4.14 - Curva de Compactação da Mistura M8020

Analisados os ensaios de compactação, observa-se o formato típico de curvas de compactação de solos, tendo bem definido o valor máximo da curva relacionado ao teor de umidade ótima para a compactação. Para o ponto de umidade ótima, o valor de saturação é de cerca de 75%, abaixo daquele obtido no ensaio da mistura M7030.

Similarmente ao ocorrido durante os ensaios de compactação do açobrita e da mistura M7030, a etapa de aplicação da umidade dos pontos necessários à construção da curva mostrou-se complexa, com resultados destoantes do inicialmente estimado. Deste modo, determinou-se o máximo peso específico aparente seco utilizando os resultados das etapas de compactação e determinação do Índice de Suporte Califórnia apresentados na Tabela 4.17:

Tabela 4.17 - Resultados dos Ensaio 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

A partir dos resultados apresentados, construíram-se as curvas referentes aos dados de ISC e Peso Específico Aparente Seco, representadas na Figura 4.15:

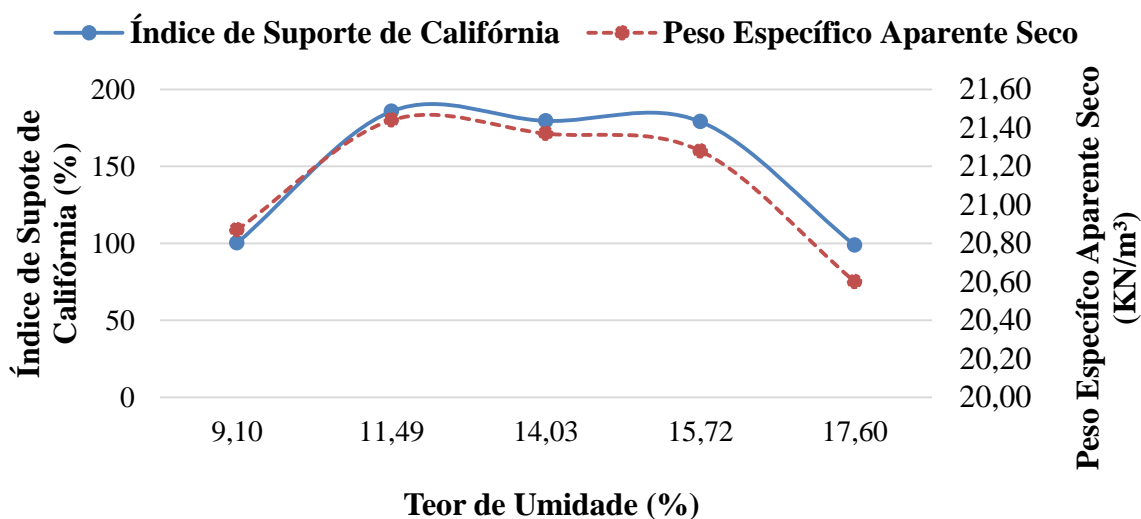


Figura 4.15 - Curvas de Compactação e Índice de Suporte Califórnia da Mistura M8020

Obteve-se o valor de umidade ótima em 11,49%, o ponto referente ao valor máximo de ambas as curvas de compactação e ISC. Para este ponto, o valor do peso específico aparente seco máximo é de 21,44 kN/m³ e o Índice de Suporte Califórnia atinge o valor de 185,7%.

Em geral, a mistura M8020 apresentou valores menores de ISC (média de 148%) quando comparados àqueles obtidos para a mistura M7030 (média de 164,38%). A norma NBR 16364 (ABNT, 2015) estabelece o valor mínimo de ISC em 80% e 20% para materiais utilizados em base e sub-base, respectivamente. Todos os pontos obtidos no ensaio se mostraram acima de 80%, tornando o material adequado a este fim quando analisada a capacidade de suporte.

A etapa de imersão resulta no valor máximo de expansão de 0,43%, referente ao corpo do prova compactado na umidade mais baixa. Atribui-se o valor de expansão da mistura ao comportamento do solo, uma vez que este valor se apresenta menor quando comparado com aqueles obtidos nas análises do açobrita (0,00%) e da mistura M7030 (0,5%). A norma NBR 16364 (ABNT, 2015) estabelece o valor máximo de expansão de 0,5% e 1% para materiais destinados à execução de bases e sub-bases, respectivamente. Para este fim, portanto, atenderia às especificações normativas em relação à expansão.

4.7.5 M9010

A Figura 4.16 apresenta a curva de compactação obtida a partir dos resultados do ensaio da mistura composta por 90% de açobrita e 10% de solo, utilizando-se a energia Proctor modificada:

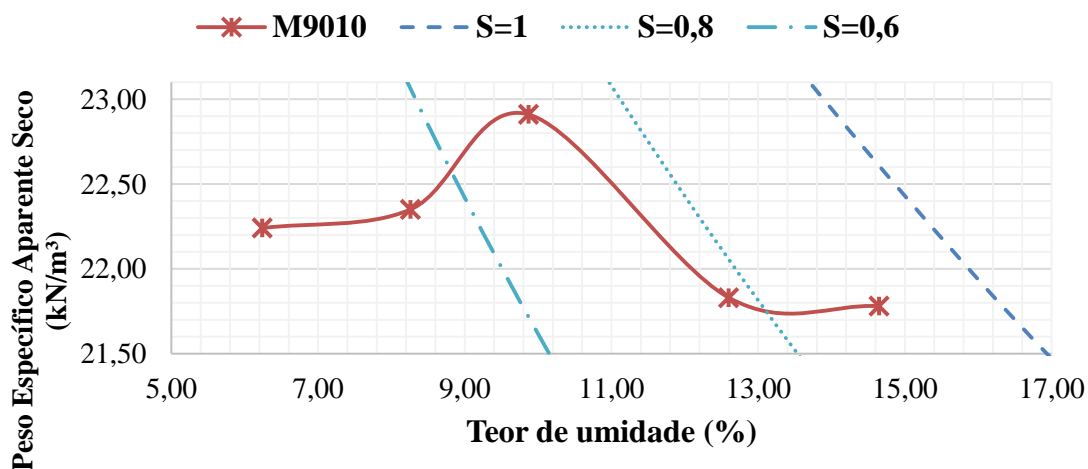


Figura 4.16 - Curva de Compactação da Mistura M9010

Quando analisados apenas os ensaios de compactação, observa-se o formato típico de curvas de compactação de solos, tendo bem definidos os pontos de máximo peso específico aparente seco relacionados aos teores de umidade ótima para a compactação. O comportamento desta curva, porém, difere daquele referente às outras curvas por apresentar inclinações maiores durante as transições entre o ponto de umidade ótima e os ramos seco e úmido. Para o ponto de umidade ótima, o valor de saturação é de cerca de 70%, abaixo daqueles obtidos nos ensaios das misturas M8020 (75%) e M7030 (85%).

Similarmente ao ocorrido durante os ensaios de compactação dos outros materiais analisados neste trabalho, a etapa de aplicação da umidade dos pontos necessários à construção da curva mostrou-se complexa, com resultados destoantes do inicialmente estimado. Deste modo, determinou-se o máximo peso específico aparente seco utilizando os resultados das etapas de compactação e determinação do Índice de Suporte Califórnia apresentados na Tabela 4.18:

Tabela 4.18 - Resultados dos Ensaios de Compactação e Índice de Suporte Califórnia da Mistura M9010

Ponto	Peso Específico Aparente Seco (kN/m³)	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

A partir dos resultados apresentados, construíram-se as curvas referentes aos dados de ISC e Peso Específico Aparente Seco, representadas na Figura 4.17:

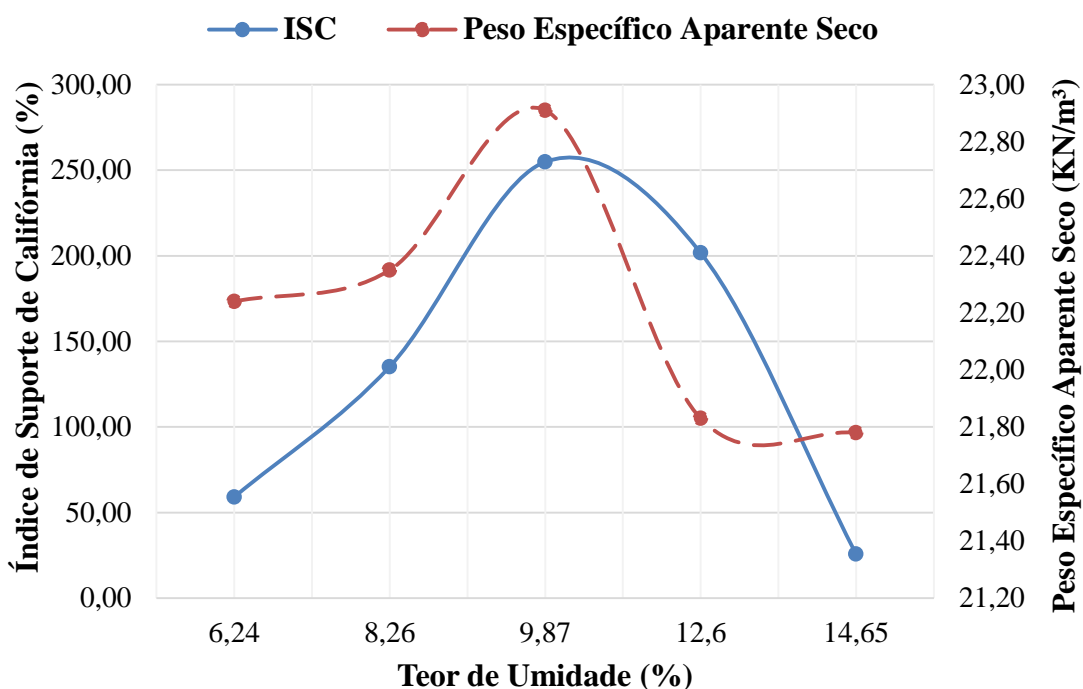


Figura 4.17 - Curvas de Compactação e Índice de Suporte Califórnia da Mistura M9010

Obteve-se o valor de umidade ótima em 9,87%, o ponto referente ao valor máximo de ambas as curvas de compactação e ISC. Para este ponto, o valor do peso específico aparente seco máximo é de 22,91 kN/m³ e o Índice de Suporte Califórnia atinge o valor de 254,87%.

Em geral, a mistura M9010 apresentou valores menores de ISC (média de 135,31%) quando comparados àqueles obtidos para as misturas M8020 (média de 148%) e M7030 (média de 164,38%), significando um aumento das inclinações das curvas de ISC a partir do aumento da proporção de açobrita nas misturas. A norma NBR 16364 (ABNT, 2015) estabelece o valor mínimo de ISC em 80% e 20% para materiais utilizados em base e sub-base, respectivamente. Diferentemente do ocorrido nas análises das outras duas misturas, os pontos extremos dos ramos seco e úmido se mostraram abaixo de 80%. O material, contudo, se mostra adequado à este fim, uma vez que o ISC referente à umidade ótima é cerca de três vezes maior que o valor limite normalizado.

A etapa de imersão resulta no valor máximo de expansão de 0,22%, novamente referente ao corpo do prova compactado na umidade mais baixa. Este valor de expansão da mistura é atribuído ao comportamento do solo, uma vez que se apresenta menor quando comparado com aqueles obtidos nas análises do açobrita (0,00%) e nas misturas M8020 (0,43%) e M7030 (0,5%). A norma NBR 16364 (ABNT, 2015) estabelece o valor máximo de expansão de 0,5% e 1% para materiais destinados à execução de bases e sub-bases,

respectivamente. Para este fim, portanto, atenderia às especificações normativas em relação à expansão.

4.7.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO E ISC

A Tabela 4.19 resume os valores referentes à umidade ótima obtidos para as propriedades peso específico aparente seco, expansão e ISC para cada material compactado na energia modificada:

Tabela 4.19 - Resumo dos Ensaios de Compactação e Índice de Suporte Califórnia Para os Materiais Compactados na Energia Modificada

Mistura	Peso Específico Aparente Seco (kN/m ³)	Teor de Umidade Ótima (%)	Expansão (%)	ISC (%)
Açobrita	23,10	8,75	0	164,00
Solo	15,39	25,30	3,03	32,50
M7030	20,98	14,66	0,41	213,00
M8020	21,44	11,49	0,38	185,70
M9010	22,91	9,87	0,05	254,90

A Figura 4.18 apresenta um resumo dos ensaios de compactação das amostras do açobrita e das misturas analisadas nesta pesquisa:

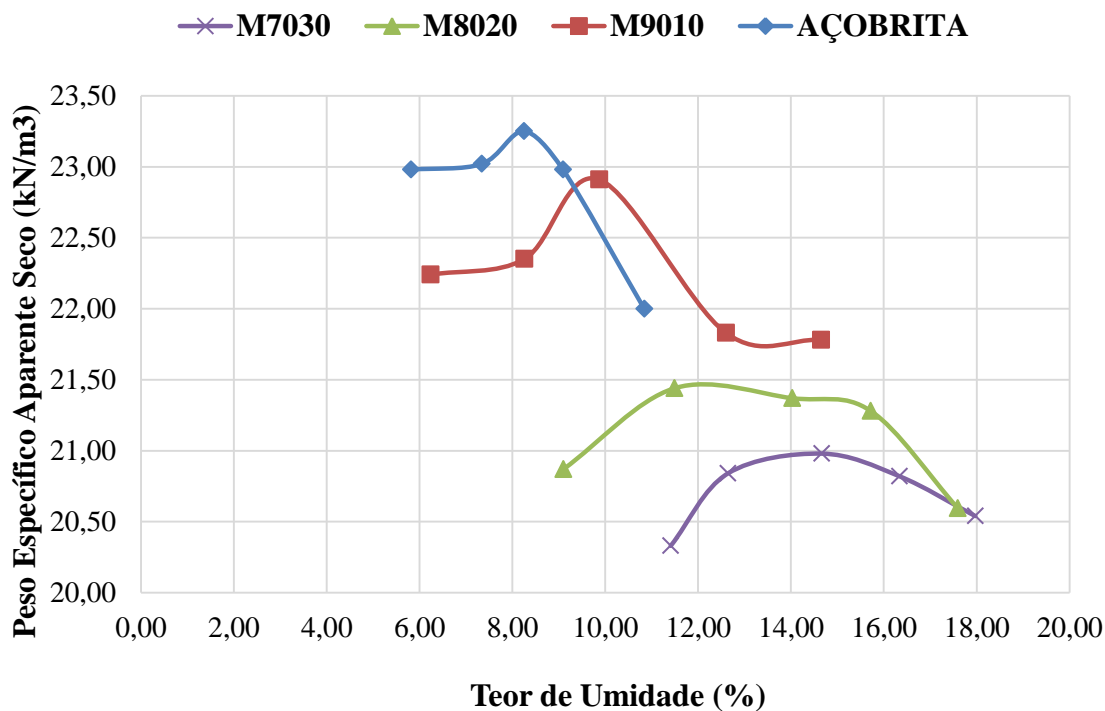


Figura 4.18 - Curvas de Compactação do Açobrita e das Misturas Analisadas

Analisando a Figura 4.18, o aumento do teor de agregado siderúrgico empregado em cada amostra resulta no aumento dos valores de peso específico aparente seco, que se mostram iguais ou maiores que o peso específico aparente seco dos agregados convencionais (20 a 22 kN/m³) em todos os casos. Analogamente, percebe-se a diminuição do teor de umidade ótima das amostras a partir da introdução de teores mais altos de aço brita.

A diferença entre os valores de γ_s do solo natural e do aço brita naturalmente tenderia a condicionar um aumento no valor do peso específico aparente seco a partir do aumento dos teores de aço brita nos corpos de prova compactados. Objetivando, portanto, a avaliação da efetividade do processo de compactação dos corpos de prova, verificou-se a variação do índice de vazios em relação ao teor de umidade para os materiais representados na Figura 4.19:

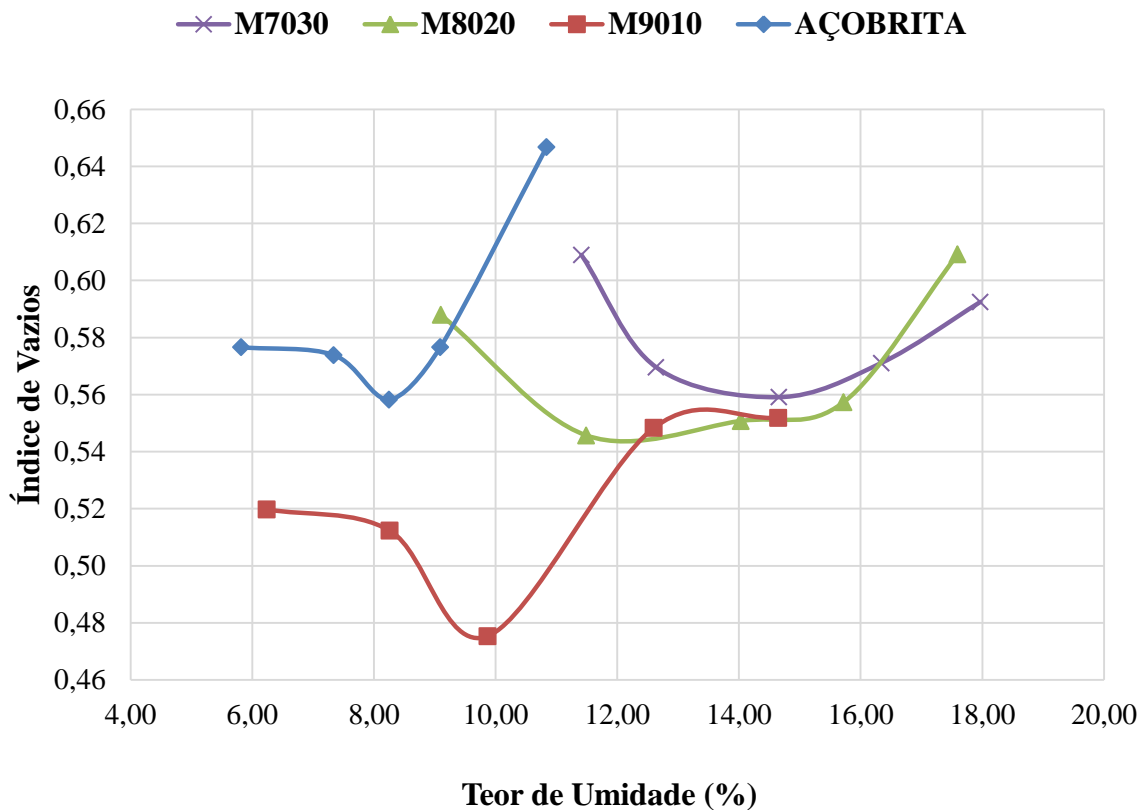


Figura 4.19 - Índice de Vazios das Amostras de Aço brita e das Misturas Analisadas (TARAZONA, 2016)

Os menores valores de índice de vazios foram obtidos na mistura M9010, denotando uma maior efetividade do processo de compactação neste caso. Uma vez que a mistura M9010 se encontra na faixa granulométrica A, que difere das outras faixas por uma maior limitação da quantidade de finos, enquanto as misturas M8020 e M7030 se encontram na

faixa D, atribui-se estes resultados à essas características granulométricas das amostras. A faixa A, portanto, tende a apresentar melhores resultados no processo de compactação.

4.8 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE EXPANSÃO – MÉTODO ME113 (DNIT, 2009).

4.8.1 AÇOBRIITA

A Tabela 4.20 apresenta os resultados obtidos a partir do ensaio baseado no Método de Ensaio para Avaliação do Potencial de Expansão de Escória de Aciaria, adaptado pela norma ME 113 (DNIT, 2013), que baseia-se na norma PTM 130, desenvolvida pelo Departamento de Transportes da Pensilvânia:

Tabela 4.20 - Resultados do Ensaio de Expansão do Açobrita pelo Método ME113 (DNIT, 2009).

Corpo de Prova		1	2	3	
Teor de Umidade (%)		8,7	10,7	6,7	
		Ótima	Ramo Úmido	Ramo Seco	
Dia no.	Data	Leituras Extensômetros (mm)			
IMERSÃO	0	05/mar	0,01	9,00	6,98
	1	06/mar	0,25	9,08	7,02
	2	07/mar	0,44	9,19	7,22
	3	08/mar	0,54	9,29	7,39
	4	09/mar	0,65	9,38	7,57
	5	10/mar	0,74	9,48	7,70
	6	11/mar	0,80	9,55	7,80
SATURAÇÃO	7	12/mar	0,87	9,60	7,88
	8	13/mar	0,92	9,66	7,84
	9	14/mar	0,96	9,70	7,87
	10	15/mar	0,97	9,78	7,90
	11	16/mar	0,94	9,84	7,93
	12	17/mar	0,99	9,92	7,97
	13	18/mar	1,00	9,98	8,01
	14	19/mar	1,02	10,12	8,05
EXPANSÃO (%)		0,87	0,96	0,92	

A norma NBR 16364 (ABNT, 2015) estabelece o limite máximo de expansão da média dos três corpos de prova em 3%. Ao final dos 14 dias de duração do ensaio, obteve-se o valor máximo de 0,96% no corpo de prova compactado no ramo úmido. A amostra referente à umidade ótima apresentou a menor expansão dentre os corpos de prova analisados, com um valor de 0,87%. A média obtida a partir dos três resultados foi de 0,92%, consideravelmente

aquém dos limites estabelecidos pela norma. Destaca-se, entretanto, que a norma PTM 130 original (DTP, 1978) especifica o valor máximo de expansão em 0,5%.

Na Tabela 4.21 apresentam-se os valores de expansão acumulada ao longo do tempo das duas fases do ensaio, totalizando os 14 dias. O dia 0 representa a aferição passados os primeiros 30 minutos de ensaio. O dia 1 representa a leitura após 24 horas do início do ensaio na condição submersa dos corpos de prova, à temperatura de 69°C. O dia 7 corresponde à metade do tempo de ensaio, ocasião em que os corpos de prova são retirados da condição submersa e seu comportamento é avaliado na condição saturada, não submersa. O dia 14 representa a leitura final, com a manutenção dos corpos de prova na condição saturada, não submersa.

Tabela 4.21 - Taxa De Expansão Acumulada Ao Longo Do Tempo De Ensaio.

Corpo de Prova		1	2	3
Teor de Umidade (%)		8,7	10,7	6,7
		Ótima	Ramo Úmido	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
	6	0,68	0,47	0,70
SATURAÇÃO	7	0,74	0,52	0,77
	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

A Figura 4.20 apresenta os valores de expansão descritos na Tabela 4.21 em função do tempo de ensaio:

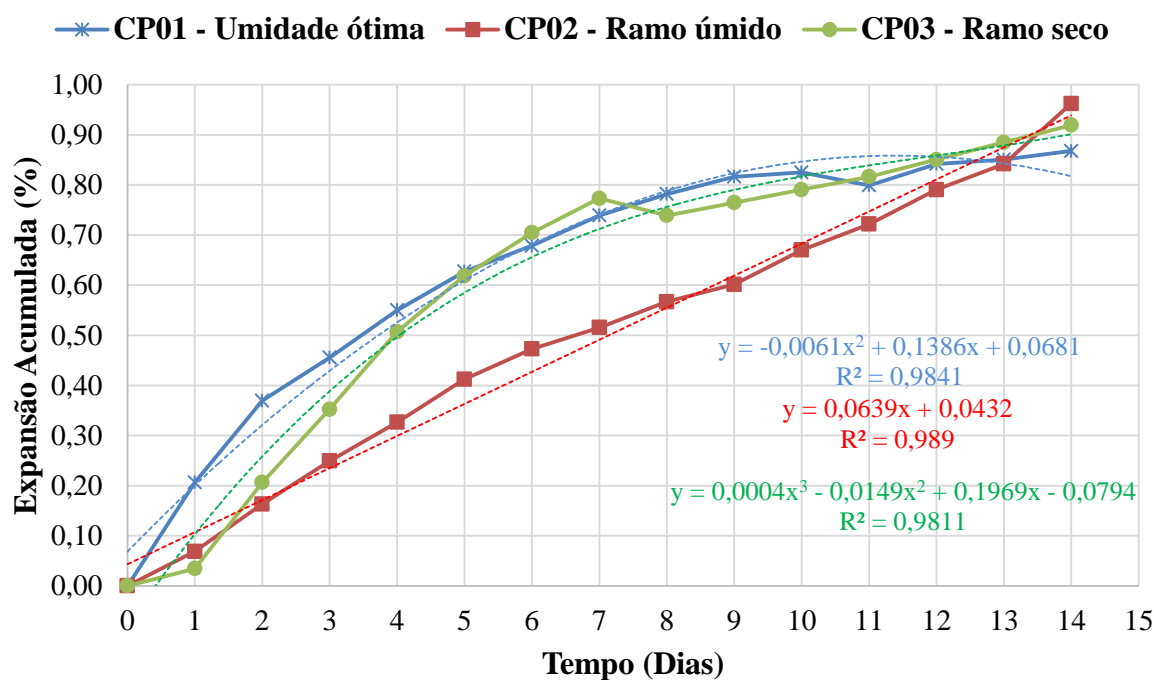


Figura 4.20 - Valores de Expansão Acumulada do Açobrita ao Longo do Tempo de Ensaio

A expansão apresentada pelo CP01, correspondente à umidade ótima se mostrou a menor dos três corpos de prova ensaiados. Sua taxa de expansão se apresenta a mais alta durante as primeiras 24 horas de ensaio, diminuindo gradativamente até o final da etapa de imersão. Na etapa de saturação, não submersa, este comportamento é continuado, podendo ser aproximado por um polinômio de ordem 2 até o 12º dia, ocasião em que a função se torna constante.

O corpo de prova compactado no ramo úmido (CP02) apresentou a maior expansão acumulada dentre as três análises. Sua taxa de expansão no início do ensaio é mais baixa, mostrando-se constante, porém, nas duas etapas do experimento.

O material compactado no ramo seco (CP03) apresenta a menor taxa de expansão durante as primeiras 24 horas do ensaio. Este valor aumenta entre o 1º e o 2º dia e se mostra constante até o 4º dia, ocasião em que esta inclinação decresce até o final da etapa de submersão. A transição entre as condições submersa e saturada não submersa resultam na contração do corpo de prova, representada na inflexão observada entre os dias 7 e 8. A partir do dia 8 a taxa de expansão se mantém constante até o final do tempo de ensaio.

Apesar de apresentarem valores próximos de expansão ao final dos 14 dias do ensaio, observam-se diferenças no comportamento apresentado pelas curvas ao longo do período analisado. Este fato pode ser explicado pelo processo de saturação que ocorre no interior de

cada corpo de prova. Uma vez que o corpo de prova 02 se encontra mais saturado, sua taxa de expansão apresenta a maior constância dentre os três CPs. Analogamente, o corpo de prova menos saturado (CP03) apresenta maior sensibilidade às condições de saturação, com variações mais pronunciadas de taxa de expansão.

Ao término do ensaio de expansão, os corpos de prova foram desmoldados e desmanchados cuidadosamente como indicado nos procedimentos do ensaio ME113 (DNIT, 2009). Verificou-se a ausência de qualquer formação cristalina na superfície dos grãos de açobrita, como mostra a Figura 4.21. A norma de ensaio não especifica outra metodologia para a realização desta verificação.



Figura 4.21 - Amostra de Açobrita Após Ensaio de Expansão

Quando comparada à metodologia de avaliação do potencial de expansão especificada pela norma ME 172 (DNIT, 2016), o método especificado na norma ME113 (DNIT, 2009) resulta em valores mais precisos quando o material analisado é destinado à execução de bases e sub-bases, uma vez que a temperatura nessas camadas pode atingir valores consideravelmente altos. Este fato torna-se claro quando são comparados os resultados de expansão acumulada final do primeiro método (0,00%) em relação ao segundo (0,92%).

Ao final destas análises, verificou-se que o açobrita cumpre com as especificações técnicas referentes à expansibilidade para a utilização do material em pavimentos rodoviários.

4.8.2 MISTURA M8020

A Tabela 4.22 apresenta os resultados obtidos a partir da metodologia ME 113 (DNIT, 2013), que baseia-se na norma PTM 130, desenvolvida pelo Departamento de Transportes da Pensilvânia:

Tabela 4.22 - Resultados Do Ensaio De Expansão Do Mistura M8020 Método ME113 (DNIT, 2009).

Corpo de Prova		1	2	3	
Teor de Umidade (%)		9,49	11,49	13,49	
		Ramo seco	Ótima	Ramo Úmido	
Dia no.	Data	Leituras extensômetros (mm)			
IMERSÃO	0	06/jun	10,29	12,21	0,05
	1	07/jun	10,31	12,29	0,08
	2	08/jun	10,32	12,49	0,11
	3	09/jun	10,32	12,57	0,19
	4	10/jun	10,34	12,67	0,24
	5	11/jun	10,40	12,75	0,27
	6	12/jun	10,55	12,84	0,29
SATURAÇÃO	7	13/jun	10,59	12,91	0,30
	8	14/jun	10,64	13,01	0,29
	9	15/jun	10,73	13,06	0,36
	10	16/jun	10,80	13,08	0,42
	11	17/jun	10,87	13,10	0,47
	12	18/jun	10,90	13,13	0,50
	13	19/jun	10,93	13,16	0,52
14	20/jun	10,95	13,18	0,53	
EXPANSÃO (%)		0,58	0,84	0,42	

Ao final dos 14 dias de duração do ensaio, obteve-se o valor máximo de 0,84% no corpo de prova compactado na umidade ótima. A média obtida a partir dos três resultados foi de 0,61%, consideravelmente aquém do limite de 3% estabelecido pela norma NBR 16364 (ABNT, 2015) e menor que a média de expansão apresentada pelo açobrita puro (0,92%). Os menores valores obtidos na mistura se devem à parcela de expansão absorvida pelos finos do solo natural. Estes resultados corroboram os estudos realizados por Silva (1991).

Na Tabela 4.23 apresentam-se os valores de expansão acumulada ao longo do tempo das duas fases do ensaio, destacando-se as leituras mais importantes. O dia 0 representa a aferição passados os primeiros 30 minutos de ensaio. O dia 1 representa a leitura após 24 horas do início do ensaio na condição submersa dos corpos de prova, à temperatura de 69°C.

O dia 7 corresponde à metade do tempo de ensaio, ocasião em que os corpos de prova são retirados da condição submersa e seu comportamento é avaliado na condição saturada, não submersa. O dia 14 representa a leitura final, com a manutenção dos corpos de prova na condição saturada, não submersa.

Tabela 4.23 - Taxa de Expansão Acumulada ao Longo do Tempo de Ensaio

Corpo de Prova		1	2	3	
Teor de Umidade (%)		9,49	11,49	13,49	
		Ramo seco	Ótima	Ramo Úmido	
Dia no.	Data	Expansão Acumulada (%)			
IMERSÃO	0	06/jun	0,00	0,00	0,00
	1	07/jun	0,02	0,07	0,02
	2	08/jun	0,03	0,24	0,05
	3	09/jun	0,03	0,31	0,12
	4	10/jun	0,04	0,40	0,17
	5	11/jun	0,10	0,47	0,19
	6	12/jun	0,23	0,55	0,21
	7	13/jun	0,26	0,61	0,22
SATURAÇÃO	8	14/jun	0,31	0,69	0,21
	9	15/jun	0,38	0,74	0,27
	10	16/jun	0,44	0,75	0,32
	11	17/jun	0,51	0,77	0,37
	12	18/jun	0,53	0,80	0,39
	13	19/jun	0,56	0,82	0,41
	14	20/jun	0,58	0,84	0,42

A Figura 4.22 apresenta os valores de expansão descritos na Tabela 4.22 em função do tempo de ensaio:

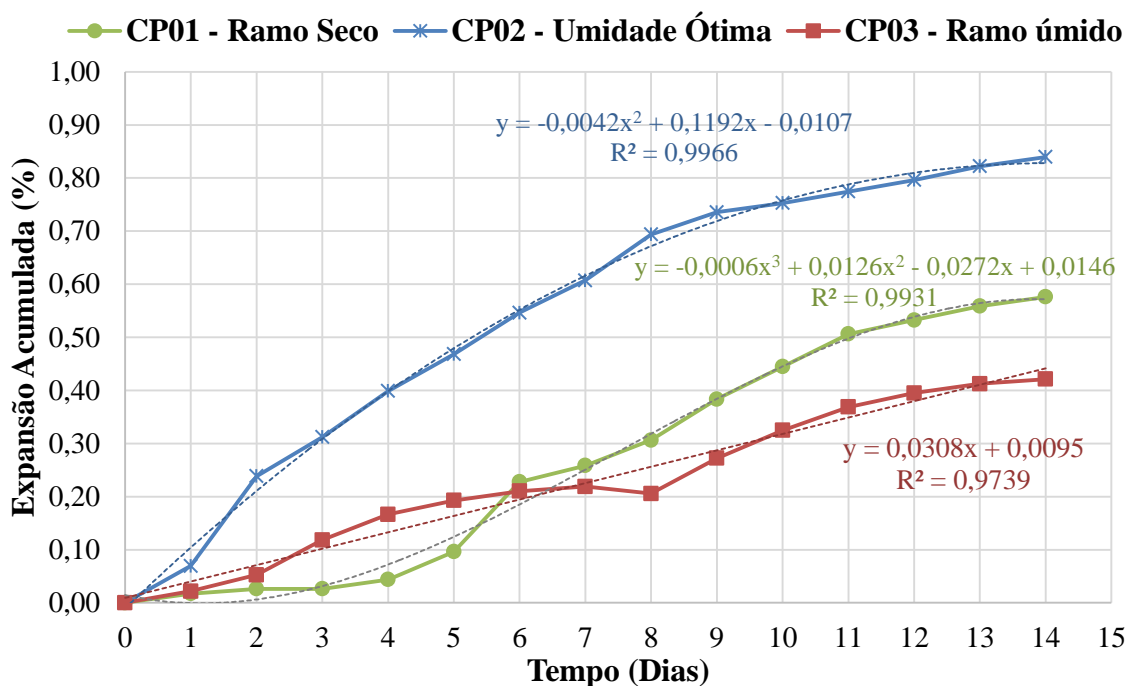


Figura 4.22 - Valores de Expansão Acumulada da Mistura M8020

A expansão apresentada pelo CP02, correspondente à umidade ótima se mostrou a maior dos três corpos de prova ensaiados. Sua taxa de expansão se apresenta a mais alta durante as primeiras 48 horas de ensaio, diminuindo gradativamente até o final da etapa de imersão. Na etapa de saturação, não submersa, este comportamento é mantido, podendo sua tendência ser descrita por um polinômio de ordem 2.

O corpo de prova compactado no ramo úmido (CP03) apresentou a menor expansão acumulada dentre as três análises. A transição entre as condições submersa e saturada não submersa resultam na contração do corpo de prova, representada na inflexão observada entre os dias 7 e 8. Similar ao comportamento da curva de expansão acumulada do açobrita, o gráfico apresenta uma tendência linear no ramo úmido.

O material compactado no ramo seco (CP01) apresenta a menor taxa de expansão durante as primeiras 48 horas do ensaio. Este valor apresenta um aumento considerável entre o 4º e o 6º dia, ocasião em que esta inclinação decresce até o final da etapa de saturação, não submersa. Novamente, o comportamento da curva de mistura no ramo seco se repete, quando comparado àquele apresentado pelo açobrita, com uma tendência caracterizada por um polinômio de 3º grau.

Nas três análises realizadas, as curvas apresentaram as mesmas tendências obtidas a partir das análises do açobrita devido ao processo de saturação que ocorre no interior de cada corpo de prova. Uma vez que o corpo de prova 03 se encontra mais saturado, sua taxa de

expansão apresenta a maior constância dentre os três CPs. Analogamente, o corpo de prova menos saturado (CP01) apresenta maior sensibilidade às condições de saturação, com variações mais pronunciadas de taxa de expansão.

Ao término do ensaio de expansão, os corpos de prova foram desmoldados e desmanchados cuidadosamente como indicado nos procedimentos do ensaio ME113 (DNIT, 2009). Verificou-se a ausência de qualquer formação cristalina na superfície dos grãos da mistura, como mostra a Figura 4.23.



Figura 4.23 – Amostra da Mistura M8020 Após Ensaio de Expansão.

Comparados os resultados das análises prescritas nas normas ME 172 (DNIT, 2016) e ME113 (DNIT, 2009), verifica-se a maior sensibilidade a variações de expansão desta (0,61%) em relação à primeira (0,38%). A temperatura, portanto, se mostra um importante fator a ser considerado durante a análise de materiais destinados à execução de bases e sub-bases.

Ao final destas análises, verificou-se que a mistura M8020 cumpre com as especificações técnicas referentes à expansibilidade para a utilização do material em pavimentos rodoviários.

5 CONCLUSÕES

Fundamentando-se nas análises dos resultados obtidos nos ensaios realizados nesta pesquisa, avaliou-se a adequação do material às condições de aplicação em estruturas de pavimentação:

5.1 ANÁLISES DO SOLO

O solo natural destinado ao subleito é altamente plástico, apresentando cerca de aproximadamente 44% de partículas de argila. Obtiveram-se limites de plasticidade e liquidez de 47% e 68%, o que corresponde a um índice de plasticidade de 21%. Suas propriedades, individualmente analisadas, portanto, seriam contrárias as recomendações da norma NBR 16364 (ABNT, 2015) inviabilizando o uso do solo puro em camadas de base e de sub-base de pavimentos. Quando analisadas as misturas, entretanto, observou-se que as características não plásticas do açobrita conduziram a um comportamento não plástico das misturas M7030, M8020 e M9010.

A curvas de compactação do solo apresentaram comportamento típico para solos coesivos em ambas as energias de compactação, com valores de peso específico aparente seco máximo de 14,00 e 15,50 kN/m³ utilizando as energias Proctor Normal e modificada, respectivamente. O Índice de Suporte Califórnia apresentado para o solo foi de 32% na energia de compactação Proctor modificada, valor elevado para materiais de subleito, possivelmente dispensando a necessidade de reforço.

A etapa de expansão correspondente ao ensaio de determinação do Índice de Suporte Califórnia resultou em valores altos (3,03%) de expansão volumétrica do solo. A análise dessa propriedade inviabilizaria o uso do solo puro em camadas de base e de sub-base de pavimentos. Quando analisadas as misturas, entretanto, observaram-se valores abaixo de 1% de expansão para todas as misturas.

5.2 ANÁLISES DO AÇOBRITA

Os processos de estabilização granulométrica e cura em relação ao potencial de expansão ao qual o agregado siderúrgico foi submetido na usina se mostraram efetivos, sendo cumpridas as especificações prescritas na norma NBR 16364 (ABNT, 2015) em todos os ensaios realizados nesta pesquisa.

Utilizando a metodologia de classificação AASHTO, classificou-se o material como A-1-a, grupo composto por materiais que se comportam como excelente agregados

granulares. A partir dos ensaios para a determinação dos Limites de Atterberg, atestou-se sua não plasticidade, propriedade de agregados necessária à sua utilização em estruturas de pavimentação rodoviária. Determinou-se o valor de perda por abrasão em 28% para a graduação A, abaixo do limite de 55% estabelecido pela NBR 16364 (ABNT, 2015) para agregados siderúrgicos utilizados em bases e sub-bases.

Obteve-se uma curva de compactação abatida com características similares às de curvas de areias limpas. Determinou-se o valor do peso específico aparente seco máximo em 23,10 kN/m³ e da umidade ótima de compactação de 8,75%, considerando a trabalhabilidade do material e os resultados obtidos a partir do ensaio de ISC. O máximo peso específico aparente seco foi superior aos valores dos agregados tradicionais (20 a 22 kN/m³), sendo a umidade ótima de compactação muito similar. O valor máximo obtido de Índice de Suporte de Califórnia foi de 183% para a amostra com 9,1% de umidade de compactação. Em geral, os valores de ISC se mostraram superiores aos dos agregados convencionais.

A etapa de expansão correspondente ao ensaio de determinação do Índice de Suporte Califórnia resultou em valores nulos para o material. Quando analisados, porém, os resultados da metodologia PTM 130 para a determinação da expansão volumétrica do agregado siderúrgico, obteve-se o valor médio de 0,92%, qualificando-o como adequado para a utilização em bases, a partir do limite de 3% da NBR 16364 (ABNT, 2015). Comparados estes resultados, verificou-se a influência da temperatura no comportamento do material quando empregado em camadas de pavimentação rodoviária.

5.3 ANÁLISES DAS MISTURAS M7030, M8020 E M9010

As três misturas compostas por açobrita e solo se mostraram adequadas à utilização em estruturas de pavimentos, sendo cumpridas as especificações prescritas na norma NBR 16364 (ABNT, 2015) em todos os ensaios realizados nesta pesquisa.

As misturas M7030, M8020 e M9010 se mostraram adequadas aos limites toleráveis das faixas granulométricas da norma NBR 16364 (ABNT, 2015). Conforme o esperado, atestou-se o aumento do peso específico real dos grãos a partir do incremento de açobrita na proporção da mistura.

A despeito da composição das misturas, que compreende teores altos de solo plástico, o comportamento não plástico do açobrita predominou sobre esta propriedade apresentada pelas misturas. As três misturas seriam, portanto, adequadas à utilização em pavimentos, considerando os Limites de Atterberg recomendados pela NBR 16364 (ABNT, 2015)

Para a definição do teor de umidade ótima e do peso específico aparente máximo nas curvas de compactação, fez-se necessária a consideração dos resultados dos ensaios de ISC e a trabalhabilidade do material. Observou-se que o aumento do teor de açobrita resulta no aumento dos valores de peso específico aparente seco máximo e na diminuição no teor de umidade ótima de compactação. 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 na mistura M9010, denotando uma maior efetividade no processo de compactação neste caso. Estes resultados podem iniciar uma discussão de natureza econômica acerca da utilização do agregado siderúrgico em diversas proporções, a depender da obra à qual o material seria destinado. Se por um lado a utilização da mistura M7030 se mostraria mais econômica, a mistura M9010, por outro lado, seria melhor indicada em projetos que requerem maior efetividade na compactação.

A expansão determinada a partir dos métodos do ensaio ISC foi baixa (máximo 0,41% para a mistura M7030), mantendo-se dentro da especificação de 1% de expansão volumétrica da norma NBR 16364 (ABNT, 2015).

O ensaio PTM 130 ao qual a mistura M8020 foi submetida conduziu a um resultado de expansão superior àquele obtido na etapa de expansão do ensaio ISC para esta mesma mistura.

Esta expansão da amostra submetida à temperatura de 69°C se mostrou consideravelmente aquém do limite estabelecido pela norma NBR 16364 (ABNT, 2015) e menor que a média de expansão apresentada pelo açobrita puro (0,92%), sendo este fenômeno explicado pela parcela de expansão absorvida pelos finos do solo natural.

Os resultados obtidos neste estudo tendem a contribuir para a elaboração e revisão de procedimentos normativos do DNIT. Atenta-se para o fato de que adicionalmente à mistura M8020, inicialmente considerada a proporção ideal, as outras duas misturas avaliadas, M7030 e M9010, apresentaram ótimo comportamento para a utilização em camadas de base.

6 BIBLIOGRAFIA

- ABM, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. (2008). *Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico*. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2000). Standard Test Method for Potencial Expansion of Aggregates from Hydration Reactions – D4792. Philadelphia.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2014). Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer. D5550.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR. 12770/92 - *Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada* - Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR. 10005/04 - *Procedimentos para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos* - Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR. 10006/04 - *Procedimentos para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos* - Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR. 11582/91 – Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier – Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR. 16364/15 – *Execução de sub-base e base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária — Procedimento* – Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR. 6459/84 - *Solo - Determinação do limite de liquidez* - Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR. 6508/84 - *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm - Determinação da massa específica* - Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR. 7180/84 - *Solos - Determinação do limite de plasticidade* - Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR. 7181/84 - *Solos - Análise Granulométrica* - Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR. 7182/86 - *Solos - Ensaio de Compactação* - Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR. 9895/87 - *Solos - Índice de Suporte Califórnia* - Rio de Janeiro, 1987.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR. NM 51 - *Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles"* - Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR. NM 53 - *Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água – Método de Ensaio* - Rio de Janeiro, 2009.
- Association, N. S. (s.d.). Acesso em 5 de Outubro de 2015, disponível em National Slag Association Web Site: <http://www.nationalslag.org/>
- BALTAZAR. (2001). *Caracterização do Fator de Expansão de Uma Escória de Aciaria em Diferentes Processos de Cura para Uso em Pavimentação*. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.
- BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M., CERATTI, J. A., & SOARES, J. B. (2006). *Pavimentação asfáltica - Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobras, ABEDA.
- BRITISH STANDARD – BS. BS EN 1744-1 – *Test for chemical properties of aggregates - Chemical analysis*. 1998.
- CASTELO BRANCO, V. T. (2004). *Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria Como Agregado*. Tese de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ.
- Centro de Gestão de Estudos Estratégicos. (s.d.).
- CGEE. (2010). *Siderurgia no Brasil 2010 - 2025; subsídios para tomada de decisão*. Brasília: Centro de Gestão de Estudos Estratégicos.
- DAYRELL, F. O. (2013). *Metodologia Geotécnica Sustentável Para Credenciamento da Escória de Aciaria Como Lastro Ferroviário*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA, Ouro Preto - MG.
- DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES DA PENSILVÂNIA - DTP. (MAIO de 1978). *Método de Ensaio para Avaliação do Potencial de Expansão de Escória de Aciaria - PTM 130*.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM-DNER. *Análise granulométrica do agregado* - DNER-ME 083/98. Rio de Janeiro, 1998.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM-DNER. *Base Estabilizada Granulometricamente* - DNER-ES 303/97. Rio de Janeiro, 1997.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM-DNER. *Desgaste do agregado por abrasão* - DNER-ME 035/98. Rio de Janeiro, 1998.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM-DNER. *Determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo* - DNER-ME 081/98. Rio de Janeiro, 1998.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM-DNER. *Emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários* – DNERPRO 263. Rio de Janeiro, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM-DNER. *Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários* – DNER-EM 262. Rio de Janeiro, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2009). DNIT 113/2009 ME, *Pavimentação rodoviária – Agregado Artificial - Avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria*
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2009). DNIT 114/2009 ES, *Pavimentação rodoviária – Sub-base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria – ACERITA® - Especificação de serviço.*
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2009). DNIT 115/2009 ES, *Pavimentação rodoviária – Base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria – ACERITA® - Especificação de serviço.*
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2010). DNIT 134/2010 ME, *Pavimentação - solos – Determinação do Módulo de Resiliência.*
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2010). DNIT 139/2010 ES, *Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço.*
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2010). DNIT 141/2010 ES, *Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço.*
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2012). DNIT 160/2012 ES, *Solos – Determinação da expansibilidade.*
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2012). *Relatório dos Levantamentos Funcionais das Rodovias Federais.* Sistema de Gerenciamento de Pavimentos.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2013). DNIT 164/2013 ES, *Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas.*
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2016). DNIT 172/2016 ME, *Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio.*
- DONIZETTI, A. (2010). *Utilização Da Escória 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, Minas Gerais.

- FERREIRA, R. M. (2007). *Dimensionamento de um Pavimento Experimental para o Tráfego de Caminhões Fora-de-Estrada em Planta de Mina*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Ouro Preto - MG.
- GEYER, R. M. (2001). *Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto*. Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande de Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre.
- GRAFFITTI. (2002). *Avaliação do teor de cal livre em escória de aciaria elétrica*. Dissertação para a Obtenção do Título de Mestre em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre.
- IABR. (2012). *Relatório de Sustentabilidade*. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil.
- IABR. (2014). *Relatório de sustentabilidade 2014*. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil.
- IABR. (2016). *Desenvolvimento da Siderurgia no Brasil*. Acesso em 05 de Maio de 2016, disponível em Instituto Aço Brasil Web Site: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/siderurgia-no-brasil--desenvolvimento.asp>
- IABR. (2016). *Números do Mercado*. Acesso em 05 de Maio de 2016, disponível em Instituto Aço Brasil Web Site: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/numeros--mercado.asp#>
- JIS A 5015 – *Iron and Steel Slag for Road Construction*. Norma Japonesa, 1992.
- JIS R 2211 – *Test method for hydration resistance of basic bricks*. Norma Japonesa, 1991.
- KUDRIN, V. A. (1984). *Metalurgia del Acero*. In: V. A. KUDRIN, *Metalurgia del Acero*. Moscou: Editorial Mir.
- LIMA, N.P., NASCIMENTO, J. F., VAL FILHO, V.P.C., ALBERNAZ, C.A.V. (2000) *Pavimentos de alto desempenho estrutural executados com escória de aciaria*. 10ª Reunião Anual de Pavimentação Urbana, Uberlândia, MG.
- MACHADO, A. T. (2000). *Estudo Comparativo dos Métodos de Ensaio para Avaliação da Expansibilidade das Escórias de Aciaria*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo.
- PARENTE, E. B., BOAVISTA, A. H., & 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*. Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia de Transportes, Fortaleza.

- PENA, D. C. (2004). *Avaliação da expansibilidade da escória de aciaria LD curada a vapor para utilização em peças de concreto para pavimentação*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES.
- POLESE, M. d. (2007). *Estudo da Expansibilidade e da Microestrutura de Escórias De Aciaria LD e EAF*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-Graduação da Engenharia Civil, Vitória - ES.
- RAPOSO, C. (2005). *Estudo experimental de compactação e expansão de uma escória de aciaria LD para uso em pavimentação*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL, Vitória - ES.
- RODRIGUES, G. L. (2007). *Caracterização e Avaliação da Expansibilidade de Escórias de Aciaria LD Não Tratadas e Tratadas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL, Vitória - ES.
- ROHDE, L. (2002). *Escória De Aciaria Elétrica Em Camadas Granulares De Pavimentos – Estudo Laboratorial*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Porto Alegre.
- SILVA, E. A. da, (1994). *Uso da Escória de Aciaria em Pavimentação Viária*”. 28º Reunião Anual de Pavimentação, Belo Horizonte, MG, Agosto.
- SILVA, P. (2001). *Estudo do Reforço de Concreto de Cimento Portland (Whitetopping) Na Pista Circular Experimental do Instituto de Pesquisas Rodoviárias*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- SOUZA. (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, Minas Gerais.
- TARAZONA, N. (2016). *Aplicabilidade agregado siderúrgico açobrita misturado com solo em camadas de pavimentos rodoviários*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF.